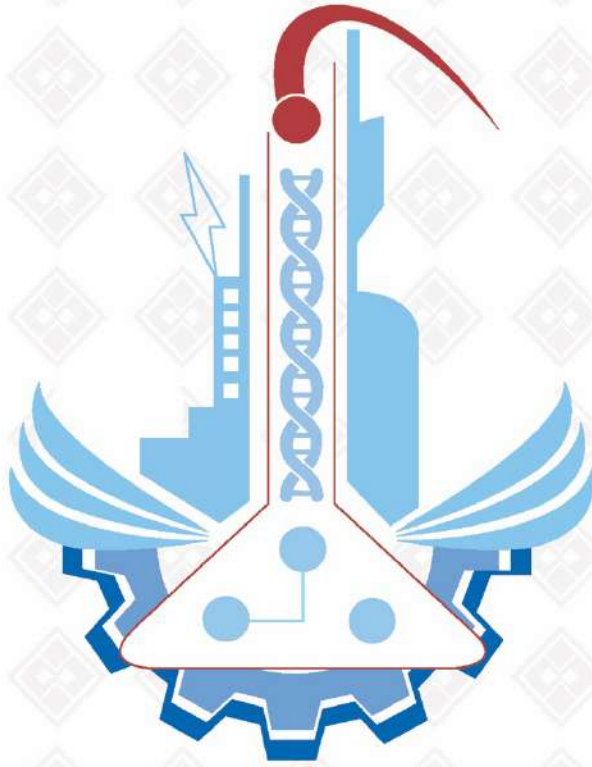


ISSN: 1308-9072

Cilt: 34 / Sayı: 1 / Yıl: 2022

# FIRAT ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ





“

**Fırat Üniversitesi**  
**Mühendislik Bilimleri Dergisi (MBD)**  
**Cilt:34, Sayı:1, Yıl: 2022**  
**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. Kürşat Esat ALYAMAÇ**  
F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**Baş Editör**

**Doç. Dr. Fatih ÖZKAYNAK**  
Fırat Üniversitesi Enstitüsü Müdür Yrd.

**Editör**

**Doç. Dr. Emrah YILMAZ**  
Fırat Üniversitesi Enstitüsü Müdür Yrd.

**DANIŞMA KURULU**

<b>Umran S. İNAN</b>	Stanford Ü. Elekt-Elktr. Müh.	<b>Cumali KINACI</b>	İ.T.Ü. Çevre Müh.
<b>Serdar SALMAN</b>	Marmara Ü. Metal. 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 EFEUGLU</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)**  
**34-1, 2022**

**İÇİNDEKİLER / CONTENTS**

1. **Türkçe Tweetler için Derin Özellik Çıkarımı Tabanlı Yeni Bir Duygu Sınıflandırma Modeli**  
*A Novel Sentiment Classification Model Based on Deep Feature Extraction for Turkish Tweets*  
**Mehmet Umut SALUR, İlhan AYDIN .....** 1-13
2. **Trafik Işıklarının Optimum Planlaması için Çizge Tabanlı Çözüm Önerisi**  
*Graph Based Solution for Optimum Planning of Traffic Lights*  
**Hilal TEKGÖZ, Neslihan KOLUKISA, Murat KARABATAK .....** 15-23
3. **JPEG Algoritmasının Performansını İyileştirmek İçin Bir Yöntem**  
*A Method to Improve the Performance of JPEG Algorithm*  
**Fırat ARTUĞER , Fatih ÖZKAYNAK .....** 25-32
4. **EMG Sinyalleri Kullanılarak GoogLeNet ve Çok Seviyeli DPD ile El Tutma Hareketlerinin Sınıflandırılması**  
*Classification of Hand Holding Gestures with GoogLeNet and Multi-Level WPT using EMG Signals*  
**Muhammed Buğracan ÖZKÜÇÜK, Ömer Faruk ALÇİN, Muhsin Tunay GENÇOĞLU...** 33-43
5. **Farklı Sönüm Tipleri Altında Tarihi Yığıma Köprülerin Sismik Tepkilerinin Değerlendirilmesi**  
*Dynamic Analysis of Historical Masonry Bridges Considering Different Damping Types*  
**Kader AKIN , Erkut SAYIN, Alper ÖZMEN.....** 45-59
6. **İçme Suyu İsale Hatlarındaki Basınç Kırıcı Yapılarda Enerji Üretiminin Yapısal Tasarımı ve Analizi: Kahramanmaraş Örneği**  
*Structural Design and Analysis of Energy Production in Pressure Breaker Structures at Drinking Water Pipelines: The Case Study over Kahramanmaraş*  
**Ahmet Fatih TAHİROĞLU , Muhammet Ömer DİŞ .....** 61-73
7. **Kronik Böbrek Hastalığının Teşhisi İçin Genetik Algoritma-Dalgacık Çekirdeği-Uç Öğrenme Makinesine Dayalı Uzman Bir Sistem**  
*An Expert System Based On Genetic Algorithm - Wavelet Kernel - Extreme Learning Machine For The Diagnosis of Chronic Kidney Disease*  
**Derya AVCI, Akif DOĞANTEKİN .....** 75-84
8. **Küresel Optimizasyon için Gauss Kaotik Haritası ile Kartal Optimizasyonu**  
*Aquila Optimization with Gaussian Chaotic Map for Global Optimization*  
**Salih Berkan AYDEMİR.....** 85-104
9. **Yüksek Dayanımlı Betonların Erken Yaş Dayanımının RSM Metodu Kullanılarak Belirlenmesi**  
*Determination of the Early Age Strength of High-Strength Concrete Using RSM Method*  
**Tuba DEMİR, Muhammed ULUCAN, Kürşat Esat ALYAMAÇ .....** 105-114
10. **Regresyon Yöntemlerine Dayalı Suç Tespit Analizi Karşılaştırması Elazığ İli Örneği**  
*Comparison of Crime Detection Analysis Based on Regression Methods The Case of Elazığ*  
**Abdulkadir BİLEN, Ahmet Bedri ÖZER .....** 115-121

<b>11. Bitkilerdeki Yaprak Hastalığı Tespiti için Derin Özellik Çıkarma ve Makine Öğrenmesi Yöntemi</b> <i>Deep Feature Extraction and Machine Learning Method for Leaf Disease Detection in Plants</i> <b>Orhan YAMAN, Türker TUNCER.....</b>	<b>123-132</b>
<b>12. EEG Analizi için CCCII+ Tabanlı Bant Geçiren Filtre Tasarımı</b> <i>CCCII+ Based Band-Pass Filter Design for EEG Analysis</i> <b>Kübra TEKİN, Hasan GÜLER.....</b>	<b>133-144</b>
<b>13. UHF Bandı Haberleşme Sistemleri İçin Çoklu Frekans Maruziyeti Etkilerinin İncelenmesi</b> <i>Investigation of Multiple Frequency Exposure Effects for UHF Band Communication Systems</i> <b>Elgin ZORLU , İzzet ALAGÖZ, Bahadır ELMAS.....</b>	<b>145-159</b>
<b>14. Farklı Su/Bağlayıcı ve Kimyasal Katkı Oranlarına Sahip Yüksek Dayanımlı Betonların İşlenebilirlik ve Dayanım Özellikleri</b> <i>Workability and Strength Properties of High Strength Concrete with Different Water/Binder and Chemical Additives Ratios</i> <b>Tuba DEMİR1, Bahar DEMİREL, Ali DEMİRBİLEK.....</b>	<b>161-170</b>
<b>15. Elektrikli Bir Formula Student Yarış Aracının Süspansiyon Sisteminin Dinamik Simülasyonu Ve Taşıyıcı Parçasının Mukavemetinin Analiz Edilmesi</b> <i>Dynamic Simulation of an Electric Formula Student Racing Vehicle Suspension System and Analyzing Strength of Upright Component</i> <b>Rıdvan ÖZGÜL, Burak TANYERİ, Zekai ÖZDEMİR.....</b>	<b>171-179</b>
<b>16. Nesne Tabanlı Ölçütlerle Yazılım Hata Kestirimi : Örnek Bir Olay İncelemesi</b> <i>Software Bug Prediction with Object-Oriented Metrics : A Case Study</i> <b>Begüm ERKAL, Tülin ERÇELEBİ AYYILDIZ.....</b>	<b>181-192</b>
<b>17. Ftalimit Sübstitüe Ag(I) NHC Komplekslerinin Sentez ve Karakterizasyonu</b> <i>Synthesis and Characterization of Phthalimide Substituted Silver(I) NHC Complexes</i> <b>Mitat AKKOÇ .....</b>	<b>193-201</b>
<b>18. Otonom Taşıyıcı Araçlardaki Hataların Teşhisi için Evrişimli Sinir Ağları Tabanlı Çoklu Heterojen Sensörlerin Füzyon Yöntemi</b> <i>Fusion Method of Multiple Heterogeneous Sensors Based on Convolutional Neural Networks for Fault Diagnosis in Autonomous Transport Vehicles</i> <b>Sergen AŞIK, Emine DENİZ, Eyüp ÇİNAR.....</b>	<b>203-213</b>
<b>19. Evrişimsel Sinir Ağı Temelli Yüz Tanıma Yöntemleri ile Robot Resim Oluşturma Uygulaması</b> <i>Create a Sketch Application with Convolutional Neural Network Based Face Recognition Methods</i> <b>Faruk AYATA, Hayati ÇAVUŞ.....</b>	<b>215-228</b>

<b>20. Sol-Jel Yöntemi ile Sentezlenen La katkılı CdO Nanoparçacıkların, Yapısal Karakterizasyonu ve Dielektriksel Özelliklerinin Belirlenmesi</b> <i>Structural Characterization and Determination of Dielectrical Properties of La-doped CdO Nanoparticles Synthesized by Sol-Gel Method</i> <b>Ezgi GÜRGENÇ, Aydın DİKİCİ, Fatih BİRYAN, Fehmi ASLAN ve Kenan KORAN.....</b>	<b>229-237</b>
<b>21. Uzunköy (Zile Batısı, Tokat) Çevresinin Tektonik</b> <i>Tectonics Features of Uzunköy (West of Zile, Tokat, N. Turkey) and its Surroundings</i> <b>Ayhan ÜSTÜNDAŞ, Murat İNCEÖZ .....</b>	<b>239-247</b>
<b>22. Atık Sulardan Cd(II) İyonlarının Adsorpsiyonu için Doğal Adsorban Olarak Kızılçam (Pinus Brutia Ten.) Talaşının Performansının Değerlendirilmesi</b> <i>Evaluation of the Performance of Red Pine Sawdust (Pinus Brutia Ten.) as a Natural Adsorbent for Adsorption of Cd(II) Ions from Wastewater</i> <b>Erdem TORUN, Celal DURAN, Duygu ÖZDEŞ .....</b>	<b>249-259</b>
<b>23. Entegre Dirençlerin Çift ve Tek Dereceli Bozulma Analizi</b> <i>Even and Odd Order Distortion Analysis of Integrated Resistors</i> <b>Ertan ZENCİR .....</b>	<b>261-266</b>
<b>24. Stockwell Dönüşümü, ONE-R Özellik Seçme Yöntemi ve Rastgele Orman Algoritması ile Güç Kalitesi Bozulumu Sinyallerinin Sınıflandırılması</b> <i>Classification of Power Quality Disturbance Signals with Stockwell Transform, ONE-R Feature Selection Method and Random Forest Algorithm</i> <b>Düzgün AKMAZ .....</b>	<b>267-276</b>
<b>25. Sürdürülebilir Biyoenerji Üretimi İçin Mikroalg Tabanlı Mikrobiyal Yakıt Hücreleri</b> <i>Microalgae-based Microbial Fuel Cells For Sustainable Bioenergy Production</i> <b>Ahmet SAATÇI, Banu TAŞKAN, Ergin TAŞKAN .....</b>	<b>277-288</b>
<b>26. AZ91 Magnezyum Alaşımının PEO ve PVD Dublex Kaplama Yöntemleriyle CrN/NbN Kaplanarak Korozyon Özelliklerinin İyileştirilmesi</b> <i>Improving the Corrosion Properties of AZ91 Magnesium Alloy by Coating CrN/NbN with PEO and PVD Duplex Coating Methods.</i> <b>Oktay YİĞİT, Taha Çağrı ŞENOCAK .....</b>	<b>289-299</b>
<b>27. Reaktivite Kontrollü Sıkıştırma Ateşlemeli Bir Motorda Motor Devrinin Yanma ve Emisyon Karakteristikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması</b> <i>Investigation of the Effect of Engine Speed on Combustion and Emission Characteristics in a Reactivity-Controlled Compression Ignition Engine</i> <b>Mutlu OKCU, Müjdat FIRAT, Yasin VAROL, Şehmus ALTUN, Okan ÇELİK .....</b>	<b>301-311</b>
<b>28. Kırkgeçit Formasyonu'nun Bartoniye-Priyaboniyen İri Bentik Foraminifer Topluluğu ve Ortamsal Yorumu, Elazığ, Türkiye</b> <i>Bartonian-Priabonian Larger Benthic Foraminifera Assemblages and Environmental Interpretation of Kırkgeçit Formation, Elazığ, Turkey</i> <b>Sibel KAYÇILI.....</b>	<b>313-339</b>
<b>29. Arşimet Optimizasyon Algoritması ile Trafo Tabanlı Evrişimsel Sinir Ağı Modelini Kullanarak Yazılım Tanımlı Ağ Teknolojisi Verilerinde Saldırı Tespiti</b> <i>Attack Detection in Software-Defined Network Technology Data Using A Transformer-Based Convolutional Neural Network Model with An Archimedean Optimization Algorithm</i> <b>Mesut TOĞAÇAR.....</b>	<b>341-349</b>
<b>30. Sürü İnsansız Hava Araçlarının Görev Paylaşımı için Genetik Algoritma Tabanlı Bir Yaklaşım</b> <i>A Genetic Algorithm-Based Approach for Mission Sharing of Unmanned Aerial Vehicles Swarm</i> <b>Ebru KARAKÖSE.....</b>	<b>351-360</b>

<b>31. Nehir Tipi Hidroelektrik Santrallerinde Rampa Olayları: Türkiye Örneği</b> <i>Ramp Events in River Type Hydroelectric Power Plants: The Case of Turkey</i> İsrafil Karadöl, Mustafa Şekkeli.....	361-375
<b>32. Bağdere Tufası'nın Jeolojik, Jeokimyasal ve Jeokronolojik Özellikleri (Elazığ, D Türkiye)</b> <i>Geological, Geochemical and Geochronological Characteristics of the Bağdere Tufa (Elazığ, E. Turkey)</i> Serap ÇOLAK EROL, Ercan AKSOY, Mehmet ÖZKUL .....	377-388
<b>33. İki Düzeyli Özbek Morfolojisi</b> <i>Two Level Uzbek Morphology</i> Ahmet Eralp KÜÇÜK, Atakan KURT .....	389-397
<b>34. Derin Öğrenme Tabanlı Otomatik Beyin Tümör Tespiti</b> <i>Deep Learning-Based Automatic Detection</i> Muzaffer ASLAN .....	399-407
<b>35. Mask R-CNN Algoritmasını Kullanarak Demiryolu Travers Eksikliklerinin Tespiti İçin Otonom İHA Tasarımı</b> <i>Autonomous UAV Design for Detection of Railway Sleeper Deficiencies Using Mask R-CNN</i> Emre GÜÇLÜ, İlhan AYDIN, Erhan AKIN.....	409-420
<b>36. İçmesuyu Dağıtım Sistemlerinde Şebeke Yenileme için Ekonomik Analiz Hesaplama Modelinin Geliştirilmesi</b> <i>Development of Economic Analysis Calculation Model for Network Renewal in Water Distribution Systems</i> Salih YILMAZ, Mahmut FIRAT .....	421-432
<b>37. Mobil Robotlar için Yük Altındaki Davranış Analizinin İncelenmesi</b> <i>Examination of Behavior Analysis Under Load for Mobile Robots</i> Halil İbrahim YAMAÇ, Taner YILMAZ.....	433-438
<b>38. Derin Öğrenme Modellerinde Komşuluk Bileşen Analizi Yöntemi Kullanarak Çiçek Görüntülerinin Sınıflandırılması</b> <i>Classification of Flower Images using Neighborhood Component Analysis Method in Deep Learning Models</i> Harun BİNGÖL .....	439-447
<b>39. MFCC Yöntemi ve Önerilen Derin Model ile Çevresel Seslerin Otomatik Olarak Sınıflandırılması</b> <i>Automatic Classification of Environmental Sounds with the MFCC Method and the Proposed Deep Model</i> Muhammed YILDIRIM.....	449-457
<b>40. Derin Öğrenme Temelli Robotik Maske Kontrol Sistemi</b> <i>Deep Learning Based Robotic Mask Control System</i> Mustafa GÖKSU, Ahmet ALKAN .....	459-471
<b>41. Diyabet Hastalıkları İçin GA-DÇF-UÖM Tabanlı Uzman Tanı Sistemi</b> <i>GA-WKF-ELM Based Expert Diagnosis System for Diabetes Diseases</i> Akif DOĞANTEKİN, Cafer BAL.....	473-484



## Türkçe Tweetler için Derin Özellik Çıkarımı Tabanlı Yeni Bir Duygu Sınıflandırma Modeli

Mehmet Umut SALUR<sup>1\*</sup>, İlhan AYDIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bilgisayar Teknolojisi Bölümü, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Gaziantep İslam Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Gaziantep, Türkiye

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

\*<sup>1</sup> mehmetumut.salur@gibtu.edu.tr, <sup>2</sup> iaydin@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 17/06/2020;

Kabul/Accepted: 10/10/2021)

**Öz:** Sosyal medya uygulamalarının yaygın kullanımı insanların her dakika yeni veri üretmelerine neden olmuştur. Ses ve resim veri türlerine göre metin tabanlı verilerin boyutu daha hızlı artmaktadır. Metin tabanlı veriler, anlamlı kelimeler haricinde birçok içerik barındırabilmektedir. Metin işleme çalışmaları için bu içerikler gürültü olarak isimlendirilir ve metin ön işleme aşamasında bu içerikler veri kümelerinden çıkartılmaktadır. Özellikle Twitter veri kümeleri üzerinde yapılan duygu sınıflandırma çalışmalarında, veri kümeleri metin temsilleri oluşturulmadan önce yapılan ön işleme aşamasında URL, noktalama işareti ve emoji gibi içeriklerden arındırılmaktadır. Ancak Twitter için gürültü olarak nitelendirilen içerikler aslında bir bakıma kullanıcının duygu ve düşüncelerinin bir parçası niteliğindedir. Bu çalışmada, veri setinden çıkarılan gürültü verilerinden özellik çıkarımına odaklanılmıştır. Önerilen yöntem, gürültü olarak silinen içeriklerden manuel olarak çıkarılan özelliklerin ve derin öğrenme yöntemlerinden elde edilen derin özelliklerin birleştirilmesine dayanmaktadır. Önerilen model literatürde çalışılan Türkçe Twitter veri kümesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerle önerilen modelin sınıflandırma performansının önceki çalışmalardan daha iyi olduğu gösterilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Duygu Sınıflandırma, Özellik Çıkarımı, Derin Öğrenme, Twitter, Uzun Kısa Süreli Bellek.

### A Novel Sentiment Classification Model Based on Deep Feature Extraction for Turkish Tweets

**Abstract:** The widespread use of social media applications has caused people to generate new data every minute. The size of text-based data is increasing faster than audio and picture data types. Text-based data can contain many content other than meaningful words. In the text processing studies, these contents are named as noise and these contents are removed from data sets in the pre-processing phase. Especially in sentiment classification studies on Twitter data sets, data sets are purified from contents such as URLs, punctuations, and emojis at pre-processing phase before word embeddings are created. However, the content called noise in Twitter, might actually be the part of a user's sentiment or thought. In this study, we focused on feature extraction from the noise data that is removed from the dataset. The proposed method is based on the fusion of features extracted manually from contents deleted as noise and deep features obtained from deep learning methods. The proposed model was implemented on the Turkish Twitter dataset studied in the literature. It has been shown with the experiments that the classification performance of the proposed model is better than previous studies.

**Key words:** Sentiment Classification, Feature Extraction, Deep Learning, Twitter, Long Short Term Memory.

#### 1. Giriş

Günümüzde bilgi alışverişinin büyük bir kısmı Twitter, Facebook ve Instagram gibi sosyal medya uygulamaları üzerinden yapılmaktadır. Bu platformlardan Twitter aracılığıyla paylaşılan tweet'ler temelde bir ürün, etkinlik veya bir konuyla ilgili kamuoyunun görüşlerinden oluşmaktadır. Sosyal medya kullanıcıları tarafından paylaşılan bu içerikler büyük miktarda yapılandırılmamış veri içermektedir. Bu işlenmemiş veriler kar amacı güden şirketler, kurumlar ve kuruluşlardan kamuoyuna kadar geniş bir kitle için yüksek bir bilgi potansiyeline sahip olduğundan, keşfedilmesi gereken bir maden niteliğindedir. Bu verilerin işlenmesi ve bu verilerden anlamlı bilgilerin oluşturulması sağlık, pazarlama, ticaret, güvenlik, müşteri memnuniyeti gibi birçok alan için fırsat niteliği taşımaktadır. Paylaşılan her içerik kullanıcının bir konu, ürün, hizmet veya olay hakkındaki duygu, düşünce ve tutumunu temsil etmektedir. Duygu analizi, insanların yazdıkları metinlerden bu duygu, düşünce ve tutumlarını ortaya çıkarmayı hedeflemektedir [1]. Duygu sınıflandırma ise olumlu, olumsuz veya belirsiz gibi önceden belirlenen duygu kategorilerine göre metin verilerinin sınıflandırması alt işlemlerinden oluşmaktadır [2]. Twitter, 2020 yılı itibariyle 340 milyon aktif kullanıcıya sahip bir mikro blog sitesidir<sup>1</sup>.

\* Sorumlu yazar: [mehmetumut.salur@gibtu.edu.tr](mailto:mehmetumut.salur@gibtu.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup>0000-0003-0296-6266, <sup>2</sup>0000-0001-6880-4935

<sup>1</sup> <https://medyaakademi.com.tr/2020/02/03/2020-sosyal-medya-kullanici-sayilari/>



Tweet'lerden oluşan veri kümeleri üzerinde duygu analizi yapmak diğer veri kümelerine göre daha zordur [3]. Twitter'in karakter sınırlamasından dolayı metin içerikleri sıkıştırılmış anlama sahiptir. Tweet'ler karakter kısıtlamasından dolayı emoji ve özel kullanımlar içermektedir.

Duygu sınıflandırma için günümüzde makine öğrenmesi (MÖ) ve sözlük tabanlı yaklaşımlara göre derin öğrenme (DÖ) tabanlı yöntemler daha iyi sınıflandırma başarımları sağlamaktadır. MÖ temelli yaklaşımlarda metin veri kümelerinden kelime çantası (Bag of Words) (BoW) [4], TF-IDF (Term Frequency - Inverse Document Frequency) [5], sözcük etiketleme (Part of Speech) (PoS) [6] ve n-gram [7] gibi öznelik çıkarma yöntemleri sıklıkla tercih edilmektedir. Zhao ve Cao [3], önerdikleri MÖ tabanlı modelde n-gram, anlamsal ve polarite skoru özellikleri birleştirerek daha iyi sınıflandırma başarımları elde etmişlerdir. Çoban ve diğerleri [8], Türkçe tweet'lerden kelime çantası ve n-gram özellikleri çıkarıp, MÖ yöntemleriyle olumlu veya olumsuz olarak sınıflandırmışlardır. Siddiqua ve diğerleri [9], kural tabanlı bir sınıflandırıcıyı, denetimli sınıflandırıcıların çoğunluğuna dayalı bir oylama topluluğu ile birleştirmişlerdir. Chamansingh ve Hosein [10], her tweet için bir kelime skoru elde etmiş ve cümlenin skoruna göre tweet'leri duygu bakımından sınıflandırmışlardır. Jianqiang ve Xiaolin [11], altı farklı Twitter veri kümesi üzerinde, veri önışlemlerin sınıflandırma başarımına olan etkisini incelemişlerdir. Her veri seti için n-gram ve sözlük tabanlı özellikler elde etmiş ve MÖ yöntemleriyle sınıflandırmışlardır. Riyadh ve diğerleri [12], önışlemden geçirilen Twitter veri kümesinden unigram ve unigram ile sözcük etiketleme özelliklerini çıkarmışlardır. Özellikler Multinomial Naive Bayes (MNB) algoritmasıyla beş farklı sınıf (mutlu, üzgün, nefret, şaşırılmış ve belirsiz) doğrultusunda sınıflandırılmıştır. Tsapatsoulis ve Djouvas [13], Twitter paylaşımlarından manuel özellik çıkarmanın, klasik metin özellik çıkarma yöntemlerine göre performansını analiz etmişlerdir. Manuel özellik çıkarımının n-gram modellerine göre daha iyi sınıflandırma sağladığı görülmüştür. Kaur ve diğerleri [14], tweet'lerden n-gram yöntemiyle özellik çıkarımı yapmış ve tweet'leri K-En Yakın Komşu algoritmasıyla pozitif, negatif veya belirsiz olarak sınıflandırmışlardır. Permatasari ve diğerleri [15], Twitter'a özgü özellikler, sözdizimsel özellikler, PoS özellikleri, sözlük tabanlı özellikler ve BoW özelliklerini birleştirerek tweet'leri duygu bakımından sınıflandırmışlardır. Sadece BoW özellikleri kullanıldığında ise toplu özelliklere göre daha iyi başarımlar elde etmişlerdir. Aydın ve diğerleri [16], tweet'lere önışlem uyguladıktan sonra öznelik mühendisliği yaparak 10 adet özellik çıkarmışlardır. Elde edilen özellikler çoklu popülasyon tabanlı parçacık sürü optimizasyon yöntemiyle duygu bakımından sınıflandırılmıştır. Salur ve diğerleri [17], Türkiye'deki turizm merkezleri hakkında yapılan Twitter paylaşımlarından elle özellik çıkarımı yapmış olup, duygu bakımından sınıflandırıldıktan sonra her turizm merkezi hakkında oluşturulan duygu sonuçları mobil uygulama yardımıyla kullanıcılara sunulmuşlardır. Ahuja ve diğerleri [18], TF-IDF ve n-gram özellik çıkarma yöntemlerinin Twitter veri kümeleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yapılan sınıflandırmada TF-IDF yöntemiyle elde edilen özelliklerin n-gram özelliklerine göre daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Saad ve Yang [19], TF-IDF özellikleri üzerine bir dengeleme ve puanlama modeli oluşturularak, MÖ yöntemleriyle tweet'leri sınıflandırmışlardır. Karçioğlu ve Aydın [20], İngilizce ve Türkçe Twitter veri kümelerinden BoW ve Word2Vec yöntemleriyle çıkartılan özellikleri kullanarak tweet'leri MÖ yöntemleriyle sınıflandırmışlar. Çalışmalarında kelime köklerinin alınmasının duygu sınıflandırma başarımları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak kök alma işlemi, hem Türkçe hem de İngilizce veri kümeleri için önerilmemiştir.

Günümüzde duygu analizi çalışmalarında MÖ yöntemlerine göre DÖ yöntemleri daha çok ilgi görmeye başlamıştır. DÖ tabanlı yaklaşımlarda metin formatındaki veriler Word2Vec [21], Glove [22], FastText [23] gibi yöntemlerle anlamsal ilişkiler barındıran sayısal vektörlerle temsil edildikten sonra DÖ algoritmalarına giriş olarak verilmektedir. DÖ yöntemleri olan Evrişimsel Sinir Ağı (Convolutional Neural Network) (CNN) ve Yinelemeli Sinir Ağı (Recurrent Neural Network) (RNN) algoritmalarının klasik MÖ algoritmalarına göre temel farklılıklarından biri, metin temsil yöntemleriyle elde edilen temsiller üzerinden özellik çıkarımlarını içsel yapılarıyla otomatikman yapmalarıdır. Salur ve Aydın [24], İngilizce Twitter paylaşımlarını hem MÖ yöntemleriyle hem de CNN yöntemiyle olumlu veya olumsuz olarak sınıflandırmışlardır. Çalışmanın sonucunda CNN'nin daha iyi başarımlar sağladığı görülmüştür. Meng ve diğerleri [25], LSTM (Long Short Term Memory) ve CNN yöntemlerinin birlikte kullanımına dayanan yeni bir dikkat mekanizması yardımıyla duygu analizi gerçekleştirmişlerdir. Kamiş ve Goularas [26], CNN ve LSTM ağlarına dayanan farklı DÖ yöntemleri kombinasyonlarını Twitter verileri üzerinde test etmişlerdir. Yapılan deneylerin sonucunda CNN ve LSTM ağlarının birlikte kullanımının tek başına kullanımlarına göre daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Salur ve Aydın [27], Türkçe Twitter verilerinin sayısal formata dönüştürülmesinde, iki farklı veri temsil yöntemi (FastText ve karakter temsilleri) ile iki farklı DÖ yönteminin (BiLSTM ve CNN) birlikte kullanımının sınıflandırma başarımlarını attırdığını göstermişlerdir. Muslim ve diğerleri [28], Twitter paylaşımlarını duygu bakımından hem LSTM hem de Çok Terimli Lojistik Regresyon (Multinomial Logistic Regression) yöntemiyle sınıflandırmıştır. LSTM'in daha iyi sınıflandırma performansı sağladığı görülmüştür. Kaladevi ve Thyagarajah'in önerdikleri CNN-LSTM tabanlı DÖ modeli [29], sıralı bir yapıda işlenen tek bir CNN katmanı ile iki LSTM

katmanından oluşmaktadır. CNN katmanından elde edilen öznitelikler LSTM ağına giriş olarak verilmiştir. Önerilen model klasik özellik çıkarma yöntemlerine göre daha iyi performans göstermiştir. Karakuş ve diğerleri, Türkçe film yorumlarının duygu bakımından sınıflandırılmasında DÖ yöntemlerinin (LSTM, BiLSTM ve CNN) performanslarını karşılaştırmışlardır [30]. Film yorumlarının sınıflandırılmasında en yüksek başarıyı CNN ve LSTM'i birlikte kullanan modelle elde etmişlerdir. Santur, duygu sınıflandırmada dengesiz veri kümelerinin sınıflandırma performansı üzerindeki olumsuz etkisini azaltmak için pozitif sınıfına ait örneklerde en sık geçen 20 kelimeyi çıkartma ilkesine dayanan DÖ modeli önermiştir [31]. Bu model Türkçe pozitif ve negatif kullanıcı yorumlarından oluşan dengesiz bir veri kümesi üzerinde uygulanmış ve sınıflandırma doğruluk değeri artırılmıştır.

Literatürdeki DÖ ve MÖ çalışmaları göz önüne alındığında; veri ön işleme aşamasında tweet'lerin içerisindeki bazı içerikler (URL, retweet, hashtag, rakamlar, noktalama işaretleri vb.) silinmektedir. DÖ modellerine giriş olarak verilen kelime temsil vektörlerinin (Word2Vec, FastText veya Glove ile elde edilen vektörler) oluşturulması aşamasından önce ön işleme aşamasında bahsedilen gürültülü içerikler temizlenmektedir. Diğer taraftan bu içerikler de aslında kullanıcının paylaşımının birer parçası olması gereği, bir noktada kullanıcının duygusuna katkı sağlaması beklenmektedir. Örneğin; sosyal medya uygulamalarında kullanıcılar yaptıkları bir paylaşımında vurgulamak istedikleri kelimeleri genellikle büyük harfle yazmaktadırlar. Metin ön işleme aşamasında genellikle tüm karakterler küçük harflere dönüştürüldüğünden bu anlamsal içerik kaybedilmektedir. Bu çalışmada bu anlamsal içeriğin de tweet'lerin duygusuna katkı sağlayacağı düşünüldüğünden önerilen modelle bu durumun etkisinin ortadan kaldırılması hedeflenmiştir. Önerilen modelde, DÖ için kelime temsilleri elde edildikten sonra, veri kümesinden özellik mühendisliği yardımıyla özellikler çıkartılmıştır. DÖ ile elde edilen özellikler ile elde edilen özelliklerin birleştirilmesiyle daha iyi sınıflandırma başarıyı elde edilmiştir. Bu çalışmanın katkıları aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Veri ön işleme aşamasında silinen gürültülü verilerden öznitelikler çıkarılarak gürültülü verilerin duygu analizi açısından sınıflandırma performansına katkıda bulunmasını sağlamıştır.
- Türkçe Twitter veri kümeleri için yeni bir sınıflandırma yaklaşımı sunulmuştur.
- Türkçe tweet'lerden manuel olarak çıkarılabilen özellik kümeleri sunulmuştur.
- Önerilen modelin performansını doğrulamak için birçok deney yapılmış ve sonuçlar literatürdeki yöntemlerle karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmanın ikinci bölümünde kullanılan yöntemlere dair temel bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde yapılan çalışmanın metodolojisi sunulmuştur. Dördüncü bölümde ise önerilen modelin performansını gösteren deneysel çalışmalar ve sonuçları paylaşılmıştır. Çalışmanın son bölümünde ise çalışmada elde edilen sonuçlar özet olarak verilmiştir.

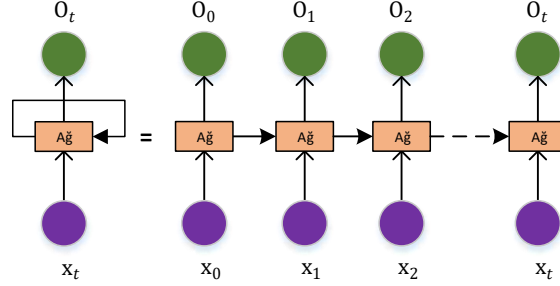
## 2. Temel Bilgiler

### 2.1. Yinelemeli sinir ağları

Yinelemeli sinir ağları klasik ileri beslemeli yapay sinir ağlarına göre dinamik bir yapıya sahiptirler. Bu ağlar sınıflandırmanın her bir adımında içsel bir durum bilgisi taşırlar. Bu ağdaki durum bilgisi, yüksek ve alt katman düğümler arasındaki dairesel bağlantılar ve kendi kendine geribildirim bağlantılar sayesinde oluşmaktadır. Bu bağlantılar, verinin önceki işlem adımından geçerli işlem adımlarına yayılmasını sağlamaktadır. Bunun sonucunda ise RNN'ler zaman serisi olaylarının bir hafızasını oluşturmaktadır [32]. Yani RNN için, herhangi bir düğümdeki  $(t + 1)$  anındaki çıkış değeri,  $t$  anındaki giriş değerinden doğrudan etkilenmektedir. RNN'nin zaman eksenini boyunca açılmış hali Şekil 1'de verilmiştir. RNN'ler zaman serileri verileri ve ardışıl veri tiplerinde etkili sınıflandırma performansı gösterdiğinden doğal dil işleme problemlerinde sıklıkla tercih edilmektedir [33].

RNN'lerdeki gradyan yok olma (vanishing gradient problem) veya gradyan uçması (exploding gradient problem) problemleri için farklı ağ tipleri geliştirilmiştir. Bu ağ tiplerinin başında ve en çok tercih edilenler arasında Uzun Kısa Süreli Bellek (Long Short Term Memory) (LSTM) ve Kapılı Yinelemeli Hücre (Gated Recurrent Unit) (GRU) gelmektedir. LSTM giriş olarak verilen veriyi baştan sona olacak şekilde ağ üzerinde geçirmektedir. Bu şekilde zaman eksenini boyunca tek yönlü ilişkiler ve bağılıklar ortaya çıkarılmaktadır. Metin türündeki veriler için bu ilişkiler her zaman tek yönlü değildir. Bunun için de çift yönlü LSTM (BiLSTM) ağ tipi geliştirilmiştir. BiLSTM hem baştan sona, hem de sondan başa kelimeler arasındaki ilişkileri ortaya çıkarmaktadır. GRU ise, LSTM'in yapısındaki bir kapının kaldırılması sonucu oluşan ağ tipidir. LSTM mimarisinde giriş (input), çıkış (output) ve unutma (forget) kapıları varken GRU mimarisinde sıfırlama (reset) ve güncelleme (update) kapıları bulunmaktadır. Zaman serisi boyunca birbiriyle ilişkili veri kümelerinde gösterdiği yüksek

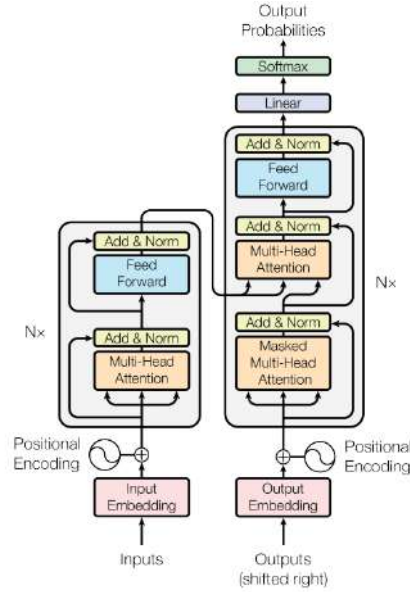
performanslarından dolayı bu çalışma kapsamında da tweet'lerin sınıflandırılmasında DÖ yöntemlerinden LSTM, BiLSTM ve GRU ağları tercih edilmiştir [34].



Şekil 1. RNN'nin zaman ekseninde açılmış halinin temsili görüntüsü.

## 2.1. BERT dil modeli

Günümüzde birçok dil modeli kodlayıcı (encoder) - kod çözücü (decoder) mimarisi üzerine inşa edilmiştir. Kodlayıcı giriş olarak sembollerden oluşan (örneğin bir ziyaretçi yorumu) girdiyi, çıktı olarak başka bir girdiye eşlemektedir. Kod çözücü ise kodlayıcıdan aldığı semboller dizisi için her seferinde bir elemanı olan bir dizi üretmektedir. Kodlayıcı-kod çözücü mimarisi diller arasında çeviri, metinlerin sınıflandırılması ve duygu analizinde sıklıkla kullanılmaktadır. RNN modelleri kodlayıcı-kod çözücü mimarisini kullanmaktadır. RNN modelleri uzun bir cümlenin kelimeleri arasındaki ilişkiyi korumada yetersiz kalırken, dikkat mekanizmaları (attention mechanism) bu problemi büyük oranda ortadan kaldırmaktadır. Dikkat mekanizması kodlayıcıdaki bütün bilgiyi sabit uzunlukta bir vektörler temsil ettiğinden kelimeler arasındaki anlamsal ilişkinin korunmasını sağlamaktadır. Dikkat mekanizmasından sonra ortaya çıkan Transformer mimarisi ise dikkat mekanizmasının yanı sıra paralel hesaplama yapma yeteneği ve çok başlı dikkat mekanizması (Multi-Headed Attention) yapısıyla metin sınıflandırmada büyük performans göstermiştir [35]. Transformer mimarisi şema görünümü Şekil 2'de verilmiştir. Transformer modelinde birden fazla kodlayıcı ve kod çözücünün ardışık olarak konumlandırılmıştır. Bu mimarideki çok başlı dikkat mekanizması bir kelimenin metin içerisinde farklı yerlerdeki anlamlarına farklı bakış açılarıyla bakılmasını sağlamaktadır. BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) modeli ise veriyi iki yönlü işleyen bir transformer modelidir. 2018 yılında Google tarafından büyük bir işlem gücüyle ve veri kümesiyle eğitilmiştir [36].



Şekil 2. Transformer ağ mimarisi [35].

### 3. Metodoloji

Bu bölümde çalışmada kullanılan veri kümesi, veri kümesi üzerinde gerçekleştirilen önışlemler, veri kümesinin sayısal vektörlerle temsil edilmesi için kullanılan veri temsil yöntemi ile yapılan özellik mühendisliğinden bahsedilmektedir. Bu bölümün son kısmında ise bu çalışmada sunulan yeni duygu sınıflandırma modelinin yapısı ve çalışma yöntemi anlatılmıştır.

#### 3.1. Veri kümesi

Bu çalışmada kullanılan veri kümesi Twitter ortamında paylaşılan genel kullanıcı içeriklerinden oluşmaktadır. Bu veri kümesi, Çoban ve diğerleri [8] tarafından tweet'in içerdiği emojilere göre pozitif veya negatif olarak etiketlenmiştir. Veri kümesi 6.887 adet pozitif ve 7.890 adet negatif olmak üzere toplamda 14.777 adet tweet'ten oluşmaktadır. Veri kümesi sınıfsal dağılım açısından eşit sayıda örnek içermemektedir.

#### 3.2. Veri önışleme

İnternet ortamında oluşturulan metin tabanlı içerikler her zaman yazım dilinin kurallarına riayet edilerek yazılmamaktadır. Kullanıcının kişisel deneyimi doğrultusunda metin içerisinde anlamlı veya anlamsız birçok içerik olabilmektedir. Twitter tabanlı duygu sınıflandırma çalışmaları için bu içerikler, URL bilgisi, hashtag bilgisi, rakam bilgisi, kelimeler arası boşluk, noktalama işaretleri vb. kullanımlar olarak sıralanabilir. Twitter veri kümeleri için bu içeriklerin temizlenmesinin sınıflandırma başarımını arttırdığı görülmüştür [37]. Ayrıca DÖ modelleri içinde de temel önışlemlerin sınıflandırma başarımını arttırdığı belirtilmiştir [38]. Bu doğrultuda veri kümesi DÖ algoritmalarına giriş olarak verilmeden önce bir dizi önışlemden geçirilmiştir. Veri kümesinin önışlem adımlarından önceki ve sonraki kelime bulutları Şekil 3'te verilmiştir.



**Şekil 3.** Veri kümesinin kelime bulutu gösterimi: **a-)** Veri kümesinin önışlem öncesi kelime bulutu gösterimi **b-)** Veri kümesinin önışlem sonrası kelime bulutu gösterimi.

Veri kümesi üzerinde önışlemler gerçekleştirilmedeki amaç, veri kümesinden daha anlamlı kelime temsil vektörleri elde etmektir. Ayrıca Türkçe tweet'lerin sınıflandırılmasında kelime gövdeleme işleminin sınıflandırma performansını arttırmadığı tespit edildiğinden [20], bu çalışmada da kelimelerde gövdeleme işlemi yapılmamıştır. Bu çalışma kapsamında DÖ yöntemlerine giriş olarak verilecek vektörlerin elde edilmesinden önce veri kümesi üzerinde gerçekleştirilen önışlemler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- **URL Bilgisi Silme:** Tweet'ler içerisinde bulunan URL bilgisi, paylaşımın duygu fikrine katkı sağlamadığından tüm link bilgileri yalnızca "URL" kelimesiyle değiştirilmiştir.
- **Boşluk Silme:** Tweet'ler içerisinde başta ve sonda bulunan fazla boşluklar silinmiştir. Ayrıca kelimeler arasındaki boşluk sayısı bire düşürülmüştür.
- **Noktalama İşareti Silme:** Tweet'ler içerisinde geçen tüm noktalama işaretleri silinmiştir.
- **Kullanıcı Adı Bilgisi Silme:** Tweet'ler içerisinde geçen kullanıcı adı bilgisi silinmiştir.
- **Anlamsız Kelime Silme:** Tweet'ler içerisinde geçen kelimelerdeki yazım yanlışları Zemberek [39] yardımıyla düzeltilmiştir. Kelime görünümünde yazılmış anlamsız karakter dizilimleri tespit edilmiş ve silinmiştir.
- **Rakam Silme:** Tweet'ler içerisinde geçen rakamlar silinmiştir.
- **Tek Karakter Silme:** Tweet'ler içerisinde geçen tek karakterlik içerikler silinmiştir.

- **Kelime Düzeltme:** “MERhabaaaa” gibi karakter tekrarı içeren kelimeler, Zemberek yardımıyla Türkçe dil bilgisi kuralına göre düzeltilmiştir.

### 3.3. Veri temsillerinin oluşturulması

Bu bölümde veri kümesinin sayısal olarak temsil edilmesinde kullanılan teknikler ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır. Bu çalışmada veri kümesi önemli temsil yöntemlerinden hem FastText ile sayısallaştırılmıştır hem de veri kümesinden manuel olarak 12 özellik olarak dahil edilmemiştir.

#### 3.3.1. Elle özellik çıkarımı

FastText yardımıyla veri kümesinden iyi temsil vektörleri elde etmek için veri önışlem aşamasında uygulanan operasyonlarla kullanıcının paylaşımındaki bazı içerikler silinmiştir. Bu içerikler duygu bakımından anlamsal bir değere sahip olmadığı düşünülse de, aslında kullanıcının duygu ve düşüncesinin bir parçası niteliğindedir. Bu bakış açısıyla, veri kümesi önışlemlerden geçirilmeden önce sözdizimsel, anlamsal ve Twitter’a özgü kullanımlardan oluşan üç kategori altında 12 adet elle özellik çıkarımı (EÖÇ) yapılmıştır. Çıkarılan bu özellikler ve açıklamaları Tablo 1’de verilmiştir. Anlamsal özelliklerden pozitif ve negatif emoji sayıları [40]’daki emoji skorlarına göre belirlenmiştir. Ayrıca veri kümesinin etiketlenmesinde [8]’de referans alınan emoji türleri (olumlu- “:-)”, “:””, “=)”, “:D” ve olumsuz- “:-(”, “:(”, “=(”, “;(” ) özellik olarak eklenmemiştir.

**Tablo 1.** Veri kümesinden elle çıkartılan sözdizimsel, anlamsal ve Twitter özgü özellikler ve açıklamaları.

Özellik Türü	Özellik No	Özellik Adı	Özellik Açıklaması
Sözdizimsel	Öz-1	Toplam Karakter Sayısı	Bir tweet içerisindeki toplam karakter sayısını ifade eder.
	Öz-2	Büyük Harf Sayısı	Bir tweet içerisindeki büyük harflerin sayısını ifade eder.
	Öz-3	Küçük Harf Sayısı	Bir tweet içerisindeki küçük harflerin sayısını ifade eder.
	Öz-4	Rakam Sayısı	Bir tweet içerisindeki rakamların sayısını ifade eder.
	Öz-5	Noktalama İşareti Sayısı	Bir tweet içerisindeki noktalama işaretlerinin sayısını ifade eder.
	Öz-6	URL Sayısı	Bir tweet içerisindeki link bilgilerinin sayısını ifade eder.
Twitter	Öz-7	Bahsetme (mention) Sayısı	Bir tweet içerisinden etiketlenen yani bahsedilen kullanıcı sayısını ifade eder.
	Öz-8	Hashtag (#) Sayısı	Bir tweet içerisinden geçen hashtag kullanımlarının (Örneğin, #pazartesi gibi.) sayısını ifade eder.
Anlamsal	Öz-9	Pozitif Emoji Sayısı	Bir tweet içerisinde geçen pozitif emoji sayısını ifade eder.
	Öz-10	Negatif Emoji Sayısı	Bir tweet içerisinde geçen negatif emoji sayısını ifade eder.
	Öz-11	Pozitif Ünlem Sayısı	Bir tweet içerisinde geçen pozitif ünlem sayısını ifade eder. Örneğin; “ohhhh”
	Öz-12	Negatif Ünlem Sayısı	Bir tweet içerisinde geçen negatif emoji sayısını ifade eder. Örneğin; “uffff”

#### 3.3.2. FastText ile kelime temsillerinin oluşturulması

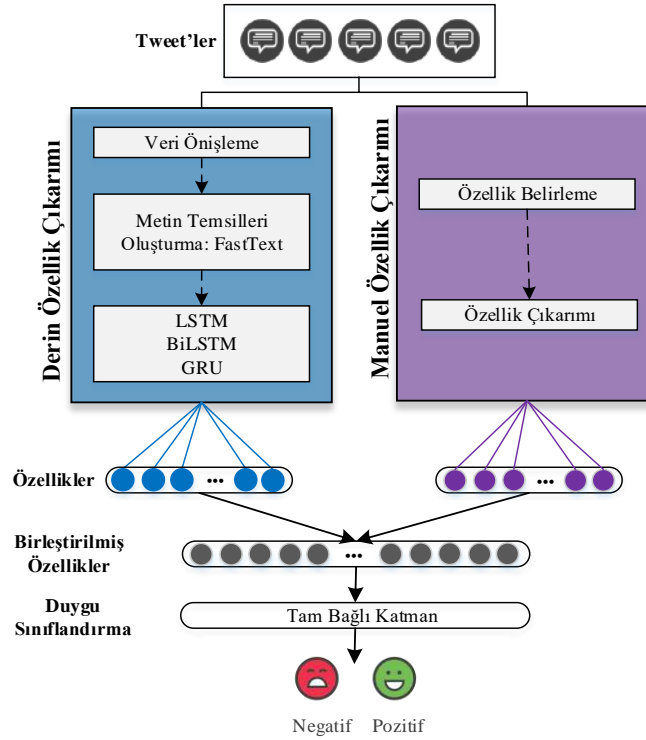
Metin tabanlı duygu sınıflandırma problemlerinin en önemli alt aşamalarından biri metin içerisindeki kelimeler arasındaki anlamsal ilişki ve bağlantıları, kelimeleri sayısal formatta temsil ederken de korumaktır. Bu aşamada kullanılan yöntemin başarısı, doğrudan sınıflandırma başarımı üzerinde olumlu etki oluşturduğundan, bu aşama ayrıca iyi özellik çıkarmanın da göstergesi niteliğindedir. Günümüzde metin tabanlı verilerin anlamsal bilgiye sahip sayısal vektör olarak temsil edilmesinde Word2Vec, Glove, FastText gibi yöntemler sıklıkla tercih edilmektedir.

Glove, giriş olarak aldığı kelimelerden, sayısal vektörleri üreten ve bağlamdaki kelimelerin birlikte bulunma istatistiklerine dayanan gözetimsiz bir öğrenme yöntemidir. Word2Vec ise, giriş olarak kelimeleri alan ve çıkış olarak çok boyutlu vektör üreten bir yapay sinir ağı modelidir. Word2Vec temelde, kelime vektör uzayında benzer kelimeleri birlikte gruplandırmaktadır. Bunu iki farklı yöntemle gerçekleştirmektedir. Bunlardan birincisi vektörü oluşturulacak kelimenin öncesinde ve sonrasında kullanılan kelimelerin vektörlerinden elde etmek yani bağlamdan kelime vektörünü (Continuous Bag of Words) (CBoW) elde etmektir. İkinci yöntemde ise, bağlamda geçen bir kelimedenden (Skip-gram) yeni kelime vektörlerini oluşturma şeklindedir. Word2Vec yönteminin en büyük eksikliği, bağlamda olmayan bir kelime için vektör oluşturma aşamasında rastgele sayısal bir vektör oluşturmaktır. Diğer taraftan FastText yöntemi, vektör oluşturma aşamasında n-gram yaklaşımını kullandığından Word2Vec

yönteminin bu eksikliğini gidermektedir. Bu nedenle bu çalışma kapsamında veri kümesinin sayısal temsillerinin oluşturulmasında FastText yöntemi tercih edilmiştir. Veri kümesi önışlemlerden geçirildikten sonra, Türkçe Wikipedia metinleri üzerinde eğitilen FastText<sup>2</sup> modeli yardımıyla 300 boyutlu sayısal vektörler olarak temsil edilmiştir.

### 3.4. Önerilen model

Twitter veri kümeleri üzerinde yapılan duygu sınıflandırma çalışmaları incelendiğinde, iyi veri temsilleri elde etmek için veri normalleştirme önışlemleri önerilmektedir. Bu önışlemlerle veri içerisinde sözdizimsel yapıların büyük bir kısmı silinmektedir. Bu çalışmada önerilen yöntemle, silinen bu içerikleri de duygu bakımından anlamsal değerlere dönüştürmek için EÖÇ yapılmış olup, elde edilen özellikler ile DÖ yöntemlerinden elde edilen özelliklerin birleştirilerek kullanılmasının sınıflandırma başarımına olan katkısı araştırılmıştır.



Şekil 4. Önerilen derin özellik çıkarımı tabanlı modelin yapısı.

Önerilen model, FastText kelime temsil yöntemi ve RNN'lerden elde edilen derin özelliklerle, veri önışlem aşamasından önce veri kümesi üzerinde elle çıkartılan 12 özelliğin birleştirilmesi ilkesine dayanmaktadır. Önerilen modelin şema gösterimi Şekil 4'te verilmiştir. Önerilen model iki temel kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda, FastText kelime temsil yöntemi ile metin formatındaki veriler sayısal vektörlerle temsil edildikten sonra, LSTM, BiLSTM ve GRU yardımıyla veri kümesinden derin özellikler çıkartılmıştır. İkinci kısımda ise, veri kümesinden önceki bölümde verilen 12 özellik çıkartılmıştır. Her iki kısımdan çıkartılan özellikler birleştirilerek, sınıflandırması amacıyla tam bağlı katmana iletilmiştir. Elle çıkartılan özellikler, RNN modelleri (LSTM, BiLSTM, GRU) yardımıyla çıkarılan derin özellikler ve her iki grup özelliklerin birleşimi olan özelliklerin sınıflandırma başarımı üzerindeki etkisini görmek için üç girişli ve üç çıkışlı DÖ modeli tasarlanmıştır. Modelin geliştirilmesi için TensorFlow<sup>3</sup> DÖ yazılım çatısı ile Keras<sup>4</sup> yazılım çatısının fonksiyonel API'si (Application Programming Interface) kullanılmıştır.

<sup>2</sup> <https://fasttext.cc/docs/en/crawl-vectors.html>

<sup>3</sup> <https://www.tensorflow.org>

<sup>4</sup> <https://keras.io/api>

#### 4. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

Bu bölümde öncelikle önerilen modelin başarımını ölçmek için kullanılan performans değerlendirme metrikleri verilmiştir. Sonrasında bu metrikler kullanılarak önerilen modelin sınıflandırma sonuçları verilmiş ve sınıflandırma sonuçları tartışılmıştır.

##### 4.1. Performans metrikleri

Sınıflandırma problemlerinde, modellerin başarımları genellikle karmaşıklık matrisi (Confusion Matrix) ve bu matris yardımıyla hesaplanan ölçütlerle değerlendirilmektedir. Bu çalışmada da önerilen modelin sınıflandırma performansının değerlendirilmesi ve elde edilen sınıflandırma sonuçlarının önceki çalışmalarla mukayese edilmesi amacıyla karmaşıklık matrisi ve ölçütleri kullanılmıştır. İki sınıflı bir sınıflandırıcı modelinin sınıflandırma sonuçları için karmaşıklık matrisi Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2.** İki sınıflı bir sınıflandırma problemi için karmaşıklık matrisi

		Tahmin Edilen Sınıf Etiket	
		Pozitif	Negatif
Gerçek Sınıf Etiketi	Pozitif	DP	YN
	Negatif	YP	DN

Tablo 2’de verilen karmaşıklık matrisindeki DP (Doğru Pozitif), YP (Yanlış Pozitif), YN (Yanlış Negatif) ve DN (Doğru Negatif) kısaltmaları aşağıdaki anlamlara gelmektedir:

- **DP:** Gerçek sınıf etiketinin pozitif ve tahmin edilen sınıf etiketinin pozitif olduğu örneklerin sayısı
- **YP:** Gerçek sınıf etiketinin negatif ve tahmin edilen sınıf etiketinin pozitif olduğu örneklerin sayısı
- **YN:** Gerçek sınıf etiketinin pozitif ve tahmin edilen sınıf etiketinin negatif olduğu örneklerin sayısı
- **DN:** Gerçek sınıf etiketinin negatif ve tahmin edilen sınıf etiketinin negatif olduğu örneklerin sayısı

Tablo 2’de verilen karmaşıklık matrisine göre Doğruluk (Accuracy), Kesinlik (Precision), Duyarlılık (Recall) ve F1 ölçümü hesaplanmaktadır. Doğruluk değeri Denklem 1’e, Kesinlik Denklem 2’ye, Duyarlılık Denklem 3’e ve F1 değeri ise Denklem 4’e göre hesaplanmaktadır. Kappa değeri ise genellikle dengesiz sınıf dağılımına sahip veri kümeleri için referans alınan bir başarımlar metriğidir. Kappa değeri Denklem 5 ve Denklem 6 yardımıyla hesaplanmaktadır. Denklem 5’te Kappa değeri için gerekli olan beklenen uzlaşma (expected agreement) ( $P_e$ ) değeri hesaplanmaktadır. Ayrıca dengesiz dağılıma sahip veri kümeleri için önem ifade eden bir diğer metrik olan ve ROC (receiver operating characteristic curve) eğrisi ile hesaplanan eğri altında kalan alanı ifade eden AUC (Area Under Curve) değeri de hesaplanmıştır.

$$\text{Doğruluk} = \frac{DP + DN}{DP + DN + YP + YN} \quad (1)$$

$$\text{Kesinlik} = \frac{DP}{DP + YP} \quad (2)$$

$$\text{Duyarlılık} = \frac{DP}{DP + YN} \quad (3)$$

$$F_1 = \frac{2 * \text{Kesinlik} * \text{Duyarlılık}}{\text{Kesinlik} + \text{Duyarlılık}} \quad (4)$$

$$P_e = \frac{(DN + YP) * (DN + YN) + (YN + DP) * (YP + DP)}{(DP + DN + YP + YN) * (DP + DN + YP + YN)} \quad (5)$$

$$Kappa = \frac{Doğruluk - P_e}{1 - P_e} \quad (6)$$

#### 4.2. Sınıflandırma sonuçları

Veri kümesi üzerinde yapılan önceki çalışmalarda 10 kat çaprazlama tekniği kullanılmasına rağmen, bu çalışmada veri kümesinin %90'ı eğitim ve %10'u test amacıyla kullanılmıştır. Her model için 10 deney gerçekleştirilmiş olup, ortalama başarımlar metrikleri kayda geçirilmiştir. Önerilen modelde LSTM, BiLSTM ve GRU için birim sayısı 64, seyreltme (dropout) oranı 0.7, tekrarlı seyreltme (recurrent dropout) oranı 0.7, optimizasyon fonksiyonu 'adam' ve aktivasyon fonksiyonu olarak da sigmoid kullanılmıştır.

Yapılan deneylerde LSTM, BiLSTM ve GRU'nun derin özellik çıkarımındaki başarımlarını test etmek için Model-A (LSTM), Model-B (BiLSTM) ve Model-C (GRU) olmak üzere üç ayrı model oluşturulmuştur. Model-A, Model-B ve Model-C'nin başarımlar metrikleri Tablo 3'te verilmiştir. Her üç modelde de elde edilen özellikler ile derin özelliklerin birleşiminden oluşan modellerin başarımları daha yüksek olduğu görülmektedir. LSTM, BiLSTM ve GRU arasından da en yüksek doğruluk sınıflandırma başarımları % 75,71 olarak BiLSTM ile elde edilmiştir. Sadece derin özellik çıkarımında da BiLSTM (%74,68) GRU (%74,32) ve LSTM (74,33)'e göre daha iyi doğruluk değeriyle performans göstermiştir. Tablo 3'teki sonuçlara göre DÖ'den elde edilen özellikler ile EÖÇ sonucunda elde edilen özelliklerin her üç model için de doğruluk değeri yaklaşık %1 ile %2 arasında arttırdığı görülmüştür. Ancak özellik birleştirmesinden sonra duyarlılık değeri düştüğünden F1 ölçütü değerinin artışı sınırlı kalmıştır.

**Tablo 3.** RNN modellerinin ve BERT modelinin sınıflandırma başarımlar metrikleri.

		Başarımlar Metrikleri					
	Özellik Türü	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F1	Kappa	ROC-AUC
Model-A	EÖÇ	0.654570	0.650137	0.577497	0.609345	0.302776	0.650678
	LSTM	0.743331	0.769972	0.656840	0.704357	0.481097	0.739023
	EÖÇ + LSTM	0.753486	0.797972	0.639818	0.707688	0.499762	0.747397
Model-B	EÖÇ	0.661408	0.648530	0.584145	0.611975	0.313154	0.655471
	BiLSTM	0.746851	0.752564	0.677385	0.710698	0.486354	0.741238
	EÖÇ + BiLSTM	<b>0.757142</b>	0.784286	<b>0.653795</b>	<b>0.712064</b>	<b>0.504839</b>	<b>0.749311</b>
Model-C	EÖÇ	0.659174	0.644400	0.595417	0.616405	0.310701	0.654636
	GRU	0.743263	0.780974	0.626742	0.692594	0.476945	0.735500
	EÖÇ + GRU	0.748679	<b>0.800400</b>	0.613487	0.692753	0.486523	0.739566
Model-BERT	BERT	0.753482	0.753385	0.753482	0.753428	0.535731	0.753518

Bu çalışmada kullanılan veri kümesi son teknoloji yöntemlerden olan ilgi (attention) mekanizması tabanlı transformers modeli olan BERT modeliyle de sınıflandırılmıştır. BERT tabanlı sınıflandırma için Model-BERT oluşturulmuştur. BERT modeli için önceden eğitilmiş kelime vektörleri kullanılmıştır. Sınıflandırma için kullanılan önceden eğitilmiş BERT Base Türkçe modeli Hugging Face<sup>5</sup> kütüphanesinden alınmıştır. BERT Base modeli 12 kodlayıcı katmanına sahiptir ve eğitim aşamasında 110 milyon parametre ayarlaması yapılmaktadır. Model-BERT'in son katmanında ince ayar (fine-tuning) yapılarak, önceden eğitilmiş modelin bu çalışmada kullanılan veri kümesine göre parametre ayarlaması yapılmıştır. BERT modellerinin eğitimi büyük bir GPU hesaplama gerektirdiğinden veri kümelerinin sınıflandırması aşamasında Google Colab<sup>6</sup> kullanılmıştır. Tablo 3'te

<sup>5</sup> <https://huggingface.co/dbmdz>

<sup>6</sup> <https://colab.research.google.com/notebooks/intro.ipynb#recent=true>



verilen BERT modeli sınıflandırma sonuçlarına bakıldığında doğruluk değeri bakımından Model-B (%75,71) ile yakın sonuçlar elde edilmiştir. F1 skoru açısından BERT modelinin skoru diğer üç modele göre daha yüksek elde edilmiştir. BERT modeli birçok ilgi mekanizması barındırdığından genel olarak LSTM, BiLSTM ve GRU'ya göre yüksek sınıflandırma performansı sağlamıştır.

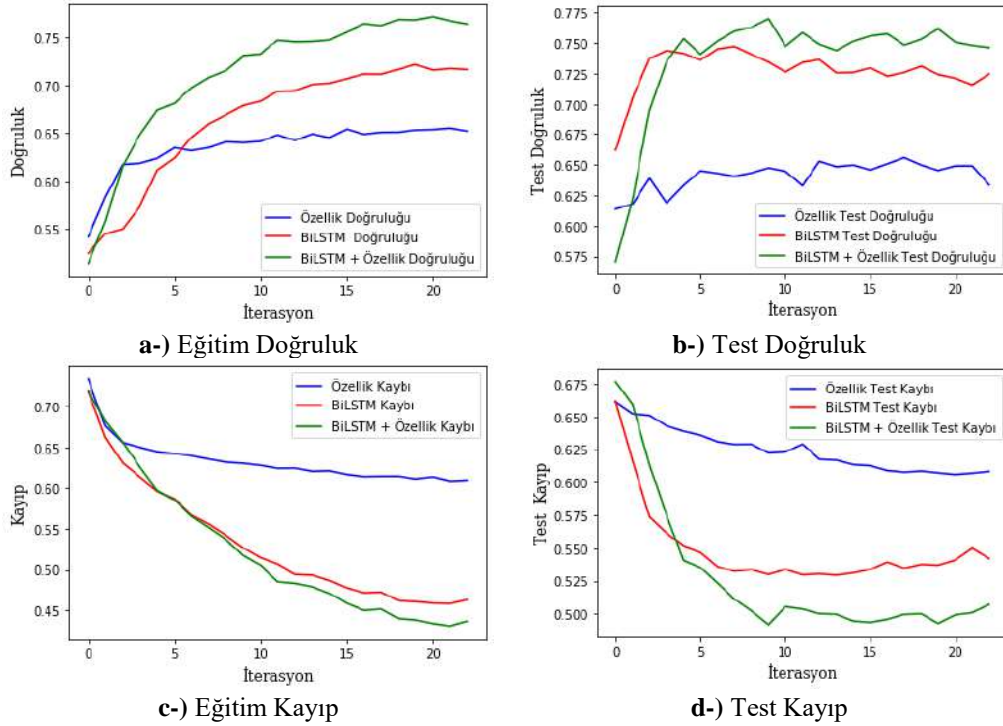
Bu çalışmada kullanılan veri kümesi pozitif ve negatif örnek sayısı bakımından dengesiz bir dağılıma sahiptir. Dengesiz veri kümelerinde başarımları olarak genellikle Kappa değeri referans alınmaktadır. Bu çalışmada da her model için Kappa değeri hesaplanmıştır. Kappa değerine bakıldığında BiLSTM tabanlı olan Model-B'nin daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. ROC-AUC ve F1 metriğine bakıldığında ise benzer şekilde de Model-B'nin başarımları Model-A ve Model-C'ye göre daha iyi olduğu görülmektedir. Öte yandan, her üç modelde de özellik birleştirme sonrasında duyarlılık değerinin yalnız BiLSTM, GRU, LSTM'e göre düştüğü görülmektedir.

Önerilen modelin performansı aynı veri kümesi üzerinde daha önce gerçekleştirilen çalışmalarla kıyaslandığında, daha yüksek sınıflandırma performansı elde edilerek, önerilen modelin etkinliği gösterilmiştir. Veri kümesi üzerinde gerçekleştirilen önceki çalışmaların özellik çıkarım yöntemleri, sınıflandırma yöntemleri ve sınıflandırma başarımları Tablo 4'te verilmiştir. Sınıflandırma başarımları incelendiğinde önerilen modelin sınıflandırma başarımları diğer çalışmalardan daha iyi olduğu görülmektedir.

**Tablo 4.** Twitter veri kümesi üzerinde önerilen model ile önceki çalışmaların başarımları.

Referans	Özellik Çıkarım Yöntemi	Sınıflandırma Yöntemi	Doğruluk (%)
[20]	BoW özellikleri	Destek Vektör Makineleri	65,62
[8]	N-gram özellikleri	MNB	66,06
<b>Önerilen Model (Model-B)</b>	<b>EÖÇ + Derin özellikler (FastText + BiLSTM)</b>	<b>Tam Bağlı Yapay Sinir Ağı</b>	<b>75,71</b>

Özelliklerin birleştirilmesinden sonra en yüksek başarımları elde edildiği Model-B'nin her iterasyondaki performansı izlenmiştir. Şekil 5'te Model-B'nin bir kez çalıştırılması sırasındaki elde çıkarılan özellikler, derin özellikler ve iki özelliğin birleşimi olan önerilen modelin doğruluk ve kayıp değerleri görülmektedir.



**Şekil 5.** Önerilen modelin eğitim ve test aşamalarındaki doğruluk ve kayıp değerleri eğrileri.

Şekil 5'teki grafiklerden de görüldüğü üzere elle çıkartılan özellikler (mavi eğri) ile BiLSTM (kırmızı eğri) ile elle çıkartılan özelliklerin birleşimi (yeşil eğri) daha iyi sınıflandırma performansı göstermiştir. Her üç model için de 50 iterasyona kadar eğitim yapılması hedeflenmiş olmasına rağmen modeller genellikle eğitimlerini 20 ile 30 iterasyon arasında tamamlamışlardır.

Önerilen yöntemin duygu sınıflandırma açısından avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Önerilen modelin avantajları arasında gürültü olarak nitelendirilen içeriklerin duygu sınıflandırması için tekrardan kullanılması ve sınıflandırma başarımına katkısı gelmektedir. Bir başka avantaj ise önerilen model Türkçe haricindeki birçok dil için uygulanabilir bir yapıda olmasıdır. Diğer taraftan her dil için manuel özelliklerin analiz edilmesi ve belirlenmesi önerilen modelin zayıf yönleri arasındadır. Ayrıca manuel özelliklerin veri kümesinden elde edilmesi süreci ek olarak çaba gerektirmektedir.

## 5. Sonuç

Twitter gibi anlık paylaşım olanağı sunan sosyal medya uygulamaları üzerinden kullanıcıların duygu ve düşüncelerini belirlemek, birçok alan için önemli fırsatlar sunması açısından önemlidir. Gelişen teknolojik imkânlar ve yöntemler sayesinde günümüzde bu kullanıcı içerikleri üzerinde duygu analizi çalışmaları gerçekleştirme aşamasında DÖ yöntemleri sıklıkla tercih edilmektedir. DÖ modelleri için kelime temsil yöntemleri yardımıyla giriş verisi oluşturulurken, iyi kelime temsil vektörleri elde etmek amacıyla veri ön işlemleri gerçekleştirilmektedir. Bu ön işlemlerde kullanıcının paylaşımında bulunan bazı içerikler silinmektedir. Bu çalışmada önerilen modelle, silinen bu içeriklerden EÖÇ yapılarak, bu özellikler ile derin model yardımıyla çıkartılan özelliklerin birleştirilmesinin daha iyi sınıflandırma performansı sağladığı gösterilmiştir. Veri kümesi üzerinde üç farklı RNN modeli (Model-A, Model-B, Model-C) çalıştırılmıştır. Bu modellerden en yüksek doğruluk değeri BiLSTM tabanlı olan Model-B ile %75,71 olarak elde edilmiştir. DÖ'den elde edilen özellikler ile EÖÇ sonucunda elde edilen özelliklerin her üç model için de doğruluk değeri yaklaşık %1 ile %2 arasında arttırdığı görülmüştür.

Önerilen model ile veri kümesi üzerinde yapılan önceki çalışmaların sınıflandırma performansları kıyaslandığında önerilen modelin daha iyi performans sağladığı görülmektedir. Önceki çalışmalardan elde edilen en yüksek sınıflandırma doğruluk değerine göre %10 daha iyi başarımlar elde edilmiştir. Gelecek çalışmalarda önerilen modelin farklı veri temsil yöntemleri üzerindeki etkisi araştırılması planlanmaktadır.

## Teşekkür

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TUBITAK) tarafından 119E655 numaralı proje ile desteklenmiştir.

## Kaynaklar

- [1] Yue L, Chen W, Li X, Zuo W, Yin M. A survey of sentiment analysis in social media. *Knowledge and Information Systems*, 2019; 60(2): 617–663.
- [2] Singh NK, Tomar DS, Sangaiah AK. Sentiment analysis: a review and comparative analysis over social media. *J. Ambient Intell. Hum. Comput*, 2020; 11(1): 97–117.
- [3] Zhao J, Cao X. Combining semantic and prior polarity for boosting twitter sentiment analysis. 2015 IEEE International Conference on Smart City/SocialCom/SustainCom (SmartCity), December 19-21 2015; Chengdu, China. 832–837.
- [4] Wallach HM. Topic Modeling : Beyond Bag-of-Words. 23rd International Conference on Machine learning, June 25-29, 2006; Pennsylvania, USA. 977–984.
- [5] Ramos J. Using Tf-Idf to Determine Word Relevance in Document Queries. *Proceedings of the first instructional conference on machine learning*, December 3-8, 2003; Piscataway, NJ USA. 29–48.
- [6] Gimpel K, Schneider N, O'Connor B, Das D, Mills D, Eisenstein J, Heilman M, Yogatama D, Flanigan J, Smith NA. Part-of-speech tagging for twitter: Annotation, features, and experiments. *Proceedings of the 49th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies*, 2011; Stroudsburg, PA, USA. 42–47.
- [7] Cavnar WBC, Trenkle JM. N-Gram-Based Text Categorization. *Proceedings of SDAIR-94, 3rd annual symposium on document analysis and information retrieval*, April 11-13 1994; Las Vegas, Nevada.
- [8] Çoban Ö, Özyer B, Özyer GT. Sentiment analysis for Turkish Twitter feeds. 2015 23rd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), May 16-19 2015; Malatya, Turkey. 2388–2391.
- [9] Siddiqua UA, Ahsan T, Chy AN. Combining a rule-based classifier with ensemble of feature sets and machine learning techniques for sentiment analysis on microblog. 19th International Conference on Computer and Information Technology (ICIT), December 18-20, 2016; Dhaka, Bangladesh. 304–309.
- [10] Chamansingh N, Hosein P. Efficient sentiment classification of Twitter feeds. 3rd International Conference on

- Knowledge Engineering and Applications (ICKEA), September 28-30 2016; Singapore. 78–82.
- [11] Jianqiang Z, Xiaolin G. Comparison research on text pre-processing methods on twitter sentiment analysis. *IEEE Access*, 2017; 5: 2870–2879.
- [12] Riyadh AZ, Alvi N, Talukder KH. Exploring human emotion via Twitter. 20th International Conference of Computer and Information Technology, December 22-24 2017; Dhaka, Bangladesh. 1–5.
- [13] Tsapatsoulis N, Djouvas C. Feature extraction for tweet classification: Do the humans perform better?. 12th International Workshop on Semantic and Social Media Adaptation and Personalization, July 9-10 2017; Bratislava, Slovakia. 53–58.
- [14] Kaur S, Sikka G, Awasthi LK. Sentiment Analysis Approach Based on N-gram and KNN Classifier. 2018 First International Conference on Secure Cyber Computing and Communication (ICSCCC), December 15-17, 2018; Jalandhar, India. 13–16.
- [15] Permatasari PI, Fauzi MA, Adikara PP, Sari EDL. Twitter Sentiment Analysis of Movie Reviews using Ensemble Features Based Naïve Bayes. 3rd International Conference on Sustainable Information Engineering and Technology, November 10-12 2018; Malang, Indonesia. 92–95.
- [16] Aydın İ, Salur MU, Başkaya F. Duygu Analizi için Çoklu Populasyon Tabanlı Parçacık Sürü Optimizasyonu. *Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi*, 2018; 11(1): 52–64.
- [17] Salur MU, Aydın I, Alghrsi SA. SmartSenti: A Twitter-Based Sentiment Analysis System for the Smart Tourism in Turkey. 2019 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP), September 21–22 2019; Malatya, Turkey. 1–5.
- [18] Ahuja R, Chug A, Kohli S, Gupta S, Ahuja P. The impact of features extraction on the sentiment analysis. *Procedia Comput. Sci*, 2019; 152: 341–348.
- [19] Saad SE, Yang J. Twitter Sentiment Analysis Based on Ordinal Regression. *IEEE Access* 2019, 7: 163677–163685.
- [20] Karcioğlu AA, Aydın T. Sentiment Analysis of Turkish and English Twitter Feeds Using Word2Vec Model. 27th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), April 24-26 2019; Sivas, Turkey. 1–4.
- [21] Mikolov T, Sutskever I, Chen K, Corrado G, Dean J. Distributed Representations of Words and Phrases and their Compositionality. *Advances in neural information processing systems*, 2013; 3111–3119.
- [22] Pennington J, Socher R, Manning CD. GloVe: Global Vectors for Word Representation. *Proceedings of the 2014 conference on empirical methods in natural language processing (EMNLP)*, October 25-29 2014; Doha, Qatar. 1532–1543.
- [23] Bojanowski P, Grave E, Joulin A, Mikolov T. Enriching Word Vectors with Subword Information. *Transactions of the Association for Computational Linguistics*, 2017; 5: 135–146.
- [24] Salur MU, Aydın I. Derin Öğrenme Tabanlı Duygu Sınıflandırma. 26. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU), 2-5 Mayıs 2018; İzmir, Türkiye. 1-4.
- [25] Meng W, Wei Y, Liu P, Zhu Z, Yin H. Aspect Based Sentiment Analysis with Feature Enhanced Attention CNN-BiLSTM. *IEEE Access*, 2019; 7: 167240–167249.
- [26] Kamiş S, Goularas D. Evaluation of Deep Learning Techniques in Sentiment Analysis from Twitter Data. 2019 International Conference on Deep Learning and Machine Learning in Emerging Applications, August 26-28 2019; İstanbul, Turkey. 12–17.
- [27] Salur MU, Aydın I. A Novel Hybrid Deep Learning Model for Sentiment Classification. *IEEE Access* 2020; 8: 58080–58093.
- [28] Muslim A, Mutiara AB, Refianti R, Karyati CM, Setiawan G. Comparison of accuracy between long short-term memory-deep learning and multinomial logistic regression-machine learning in sentiment analysis on twitter. *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.* 2020; 11(2): 747–754.
- [29] Kaladevi P, Thyagarajah K. Integrated CNN- and LSTM-DNN-based sentiment analysis over big social data for opinion mining. *Behav Inform Technol* 2019; 1–9.
- [30] Karakuş BA, Talo M, Hallaç İR, Aydın G. Evaluating deep learning models for sentiment classification. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 2018; 30(21): e4783.
- [31] Santur Y. Derin Öğrenme ve Aşağı Örnekleme Yaklaşımları Kullanılarak Duygu Sınıflandırma Performansının İyileştirilmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2020; 32(2): 561–570.
- [32] Staudemeyer RC, Morris ER. Understanding LSTM -- a tutorial into Long Short-Term Memory Recurrent Neural Networks. *arXiv Prepr. arXiv1909.09586*. 2019; 1–42.
- [33] Chollet F. *Deep learning with Python*. Shelter Island: Manning Publications, 2017.
- [34] Dang NC, Moreno-García MN, De la Prieta F. Sentiment analysis based on deep learning: A comparative study. *Electronics*, 2020; 9(3): 1-29.
- [35] Vaswani A, Shazeer N, Parmar N, Uszkoreit J, Jones L, Gomez a, Kaiser L, Polosukhin I. Attention is all you need. *Advances in neural information processing systems*, 2017. 5998–6008.
- [36] Devlin J, Chang M, Lee K, Toutanova K. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies - Proceedings of the Conference, 2018. 4171–4186.
- [37] Zhao J. Pre-processing boosting twitter sentiment analysis. 2015 IEEE International Conference on Smart City/SocialCom/SustainCom (SmartCity), December 19-21 2015; Chengdu, China; 748–753.
- [38] Salur MU, Aydın I. The Impact of Preprocessing on Classification Performance in Convolutional Neural Networks for Turkish Text. 2018 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP), September 28-30

- 2018; Malatya, Turkey. 1-4.
- [39] Akın AA, Akın MD. Zemberek, An Open Source Nlp Framework for Turkic Languages, *Structure* 2007; 10: 1–5.
- [40] Novak PK, Smailović J, Sluban B, Mozetič I. Sentiment of emojis. *PLoS One*, 2015; 10(12): 1–22.



## Trafik Işıklarının Optimum Planlaması için Çizge Tabanlı Çözüm Önerisi

Hilal TEKGÖZ<sup>1</sup>, Neslihan KOLUKISA<sup>2</sup>, Murat KARABATAK<sup>3\*</sup>

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

<sup>2</sup> HAVELSAN, Çankaya/Ankara, Türkiye

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

<sup>1</sup> hilaltekgoz@outlook.com.tr, <sup>2</sup> nkolukisa@havelsan.com.tr, <sup>3</sup> mkarabatak@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 08/08/2020;

Kabul/Accepted: 22/02/2022)

**Öz:** Dünyadaki modern şehirler kültür, coğrafya ve nüfus bakımından benzersiz karakterlere sahip olmalarına rağmen ortak özelliklerinden biri yoğun kavşakları ve bu kavşaklardaki trafik akışının kontrol edilme gereksinimidir. Bu özellik nedeni ile kavşak tipi seçiminde ve kavşak tipinin tasarımında trafik güvenliği kriterleri oldukça önemli bir unsurdur. Trafik güvenliği kriterlerinden biri de kavşağın işletim performansındır. Bu nedenle akıllı ulaşım sistemlerinde trafik akışının düzenlenmesi, dinamik ve proaktif trafik kontrolünü desteklemek ve trafik yönetim planı yapmak için oldukça önemlidir. Trafik ışıkları da trafik yoğunluğunu düzenleyen sistemlerden biridir. Trafik ışıkları özellikle trafiğin yoğun olduğu kavşaklarda trafik akışını düzenlemek için kullanılmaktadır. Bu yönü ile trafik ışıkları hayatı kolaylaştırır ve zaman kazandırır son derece yararlı bir teknolojidir. Fakat çoğu durumda hangi trafik akışlarının aynı anda hareket edeceği, hangi akışların kırmızı ile durdurulacağı veya yeşil ile sürdürüleceği ve durdurma veya sürdürme işlemlerinin ne kadar olacağını belirlemek oldukça zordur. Bu sorunun üstesinden gelmek için bu makalede çizge tabanlı bir çözüm önerisi sunulmaktadır. Çizgeler; gerçek dünya problemlerini matematiksel yöntemlere çevirmek için kullanılan yöntemlerden biridir. Bu çalışmada aralık çizgesi ve dairesel yay çizgesi kullanılarak probleme çözüm sunulmuştur ve dört yönlü ve 12 akışlı bir trafik kavşağının optimum düzeyde modellenmesi gerçekleştirilerek elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Trafik Işıkları, Çizge, Dairesel Yay Çizgesi, Optimum Trafik Kavşağı.

### Graph Based Solution for Optimum Planning of Traffic Lights

**Abstract:** Although modern cities in the world have unique characteristics in terms of culture, geography and population, one of their common features is their busy intersections and the need to control the traffic flow at these intersections. Because of this feature, traffic safety criteria are very important factor in the selection of the intersection type and the design of the intersection type. One of the traffic safety criteria is the operational performance of the intersection. For this reason, regulation of traffic flow in smart transportation systems is very important to support dynamic and proactive traffic control and to make a traffic management plan. Traffic lights are one of the systems that regulate traffic density. Traffic lights are used to regulate traffic flow, especially at intersections with heavy traffic. With this aspect, traffic lights are an extremely useful technology that makes life easier and saves time. However, in most cases it is very difficult to determine which traffic flows will move at the same time, which flows will be stopped in red or resumed in green, and how long the interruptions or resumptions will be. In this article, graph-based solution was proposed to overcome this problem. Graphs; it is one of the methods used to translate real world problems into mathematical methods. In this study, a solution for the problem is presented by using the interval graph and circular arc graph, and the results obtained by performing the optimum modeling of a four-way and 12-flow traffic intersection are evaluated.

**Key words:** Traffic Lights, Graph, Circular Arc Graph, Optimum Traffic Junction.

#### 1. Giriş

Trafik yönetimi, ulaşım hizmetlerinin önemli bir parametresidir. Bu nedenle trafik akışını yöneten ve düzenini sağlayan bir sisteme ihtiyaç duyulmaktadır. Trafik yönetimini sağlayan sistemlerden birisi de trafik ışıklarıdır. Trafik ışıkları, trafikteki araçların veya yayaaların geçişlerini kontrollü yapmasını sağlayan teknolojik araçlardır. Bu ışıklar, araçların farklı taraflardan kontrollü bir biçimde sürüşe devam etmesi veya durması gerektiğini belirtmektedir.

Trafik ışıkları günlük yaşantının bütünleyici unsurlarından biridir. Trafik ışıklarının kullanılması sayesinde trafik verimli ve güvenli bir şekilde yönetilmekte, aynı zaman da zaman ve enerji konusun da tasarruflar sağlanmaktadır. Her gün kırmızı ışıkta ve yavaş akan trafikte bekleyen binlerce insan bulunmakta ve binlerce saat boşa harcanmaktadır. Trafikte harcanan süreyi en aza indirmek için trafik ışıkları sisteminin nasıl davranacağını

\* Sorumlu yazar: [mkarabatak@firat.edu.tr](mailto:mkarabatak@firat.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-5469-5125, <sup>2</sup> 0000-0002-0695-8848, <sup>3</sup> 0000-0002-6719-7421

belirleyen bir model oluşturmak mümkündür. Bununla birlikte, yol düzeni, trafik hacmi gibi birçok parametre olduğu için genel olarak bir modelleme yapmak çok zordur [1].

Çizge teorisi, gerçek dünya problemlerinde etkin çözümler sunan önemli bir çalışma konusudur. Çizge teorisinin uygulamaları modern hayatın karmaşık ve geniş kapsamlı birçok probleminin çözümü için kullanılmaktadır. Bu uygulamalar; ekonomi, yönetim bilimi, bilgi iletimi ve trafik ışıkları gibi alanları kapsamaktadır. Çizge çalışmalarının en önemlilerini gezgin satıcı ve gezgin alıcı problemleri oluşturmaktadır [2, 3]. Bu çalışmalar, çizge düğümlerini oluşturan şehirlerin yönlendirilmiş kenarları ifade eden güzergahlara bağlandığı bir optimizasyon problemidir. Bu problemler haricinde de literatürdeki birçok çalışmada çizge tabanlı çözümler yer almaktadır. Assadian ve ark. [4] yaptıkları çalışmada, dağıtım sistemlerinin güç kaybını ve voltaj profiline artırılması için ağın yeniden yapılandırılmasına yönelik çizge teorisi ile işbirliği içinde olarak bir çalışma sürdürmüşlerdir. Bu çalışma sonucunda çizge teorisi kullanarak ağı yeniden yapılandırarak dağıtım sistemindeki kayıpların azaltılabileceğini ve bunun sonucunda da enerji tasarrufu yapılabileceğini ortaya çıkarmışlardır. Velitchko ve ark. [5] tarafından yapılan başka bir çalışmada da, kentsel alanlardaki su dağıtım şebekelerinin analizi hakkında çizge teorisi tabanlı algoritmalar kullanılmıştır. Bu çalışma, bir ağ düzenindeki bağımsız sektörlerin sayısını, her bir sektöre ait düğüm kümesini, bağlantısı kesilmiş düğüm kümesini ve kaynağa düğüm katkısını elde etmek için çizge teorisine dayalı türden algoritmalar sunmuştur. Bu algoritmalar için AutoCAD tabanlı bir sistem kullanmışlardır. Önerilen algoritmalar, iki şehirde gerçek sektör projesi olarak gerçekleştirilmiş ve sonuçları yorumlanmıştır.

Li Ding ve Zhi-Hong Guan [6], kablosuz sensör ağlarının kritik bir sorunu olan ağ düğümleri içindeki sınırlı enerji kullanılmasını araştırmışlardır. Çalışmada sensör ağların modellenmesinde enerjinin iyi bir şekilde kullanılması gerektiği için çizge teorisi kullanarak yeni bir kablosuz sensör ağ modeli önermişlerdir. Ayrıca, modeli iyileştirmek için bir algoritma önermişler ve sonuç olarak ağların ömrünün uzadığı sonucuna varmışlardır. Enerji tüketimini, Markov süreci ile analiz edilmiş ve bu sonuçlar simülasyon ile uygulamışlardır.

Çizge kullanımı, çok yaygın bir kullanım ağına sahip olmakla beraber, şehirlerde trafik ışıkları kontrolü için de literatürde birçok araştırmada çalışılmıştır. Bu araştırmalardan biri Chanun Lewchalermvongs [7] tarafından yapılan çalışmadır. Yapılan çalışmada, trafik ışıklarının aşamalandırılmasında ve tek yönlü sokak problemine çözüm geliştirilmesinde çizge teorisi kullanılmıştır. Bu çalışmada çizge teorisinin temelini oluşturan Königsberg'in yedi köprü problemi ve Hampton sarayındaki labirent problemi göz önüne alınarak altı akışlı bir kavşak modellenmiştir ve uygulanabilir yeşil ışık atamaları tanımlanmıştır. Literatür taramasında en güncel çizge çalışmalarından biri de Marpaung ve Ritonga [8] tarafından yapılan çalışmadır. Endonezya'daki trafik sıkışıklığı problemine çözüm olarak düğüm renklendirme uygulaması ile çizge yaklaşımının kullanıldığı çalışmada yeşil ve kırmızı ışık sürelerinin en optimum düzeyde ayarlanması amaçlanmıştır.

Trafik ışıklarının organizasyonu için de çizge tabanlı yöntemlerin uygulanması mümkün olabilmektedir. Bu konuda literatürde çeşitli çalışmalar [9-20] mevcut olup bu çalışmalar hem problemi farklı yönleri ile ele almış hem de farklı kavşak noktalarında uygulamalar gerçekleştirmişlerdir.

Çizgede noktalar trafik akışlarını, kenarlar ise uyumlu akışları belirtmektedir. Tehlikeli sonuçlara yol açmayan ve aynı anda hareket edebilen iki trafik akışı birbiri ile uyumlu olarak nitelendirilmektedir. Genel olarak trafik ışıklarında kullanılan çizge yöntemi dairesel yay çizge teorisidir. Dairesel yay çizgesinin de uyumlu trafik akışları çakışan yaylar ile gösterilmektedir. Uyumlu akışlar, belirli bir daire üzerindeki yayların kesişim kümesi denilebilir [9].

Dairesel yay çizgeleri ile ilgini en önemli çalışmalardan biri Lin ve Szwarcfiter tarafından yapılan dairesel yay çizgeleri ve alt çizgelerinin karakterizasyonu çalışmasıdır [11]. Bu çalışmada dairesel yay grafikleri detaylı incelenmiş ve alt çizgelere yönelik teoremler verilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlardan, dairesel yay çizgelerinin trafik ışıklarının kontrolünde kolaylıkla kullanılabileceği ortaya çıkmıştır.

Trafik ışıklarının kontrolüne yönelik olarak kullanılan çizge türlerinden bir diğeri de aralık çizgeleridir. Gardi [12] aralık çizgeleri ile düzgün ve düzenli aralık çizgelerini çalışmasında detaylandırmış ve önemini vurgulamıştır. Bu çalışmada verilen bilgiler ışığında, aralık çizgelerinin trafik ışıklarının kontrolünde önemli bir rol oynayacağı görülmektedir.

Tanveer [13], trafik ışıklarının planlanması problemine, uygun çizge modellerinin uygulanmasına yönelik bir uygulama yapmıştır. Yapılan bu çalışmada, uygun çizge türlerinden kapsama alt çizgesi ve dairesel yay çizgesi türleri üzerinde durmuştur. Trafik ışıklarında bekleme süresini minimuma indirmeye üzerine yapılan bu çalışmada hem çizgelerin kullanımını açıklamış hem de uygun sonuçlar elde etmeyi ağlamıştır.

Setiawan ve Budayasa [15] yaptıkları çalışmada, kavşak noktalarında bulunan trafik ışıklarının kontrolü için çizge tabanlı bir uygulama yapmışlardır. Çizge teorisinin trafik ışık sistemlerine uygulanabilirliğine yönelik olarak yapılan bu çalışmada, her bir trafik akışının çalışma süresinin en aza indirilmesi gibi gerekli koşullar oluşturularak tüm akışların toplam süresi şeklinde bir matematiksel model oluşturulmuştur. Bu modelin çözümünün, maksimum

toplam çalışma süresi biçiminde olduğunu ve her kavşaktaki yoğun saate bağlı olarak saatte gerçekleşen trafik yoğunluğundan etkilendiğini uygulamalarında göstermişlerdir.

AK Baruah ve N Baruah [16], bir uyumluluk grafiğinin Sinyal Grupları, trafik akışları arasındaki çatışmayı çözmek için kullanılır ve bu nedenle bir kavşaktaki trafik kontrol sorunu için bir çözüm olarak kullanılabilir. Bu yazıda, uyumlu grafiğin kliklerini sinyal grupları olarak ele aldık ve aynı anda bir kavşakta hareket edebilen sinyal grupları kümesi bir fazda alındı. Trafik ışıklarının fazlandırılması, döngü süresinin bu fazlar arasında bölünmesiyle yapılır, böylece her bir sinyal grubunun döngüde bir kez hareket etmesine izin verilir.

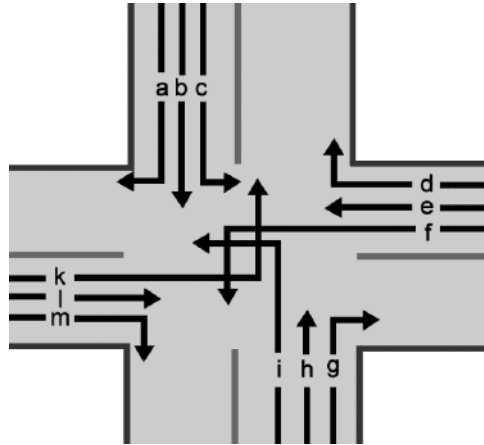
Baruah [17] yaptığı diğer bir çalışmada ise yine çizge bağıntısının trafik ışıklarının düzenlenmesinde kullanılması gerektiğine vurgu yapmıştır. Bir trafik kavşağı için en uygun çizgenin, minimum kenar veya minimum köşe sayısını kullanarak trafik akışını maksimum kapasitesine yönlendirmek için en verimli rotayı veya trafik kontrol sistemini oluşturmak için kullanıldığını göstermiştir. Çalışmanın sonucunda elde ettiği sonuçlar, trafikteki bekleme sürelerini ve trafik verilerini toplamak için sensörlerin yerini belirleme maliyetini en aza indirmeye yönelik olup ayrıca bir kavşakta trafik kontrol problemlerinde uygulama alanı bulunduğunu göstermiştir. Firouzian ve Jouybari [20] ise yaptıkları çalışmada bulanık çizge renklendirmesi ve trafik ışığı problemini ele almışlardır. Özellikle bulanık çizgelerin önemini çalışmalarında vurgulayan araştırmacılar bu çizge türü ile trafik ışıklarını modellemiş ve probleme bu şekilde yaklaşarak olumlu sonuçlar elde etmişlerdir.

Bu çalışmada da, dört yönlü ve 12 akışlı bir trafik kavşağı ele alınarak optimum düzeyde modellenmesi ve trafik akışının kontrolü sağlanmıştır. Bu işlem gerçekleştirilirken çizge teorisinde faydalanılmış çizge türlerinden aralık çizgesi ve dairesel yay çizgesi kullanılarak trafik ışığı problemine çözüm sunulmuştur.

## 2. Problem Tanımı

Trafik, her ülkede artan araç sayısından dolayı karşılaşılan temel sorunlardan biridir. Bu nedenle, trafikte oluşan yoğunluğu giderebilmek için trafik kontrol algoritmasını en üst düzeye çıkarma ve optimize etme ihtiyacı doğmaktadır. Kentsel alanlarda trafiğin bir bölgesi, diğer bölgesini dolaylı olarak etkileyebilmektedir. Örneğin bir kırmızı ışıktaki araç oranı fazla olduğu gözlemlendiğinde, bu ışığı takip eden diğer kırmızı ışıkta da araç oranının fazla olacağı anlamına gelmektedir.

Yeni yollar eklemeyen karayolu altyapılarını değiştirmenin alternatifi olarak, sadece belirli bir bölgedeki trafik verileri kullanılarak, trafik çıktısını iyileştirmek mümkün olabilmektedir. Buradaki önemli olan husus doğru verilerin, doğru bir şekilde kullanılmasıdır. Bu nedenle etkin senkronizasyon stratejilerinin tasarlanması gerekmektedir. Çizge teorisinin özellikleri kullanılarak, trafik yönetim problemi matematiksel modelleme ile kolayca üstesinden gelebilecek bir hale dönüştürülebilmektedir. Şekil 1'de çalışmada modellenen 12 akışlı (akış bileşenli) trafik kavşağı görülmektedir.



Şekil 1. 12 akışlı trafik kavşağı

Şekil 1'deki 12 akışlı trafik kavşağında, araçlar sola dönme ve sağa dönme gibi belirli hareketler yapılmaktadır. Her bir araç bir akış bileşenini temsil etmektedir. Oklar trafik akışlarını temsil etmekte ve akışların yönlerini göstermektedir. Çakışma olmadan bir kavşakta aynı anda hareket eden trafik akışları uyumlu olarak değerlendirilmektedir. Örneğin Şekil 1'de (a) akış bileşeni ile (b) akış bileşeni uyumlu akışlardır. Fakat (e) akış bileşeni ile (h) akış bileşeni arasında bir uyum söz konusu değildir.



Şekil 1'deki modelde hangi akış bileşen(ler)inin hangi akış bileşen(ler)i birlikte hareket edebileceğine karar vermek zor bir seçim sürecidir. Çünkü verilecek bu karar önemli sorunlara yol açabilmektedir. Örneğin, trafikte bekleme sürelerinin artması, trafik sıkışıklığının ve olası trafik kazalarının artmasına neden olabilmektedir.

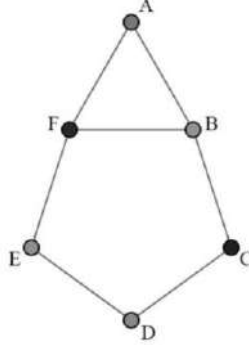
Bahsedilen bu nedenlerden dolayı trafik ışığı düzenlemesi önemli ve çözülmesi gereken problemlerden biridir. Bu çalışmada da şehir içi ulaşımın daha seri olmasını, emniyetli hale gelmesini ve mevcut yol ağının en verimli şekilde kullanılmasını sağlamak ve trafikte kalma süresinin en az seviyeye indirgenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla dairesel yay çizge teorisi kullanılarak problem modellenmiş ve optimum sonuç elde edilmeye çalışılmıştır. Bu nedenle mevcut probleme özgü bir örnek kavşak modeli ele alınmış ve problemin nasıl modellenebileceği ve çözülebileceği açıklanmıştır.

### 3. Yöntem

Bu çalışmada, kavşak noktalarında bulunan trafik ışıklarının çizge teorisi ile optimize edilmesi sağlanmaktadır. Çizgeler, bilgisayar dünyasında bulunan ve gerçek hayatta çeşitli sebeplerle karşılaşılan yapıları temsil etmek amacıyla kullanılan şekillerdir [9]. Bu probleme yönelik en sık kullanılan çizge çeşitleri aralık çizgeleri ve dairesel yay çizgeleridir. Bu çizge çeşitleri gerçek dünya problemlerinde bir takım görevlerin hiçbir zaman aynı anda yapılamayacağı zamanlarda kullanılmaktadırlar. Trafik kavşaklarında bulunan trafik ışıklarının da çalışma prensibinde çakışmaların önlenmesi ve her bir akışın sağlanması dairesel yay çizgelerine örnektir. Yapılan çalışmada da kavşak noktalarındaki trafik ışık sistemlerinin çözümünde kullanılan dairesel yay çizgesi kullanılmıştır.

#### 3.1 Çizgeler

Bir çizgenin genel gösterimi  $G = (V, E)$  şeklindedir. Bu ifadede  $V$  düğümler kümesi  $E$  ise kenarlar kümesini yani düğümlerin birbirleri ile ilişkisini ifade etmektedir. Şekil 2'de bir çizge modeli görülmektedir.



Şekil 2. Çizge örneği

Şekil 2'deki çizgede  $V$  sayısı 6,  $E$  sayısı da 7 olduğundan çizge  $G=(6,7)$  şeklinde formüle edilmektedir.

##### 3.1.1 Aralık çizgesi

Bir çizgi üzerinde kesişen aralıkları gösteren çizgeye aralık çizgesi denir. Aralık çizgeleri, gerçek dünya problemlerini modellemek için kullanılan en kullanışlı matematiksel yapılardan biridir. Öncelikle her biri kesin başlangıç ve bitiş zamanı olan bir dizi görevi ele almaktadır. Art arda çalışan işlemlerin, bu görevleri yerine getirmeleri aralık çizgesi ile ifade edilebilmektedir. Ancak, art arda çalışan bu işlemler, hiçbir zaman aynı anda görev yapmayacak şekilde tasarlanmalıdır. Bu durumu modellemek için her bir görevin tepe noktası ile temsil edilmesi gerekmektedir. Bir kenara karşılık gelen görevlerin zamanla çakıştığı durumlarda iki köşenin bağlandığı bir çizge oluşturulmalıdır.

Trafik kavşaklarında bulunan trafik ışıklarının çalışma prensibi aralık çizgelerine benzemektedir. Bir çizgenin aralık çizgesi olup olmadığına karar vermek için aşağıdaki yöntem kullanılmalıdır.

Örneğin  $G = (V, E)$  çizgesi ele alındığında,

$$V = \{1,2,3,4,5,6,7\} \quad (1)$$

$$E = \{\{1,2,3\}, \{2,3,4\}, \{4,5\}, \{5,6,7\}\} \quad (2)$$

$G$  çizgesinin maksimum hizipleri  $K_1=\{1,2,3\}$ ,  $K_2=\{2,3,4\}$ ,  $K_3=\{4,5\}$ ,  $K_4=\{5,6,7\}$  ve maksimal-uç nokta tepe insidans matrisi Şekil 3'te gösterilmektedir.

$$\mathbf{K} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} \mathbf{K} = 123 \\ \mathbf{K} = 234 \\ \mathbf{K} = 45 \\ \mathbf{K} = 567 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Şekil 3.  $G$  çizgesinin maksimal-uç nokta tepe insidans matrisi

Örneğin  $H = (V, E)$  çizgesi ele alındığında,

$$V = \{1,2,3,4\} \quad (1)$$

$$E = \{\{1,2\}, \{2,3\}, \{3,4\}, \{1,4\}\} \quad (2)$$

$H$  çizgesinin maksimum hizipleri  $K_1=\{1,2\}$ ,  $K_2=\{2,3\}$ ,  $K_3=\{3,4\}$ ,  $K_4=\{1,4\}$  ve maksimal-uç nokta tepe insidans matrisi Şekil 4'te gösterilmektedir.

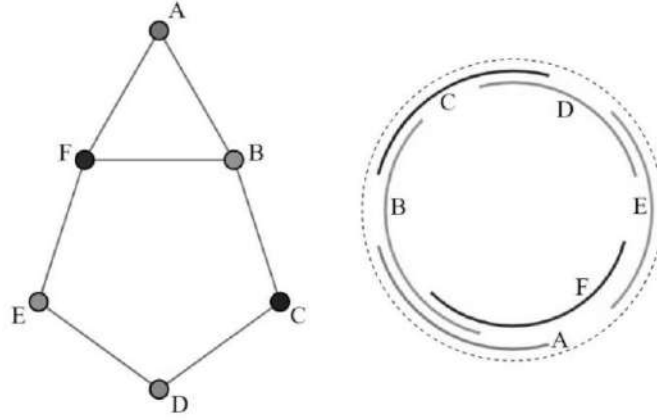
$$\mathbf{K} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} \mathbf{K} = 12 \\ \mathbf{K} = 23 \\ \mathbf{K} = 34 \\ \mathbf{K} = 14 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Şekil 4.  $H$  çizgesinin maksimal-uç nokta tepe insidans matrisi

Bir çizgenin aralık çizgesi olması için maksimal uç nokta tepe insidans matrisinin, hem satırlar hem sütunlar için ardışık 1'lerin olması gerekir [10]. Şekil 3'te gösterilen  $G$  çizgesinin maksimal-uç tepe insidans matrisinde 1'lerin sıralı bir düzende geldiği için  $G$  çizgesi aralık çizgesidir. Fakat Şekil 4'te gösterilen  $H$  çizgesinin maksimal-uç tepe insidans matrisinde 1'ler sıralı bir düzende gelmediği için  $H$  çizgesi aralık çizgesi olarak ifade edilmemektedir.

### 3.1.2 Dairesel yay çizgesi

$G$  çizgesi, bir daire üzerindeki bir dizi yay şeklinde kesişim çizgesi ise bu çizge dairese yay çizgesi olarak ifade edilmektedir. Bu durumda, her  $G$  tepe noktası için bir yay bulunmakta ve buna karşılık gelen yayların kesişimi ile  $G$ 'de iki köşe bitişiktir [11]. Bu çizge sınıfını tanımak için doğrusal bir zaman sınırı verilmektedir.  $G$  sınıfın bir üyesi olduğunda, algoritma bunu gerçekleştiren bir dizi yay şeklinde bir sertifika vermektedir. Şekil 5'te bir çizgenin dairese yay çizgesi olarak gösterimi verilmektedir. Burada her düğüm (A, B, C, D, E, F) bir dizi dairese yay çizgesinde bir yaya karşılık gelmektedir. Ayrıca her yayın kesişmesi için birbirleri ile ilişkisi olması gerekmektedir.

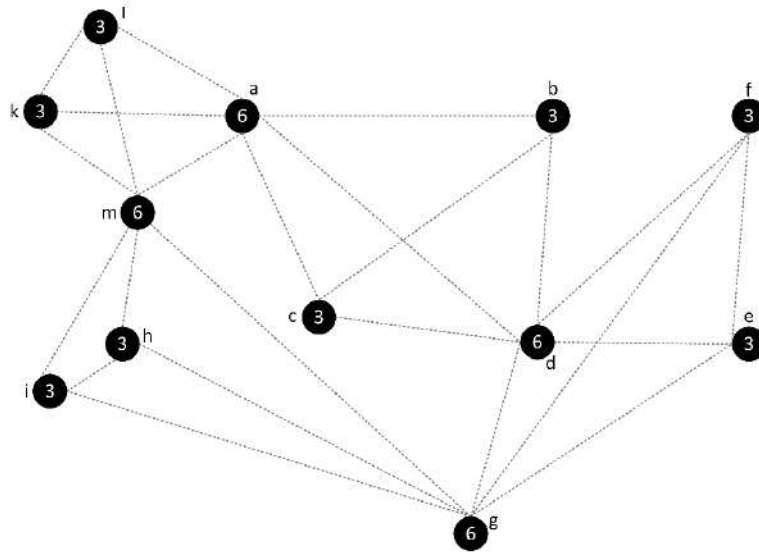


Şekil 5. Dairesel yay çizgesi örneği

#### 4. Deneysel Çalışma

Bu çalışmada, trafik ışığı senkronizasyonunu optimum seviyeye ulaştırmak amacıyla 12 akışlı bir kavşak üzerinde çizge teorisi kullanılmıştır. Öncelikle Şekil 1’de verilen kavşak, bir çizgeye olarak modellenmiştir. Daha sonra oluşturulan çizge üzerinden maksimum hizip sayıları bulunmuş ve dairesel yay çizgesi oluşturulmuştur. Son olarak ise aralık çizgesi oluşturulmuş ve 4 adet yeşil ışık çalışma durumu elde edilmiştir. Elde edilen sonucun aralık çizgesi Şekil 8’de yer verilmiştir.

Şekil 1’de gösterilen 12 akış bileşeninden oluşan kavşak öncelikle çizge olarak modellenmiştir. Bu modele ilişkin çizge Şekil 6’da gösterilmektedir.



Şekil 6. Şekil 1’den elde edilmiş çizge

Şekil 6’daki çizgede her bir akış bir düğüm ile gösterilmiştir ve 12 akış bileşenini temsil eden 12 adet düğüm bulunmaktadır. Düğümlerin üzerindeki sayılar, düğümlerin derecelerini göstermektedir. Örneğin (a) düğümünün üzerinde 6 sayısı yer almaktadır. Yani (a) düğümü, kendisi hariç diğer düğümlerle 6 adet komşuluğu bulunmaktadır. Uyumlu olan akışlar ise hatlar ile birleştirilmiştir. Örneğin (a), (k), (l), (m) akışları birbirleri ile uyumludur ve bu düğümler, kenarlar ile birleştirilmiştir. Böylece kavşağı temsil eden çizge oluşturulmuştur.

Şekil 6’da verilen çizgeden yararlanılarak maksimum hizip sayılarının öncelikle elde edilmesi gerekmektedir. Maksimum hizip sayıları hesaplanırken Algoritma 1’deki sözde koddan faydalanılmıştır.

**Algoritma 1:** Maksimum hizipleri bul

```

FUNCTION Hizipleribul(i,l,s)
  FOR each j:range(i + 1, n - (s - l) + 1)
    IF çizgenin derecesi yeterli ise
      THEN tepe noktası ekle
      IF Call Hizipkontrolü(l + 1) #Alt kümenin bir hizip oluşturduğunu kontrol et
        THEN
          IF (l < s)
            THEN Call Hizipleribul(j,l + 1,s)
          ELSE
            Yaz(l+1)
          End IF
        End IF
      End IF
    End FOR
  End FUNCTION

```

Algoritma 1’deki sözde koddan faydalanılarak bulunan hizip sayılarına Tablo 1’de yer verilmiştir.

**Tablo 1.** Şekil 6’daki çizgede yararlanılarak bulunan maksimum hizip sayıları

Dörtlü Maksimum Hizipler	Üçlü Maksimum Hizipler	İkili Maksimum Hizipler
a, b, c, d	a, b, c      d, e, g	a, b    c, d      g, i
d, e, f, g	a, b, d      d, f, g	a, c    d, e      g, m
i, h, g, m	a, c, d      e, f, g	a, d    d, f      h, i
a, k, l, m	a, k, l      g, h, i	a, k    d, g      h, m
	a, k, m      g, h, m	a, l    e, f      i, m
	a, l, m      g, i, m	a, m    e, g      k, l
	b, c, d      h, i, m	b, c    f, g      k, m
	d, e, f      k, l, m	b, d    g, h      l, m

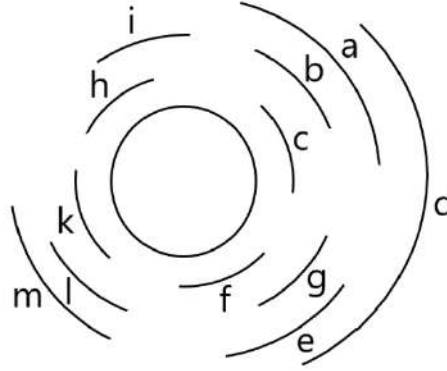
Tablo 1’de görüldüğü üzere maksimum hizipler en çok dörtlü en az ise ikili olarak tespit edilmiştir. Daha sonra hizipler, sayıları dörtlü, üçlü ve ikili olarak kategorize edilmiştir. Böylece 4 adet dörtlü maksimum hizip, 16 adet üçlü maksimum hizip ve 24 adet ikili maksimum hizip elde edilmiştir.

Bir sonraki aşamada, Tablo 1’de verilen hizipler kullanılarak, maksimal-uç nokta tepe insidans matrisi oluşturulmuş ve maksimum hizipler elde edilmiştir. Maksimal-uç nokta tepe insidans matrisi oluşturulurken (a), (b), (c), (d) ve (d), (e), (f), (g) dörtlü maksimum hizipleri, (k), (l), (m) üçlü maksimum hizipleri ve (h), (e) ikili maksimum hizipleri kullanılmıştır. Oluşturulan matrise Tablo 2’de yer verilmiştir.

**Tablo 2.** Maksimal-uç nokta tepe insidans matrisi

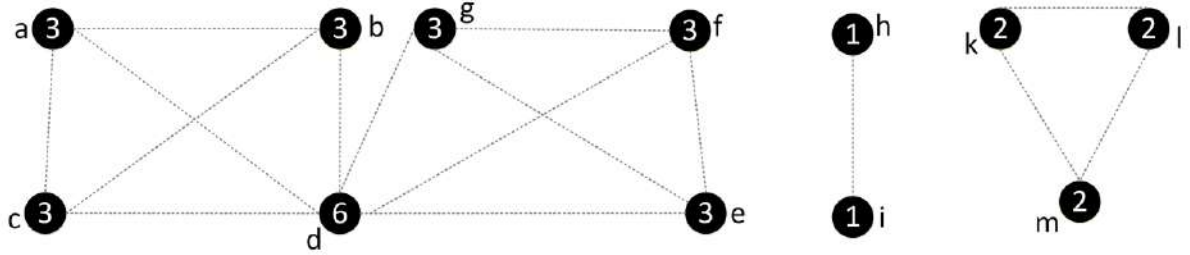
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	k	l	m
a	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
d	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
k	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1

Tablo 2’den görüldüğü üzere, tüm satırlarda elde edilen 1’lerin sıralı olması sağlanacak şekilde hizipler yerleştirilmiştir. Bu aşamadan sonra dairesel yay çizgesi oluşturulmuştur. Dairesel yay çizgesi, satırlarda bulunan maksimum hizipler göre oluşturulabilmektedir. Oluşturulan dairesel yay çizgesine Şekil 7’de yer verilmiştir.



Şekil 7. Dairesel yay çizgesi

Dairesel yay çizgesinde birbirleri ile aynı anda hareket edecek akışlar, birbirlerini kesecek şekilde daire üstüne yerleştirilmektedir. Şekil 7’de bulunan örnekte (k) ve (l) akışları aynı anda hareket edeceklerinden dolayı kesiktirilmişlerdir. Şekil 7’de verilen dairessel yay çizgesi kullanılarak bir sonraki aşamada aralık çizgesi oluşturulmuştur. Oluşturulan aralık çizgesi Şekil 8’de görülmektedir.



Şekil 8. Aralık çizgesi

Şekil 8’de oluşturulan aralık çizgesine göre toplamda 4 adet yeşil ışık ataması yapılmıştır. Birinci yeşil ışık ataması (a), (b), (c), (d) akışlarını içermektedir. İkinci yeşil ışık ataması (d), (g), (f), (e) akışlarını içermektedir. Burada dikkat edilirse birinci ve ikinci yeşil ışık atamalarının kesişimin de (d) akışı bulunmaktadır. Buradan anlaşılacağı üzere birinci yeşil ışık ataması tamamlandıktan sonra (d) akışının yeşil ışık olarak yanması devam etmekte ve kırmızıya dönmeye gerek kalmamaktadır. Böylece, ikinci yeşil ışık ataması ile (d) akışı hareketine devam edebilmektedir. Üçüncü yeşil ışık ataması ise (h) ve (i) akışlarını içermektedir. Son olarak dördüncü yeşil ışık ataması ise (k), (l) ve (m) akışlarını içermektedir. Bu durumda trafik ışıklarının optimum olarak çalışma prensibi elde edilmiş olacaktır.

## 5. Sonuçlar ve Değerlendirme

Bu çalışmada trafik akışının daha seri olmasını, emniyetli hale gelmesini ve mevcut yol ağının en verimli şekilde kullanılmasını sağlamak ve trafikte kalma süresinin en aza indirgenmesi sağlamak amacı ile bir trafik kavşağı modellenmesi yapılmıştır. Yapılan modellemede yeni yollar eklemeyen, var olan veriler kullanılarak trafik akışlarının dört yönlü yol kavşağında sorunsuz ve verimli bir şekilde düzenlenmesi sağlanmıştır. Modellemenin dairessel yay çizge teorisi kullanılarak optimum düzeyde gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Tekniğin geçerliliğini ve çizgeler ile uygulanabilirliğini göstermek için dört yönlü ve 12 akışlı bir trafik kavşağı örneği üzerinde model geliştirilmiş çalışma yapılmıştır.

Örnekte belirli bir kavşak için çözüm ortaya çıkarılmasına rağmen bu fikir genişletilebilir niteliktedir. Yapılan çalışmaya alternatif olarak, yol düzenleri, trafik hacimleri ve benzer parametreleri farklılık gösteren kavşaklar için

de dairesel yay çizgesi kullanılarak optimum çözüm elde edilebilmektedir. Ayrıca bir kavşakta oluşan yoğunluğun bağlantılı diğer kavşakları da etkilemesi olası bir sorundur. Akış yoğunluğunun az olduğu bölgelerde trafik ışığı sürelerini de göz önüne alarak optimum model oluşturulabilir.

Matematiksel bir yöntem olan çizge teorisini bilgisayar bilimlerinde kullanarak bir bölgenin trafik akışlarını optimum düzeyde modelleyebilen algoritmalar tasarlanabilir. Oluşturulan algoritmalar ile bir yazılım ürünü geliştirilerek farklı parametreler de trafik akışları ve kavşak modelleri belirlenerek optimum bir çözüme ulaşılabılır. Böylece problemin çözümü evrensel bir çözüme ulaştırılabilir. Bir şehirdeki tüm kavşakların bir araya getirilerek büyük ölçekli bir şehir içi ulaşım sorununun çizge modellemesi ile kolayca çözülmesi mümkün olabilecektir.

### Kaynaklar

- [1] Robert C. Alex W. Swarm optimization methods for traffic light cycle control. Applied Mathematics 221 Final Project. August 31, 2017.
- [2] Little, J. D., Murty, K. G., Sweeney, D. W., & Karel, C. (1963). An algorithm for the traveling salesman problem. Oper. Res., 11(6), 972-989.
- [3] Ramesh, T. (1981). Traveling purchaser problem. Opsearch, 18(1-3), 78-91.
- [4] Assadian, M., Farsangi, M. M., & Nezamabadi-pour, H. (2010). GCPSO in cooperation with graph theory to distribution network reconfiguration for energy saving. Energy Convers. Manage., 51(3), 418-427.
- [5] Tzatchkov, V. G., Alcocer-Yamanaka, V. H., & Bourguett Ortíz, V. (2008). Graph theory based algorithms for water distribution network sectorization projects. In Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006 (pp. 1-15).
- [6] Ding, L., & Guan, Z. H. (2008). Modeling wireless sensor networks using random graph theory. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 387(12), 3008-3016.
- [7] Lewchalermvongs, C., (2018). Origami and Graph Theory.
- [8] Marpaung F., Ritonga A., Application Of Graph Coloring For Optimization Of Traffic Light Setting in Medan. Journal Of Physics. Conference Series (Vol. 1188, No. 1, p. 012012). IOP Publishing.
- [9] Chanun L., Applying Graph Theory to Problems in Traffic Control. Mahidol University International College March 21.
- [10] Hong S., Combinatorial And Computation. Kore Cumhuriyeti: World Scientific, 2000.
- [11] Lin M. C., Szwarcfiter J. L., Characterizations and Recognition of Circular-Arc Graphs and Subclasses: A Survey. Discrete Math. 2009;309(18): 5618-5635
- [12] Gardi, F. (2007). The Roberts Characterization of Proper and Unit Interval Graphs. Discrete Math., 307(22), 2906-2908.
- [13] Tanveer S., Application of Graph Theory for Scheduling Of Traffic Lights. International Journal of Mathematics **and Computer Applications Research** 2017; 7(5): 21-24.
- [14] Roberts F. S., Some applications of graph theory. Combinatorial & Computational Mathematics: Present and Future: Pohang, the Republic of Korea, 15-17 February 2000, 210.
- [15] Setiawan, E. K., Budayasa, I. K. (2017). Application of Graph Theory Concept for Traffic Light Control at Crossroad. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1867, No. 1, p. 020054). AIP Publishing LLC.
- [16] Baruah A. K., Baruah N., Signal Groups of Compatible Graph in Traffic Control Problems. International Journal of Advanced Networking and Applications; 2012;04(01):1473-1480.
- [17] Baruah A. K., Traffic Control Problems Using Graph Connectivity. Int. J. Comput. Appl. 2014;86(11).
- [18] Sharma A. Pandey R., Optimization of Traffic Signal System. Journal of International Academy of Physical Sciences 2011;15(04): 479-486.
- [19] Kuplinsky S. Kuplinsky J., The Scheduling Of Traffic Lights. UMAP/ILAP Modules 2006.
- [20] Firouzian S. Jouybar M.N., Coloring Fuzzy Graphs And Traffic Light Problem. The Journal of Mathematics and Computer Science (TJMCS) 2011;02(03):431-435



## JPEG Algoritmasının Performansını İyileştirmek İçin Bir Yöntem

Fırat ARTUĞER<sup>1\*</sup>, Fatih ÖZKAYNAK<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Yazılım Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

\*<sup>1</sup> firartugur@munzur.edu.tr, <sup>2</sup> ozkaynak@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 01/06/2021;

Kabul/Accepted: 11/02/2022)

**Öz:** JPEG, görüntü sıkıştırma için en yaygın kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir. JPEG görüntü sıkıştırma yönteminde kuantalama adımında kullanılan kuantalama tablosu önemli bir rol oynamaktadır. Kuantalama tablosu görüntünün kalitesini ve sıkıştırma miktarını önemli ölçüde belirler. Bu nedenle kuantalama tablosunun oluşturulması bir optimizasyon problemi olarak görülmektedir. Bu makalede daha etkili kuantalama tabloları oluşturulabilmesi için oran-bozulma yaklaşımı, insan görsel sistemi yaklaşımı ve meta sezgisel yaklaşımlar açıklanmıştır. Daha sonra JPEG kuantalama tablosundaki her bir değer yerine, o değer komşuları ortalaması alınarak yeni bir tablo elde edilmiştir. Farklı kalite faktörleri kullanılarak 5 farklı görüntü üzerinden sonuçlar test edilmiştir. Önerilen tablonun, standart JPEG tablosuna göre görüntülerin kalitesinden neredeyse ödün vermeden sıkıştırma oranını %3,52 artırdığı tespit edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Görüntü Sıkıştırma, JPEG, Kuantalama Tablosu.

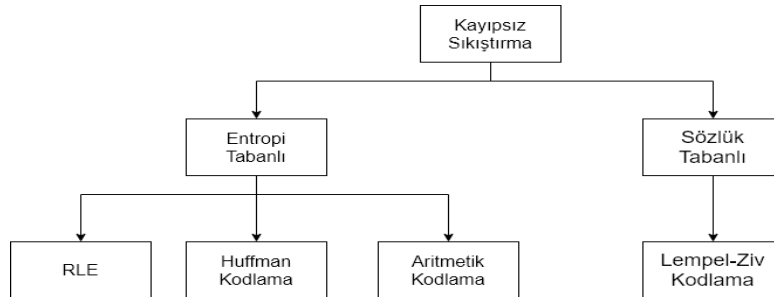
### A Method to Improve the Performance of JPEG Algorithm

**Abstract:** JPEG is one of the most widely used methods for image compression. In the JPEG image compression method, the quantization table used in the quantization step plays an important role. The quantization table significantly determines the quality of the image and the amount of compression. Therefore, the creation of the quantization table is seen as an optimization problem. In this article, rate-distortion approach, human visual system approach and meta-heuristic approaches have been explained in order to create more effective quantization tables. Then, a new table was obtained by taking the average of the neighbors of that value instead of each value in the JPEG quantization table. The results were tested on 5 different images using different quality factors. It has been found that the proposed table increases the compression ratio by 3.52% compared to the standard JPEG table, almost without sacrificing the quality of the images.

**Key words:** Image Compression, JPEG, Quantization Table.

### 1. Giriş

Görüntü Sıkıştırma, bir görüntüyü temsil etmek için gereken veri miktarını azaltma işlemidir. Görüntü sıkıştırma tekniği, gereksiz bitlerin daha az bit ile değiştirildiği veri sıkıştırma işlemidir. Görüntü sıkıştırmanın asıl amacı, görüntünün ağda etkin biçimde iletilmesi için fazlalığı ortadan kaldırarak görüntü dosyasının boyutunu azaltmaktır. Görüntü sıkıştırma teknikleri genel olarak Kayıpsız ve Kayıplı sıkıştırma olarak sınıflandırılır. Kayıpsız sıkıştırma yönteminde sıkıştırma oranı düşüktür, ancak hiçbir veri kaybolmaz. Kayıpsız sıkıştırma tekniği Şekil 1'de gösterildiği gibi sınıflandırılabilir.

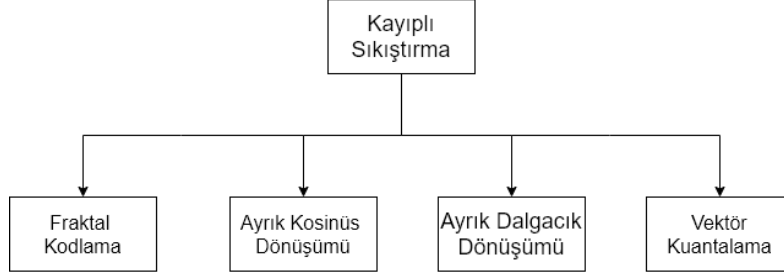


Şekil 1. Kayıpsız veri sıkıştırma sınıflandırması

\* Sorumlu yazar: [firartugur@munzur.edu.tr](mailto:firartugur@munzur.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-4096-0458, <sup>2</sup> 0000-0003-1292-8490



Kayıplı sıkıştırma yönteminde bir miktar veri kaybedilir ve sıkıştırılmış görüntü orijinal görüntüye yakındır. Kayıpsız sıkıştırma tekniği ile karşılaştırıldığında kayıplı sıkıştırma tekniği kullanılarak daha yüksek sıkıştırma oranı elde edilir. Kayıplı sıkıştırma tekniği Şekil 2'de gösterildiği gibi sınıflandırılabilir[1].



Şekil 2. Kayıplı Veri Sıkıştırma Sınıflandırması

JPEG yaygın olarak kullanılan kayıplı sıkıştırma tekniğidir. Kuantalama işlemi, JPEG görüntü sıkıştırma algoritmasında yer alan adımlar arasında önemli bir rol oynar. Kuantalama işleminde kullanılan kuantalama tablosu, kodlanan görüntünün kalitesini belirler ve ayrıca görüntünün sıkıştırılması gereken miktarı da kontrol eder.

Etkili kuantalama tabloları geliştirmek için son yıllarda yapılan bazı çalışmalar şunlardır: Ayrık kosinüs dönüşümü tabanlı gri tonlamalı görüntüler üzerinde psiko-görsel bir hata eşiği araştırılmıştır. Yeni kuantalama tablosu, belirli eşiğin psiko-görsel hataya göre ayarlanmasıyla oluşturulmuştur[2]. Kuantalama tablosunu optimize etmek için algısal görüntü kalitesi değerlendirme yöntemi kullanıldı. Bu yöntem kullanılarak oluşturulan ölçüm tablosu, standart ölçüm tablosu kullanılarak oluşturulan görüntüden daha iyi kalitede sıkıştırılmış görüntü üretmiştir[3]. Tıbbi görüntülerde daha yüksek sıkıştırma performansı elde etmek için genetik algoritma (GA) kullanıldı. JPEG temel algoritması kullanılarak üretilen ölçüm tablosuna kıyasla daha iyi kodlanmış bir görüntü elde edilmiştir[4]. Farklı kuantalama tabloları oluşturmak için iki amaçlı bir evrimsel algoritma geliştirildi[5]. Farklı görüntüler için kuantalama tabloları elde etmek için kültürel temelli çok amaçlı parçacık sürü optimizasyonu modeli önerildi. Bu çalışmanın temel amacı, en iyi görüntü sıkıştırma ve kalite değişimini sağlayan tabloyu oluşturmaktır[6]. Farklı görüntülerle en uygun kuantalama tablosunu belirlemek için ateş böceği algoritması kullanıldı[7]. Optimal kuantalama tablosunu bulmak için Diferansiyel Evrim Algoritması önerildi. Genetik algoritma ve Diferansiyel Evrim Algoritması arasında kapsamlı bir performans analizi gerçekleştirildi[8]. Genetik algoritmada(GA) kullanılan uygunluk değerini yaklaşık olarak belirlemek için bir problem yaklaşımı vekil modeli önerildi. Önerilen yaklaşım, GA 'nın hesaplama süresini, performansında herhangi bir kayıp olmadan azaltmıştır[9]. Tüm frekans bantları için oran bozulma maliyetlerini optimize ederek JPEG için uygun bir fark bazlı kuantalama tablosu üretme yöntemi önerilmiştir[10]. Tek bir görüntüyü veya bir temsili görüntü koleksiyonunu optimize etmek yerine, benzetilmiş tavlama tekniği, her doku kategorisi için optimal bir niceleme tablosu aramak için doku mozaik görüntülerine uygulanır. Bu doku özelliklerini öğrenmek ve yeni görüntünün doku dağılımını tahmin etmek için önceden eğitilmiş VGG-16 CNN modelini kullanılmıştır. Daha sonra görüntüye özgü optimum niceleme tablosu oluşturmak için optimum doku tabloları birleştirilmiştir[11]. Standartlara uygun bir şekilde görüntüye uyarlanabilir bir kuantalama tablosu oluşturmak için bir Evrimsel Sinir Ağı modeli kullanılmıştır[12]. Standart JPEG kodlayıcı ve kod çözücüyle tam uyumlu, görüntüye özgü en iyi kuantalama tabloları için derin bir sinir ağı önerilmiştir[13].

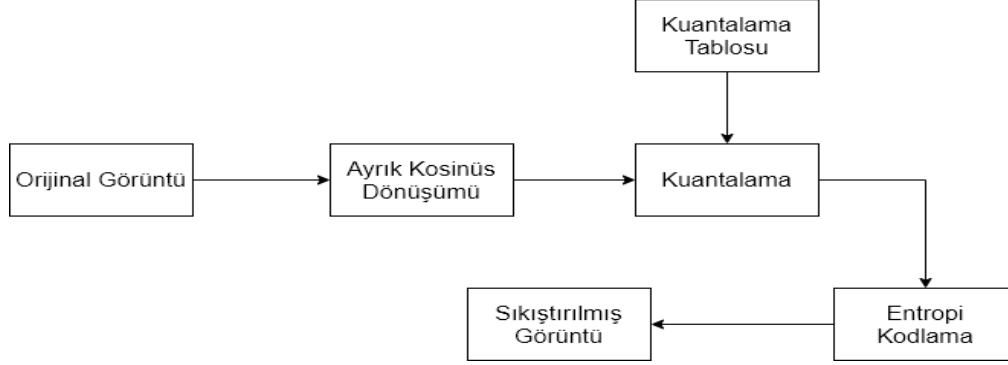
Çalışmanın 2. bölümünde JPEG görüntü sıkıştırma algoritması, 3. bölümünde farklı kuantalama tablolarının oluşturulma yöntemleri, 4. bölümünde önerilen yöntem açıklanmıştır. 5. bölümde analiz sonuçları ve 6. bölümde ise sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

## 2. JPEG Algoritması

JPEG standardı[14], Birleşmiş Fotoğraf Uzmanları Grubu anlamına gelir ve aynı zamanda JPEG olarak da adlandırılan iyi bilinen dijital görüntü sıkıştırma standardının geliştirilmesinden sorumlu olan, ISO / IEC Ortak Teknik Komitesinin iki alt grubundan biridir. JPEG kodlama, hareketsiz görüntülerin gösterimi için en yaygın standarttır. JPEG, günümüzde yaygın olarak kullanılan ve çok esnek bir dijital fotoğraf sıkıştırma standardıdır. Bu çalışmada kayıplı sıkıştırma yöntemlerinden JPEG kodlama ele alınmıştır. Esasen kayıplı bir yöntem olduğu kadar kayıpsız sıkıştırma yapan versiyonları da bulunmaktadır[15]. Kayıplı sıkıştırma da kalite faktörüne bağlı olarak

görüntünün sıkıştırma oranı ve bozulma miktarı istenilen seviyede ayarlanabilmektedir. JPEG sıkıştırma yöntemi, Şekil 3'de gösterildiği gibi aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır.

1. Öncelikle bir görüntü YCbCr renk uzayına dönüştürülür ve 8x8'lik bloklara ayrılır.
2. Her bloğa Ayırık Kosinüs Dönüşümü(AKD) uygulanır.
3. AKD katsayıları bazı kuantalama kurallarına göre kuantize edilir.
4. Entropi kodlama yöntemi gerçekleştirilir.



Şekil 3. JPEG Algoritmasının Adımları

## 2.1. JPEG Kodlamada Kuantalama

Kuantalama adımı ile verideki fazlalıklar atılır kayıplar burada meydana gelir. Dönüştürülmüş görüntü AKD matrisini kullanan kuantalama matrisine bölünerek kuantalamayı elde eder. Ortaya çıkan matrisin değerleri daha sonra yuvarlanır. Kuantalama katsayıları denklem 1 ile, ters dönüşüm işlemi ise denklem 2 ile elde edilebilir.

$$F(u, v)_{kuantalama} = \text{round} \left( \frac{F(u, v)}{Q(u, v)} \right) \quad (1)$$

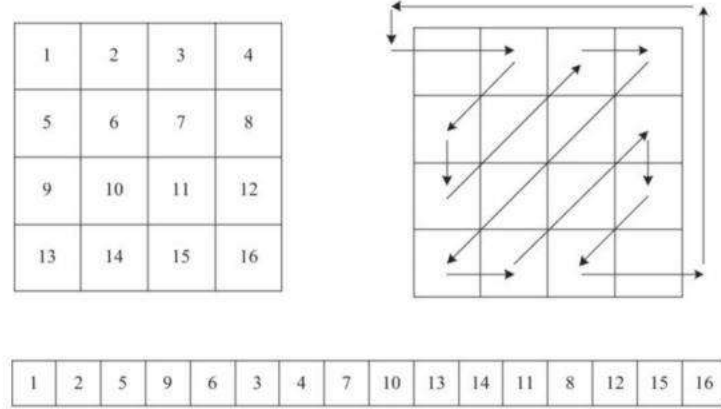
$$F(u, v)_{Ters\ kuantalama} = F(u, v)_{kuantalama} * Q(u, v) \quad (2)$$

Kuantalama, daha az önemli olan yüksek frekanslı AKD katsayılarının çoğunu sıfıra indirmeyi amaçlamaktadır[16]. Sıfırların sayısı ne kadar fazla olursa görüntünün sıkıştırma oranı o kadar yüksek olacaktır. JPEG algoritmasında kullanılan kuantalama tablosu Tablo 1 'de verilmiştir.

Tablo 1. JPEG Kuantalama tablosu

16	11	10	16	24	40	51	61
12	12	14	19	26	58	60	55
14	13	16	24	40	57	69	56
14	17	22	29	51	87	80	62
18	22	37	56	68	109	103	77
24	35	55	64	81	104	113	92
49	64	78	87	103	121	120	101
72	92	95	98	112	100	103	99

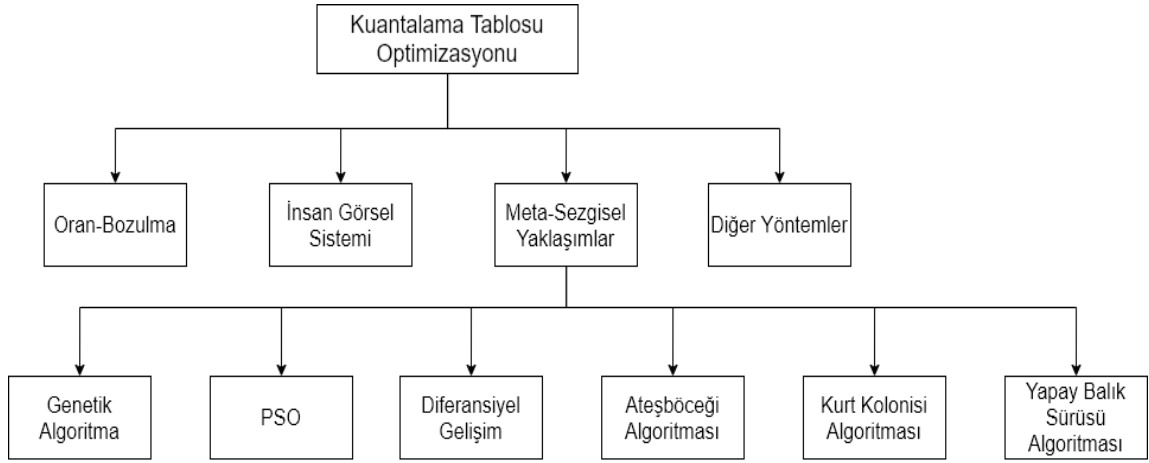
Kuantalama adımından sonra, Şekil 4' de gösterildiği gibi Zikzak tarama yöntemi kullanılarak değerler bir diziye dönüştürülür. Zikzak dizisinde, önce düşük frekanslı (genellikle daha yüksek değerler) değerler, daha sonra yüksek frekanslı değerler(genel olarak sıfır veya sıfıra yakın değerler) kodlanır. Zikzak taramadan sonra entropi kodlama adımıyla bitler kodlanır ve görüntü sıkıştırma işlemi tamamlanmış olur.



Şekil 4. Zig-zag tarama

### 3. Farklı Kuantalama Tabloları Oluşturma Yöntemleri

Sıkıştırılmış görüntünün kalitesi, JPEG kuantalama adımında kullanılan kuantalama tablosuyla belirlenir. Kuantalama tablosu optimizasyonunda yer alan yaklaşımlar, Şekil 5 'de gösterildiği gibi geniş bir şekilde sınıflandırılır. Bu sınıflandırma dışında daha farklı yöntemler de kullanılabilir[17].



Şekil 5. Kuantalama tablosu üretmek için farklı yaklaşımlar

#### 3.1. Oran-Bozulma Yaklaşımı

Oran-bozulma yaklaşımı, görüntü ve video sıkıştırma algoritmalarının optimize edilmesinde önemli bir rol oynar[18]. Düşük bit değerleri ve yüksek bozulmaya karşılık gelen bir kuantalama tablosundan başlayarak ölçüm tablosunun bir girişi güncellenir. Böylece her adımda, bozulmadaki düşüşün bit oranındaki artışa oranı yaklaşık olarak en üst düzeye çıkarılır[19].

Oran-bozulma metodunu kullanarak niceleme tablosunu oluşturmak için aşağıdaki adımlar kullanılmaktadır.

1. Yüksek bozulma ve düşük bit değerine karşılık gelen bir ölçüm tablosu alınır.
2. Her adımda bir kuantalama tablosu girişi güncellenir.
3. Böylece bit oranı artar ve bozulma azalır.
4. Adım 2 ve 3, istenen bit oranı elde edilinceye kadar tekrar edilir.

### 3.2. İnsan Görsel Sistemi Yaklaşımı

İnsan Görsel Sisteminde, belirli bir bit oranı için optimum görsel kalite, JPEG algoritması için kuantalama tablosunu tasarlamak bir kılavuz olarak kullanılır. Bu nedenle, kuantalama tablosunun tasarımı, çeşitli Ayrık Kosinüs Dönüşümü frekanslarında meydana gelen kuantalama hatalarına bağlıdır. İnsan görsel sistemi yüksek frekanslı değerlere daha az hassastır. Bu nedenle sıkıştırmanın daha çok bu yüksek frekanslı değerlere uygulanması amaçlanmaktadır. Bu şekilde insan gözünün algılayamayacağı şekilde daha yüksek sıkıştırma oranları elde edilebilir. Kuantalama tablosunu oluşturmak için İnsan Görsel Sisteminde, Görüntüden Bağımsız Algısal Yaklaşım ve Görüntüye Bağlı Algısal Yaklaşım olmak üzere iki yaklaşım kullanılmaktadır[20].

### 3.3. Meta-Sezgisel Yaklaşımlar

JPEG temel algoritması için kuantalama tablosunun oluşturulması optimizasyon problemi olarak görülmektedir. Optimizasyon problemlerinin çoğu son yıllarda meta-sezgisel yaklaşımlar uygulanarak çözülmüştür. Meta-sezgisel yaklaşımlar, optimizasyon problemine en uygun çözümü sağlamak için doğayı taklit eder. Bu optimizasyon tekniklerini kuantalama tablosu üretme problemine kullanabilmek için, algoritmaları iyi analiz edip, gerekli parametreleri bu doğrultuda ayarlamak ve algoritmaları bu probleme göre uyarlamak gerekmektedir[7-8].

### 4. Önerilen Yöntem

JPEG algoritmasında kullanılan kuantalama tablosunun her bir değeri o değer komşularının ortalaması alınarak yeni bir tablo elde edilmiştir. Ortalamanın sonucu tam sayı çıkmadığında bir önceki veya bir sonraki değere yuvarlanmıştır. Örneğin standart JPEG tablosunda ilk değer komşuları 11 ve 12 değerleridir. Bu iki değer ortalaması 11.5 değeri 12 değerine yuvarlanır ve önerilen tablonun ilk değerine yazılır. Bu işlem tüm elemanlara uygulanarak tablo elde edilir. Elde edilen tablo Tablo 2 'de gösterilmektedir.

**Tablo 2.** Önerilen Tablo

12	13	14	18	27	44	54	53
14	13	14	20	35	46	58	59
13	15	18	26	40	64	63	62
16	18	25	38	56	74	80	71
20	27	39	50	74	91	95	86
34	41	54	70	85	106	105	97
53	64	75	86	100	107	110	104
71	77	89	98	100	112	106	102

### 5. Analiz Sonuçları

JPEG algoritmasında sıkıştırma ve bozulma oranı kalite faktörüne(Q) göre ayarlanabilmektedir[21]. Şekil 6 'da verilen görüntüler için 10, 20, 60 ve 100 kalite faktörleri kullanılarak sonuçlar test edilmiştir. Burada seçilen kalite faktörleri örnek olması açısından rastgele seçilmiştir. Ayrıca kalite faktörü 1 ile 100 arasında seçilebilmektedir. Kalite faktörü 100 dahi seçilse kayıplı sıkıştırma meydana gelmektedir.

Bu makalede görüntü sıkıştırma yönteminin başarısını değerlendirmek için iki temel ölçüt kullanılmıştır. Bunlardan ilki görüntünün sıkıştırma oranıdır. Sıkıştırma oranı aşağıdaki formül ile hesaplanabilir.

$$\text{Sıkıştırma oranı(SO)} = \text{Orijinal görüntünün boyutu} / \text{Sıkıştırılmış görüntünün boyutu}$$

Diğer başarı ölçütü ise sıkıştırılmış görüntünün ne kadar bozulduğunu test etmektir. Bunun için en çok kullanılan yöntemlerden biri olan Tepe sinyal-gürültü oranı(Peak signal-to-noise ratio-PSNR) yöntemi kullanılmıştır. PSNR değerini hesaplamak için denklem 3 kullanılabilir.

$$\text{PSNR} = e_{ms}^2 = (1 - NM) \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M E(u_{i,j} - u_{i,j}^*)^2 \quad (3)$$



Şekil 6. Orijinal Test Görüntüleri ve boyutları

4 farklı kalite faktörü için hem standart JPEG tablosu hem de önerilen tablo ile sıkıştırılmış Lena görüntüleri Şekil 7 'de verilmiştir. Analiz sonuçları ise Tablo 3 'de gösterilmektedir. Tablo 3'e bakıldığında kalite faktörü yükseldikçe sıkıştırma miktarının azalıp, görüntünün kalitesinin yani PSNR değerinin arttığı görülmektedir. Aynı şekilde kalite faktörü küçüldükçe sıkıştırma oranı artar ve PSNR değeri düşer. JPEG yöntemi ile bir görüntü sıkıştırıldığında, sıkıştırma oranı ve görüntü kalitesi arasındaki dengenin iyi sağlanması gerekmektedir. Buna kullanıcılar karar verebilmektedir. JPEG yönteminin en büyük avantajlarından birisi budur. Şekil 6'da verilen görüntülerin sıkıştırma sonuçlarının ortalamaları alındığında, önerilen tablonun PSNR değerinde %0,05 gibi ihmal edilebilecek bir düşüş ile sıkıştırma oranını %3,52 arttırdığı tespit edilmiştir.



Şekil 7. Sıkıştırılmış Görüntüler (JPEG kuantalama tablosu a: Q=10, b:Q=20, c:Q=60, d:Q=100) (Önerilen kuantalama tablosu e: Q=10, f:Q=20, g:Q=60, h:Q=100)

**Tablo 3.** Analiz Sonuçları

Orijinal Test Görüntüsü	Kalite Faktörü (Q)	JPEG			Önerilen		
		Boyut(kb)	SO	PSNR	Boyut(kb)	SO	PSNR
(a)	Q=10	12,7	36,37	30,98	12,4	37,25	31,04
	Q=20	17,6	26,25	32,41	17	27,17	32,37
	Q=60	35	13,2	34,25	33,8	13,66	34,19
	Q=100	439	1,05	50,56	439	1,05	50,56
(b)	Q=10	13,9	44,74	30,68	13,5	46,07	30,74
	Q=20	19,7	31,57	31,80	19,1	32,56	31,78
	Q=60	41,1	15,13	33,25	39,6	15,70	33,22
	Q=100	482	1,29	50,65	482	1,29	50,65
(c)	Q=10	29,9	21,80	29,59	28,1	23,20	29,55
	Q=20	44,4	14,68	30,38	42,1	15,48	30,30
	Q=60	87,1	7,48	32,30	84,2	7,74	32,22
	Q=100	580	1,12	50,86	580	1,12	50,86
(d)	Q=10	18,8	27,39	30,60	17,9	28,77	30,64
	Q=20	28,5	18,07	31,90	26,9	19,14	31,83
	Q=60	59,4	8,67	34,10	57,1	9,01	33,97
	Q=100	503	1,02	50,58	503	1,02	50,58
(e)	Q=10	16,3	39,93	31,75	16	40,68	31,95
	Q=20	21,6	30,13	34,24	20,9	31,14	34,21
	Q=60	39,8	16,35	37,53	38,7	16,82	37,41
	Q=100	397	1,63	50,65	397	1,63	50,65
<b>Ortalama</b>		<b>144,34</b>	<b>17,8935</b>	<b>29,543</b>	<b>143,415</b>	<b>18,525</b>	<b>29,528</b>
<b>Kazanç ve Kayıp Yüzdesi</b>						<b>+%3,52</b>	<b>-%0,05</b>

## 6. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, JPEG temel algoritmasında kuantalama tablosu oluşturmak için kullanılan çeşitli yaklaşımlar hakkında bir araştırma sunulmakta olup yeni bir kuantalama tablosu önerilmiştir. JPEG oran-bozulma yaklaşımı, insan görsel sistemi yaklaşımı ve meta-sezgisel yaklaşımlar gibi çeşitli yöntemler üzerinde bir analiz yapılmıştır. Günümüzde hala optimum çözüme ulaşılamamıştır ve çalışmalar her geçen gün artmaktadır. Bu yazıda, var olan kuantalama tablosundan basit bir yöntemle yeni bir tablo elde edilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Önerilen tablonun, standart JPEG tablosuna göre görüntülerin kalitesinden neredeyse ödün vermeden sıkıştırma oranını %3,52 arttırdığı tespit edilmiştir. Buda gösteriyor ki daha iyi kuantalama tabloları elde edilebilir. Özellikle yakın zamanda ortaya çıkan birçok yeni meta sezgisel algoritma bulunmaktadır. Bu algoritmalar kullanılarak oluşturulacak farklı kuantalama tablolarının daha iyi çözümler vereceği düşünülmektedir.

## Kaynaklar

- [1] B. V. Kumar, G.R. Karpagam and N. V. Rekha. Performance Analysis of Deterministic Centroid Initialization method for Partitional Algorithm in Image Block Clustering. Indian Journal of Science and Technology, Vol.8 (s7):63-73.
- [2] F. Ernawan, N. Suryana. A generic psycho visual error threshold for the quantization table generation on jpeg image compression. IEEE Signal Processing and its Applications Colloquium, pp. 39-43, 2013.
- [3] J. Yuebing. JPEG image compression using quantization table optimization based on perceptual image quality assessment, IEEE Signals, Systems and Computers Conference, New Jersey, NJ, USA, pp. 225- 229, 2011.
- [4] Y.G. Wu. GA-based dct quantization table design procedure for medical images, IEE P-Vis Image Sign, 151: 353-359, 2004.
- [5] B. Lazzerini, F. Marcelloni, M. Vecchio. A multi-objective evolutionary approach to image quality/compression ratio trade-off in jpeg baseline algorithm. Applied Soft Computing, 10:548-561, Elsevier, 2009.

- [6] H. Ma, Q. Zhang. Research on cultural-based multi objective particle swarm optimization in image compression quality assessment. *Optik* 124, 957– 961, Elsevier, 2012.
- [7] M. Tuba, N. Bacanin. JPEG Quantization Tables Selection by the Firefly Algorithm. *International conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS)*, IEEE, 2014.
- [8] B. V. Kumar, G.R. Karpagam. Differential evolution versus genetic algorithm in optimising the quantisation table for JPEG baseline algorithm. *International Journal on Advanced Intelligence Paradigms*, 7 (2), 111-135,2015.
- [9] B. Vinoth, K. and G.R. Karpagam. A problem approximation surrogate model (PASM) for fitness approximation in optimizing the quantization table for the jpeg baseline algorithm. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*,2015.
- [10] X. Zhang, S. Wang, K. Gu, W. Lin, S. Ma, W. Gao. Just-Noticeable Difference-Based Perceptual Optimization for JPEG Compression, *IEEE Signal Processing Letters*, Vol. 24: no. 1, 2017.
- [11] C.H. Huang, J. L. Wu. JQF: Optimal JPEG Quantization Table Fusion by Simulated Annealing on Texture Images and Predicting Textures, *Image and Video Processing*. arXiv:2008.05672, 2020.
- [12] X. Yan, Y. Fan, K. Chen, X. Yu, X. Zeng. QNet: An Adaptive Quantization Table Generator Based on Convolutional Neural Network, *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 29, 2020.
- [13] J. Choi, B. Han. Task-Aware Quantization Network for JPEG Image Compression. *ECCV 2020: Computer Vision – ECCV 2020 pp 309-324*, 2020.
- [14] Wallace, G. K. (1992). The JPEG still picture compression standard. *IEEE transactions on consumer electronics*, 38(1), xviii-xxxiv.
- [15] F. Artuğer, F. Özkaynak. JPEG Sıkıştırma Algoritmasının Dünü Bugünü ve Geleceği, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 32 (3) 2018.
- [16] F. Artuğer, F. Özkaynak. Performance Comparison for Lossy Image Compression Algorithm. *Proceedings of The IIER International Conference*, Kiev, 2018.
- [17] X. Zhang, S. Wang, K. Gu, W. Lin, S. Ma, W.Gao. Just-Noticeable Difference-Based Perceptual Optimization for JPEG Compression, *IEEE Signal Processing Letters*, Vol. 24, no. 1, 2017.
- [18] G. Sullivan and T. Wiegand. Rate-distortion optimization for video compression, *IEEE Signal Process. Mag.*. Vol. 15, no. 6, pp. 74–90, Nov. 1998.
- [19] K. Ramchandran and M. Vetterli. Rate-distortion optimal fast thresholding with complete JPEG/MPEG decoder compatibility. *IEEE Trans. Image Proc*, vol. 3, pp. 700-704, Sept. 1994.
- [20] A. B. Watson, (1993). DCTune: A technique for visual optimization of DCT quantization matrices for individual images. *Society for Information Display Digest of Technical PapersXXIV*, 946-949.
- [21] B. Mahdian, S. Saic, R. Nedbal. Jpeg quantization tables forensics: A statistical approach. In H. Sako, K. Y. Franke,S. Saitoh, editors, *Computational Forensics*, pages 150–159, Berlin, Heidelberg, 2011. Springer Berlin Heidelberg.

## EMG Sinyalleri Kullanılarak GoogLeNet ve Çok Seviyeli DPD ile El Tutma Hareketlerinin Sınıflandırılması

Muhammed Buğracan ÖZKÜÇÜK<sup>1</sup>, Ömer Faruk ALÇİN<sup>2\*</sup>, Muhsin Tunay GENÇOĞLU<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Malatya, Türkiye

<sup>2</sup> Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Malatya, Türkiye

<sup>3</sup> Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>1</sup> bugracan.ozkucuk@ozal.edu.tr, <sup>2\*</sup> omer.alcin@ozal.edu.tr, <sup>3</sup> mtgencoglu@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 04/05/2021;

Kabul/Accepted: 01/01/2022)

**Öz:** Elektromiyografi (EMG) elektriksel aktiviteyi ölçmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem günümüzde hastalık tespitinde kullanılmasıyla yaygınlaşmış olsa da robotik, protez kontrolü, video oyunları gibi popüler alanlarda yer edinmiştir. Bu çalışmada altı temel el hareketinin EMG sinyalleri kullanılarak sınıflandırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda transfer öğrenme yaklaşımı kullanılmıştır. EMG sinyalleri çok seviyeli dalgacık paket dönüşümü (DPD) ile zaman-frekans (ZF) görüntülerine çevrilmiştir. Bütün kanallara ait ZF görüntülerinin %80'i birleştirilerek GoogLeNet mimarisini eğitmek için kullanılmıştır. Hareket tanımda başarıyı artırmak için GoogLeNet'ten elde edilen derin öznetelikler Destek Vektör Makinesi (DVM) ile sınıflandırılmıştır. Önerilen yöntem altı temel el hareketini tanımda %98.833 doğruluk oranına sahiptir. Önerilen yöntem aynı veri setini kullanan çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda önerilen yöntemin mevcut yöntemlerden %0.8 daha yüksek performans sergilediği görülmüştür. Deneysel çalışmalar önerilen yaklaşımın EMG ile hareket tanımda kullanılabilirlik etkin ve verimli bir yöntem olduğunu göstermiştir.

**Anahtar kelimeler:** EMG, Transfer Öğrenme, GoogLeNet, DVM, Çok Seviyeli DPD.

## Classification of Hand Holding Gestures with GoogLeNet and Multi-Level WPT using EMG Signals

**Abstract:** EMG is a method used to measure electrical activity. Although this method has become widespread with its use in disease detection today, it has gained a place in popular areas such as robotics, prosthesis control, video games. This study, it is aimed to classify six basic hand movements using EMG signals. For this purpose, the transfer learning approach was used. EMG signals have been converted into Time-Frequency (TF) images with multi-level wavelet packet transformation (WPT). %80 of the ZF images of all channels were combined and used to train the GoogLeNet architecture. In order to increase the performance in motion recognition, deep features obtained from GoogLeNet were classified by Support Vector Machine (SVM). The proposed method has 98.833% accuracy in recognizing six basic hand gestures. The proposed method was compared with studies using the same data set. As a result of the comparisons, it was found that the proposed method performed 0.8% higher than the existing studies. Experimental studies have shown that the proposed approach is an effective and efficient method that can be used in motion recognition with EMG.

**Key words:** EMG, Transfer Learning, GoogLeNet, SVM, Multi Level WPT.

### 1. Giriş

İnsanın vücut ağırlığını taşımasını sağlayan kasların en temel elemanı motor birimidir. Motor birimlerinin bir araya gelmesiyle kas lifleri oluşur. Bir motor birimi uyarıldığında, 20-2000  $\mu$ V genlikli dalga şekli, 6~30 Hz deşarj frekansı oluşurken bu durum 3-5 ms aralığında gerçekleşmektedir. Böylelikle kas liflerinin kasılması daha yüksek genlikli ve yüksek frekanslı bir potansiyel sinyalin oluşmasına sebebiyet verir [1]. Bu elektriksel aktivite elektromiyogram (EMG) yöntemi ile ölçülebilmekte, hastalık teşhisinde uzmanlara yardımcı olabilmektedir.

EMG sinyalleri, hastalık tespitlerinin yanı sıra güncel olarak robotik, akıllı sistemler, video oyunları ve işaret dili tanıma gibi popüler olan sistemlerde de sıklıkla kullanılmaktadır. Bu nedenle EMG sinyallerinin sınıflandırılması önemli bir yer tutmaktadır. Literatürde, çeşitli örneklerle ve farklı yaklaşımlarla, EMG

\* Sorumlu yazar: [omer.alcin@ozal.edu.tr](mailto:omer.alcin@ozal.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-1466-2502, <sup>2</sup> 0000-0002-2917-3736, <sup>3</sup> 0000-0002-1774-1986



sinyallerinin sınıflandırılmasına çalışılmıştır. Subası vd., EMG sinyallerinden Nöromusküler kas hastalığını belirlemeyi hedeflemişlerdir [2]. Bu hedef doğrultusunda ilk olarak EMG sinyallerinden öznitelik çıkarmak amacıyla bu sinyallere ayırık dalgacık dönüşümü (ADD) uygulanmış, dalgacık katsayılarının dağılımını belirtmek için ADD'nin istatistiksel değerleri hesaplamıştır. Kas ve sinir hastalıkları gibi nöromusküler hastalıkların tespiti amacıyla yapılan bu durumlar torbalama topluluk (TT) sınıflandırıcısına giriş verisi olarak verilmiş ve sonuçlar gözlemlenmiştir. Sapsanis vd., EMG sinyalleri için bir el hareketini tanımlama yöntemi üzerinde durmuşlardır [3]. Önerilen yaklaşımın test edilmesi için benzer yaşlarda beş sağlıklı denek seçilmiş ve bunlardan altı temel el hareketi, iki kanallı yüzey EMG sinyalleriyle toplanmıştır. Öncelikle, yüzey EMG sinyallerini içsel mod fonksiyonlarına (IMF) ayırmak için deneysel mod ayırıştırma (DMA) kullanılmış ve daha sonra entegre EMG (EEMG), uzunluk, Willison genliği, varyans, sıfır geçiş, eğim işareti değişiklikleri, çarpıklık ve basıklık dahil olmak üzere sekiz özelliği ortaya çıkarmak için çalışılmıştır. Son olarak, EMG sinyallerini sınıflandırmak için basit bir doğrusal sınıflandırıcı kullanılmıştır. Bu çalışmadan farklı olarak, sekiz özelliğe ilaveten EMG sinyallerinden medyan ve standart sapma olmak üzere iki yeni özellik eklenilerek yeni bir çalışma Sapsanis vd., tarafından ortaya konmuştur [4]. Boyutsallığı azaltmak amacıyla temel bileşen analizi (TBA) ve Relief özellik seçme algoritması kullanılmış olup yaklaşımları altı kişiden kaydedilen EMG sinyalleri üzerinde test edilmiştir. Kakoty ve Hazarika, EMG sinyalleri için elle kavrayan bir sınıflandırma yöntemiyle yaklaşmışlardır [5]. Altı kavrayışa karşılık gelen iki kanallı EMG sinyalleri 40 deneysel denekten elde edilmiştir. EMG sinyallerinin özellikleri, ayırık dalgacık dönüşümü katsayılarının temel bileşen analizi (TBA) kullanılarak çıkarılmıştır. El kavrayışlarının sınıflandırılması, radyal temel fonksiyon (RTF) çekirdek destek vektör makinesi (DVM) ile gerçekleştirilmiştir. Nazemi ve Maleki, el hareketlerini ve jestleri belirlemek için çok katmanlı algılayıcı (ÇKA), doğrusal diskriminant analizi (DDA) ve en küçük kareler destek vektör makinesinin (EKK-DVM) başarımları üzerinde durmuşlar ve karşılaştırılmasını yapmışlardır [6]. Başarım değerlendirmesi 27 denegin 52 el, parmak ve bilek hareketleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Öznitelik çıkarımı için kök ortalama kare, dalga şekli uzunluğu, ortalama mutlak değer, integral mutlak değer, konkordans korelasyonu, enerji ve iki enerji oranı yöntemi gibi yedi zamansal özellik kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, ÇKA'nın el hareketlerini tanıma başarısı açısından DDA ve EKK-DVM'den daha iyi olduğunu göstermektedir. Nishad vd., ayarlanabilir Q dalgacık dönüşümü (QDD) tabanlı filtre bankası (QDD-FB) kullanılarak temel bir el hareketi sınıflandırma yaklaşımı ile çözüme odaklanmışlardır [7]. İlk olarak, QDD-FB, EMG sinyallerinin çapraz kovaryansını belirlemek için kullanılmış ve ardından özellikleri çıkarmak için Kraskov entropisi kullanılmıştır. Son olarak, önerilen yaklaşımın performansını incelemek için bir k-NN sınıflandırıcısı kullanılmıştır. Belkhou vd., miyopati ve normal EMG sinyallerinin sınıflandırılmasını hedeflemişlerdir [8]. Bu hedef doğrultusunda EMG sinyallerine sürekli dalgacık dönüşümü ile dört istatistiksel öznitelik belirlenmiştir. Sinyallerin sınıflandırılmasını belirlemek için hem k-en yakın komşuluk hem de DVM sınıflandırıcısı kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, KEYK sınıflandırıcısının başarım oranının DVM sınıflandırıcıya yakın olduğu sonucuna varılmıştır. Benazzouz vd., miyopati, ALS ve normal bireylere ait olan EMG sinyallerinin sınıflandırılmasını hedeflemişlerdir [9]. EMG sinyallerine ilk olarak ADD ve güç spektral yoğunluğu yöntemleri uygulanarak sinyallere ait öznitelik belirlenmiştir. Özniteliklerden en etkin olanı belirlemek için Relief algoritması kullanılmıştır. Belirlenen yeni öznitelikler RO ve KEYK sınıflandırıcılarına giriş verisi olarak verilmiştir. Babita vd., kısmen engellilerin hayatını kolaylaştırmak için EMG sinyallerinin zaman alanı ve zaman ölçeği özelliklerini DVM ile sınıflandırmışlardır [10]. Çalışmada, 18-30 yaş arası 8 katılımcıdan elde edilen 303 EMG verisi kullanılarak dalgacık paket dönüşüm (DPD) yöntemi ile öznitelik çıkarımı gerçekleştirilmiştir. Arozi vd., EMG sinyallerinde hareket tespitini hedeflemişlerdir [11]. Bu hedefle alınan 8 farklı harekete ait EMG sinyallerine ADD uygulanmış ve buradan gelen katsayılara bazı istatistiksel yöntemler uygulanarak öznitelik belirlenmiştir. Belirlenen bu öznitelikler yapay sinir ağı (YSA) ile sınıflandırılmıştır.

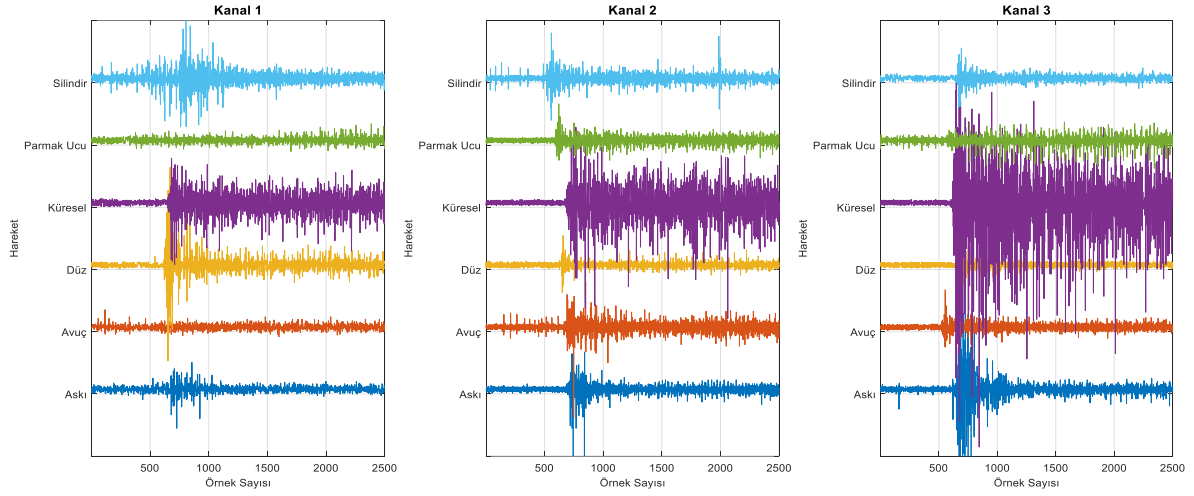
Bu çalışmada EMG sinyallerinden hareket sınıflama için derin öğrenme yaklaşımı düşünülmüştür. Bu amaçla bu çalışmada Sapsanis EMG veri seti [12] kullanılmıştır. Derin öğrenmede, girdi sayısının hedeflenen veri setinde az olduğu durumlarda, transfer öğrenme yaklaşımı kullanılmaktadır. Transfer öğrenmeyi gerçekleştirmek için GoogLeNet ön-eğitilmiş mimarisinden yararlanılmıştır. EMG sinyalleri çok seviyeli DPD yöntemi ile Zaman-Frekans domeni görüntülerine dönüştürülmüştür. Ardından ZF görüntüleri, GoogLeNet'e giriş olarak uygulanmıştır. Hareket tanımadaki başarımları artırmak için GoogLeNet'in tam bağlı katmanından elde edilen derin öznitelikler DVM ile sınıflandırılmıştır. Ayrıca, bu çalışmada; veri seti, GoogLeNet, DVM sınıflandırıcısı, çok seviyeli dalgacık paket dönüşümü ve performans ölçütleri tanıtılmıştır. Deneysel çalışma ayrıntılı bir şekilde anlatılmış ve elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

Bu bölümde veri seti, GoogLeNet, DVM sınıflandırıcısı, çok seviyeli dalgacık paket dönüşümü ve performans ölçütleri yer almaktadır.

### 2.1. Veri Seti

EMG veri seti altı temel el hareketi varsayılarak, üçü kadın, ikisi erkek olmak üzere beş katılımcı ile oluşturulmuştur. Her bir hareket için üç kanallı 100 tekrar ile EMG sinyalleri kaydedilmiştir. EMG sinyalleri girişimleri önlemek için 50 Hz çentik ve 15-500 Hz bant geçiren filtrelenmiştir [12]. Şekil 1'de, EMG sinyallerinin bir örneği verilmiştir. EMG veri seti, 2500 örnek uzunluğunda 600 sinyalden oluşmaktadır.



Şekil 1. EMG sinyal örneği

### 2.2. GoogLeNet

GoogLeNet [13] içeriğinde bulunan başlangıç modüllerinden dolayı karmaşık bir yapıdır. Bu yapı ana hatlarıyla, ardışık bir durum olan konvolüsyon ve havuzlama katmanlarını üst üste istiflemekten uzaklaşan ilk CNN yapılarından birisidir. Katmanların hepsini yığmak ve çok sayıda filtre eklemek, hesaplama ve bellek maliyeti getireceğinden bu model bellek ve güç kullanımı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. GoogLeNet'te bu durumla başa çıkmak için paralel olarak birbirine bağlı olan modüller Şekil 2.a'daki gibi kullanılmıştır. Başlangıç modülü, parametrelerin ölçeğini ve model karmaşıklığını sınırlandırmaya yardımcı olan küçük boyutlu ( $1 \times 1$ ,  $3 \times 3$  ve  $5 \times 5$  vb.) birkaç evrilmiş çekirdekte oluşmaktadır. Buradaki problem işlem karmaşası, çıkış boyutunun büyüklüğü ve parametre sayısının paralel işlemlerden dolayı oldukça büyümesidir. Bu problemi çözmek için şekil 2.b'deki gibi  $1 \times 1$  evrilmiş çekirdek katmanı diğer evrilmiş katmanların öncesine eklenerek boyut azaltma işlemi gerçekleştirilmektedir. GoogLeNet'te mimariyi oluşturmak için kullanılan 9 başlangıç modülü ve 100'den fazla katman vardır.

### 2.3. DVM Sınıflandırıcılar

Destek Vektör Makineleri genellikle büyük veri sınıflandırma problemlerini çözmeye yardımcı olabilecek klasik makine öğrenme tekniklerinden biri olup Vapnik tarafından ortaya atılmış bir öğrenme yöntemidir[14]. Bu öğrenme yöntemi eğitim aşamasındaki verilerin hangi sınıfa ait olduğu belli olan denetimli öğrenme kapsamına girer. Destek vektör makinesi doğrusal olan veya doğrusal olmayan modellere ayrılabilir.

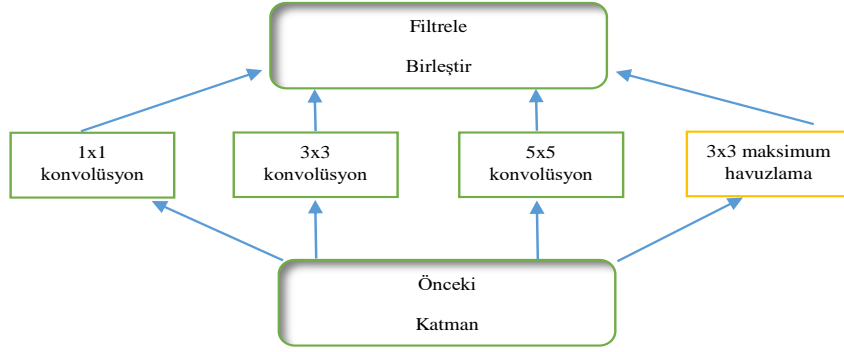
Veri alanı, orijinal alandaki sınıfları ayırmak için doğrusal olarak bölünebilirse yani sırasıyla veri alanının bir yanıt kümesine eşlenmesi ve veri alanının bölünmesi adımları gerçekleşirse, buna doğrusal destek vektör makinesi denir. Denklem 1'de olduğu gibi basitçe ifade edilir.

$$y = wx' + z$$

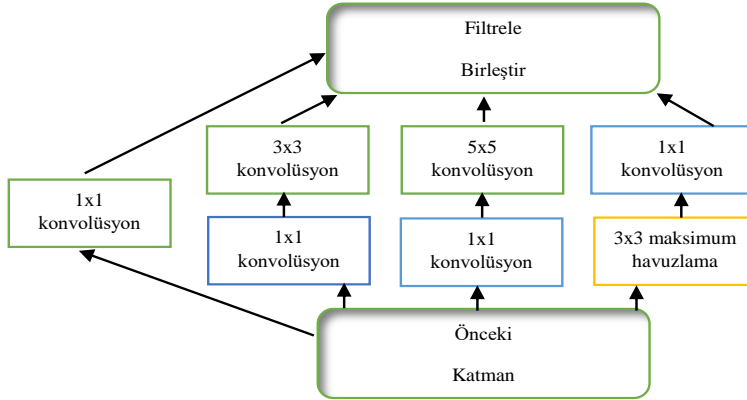
(1)

Veri alanı doğrusal olarak bölünemiyorsa, veri alanının sınıfları ayırmak için doğrusal olarak bölünebileceği özellik alanı olarak adlandırılan bir boşluğa dönüştürülebiliyorsa buna doğrusal olmayan destek vektör makinesi denir. Bu durumda sırasıyla bir çekirdek işlevi kullanılarak veri alanının bir özellik uzayına eşlenmesi, özellik alanının yanıt kümesine eşlenmesi ve ardından veri alanının bölünmesi adımları gerçekleşir. Denklem 2’de olduğu gibi basitçe ifade edilir [15].

$$y = w\phi x' + z \quad (2)$$



(a) Naif versiyon başlangıç modülü



(b) Boyut azaltma özelliğine sahip başlangıç modülü

Şekil 2. Başlangıç modülü

#### 2.4. Çok Seviyeli Dalgacık Paket Dönüşümü

Dalgacık Paket Dönüşümü, Ayrık Dalgacık Dönüşümü yönteminin genişletilip, geliştirilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Ayrık dalgacık dönüşümünde her seviye için sinyalin sadece yaklaşım kısımlarına ayrışım uygulanmaktadır. Dalgacık paket dönüşümünde ise sinyalin yaklaşım kısmının yanı sıra ayrıntılı kısımlarına da ayrışım uygulanmaktadır [16]. DPD, sinyal işlemeye, özellikle durağan olmayan sinyallere uygundur. Çünkü aynı frekans bant genişlikleri, yüksek ve düşük frekanslardan bağımsız olarak iyi çözünürlük sağlayabilir. DPD, dalgacık dönüşümünün bir genellemesidir ve dalgacık paket işlevi de bir zaman-frekans işlevidir [17]. Dalgacık paket dönüşümünün parametrelere göre ifadesi Denklem 3’teki gibi yazılabilir.

$$W_{b,c}^a(t) = 2^{\frac{b}{2}} W^a(2^b t - c) \quad (3)$$

Burada b ve c tam sayıları indeks ölçeği ve çeviri işlemleri, a indisi ise bir işlem modülasyon parametresi veya salınım parametresidir.

Denklem 4 ve Denklem 5 ölçekleme ve ana dalgacık fonksiyonlarıdır.

$$W_{0,0}^0(t) = \theta(t) \quad (4)$$

$$W_{0,0}^1(t) = \varphi(t) \quad (5)$$

Burada  $a=2,3, \dots$  olduğunda Denklem 6 ve Denklem 7 ile tanımlanabilir.

$$W_{0,0}^{2a}(t) = \sqrt{2} \sum_c h(c) W_{1,c}^a(2t - c) \quad (6)$$

$$W_{0,0}^{2a+1}(t) = \sqrt{2} \sum_c g(c) W_{1,c}^a(2t - c) \quad (7)$$

Burada  $h(c)$  ve  $g(c)$  önceden tanımlanmış ölçekleme fonksiyonu ve ana dalgacık fonksiyonu ile ilişkili kareleme ayna filtresidir. DPD açılan seviyesi  $b$  ile gösterilirse  $k=2^{b+1}-1$  katsayısı elde edilmektedir. Her bir katsayının entropisi sinyali temsil edebilecek niteliktedir. Böylece  $b=7$  alınırsa bir sinyali temsil edebilen 255 öznitelik elde edilmektedir.

Bu çalışmada çok seviyeli dalgacık paket dönüşümü kullanılmıştır. Çok seviyeli yaklaşım sinyalini bütünüyle kullanmak yerine pencereleme ile sinyalin bir parçasına DPD uygulanması şeklinde tanımlanabilir. Bu yapıya göre herhangi bir sinyal belirlenen pencere genişliğinde artırım aralıkları ile taranmaktadır. Çok seviyeli yaklaşım ile bir sinyalden denklem 8'de belirtilen  $n$  sayıda alt sinyal elde edilir [18-19].

$$n = \frac{L-W}{S} + 1 \quad (8)$$

Burada  $n$  elde edilen alt sinyal,  $L$  sinyal uzunluğu,  $W$  pencere genişliği ve  $S$  ise pencere artım aralığını sembolize etmektedir. Çalışmada pencere genişliği  $W=256$ , artırım aralığı  $S=32$  ve  $j=7$  deneysel yolla belirlenmiştir. EMG sinyal uzunluğu ise  $L=2500$ 'dir.

## 2.5. Performans Ölçütleri

Bu çalışmada önerilen yöntemi değerlendirmek için doğruluk (Doğ), duyarlılık (Duy), özgüllük (Özg), hassaslık (Has) metrikleri ve alıcı çalışma karakteristiği (ROC) eğrisi kullanılmıştır. Doğruluk, Duyarlılık, Özgüllük ve Hassaslık metrikleri Denklem 9-12'de ifade edilmiştir.

$$Doğ = \frac{A+B}{A+B+C+D} \times 100 \quad (9)$$

$$Duy = \frac{A}{A+D} \times 100 \quad (10)$$

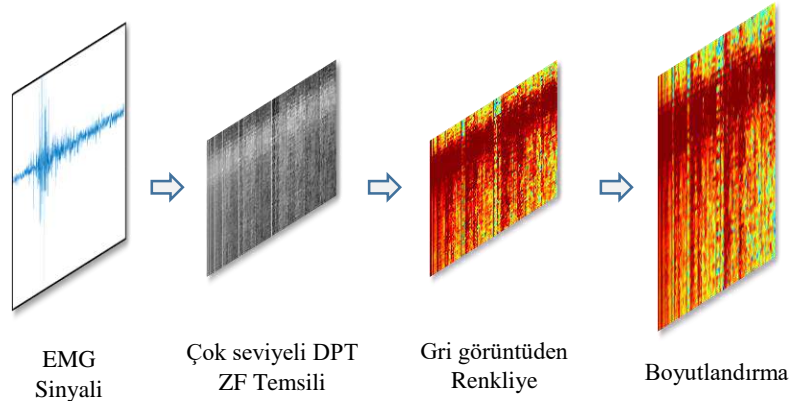
$$Özg = \frac{B}{B+C} \times 100 \quad (11)$$

$$Has = \frac{A}{A+C} \times 100 \quad (12)$$

Burada,  $A$  sınıflandırıcının gerçek pozitif sayılarını,  $B$  sınıflandırıcının gerçek negatif sayılarını,  $C$  sınıflandırıcının gerçek olmayan pozitif sayılarını ve  $D$  sınıflandırıcının gerçek olmayan negatif sayılarını sembolize etmektedir. ROC eğrisi,  $Se$  sınıflandırıcısı ile yanlış pozitif oranları arasındaki ilişkiyi verir [20-21].

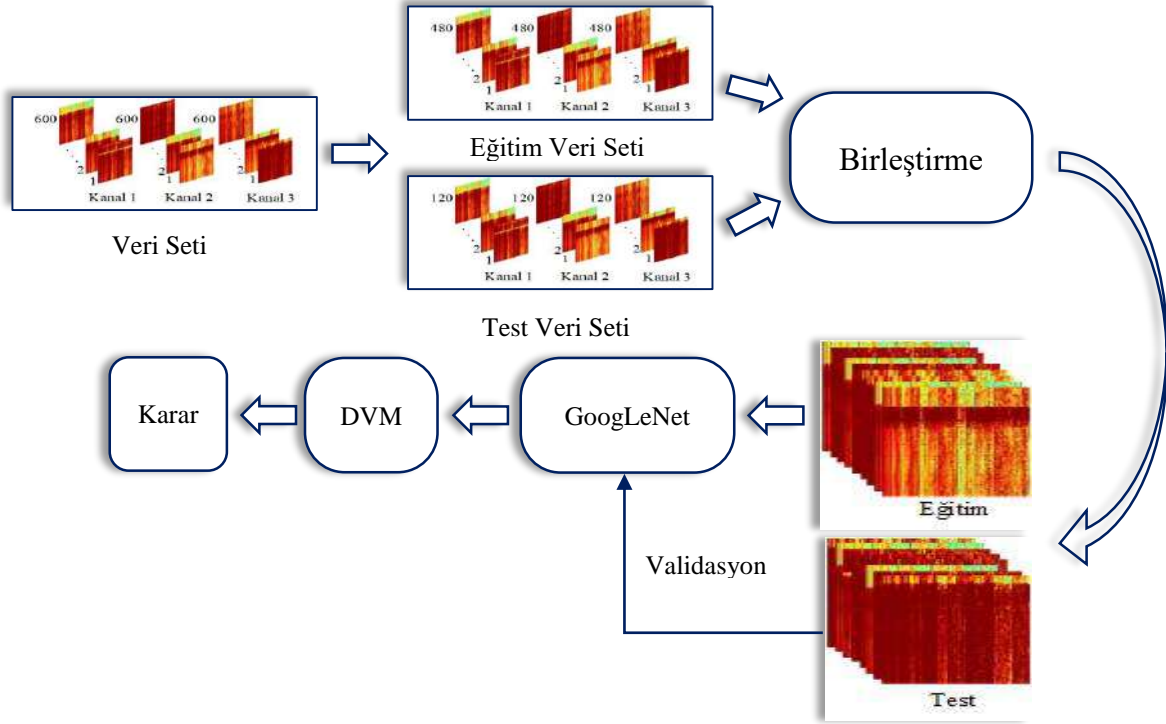
## 3. Deneysel Çalışma ve Sonuçlar

Bu çalışmada EMG sinyalleri ile hareket belirlenmesi yapılmıştır. Önerilen yaklaşımda derin öğrenme kullanılmıştır. EMG kayıtlarının azlığı sebebiyle transfer öğrenme kullanılmıştır. Bulanık dalgacık dönüşümü kullanılarak EMG sinyallerinin iki boyutlu zaman-frekans görüntüleri elde edilmiştir. Bir EMG sinyali çok seviyeli DPD ile  $n \times k$  boyutunda bir görüntüye çevrilmektedir. Bölüm 2.4'te verilen parametreler dikkate alındığında  $71 \times 255$  boyutunda gri seviye görüntü elde edilmiştir. Ardından GoogLeNet giriş görüntü büyüklüğüne uygun olması için  $224 \times 224 \times 3$  boyutuna dönüştürülmüştür. Bir EMG sinyali için ZF görüntü elde etme işlemi Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Bir EMG sinyalinden ZF görüntü elde edilmesi

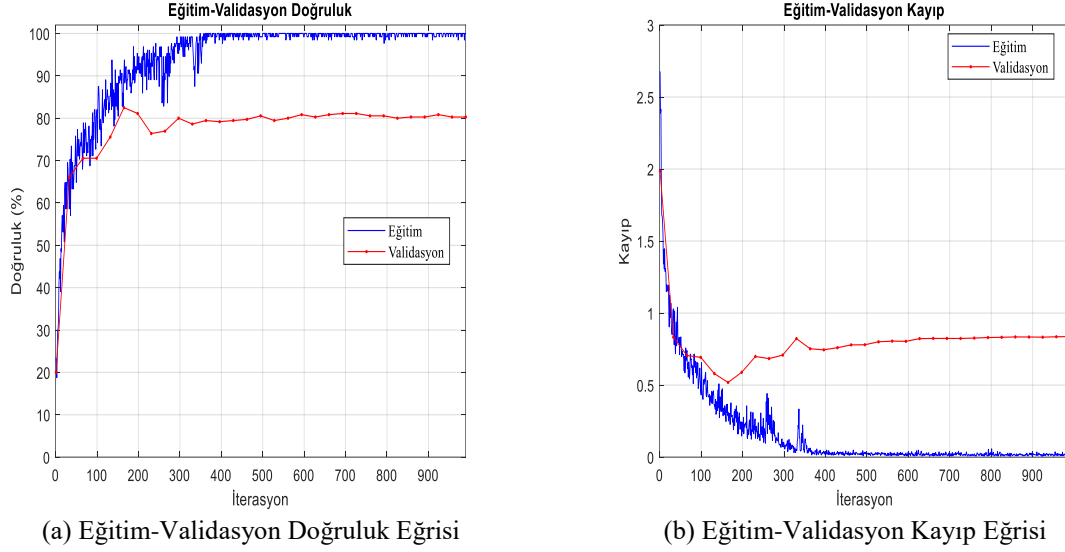
Şekil 3'te görüldüğü gibi çok seviyeli DPT ile bir EMG sinyalinin ZF görüntüsü elde edilmiştir. Ardından gri seviye ZF ölçeklendirilip RGB görüntüye çevrilmiştir. RGB ZF görüntüsü  $224 \times 224$  olacak şekilde boyutlandırılmıştır. Veri seti daha önce bahsedildiği gibi [3-4, 12] üç kanaldan oluşmaktadır. Eğitim aşamasında veri setinin rastgele seçilen %80'i kullanılırken kalan kısım ise ağıın doğrulamasında ve yöntemin test edilmesinde kullanılmıştır. EMG sinyalinden ZF görüntüleri oluşturulurken ve veri seti bölünürken kanallar birbirine karıştırılmamıştır. Yani aynı kayda ait üç kanal eğitim ya da test kümesinde bulunmaktadır. Eğitim ve doğrulama aşamasında üç kanal birleştirilerek değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 4. Önerilen yöntem

Şekil 4'te görüldüğü gibi üç kanal birleştirilerek GoogLeNet modelin daha fazla giriş görüntüsü ile eğitilmesi amaçlanmıştır. GoogLeNet eğitimi sırasında test ZF görüntüleri ile ağıın validasyonu yapılmıştır. GoogLeNet ağı

sgdm optimizasyon ile her iterasyonda 32 adet görüntü ve 0.001 öğrenme oranı ile eğitilmiştir. Eğitim sürecine ait eğriler Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. GoogLeNet eğitim eğrileri

Şekil 5.a'da görüldüğü gibi eğitim 300-400 iterasyon arasında %100 doğruluğa ulaşırken, validasyon %80 civarında seyretmiştir. Şekil 5.b'den görüldüğü gibi kayıp yaklaşık 0.83 iken eğitim süreci tamamlanmıştır. Tablo 1'de GoogLeNet ve DVM sınıflandırıcısı üç kanal birleştirilmiş test görüntülerine ait sonuçlar verilmiştir. Yapılan deneylerde gauss çekirdeğinin DVM sınıflandırıcısı için en uygun çekirdek fonksiyonu olduğu belirlenmiştir.

Tablo 1. Sınıflandırma sonuçları (%)

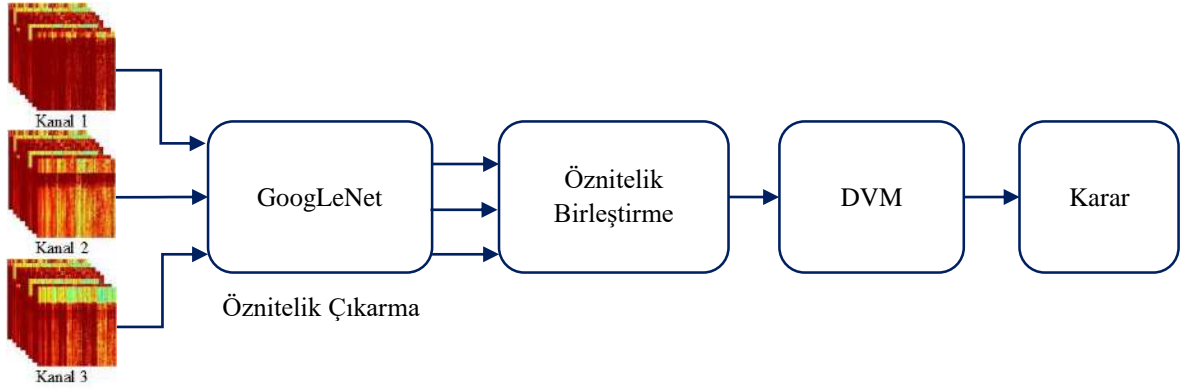
Sınıflandırıcı	Doğ	Duy	Özg	Has
GoogLeNet	81.111	81.111	96.222	81.502
DVM	82.222	82.222	96.444	82.942

Tablo 1'de görüldüğü gibi, DVM sınıflandırıcısı GoogLeNet'ten yaklaşık %1 daha iyi doğrulukla sınıflandırmıştır. Diğer metriklerde de DVM daha yüksek başarımlarına sahiptir. Her bir kanalın GoogLeNet sınıflandırıcı katmanına ait test sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Her bir kanalın sınıflandırma sonuçları (%)

Kanal	Doğ	Duy	Özg	Has
Kanal 1	76.667	76.667	95.333	80.748
Kanal 2	84.167	84.167	96.833	84.664
Kanal 3	80.000	80.000	96.000	82.024

Tablo 2'den görüldüğü gibi, Kanal 2 hareketlerin sınıflandırılmasında diğer kanallardan daha iyi performans göstermiştir. Deneysel çalışma üç kanalın birlikte değerlendirilmesi ile sürdürülmüştür. Bu yaklaşım test başarımlarını artırmak için uygulanmıştır. Her bir kanala ait test görüntüsü bireysel olarak uygulandığında yapılan deneysel çalışmalarda başarımın düşük olduğu gözlenmiştir. Bu deneysel yaklaşım Şekil 6'da gösterilmiştir.



**Şekil 6.** Önerilen test yaklaşımı

Test aşamasında ise her bir kanala ait derin öznelikler elde edilerek birleştirilmiştir. Derin öznelikler GoogLeNet'in tam bağlı katmanından (fc) elde edilmiştir. Her bir kanal için  $600 \times 6$  öznelik matrisi ve üç kanal birleştirildiğinde ise  $600 \times 18$  boyutlu matris elde edilmiştir. Birleştirilen derin öznelikler DVM sınıflandırıcısı ile sınıflandırılmıştır. Sınıflandırma geçerliliği 10-kat çapraz doğrulama ile değerlendirilmiştir. Birleştirilmiş öznelik matrisinin sonuçları Tablo 3'te verilmiştir.

**Tablo 3.** Birleştirilmiş kanallara ait sınıflandırma sonuçları (%)

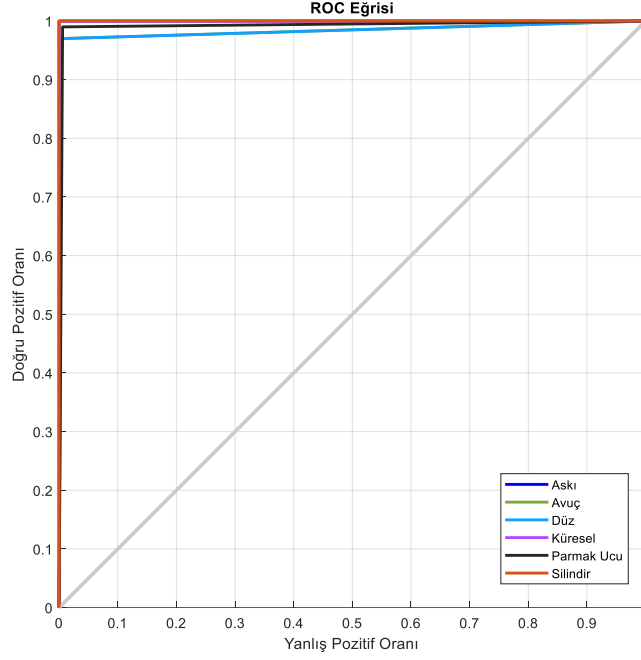
Doğ	Duy	Özg	Has
98.833	98.833	99.767	98.836

Tablo 2'deki sonuçlar göz önüne alındığında, önerilen test yaklaşımının yaklaşık %16 doğruluk artışı sağladığı görülmektedir. Bu yaklaşımda her bir hareketin sınıflandırma sonuçları incelenmiş ve bu sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir.

**Tablo 4.** Her sınıfın performans sonuçları (%)

	Doğ	Duy	Özg	Has
Askı	100.000	100.000	100.000	100.000
Avuç	97.000	97.000	99.600	97.980
Düz	97.000	97.000	99.600	97.980
Küresel	100.000	100.000	100.000	100.000
Parmak Ucu	99.000	99.000	99.400	97.059
Silindir	100.000	100.000	100.000	100.000

Tablo 4'te görüldüğü gibi, Askı, Küresel ve Silindir nesne tutma hareketlerinden tam bir ayırım yapılmıştır. Avuç ve Düz nesne tutma hareketleri %97 doğruluk performansı sağlamıştır. Parmak Ucu ile nesne tutma hareketi %99 başarıyla belirleyebilmiştir. Analizler Şekil 7'de verilen ROC eğrisi ile desteklenmiştir.



Şekil 7. Önerilen yaklaşıma ait ROC eğrisi

ROC eğrisi incelendiğinde, önerilen Askı, Düz ve Silindir yaklaşım sınıflarının tam eğri altında alana sahip olduğu görülmektedir. Yine Tablo 4’den görüleceği gibi Parmak ucu, Avuç ve Düz sınıflarından daha iyi ayırt edilmiştir. Önerilen yöntemin aynı veri setini kullanan diğer çalışmalar ile karşılaştırılması Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5. Karşılaştırma sonuçları

Çalışma	Doğ (%)
Sapsanis C. [12]	75.00
Sapsanis ve diğerleri [3]	80.00
Arı ve diğerleri [22]	92.00
Arı ve diğerleri [23]	93.167
Alçin Ö. F. [24]	96.833
Aslan M. [25]	98.00
<b>Önerilen Yöntem</b>	<b>98.833</b>

Tablo 5’te verilen çalışmalar incelenecek olursa, Sapsanis, elin altı temel hareketini belirlemeyi amaç edinmiştir [12]. Bu doğrultuda sınıflandırma başarı oranını arttırmak için temel bileşen analizi ve Relief özellik seçme algoritması kullanılmış, boyutu azaltmak için ise EMD uygulanmıştır. Sapsanis vd., EMG sinyalleri için bir el hareketini tanımlama yöntemi üzerinde durmuşlar ve altı temel el hareketi iki kanallı yüzey EMG sinyalleriyle toplamışlardır [3]. Öncelikle, EMG sinyallerini içsel mod fonksiyonlarına (IMF) ayırmak için deneysel mod ayrıştırma (DMA) kullanılmış ve daha sonra entegre EMG (EEMG), uzunluk, Willison genliği, varyans, sıfır geçiş, eğim işareti değişiklikleri, çarpıklık ve basıklık dahil olmak üzere sekiz özelliği ortaya çıkarmak için çalışılmıştır. Arı vd., altı farklı el hareketi için EMG sinyallerinin sınıflandırılmasını amaçlamışlardır [22]. Bu amaç doğrultusunda EMG sinyallerine kısa zamanlı fourier dönüşümü uygulanıp zaman frekans düzlemine dönüştürülmüştür. Yerel ikili örüntüler ve gri seviye eş-oluşum matrisleri yöntemleri uygulanarak görüntülerden



öznitelik elde edilmiştir. Arı vd., altı el hareketi permütasyon entropi ve bir boyutlu yerel ikili örtüntü yöntemleri kullanılarak öznitelikler çıkarımını sağlamışlardır [23]. Elde edilen öznitelikler destek vektör makinesi ile sınıflandırılmıştır. Alçın, EMG sinyallerini sınıflandırmayı hedeflemiştir [24]. Bu hedef doğrultusunda fraktal eğimden arındırılmış dalgalanma analizi ve örtüşmeyen pencereci kök ortalama karesinden öznitelik çıkarmak için yararlanılmıştır. Elde edilen öznitelikler destek vektör makinesi, karar ağacı, k-En yakın komşu, ve doğrusal diskriminant analizi yöntemleri ile sınıflandırılmıştır. Aslan, temel el hareketlerinin belirlenmesini amaçlamıştır [25]. Bu amaçla dağılım entropisi ve normal kümülatif dağılım fonksiyonu öznitelik çıkarma için kullanılmıştır. Elde edilen öznitelikler destek vektör makinesi ile sınıflandırılmıştır. Tablo 5 incelendiğinde araştırmacıların EMG veri seti için %75 ile %98 arasında başarıya ulaştıkları görülmektedir. Önerilen yöntem literatürdeki yöntemlerden daha yüksek bir doğruluğa sahiptir.

#### 4. Tartışma

EMG sinyallerinin sınıflandırılması, beyin bilgisayar ara yüzü ve protez aygıt kontrolü gibi uygulamalarda öneme sahiptir. Bu çalışmada EMG sinyallerinin sınıflandırılması için derin öğrenme tabanlı bir yaklaşım önerilmiştir. EMG sinyalleri çok seviyeli DPD ile ZF görüntüleri elde edilmiştir. Veri tabanı derin öğrenme için görece az bir sayıya sahip olduğu için eğitim aşamasında veri setinde üç kanal birleştirilmiştir. Böylece derin öğrenme yöntemine daha fazla görüntü girdi olarak sağlanmıştır. GoogLeNet mimarisi ile transfer öğrenme gerçekleştirilmiştir. Eğitilmiş GoogLeNet mimarisi ile her bir kanala ait derin öznitelikler elde edilmiştir. Bu derin öznitelikler birleştirilerek hareket sınıflama doğruluğu %16 artırılmıştır. Önerilen yaklaşımın veri setini kullanan diğer yöntemler ile karşılaştırılması yapılmıştır. Karşılaştırma sonuçları, önerilen yöntemin EMG sınıflamada kullanılabilecek verimli bir yöntem olduğunu göstermektedir. Görüntü sayısı öğrenme için az olduğundan, daha sonraki çalışmalarda, görüntü artırma yöntemleri ile görüntü sayısının çoğaltılması planlanmaktadır.

#### Kaynaklar

- [1] Şenli K. EMG (Elektromiyografi) kontrollü protez kol tasarımı. (Master Tezi), Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2011.
- [2] Subasi A, Yaman E, Somaily Y, Alynabawi H A, Alobaidi F, Altheibani S. Automated EMG signal classification for diagnosis of neuromuscular disorders using DWT and bagging. *Procedia Computer Science* 2018; 140: 230-237.
- [3] Sapsanis C, Georgoulas G, Tzes A, Lymberopoulos D. Improving EMG based classification of basic hand movements using EMD, 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC); 3-7 July 2013; Osaka, Japan: IEEE. pp. 5754-5757.
- [4] Sapsanis C, Georgoulas G, Tzes A. EMG based classification of basic hand movements based on time-frequency features. In: 2013 21st Mediterranean Conference on Control & Automation (MED).
- [5] Kakoty NM, Hazarika SM. Recognition of grasp types through principal components of dwt based emg features. In: 2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR), pp 1–6.
- [6] Nazemi A, Maleki A. Artificial neural network classifier in comparison with LDA and LS-SVM classifiers to recognize 52 hand postures and movements. In: 2014 4th International eConference on Computer and Knowledge Engineering (ICCKE), pp 18–22.
- [7] Nishad A, Upadhyay A, Pachori RB, Acharya UR. Automated classification of hand movements using tunable-Q wavelet transform based filter-bank with surface electromyogram signals. *Future Gener Comp Syst* 2019; 93:96–110.
- [8] Belkhou A, Achmamad A, Jbari A. Classification and Diagnosis of Myopathy EMG Signals Using the Continuous Wavelet Transform. 2019 Scientific Meeting on Electrical-Electronics & Biomedical Engineering and Computer Science (EBBT); 24-26 April 2019; Istanbul, Turkey: IEEE. pp. 1-4.
- [9] Benazzouz A, Guilal R, Amirouche F, Slimane, Z E H. EMG Feature Selection for Diagnosis of Neuromuscular Disorders. 2019 International Conference on Networking and Advanced Systems (ICNAS); 26-27 June 2019; Annaba, Algeria: IEEE. pp. 1-5.
- [10] Babita, P. Kumari, Y. Narayan, and L. Mathew, "Binary movement classification of sEMG signal using linear SVM and Wavelet Packet Transform," 1st IEEE Int. Conf. Power Electron. Intell. Control Energy Syst. ICPEICES 2016, pp. 30–33, 2017, doi: 10.1109/ICPEICES.2016.7853640.
- [11] Arozi M, Putri, FT, Ariyanto M, Caesarendra W, Widyotriatmo A, Setiawan, JD. Electromyography (EMG) signal recognition using combined discrete wavelet transform based on artificial neural network (ANN). 2016 2nd International Conference of Industrial, Mechanical, Electrical, and Chemical Engineering (ICIMECE); 6-7 Oct. 2016; Yogyakarta, Indonesia: IEEE. pp. 95-99.
- [12] Sapsanis, C. , Recognition of basic hand movements using Electromyography, Diploma Thesis, University of Patras, Patras, Greece, 2013.
- [13] Szegedy, C. , W. Liu, Y. Q. Jia, P. Sermanet, S. Reed, D. Anguelov, D. Erhan, V. Vanhoucke and A. Rabinovich (2015). "Going Deeper with Convolutions." 2015 Ieee Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (Cvpr): 1-9.

- [14] Vapnik VN. An overview of statistical learning theory. *IEEE transactions on neural networks* 1999; 10(5): 988-999.
- [15] Suthaharan S. *Machine Learning Models and Algorithms for Big Data Classification: Thinking with Examples for Effective Learning*. Boston, MA: Springer US, 2016.
- [16] Lu, Q. ve Zhu, J. L. Wavelet packet based de-noising algorithm for UWB GPR data. *14th International Conference on Microwave Radar and Wireless Communications*;2010; Sf. 1-3.
- [17] Wu, Jian-Da & Liu, Chiu-Hong. An expert system for fault diagnosis in internal combustion engines using wavelet packet transform and neural network. *Expert Syst. Appl* 2009; 36. 4278-4286.
- [18] R. N. Khushaba, A. Al-Jumaily, and A. Al-Ani, "Novel Feature Extraction Method based on Fuzzy Entropy and Wavelet Packet Transform for Myoelectric Control", *7th International Symposium on Communications and Information Technologies ISCIT2007, Sydney, Australia*, pp. 352 – 357.
- [19] R. N. Khushaba, S. Kodagoo, S. Lal, and G. Dissanayake, "Driver Drowsiness Classification Using Fuzzy Wavelet Packet Based Feature Extraction Algorithm", *IEEE Transaction on Biomedical Engineering*, vol. 58, no. 1, pp. 121-131, 2011.
- [20] S. Siuly and Y. Li, "A novel statistical algorithm for multiclass EEG signal classification," *Eng. Appl. Artif. Intell Sep.* 2014; vol. 34, pp. 154–167.
- [21] Siuly, X. Yin, S. Hadjiloucas, and Y. Zhang, "Classification of THz pulse signals using two-dimensional cross-correlation feature extraction and non-linear classifiers," *Comput. Methods Programs Biomed Apr.* 2016; vol. 127, pp. 64–82,
- [22] Arı A, Ayaz F, Hanbay D. EMG Sinyallerinin Kısa Zamanlı Fourier Dönüşüm Özellikleri Kullanılarak Yapay Sinir Ağları ile Sınıflandırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 2019; 31(2): 443-451.
- [23] Arı, A, Arı B, Alçin ÖF. Elektromiyografi Sinyallerinin Permütasyon Entropi ve Bir Boyutlu Yerel İkili Özellikler Kullanılarak Sınıflandırılması. *İzmir Tepecik Eğitim ve Araştırma Hastanesi Dergisi* 2020; 30: 46-49.
- [24] ALÇİN, Ö. F. Fraktal Eğimden Arındırılmış Dalgalılık Analizi ve Pencereleli Kare Ortalamanın Karekökü Tabanlı EMG Sınıflandırma. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 32(2), 359-368.
- [25] Aslan, M. (2020). Normal Cumulative Distribution Function and Dispersion Entropy Based EMG Classification. *Sakarya University Journal of Computer and Information Sciences*, 3(3), 325-333.



## Farklı Sönüm Tipleri Altında Tarihi Yiğma Köprülerin Sismik Tepkilerinin Değerlendirilmesi

Kader AKIN<sup>1</sup>, Erkut SAYIN<sup>1\*</sup>, Alper ÖZMEN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> İnşaat Mühendisliği, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elazığ, Türkiye  
<sup>2</sup> İnşaat Mühendisliği, İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malatya, Türkiye  
<sup>1</sup> kader94@hotmail.com, <sup>\*1</sup> esayin@firat.edu.tr, <sup>2</sup> alper.ozmen@inonu.edu.tr

(Geliş/Received: 21/05/2021;

Kabul/Accepted: 25/10/2021)

**Öz:** Tarihi yapıların kültürel mirasımız içinde önemi büyüktür. Kültürel ve yapısal anlamda büyük öneme sahip mühendislik yapılarından biride tarihi yiğma köprülerdir. Bu köprüler, geçmişten günümüze kadar önemini yitirmeden gelen, insanlığa ulaşım açısından büyük kolaylıklar sağlayan yapılardır. Tarihi yapıların korunması ve onarılması için yapılacak olan çalışmalarda bu yapıların yapısal davranışları belirlenmelidir. Bu çalışmada, tarihi yiğma bir köprünün farklı sönüm tipleri altında sismik tepkisi incelenmiştir. Bu amaçla kütle orantılı sönüm, rijitlik orantılı sönüm ve Rayleigh sönümü dikkate alınmıştır. Sayısal örnek olarak tek açıklıklı tarihi yiğma bir köprü seçilmiştir. Köprünün sonlu eleman modeli üç boyutlu katı elemanlarla oluşturulmuştur. Dinamik analizler için SAP2000 sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Köprünün bulunduğu konumda dikkate alınarak dinamik analizler için 1992 Tunceli depreminin ivme kayıtları kullanılarak farklı sönüm tipleri altında köprünün sismik tepkisi değerlendirilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Tarihi Köprüler, Sonlu Elemanlar, Dinamik Analiz.

### Dynamic Analysis of Historical Masonry Bridges Considering Different Damping Types

**Abstract:** Historical structures have great importance in the cultural heritage. Therefore, historical bridges are one of the most important engineering structures in terms of cultural and structural aspects. These bridges, which have come from the past to the present without losing their importance, provide great convenience to humanity in terms of transportation. The structural behavior of the historical structures is vital for the protection and restoration of these structures. In this study, the dynamic analysis of a historical masonry bridge was investigated under different damping types. For this purpose, mass proportional damping, stiffness proportional damping and Rayleigh damping were used. A single-span historical masonry bridge was considered as a numerical example. The finite element model of the bridge was generated using three dimensional solid elements. In order to perform dynamic analysis of the masonry bridge, the SAP2000 finite element program was used. Considering the location of the bridge, the seismic response of the bridge was evaluated under different damping types by using the 1992 Tunceli earthquake acceleration records for dynamic analysis.

**Key words:** Historical Bridges, Finite Element, Dynamic Analysis.

#### 1. Giriş

Köprüler yol üzerindeki nehir ve vadileri geçebilmek amacıyla yapılmış olan mühendislik yapılarıdır. Tarihi köprüler, kültürel mirasımızın önemli yapı eserlerindedir. Dünyada farklı dönemlerde inşa edilmiş, yapıldığı kültür ve medeniyetten izler taşıyan, birçok tarihi yiğma köprü mevcuttur. Bu köprülerin bir kısmı, beşerî faktörlerden ve tabiat olaylarından (deprem, sel, rüzgâr vb.) etkilenerek zamanla mukavemetlerini kaybetmiş ve yok olmuştur. Depremler tarihi yapıların hasar görmelerine sebep olan en önemli dış faktörlerden biridir. Ülkemiz birçok medeniyete ev sahipliği yaptığundan geçmişten günümüze ulaşan farklı dönemlere ait, boyutları ve şekilleri farklı çok sayıda tarihi yiğma köprü mevcuttur. Bu köprülerin işlevsel ve yapısal özelliklerinin bozulmasını engelleyebilmek için periyodik olarak bakımlarının yapılması gerekir. Bu bakımlar ülkemizde Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından gerçekleştirilmektedir. Tarihi köprüler birçok ülkede ve ülkemizde halen karayolu, demiryolu ve yaya trafiğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Birçok araştırmacı tarihi yapılar ve köprüler konusunda deneysel ve sayısal çeşitli çalışmalar yapmıştır. Fanning ve Boothby [1], üç yiğma köprüyü modelleyerek köprülerin servis yükleri altında analizlerini yapmışlardır. Taşıyıcı yapı elemanları için yayılı çatlak modelini, dolgu malzemesi için ise Drucker-Prager malzeme modelini kullanmışlardır. Söz konusu köprülerin servis yükleri altında statik analizlerini yapmışlar ve elde edilen çözümleri köprü üzerinde yapılan test sonuçlarıyla

\* Sorumlu yazar: [esayin@firat.edu.tr](mailto:esayin@firat.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-5648-281X, <sup>2</sup> 0000-0003-0266-759X, <sup>3</sup> 0000-0003-1335-3780

karşılaştırmışlardır. Sevim ve diğ. [2], Rize ilinde bulunan tarihi Mikron köprüsünün operasyonel modal analiz yardımı ile sonlu eleman model iyileştirilmesini yapmışlardır. 1992 Erzincan depremi altında köprünün lineer olmayan davranışını inceleyerek, sonlu eleman iyileştirmesinin lineer olmayan analize etkisini incelemişlerdir. Sayın ve diğ. [3], tarihi Uzunok köprüsünün üç boyutlu sonlu elemanlar modelini oluşturarak lineer ve lineer olmayan analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Tetik [4], İstanbul tarihi yarımada da bulunan Şeyh Süleyman Mescidinin sonlu eleman modelini oluşturarak SAP2000 programında yapının statik, dinamik ve zaman tanım alanındaki analizlerini yaparak yapının bu analizler altındaki durumunu incelemiştir. Yılmaz [5], tarihi Göderni Köprüsünün kemer kalınlığını ve kemer yüksekliğini değiştirerek oluşturduğu sonlu eleman modelleri üzerinde kendi ağırlığında, kendi ağırlığı ve hareketli yükler ile kendi ağırlığı, hareketli yükler ve deprem yükleri altında çeşitli analizler yapmıştır. Sonuçları karşılaştırarak tarihi yığma köprülerin ana taşıyıcı elemanı olan kemerlerin, köprünün yapısal davranışını nasıl ve ne düzeyde değiştirdiğini incelemiştir. Günaydın [6], Trabzon da bulunan tarihi İskenderpaşa Camii minaresinin onarım sonrasındaki dinamik karakteristiklerini çevresel titreşim yöntemi ile elde etmiş, elde edilen sonuçları literatürde bulunan onarım öncesi sonuçlar ile mukayese ederek ikisi arasındaki farkları incelemiştir. Güllü [7], tarihi Cendere köprüsünün üç boyutlu sayısal modelini oluşturarak deprem etkisindeki davranışını incelemiştir. Deprem etkisi, zaman-tanım analizi uygulanarak lineer elastik davranış modeline göre araştırılmıştır. Özmen ve Sayın [8], Elâzığ ilinde bulunan tarihi Dutpınar köprüsünün zaman tanım alanında lineer dinamik analizini yapmışlardır. Dinamik analizler için 2003 Bingöl depremi dikkate alınmıştır. Çalışma sonucunda köprüde meydana gelen asal gerilmelerin yoğun olduğu bölgeler ve köprüde meydana gelen maksimum yer değiştirmeler elde edilerek gerilme yığılmaların olduğu bölgelerde daha detaylı analizler yapılması gerektiğini ifade etmişlerdir. Öncü ve diğ. [9], tek açıklığı bulunan tarihi Tuzluca köprüsünü üç boyutlu olarak ANSYS programında modelleyip statik ve dinamik yükler altında doğrusal analizlerini yapmışlardır. Demir [10], Diyarbakır ilindeki Dicle Nehri üzerinde bulunan Dicle Köprüsünü SAP2000 programında makro modelleme tekniğiyle modellemiş, statik ve dinamik analizler yaparak tarihi köprünün deprem davranışını değerlendirmiştir. Zaman tanım alanında yapılan analizlerde 13 Mart 1992 Erzincan deprem ivme kayıtlarını kullanarak tarihi köprünün maksimum yer değiştirme ve gerilme değerlerini tespit etmiştir. Gönül ve Sakçalı [11], tarihi Irgandı köprüsünün doğrusal dinamik analizlerini yaparak köprüde meydana gelen yerdeğiştirme ve gerilme dağılımlarını incelemişlerdir. Öksüz [12], Rize ilinde bulunan tarihi Timisvat köprüsünü incelemiştir. Köprüyü ANSYS sonlu elemanlar programı ile 3 boyutlu modelleyerek iki farklı deprem ivmesi altında dinamik analizlerini gerçekleştirmiştir. Işık ve diğ. [13], Bitlis ilinde bulunan tarihi Bezirhane'ye ait beden duvarını SAP2000 programında modelleyerek deprem etkisi altında analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Hökelekli [14], tarihi yığma bir minarenin esnek ve ankastre mesnetlenme durumları için deprem davranışlarını araştırmıştır. Minare ve zemin ortamını üç boyutlu sonlu elemanlar ile modellemiştir. Oluşturulan sonlu eleman modeli, operasyonel modal analiz yöntemi deney sonuçlarına göre kalibre etmiş ve kalibre edilen sonlu eleman modelini kullanarak minare-zemin etkileşim sisteminin deprem davranışları, farklı zemin ve ankastre mesnetlenme durumları için elde edilerek mukayese edilmiştir. Özmen ve Sayın [15], Kütahya ilinde bulunan tarihi Debboy köprüsünün lineer dinamik analizlerini yaparak köprünün deprem etkisi altındaki davranışını incelemişlerdir. Zaman tanım alanındaki analizler için köprünün bulunduğu bölgede meydana gelmiş olan 2002 Sultandağı ve 2011 Simav depremlerini dikkate almışlardır. Yapılan analizlerde ANSYS sonlu elemanlar programını kullanmışlardır. Homaei ve Yazdani [16], yaptıkları çalışmada tarihi kemerli beton demiryolu köprülerinde yapı zemin etkileşiminin dikkate alındığı durumda yapının sismik tepkilerinin nasıl değiştiğini araştırmışlardır. Dinamik analizlerde artımsal dinamik analiz metodunu kullanmışlardır. Çalışma sonucunda yapı zemin etkileşiminin dikkate alınmadığı durumda yapının kapasitesinin daha yüksek çıktığı sonucuna varmışlardır. Literatür incelendiğinde tarihi yığma bir köprünün farklı sönüm tipleri ve oranları altında değerlendirildiği bir çalışmaya rastlanmamıştır.

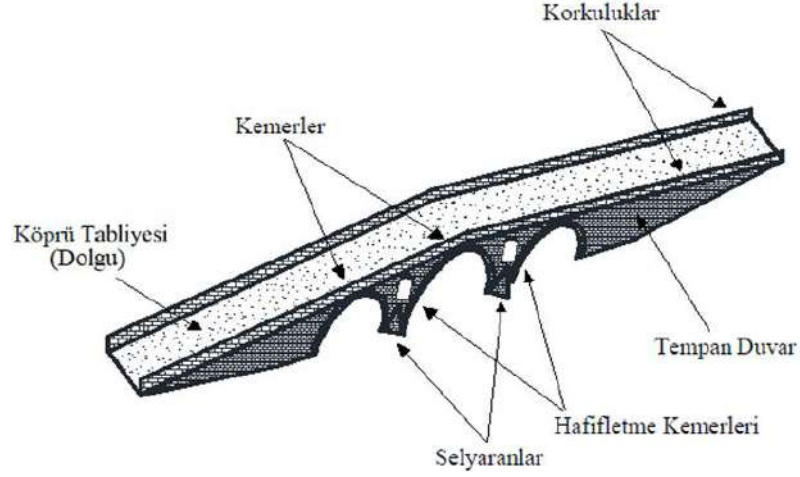
Bu çalışmada, sayısal uygulama için Tunceli ili Çemişgezek ilçesinde bulunan tek açıklıklı tarihi Tağar köprüsü seçilmiştir. Köprünün sonlu elemanlar modeli SAP2000 sonlu eleman paket programıyla üç boyutlu olarak oluşturulmuş daha sonra köprünün dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Köprünün zaman tanım alanında dinamik analizleri kütle orantılı sönüm, rijitlik orantılı sönüm ve Rayleigh sönümü için farklı sönüm oranları altında değerlendirilmiştir. Sismik etki olarak 15.03.1992 Tunceli depreminin ivme kayıtları dikkate alınmıştır. Analizler sonucunda farklı sönüm tipleri ve oranları için köprüde meydana gelen yer değiştirme ve gerilme grafikleri elde edilerek tarihi yığma bir köprünün sismik davranışına etkisi araştırılmıştır.

## 2. Tarihi Yığma Köprüler

Yeryüzünde kemer formuna ait örnekler ilk olarak M.Ö. 3000 yıllarında Mezopotamya'da Sümerlere ait yeraltı mezarlarında rastlanmıştır. Aynı dönemlerde Mısırda görülen örnekler, Mısırlıların da kemer formunun yapısal özellikleri hakkında bilgi sahibi olduğunu göstermektedir. Kemer formu her ne kadar ilk olarak Sümerler

ve Mısırlılarda görülse de kemer formunu en etkili ve göz alıcı biçimde kullanmayı başaranlar Romalılardır. Köprü mimarisinin ülkemizdeki en güzel örnekleri ise 16. yüzyılda inşa edilen Mimar Sinan eserleridir [17].

Geçmişten günümüze farklı boyut, şekil ve malzemelerden inşa edilmiş birçok yığma köprü bulunmaktadır. Farklı amaçlara hizmet etmesi için yapılan bu köprülerde farklı yapım teknikleri uygulanmıştır. Tarihi taş kemer köprüler temeller, kanat duvarları, dolgu malzemesi, kemerler, kitabeler, selyaranlar, korkuluklar, çörtener ve tempan (yan) duvarlar gibi birtakım ana ve yardımcı elemanlardan meydana gelir. Yığma kemer köprüler için ana elemanları temeller, tempan duvarlar, kanat duvarlar, kemerler ve dolgu malzemesi olarak söylemek mümkündür [18]. Yığma köprü elemanları Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Tarihi yığma köprü elemanları

### 3. Tağar Köprüsü

Tarihi yığma Tağar köprüsü, Tunceli ili Çemişgezek ilçesinde bulunmaktadır. Köprü, Çemişgezek ilçesine 3 km uzaklıkta bulunan Tağar çayı üzerindedir. Köprünün yapım tarihi 1807 yılıdır ve Osmanlı dönemine aittir. Bosna Hersek’te bulunan Mostar köprüsüyle mimari açıdan benzerlikleri bulunmaktadır. Köprü, ova köyleri ile bağlantıyı sağlamak amacıyla Yusuf Ziya Paşa tarafından yaptırılmıştır (Şekil 2).



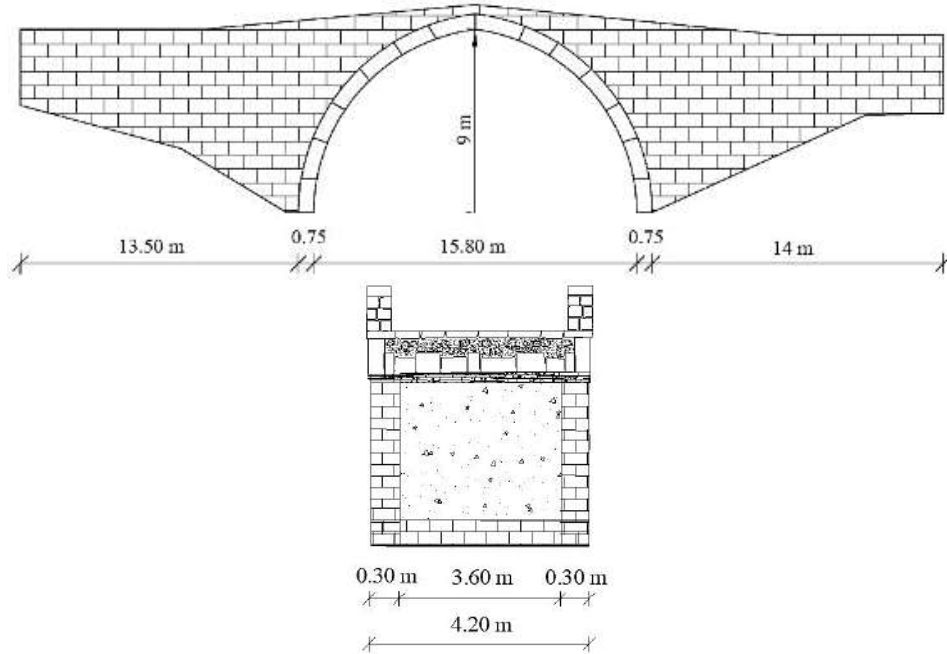
Şekil 2. Tağar Köprüsü

Günümüze kadar gelmeyi başarmış Tağar köprüsü bilinen iki onarım geçirmiştir. Bunlardan ilki, Diyarbakır Valisi Akif Paşa tarafından 1902 yılında, ikincisi ise Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından 1987 yılında yapılmıştır. Yapılan son restorasyon çalışmasında aşağıda maddeler halinde verilen işlemler gerçekleştirilmiştir.

1. Kemerden düşen taşlar gerçeğine uygun biçimde tamamlanmıştır.
2. Tempan duvarda meydana gelmiş çatlaklar ve sökülen taşlar gerçeğine uygun biçimde onarılmıştır.
3. Mansap kısmındaki tempan duvar üzerine sonradan yapılmış sıva sökülerek asıl yüzey ortaya çıkarılmıştır.
4. Kemer ile tempan duvar üzerindeki derzler takviyeler yapılarak yenilenmiştir.
5. Köprüye özgün eğimini tekrar kazandırmak için sonradan yükseltile döşeme ve korkuluklar sökülmüştür.
6. Bozulan baba taşları yenilenmiştir.

Köprü, 1986 yılında 1839 sayılı Taşınmaz Kültür Varlıkları Yüksek Kurulu Kararı ile birinci derece anıtsal yapıt olarak kayda geçmiştir [19].

Tağar köprüsü sivri kemer geometrisine sahiptir. Köprü, dolgu malzemesi, tempan duvarlar ve tempan duvar üzerinde bulunan korkuluklardan oluşmaktadır. Köprünün uzunluğu 44.80 m, genişliği 4.2 m, kemer açıklığı ve yüksekliği sırasıyla 15.8 m ve 9 m dir. Tempan duvar kalınlığı 0.30 m ve korkuluk yüksekliği 0.75 m'dir. Tağar köprüsünün geometrik özellikleri Şekil 3'de görülmektedir.



Şekil 3. Köprüye ait geometrik özellikler

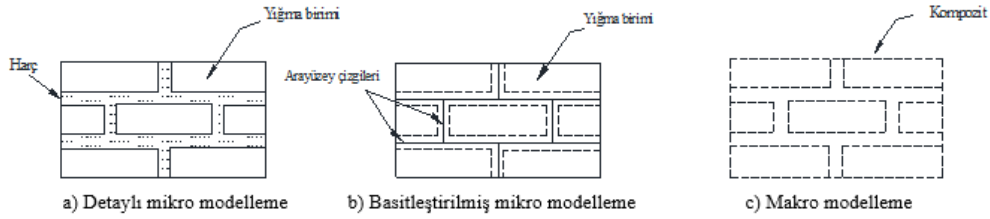
Tarihi yapılarda kullanılan malzemelerin özelliklerinin belirlenmesi güçtür. Ayrıca tarihi öneme sahip bu yapılarda tahrip edici sonuçlara yol açabilir. Bu sebeple köprüde kullanılan malzemelerin özellikleri hakkında deneysel bir çalışma yapılamamıştır. Bu çalışmada geçmişte yapılmış birçok çalışmada olduğu gibi, sonlu elemanlar analizinde kullanılan malzeme özellikleri literatürde tarihi yığma köprülerin analizinde kullanılan malzeme özellikleri dikkate alınarak seçilmiştir [20-22]. Köprüde kullanılan taşın basınç dayanımı 20 MPa, çekme dayanımı ise basınç dayanımının 1/10 ile 1/20 arasında alınabileceği dikkate alınarak 1 MPa olarak dikkate alınmıştır [7]. Çalışmada kullanılan malzeme özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Sonlu elemanlar analizinde dikkate alınan malzeme özellikleri

Malzeme	Elastisite modülü (Mpa)	Poisson oranı	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
Kemer	2500	0.2	2300
Tempan duvarlar	2000	0.2	2100
Dolgu	1200	0.2	1500

### 3. Sonlu Elemanlar Modeli ve Dinamik Analiz

Yığma yapılar üç temel yaklaşım ele alınarak modellenebilir. Bunlar; detaylı mikro modelleme, basitleştirilmiş mikro modelleme ve makro modelleme olarak isimlendirilir [23]. İlk modelleme tekniğinde çözüm süresi oldukça uzun olduğundan daha çok incelenecek yapının bir bölümü veya küçük yapıların çözümü için kullanışlıdır. Basitleştirilmiş mikro modellemede, yığma birimlerinin boyutları harç tabakasının kalınlığının yarısı kadar genişletilerek harç tabakası ihmal edilir. Oluşturulan yığma birimleri birbirlerinden ara yüzey çizgileri ile ayrılırlar. Makro modelleme ise eşdeğer bir malzeme modelidir. Bu modelleme tekniğinde taş, tuğla vb. bloklar ve harç arasında ayırım yapılmaz [24]. Bu modelleme tekniği mikro modelleme tekniklerinden daha az düğüm ve eleman sayısı içerdiğinden bilgisayar çözüm süresini önemli ölçüde azaltır. Bu sebeple büyük yapı sistemlerinin incelenmesinde sıklıkla tercih edilir. Bu modelleme yönteminde yığma malzeme kompozit olarak dikkate alınmaktadır. Geçmişte bu konuda yapılmış çalışmalar incelendiğinde tarihi yapıların genellikle makro modelleme tekniği ile modellendiğini görmek mümkündür. Bu modelleme teknikleri Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Yığma yapıların modelleme teknikleri [23-24].

#### 4.1. Yapılarda kullanılan sönüm modelleri

Sönümsüz modellerle yapılan hesaplar, yapıların dinamik davranışı hakkında önemli bilgiler verse de elde edilen sayısal veriler önemli hatalar içerir. Bu nedenle sayısal sonuçların gerçeğe daha yakın olabilmesi için yapı modeline bir sönüm mekanizması eklemek gerekir. Literatürde, dinamik analizlerde kullanılması önerilen bazı sönüm modelleri vardır [25-26]. Bu modeller aşağıda verilmiştir.

- Vizkoz sönüm
- Kütle orantılı sönüm
- Rijitlik orantılı sönüm
- Kütle ve rijitlikle orantılı (Rayleigh) vizkoz sönüm
- Coloumb sönümü
- Çevresel sönüm
- Enerji yayılma sönümü

Bu çalışma kapsamında yapılan dinamik analizlerde yukarıda belirtilen sönüm modellerinden kütle orantılı, rijitlik orantılı ve Rayleigh sönüm modelleri dikkate alınmıştır.

##### 4.1.1. Kütle orantılı sönüm modeli

Kütle orantılı sönüm modeli, deneylerle elde edilen yapıya ait sönüm oranı ve hakim titreşim frekansıyla ilgilidir. Herhangi bir n'inci mod için genelleştirilmiş sönüm matrisi Denklem 1' de gösterilmiştir.

$$C = a_0 M \quad (1)$$

Burada, C sönüm matrisini,  $a_0$  kütle orantılı sönüm katsayısını ve M ise kütle matrisini ifade etmektedir. Kütle orantılı sönüm katsayısı, herhangi bir moddaki sönüm oranı ile o modun doğal titreşim frekansı ile belirlenir (Denklem 2).

$$a_0 = 2\xi_1 \omega_1 \quad (2)$$



#### 4.1.2. Rijitlik orantılı sönüm modeli

Rijitlik orantılı sönüm modeli, kütle orantılı sönüm modelinde olduğu gibi deneysel olarak elde edilen yapıya ait sönüm oranı ve hakim titreşim frekansı ile ilişkilidir. Rijitlik orantılı sönüm matrisi Denklem 3 yardımı ile belirlenir.

$$C = a_1 \omega_n^2 M \quad (3)$$

Denklemdaki C sönüm matrisini,  $a_1$  rijitlik orantılı sönüm katsayısını,  $\omega_n$  yapının hakim titreşim frekansını M ise kütle matrisini temsil etmektedir.  $a_1$  katsayısı, herhangi bir moddaki sönüm oranı ile o modun doğal titreşim frekansı ile belirlenir (Denklem 4).

$$a_1 = \frac{2\xi_i}{\omega_j} \quad (4)$$

#### 4.1.3. Rayleigh sönüm modeli

Kütle ve rijitlik orantılı sönüm modellerine bağlı olarak birçok deneysel verinin sonucuna göre Rayleigh sönüm oranı aşağıdaki eşitlikler ile bulunur. Direkt integrasyon tekniğinin kullanıldığı analizlerde dikkate alınan Rayleigh sönümü, Denklem 5 ile ifade edilmektedir.

$$C = a_0 M + a_1 K \quad (5)$$

Burada, C, M ve K sırasıyla sönüm, kütle ve rijitlik matrislerini ifade etmektedir. Rayleigh sönüm katsayıları olan  $a_0$  ve  $a_1$  ise sırasıyla kütle ve rijitlik matrisi katsayılarıdır. Rayleigh sönümünde, modal sönüm oranı ile doğal frekanslar arasında Denklem 6 daki eşitlik kullanılır.

$$\xi_n = \frac{a_0}{2} \frac{1}{\omega_n} + \frac{a_1}{2} \omega_n \quad (6)$$

Eğer bu ifade matris biçiminde sistemin farklı iki mod durumu için yazılacak olursa Denklem 7'deki matris elde edilir

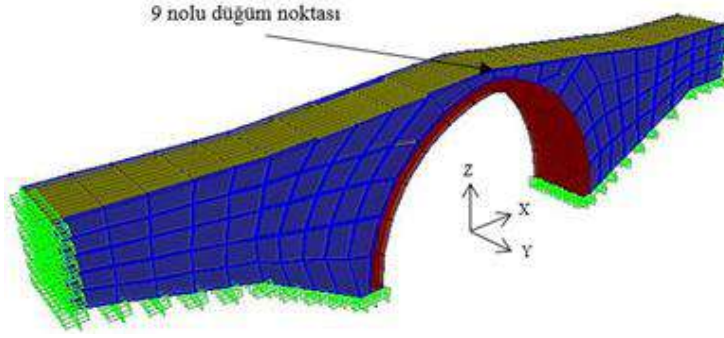
$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1/\omega_i & \omega_i \\ 1/\omega_j & \omega_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \xi_i \\ \xi_j \end{Bmatrix} \quad (7)$$

Denklem 7' deki  $\omega_i$ ,  $\omega_j$  ifadeleri sistemin i inci ve j inci moda ait doğal frekanslarıdır. Bu matris tanımından kütle ( $a_0$ ) ve rijitlik ( $a_1$ ) orantı katsayıları Denklem 8'de verilen ifadelerle hesaplanmaktadır [25-26].

$$a_0 = \frac{2\xi_i \omega_i \omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad a_1 = \frac{2\xi_j}{\omega_i + \omega_j} \quad (8)$$

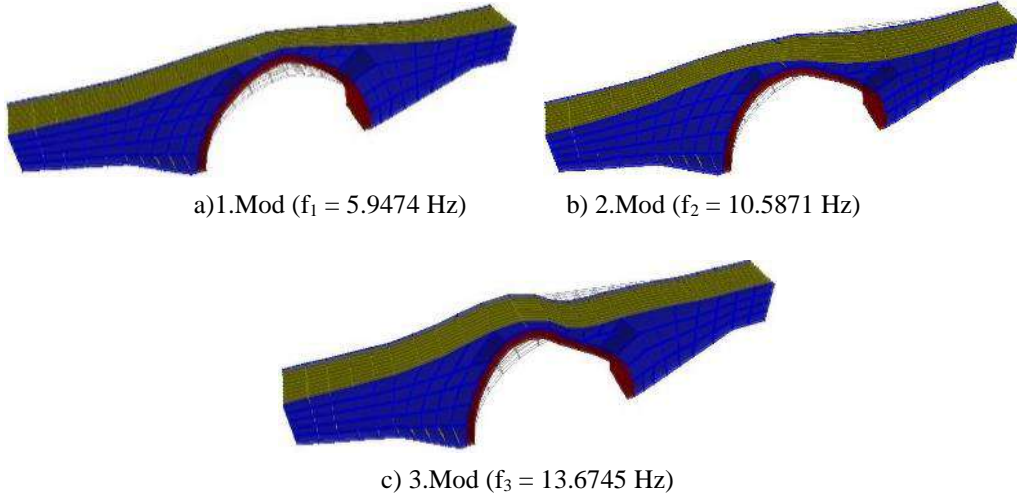
## 4.2. Köprünün dinamik analizleri

Tarihi Tağar köprüsünün üç boyutlu sonlu elemanlar modeli SAP2000 [27] programı ile üç boyutlu katı (solid) elemanlar kullanılarak hazırlanmıştır. Köprüde makro modelleme yöntemi esas alınmıştır. Köprünün sonlu elemanlar ağı 2115 düğüm noktası ve 1498 dörtgen prizmatik katı elemandan oluşmaktadır. Köprünün sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasında her düğüm noktasında üç serbestliği bulunan sekiz düğüm noktalı üç boyutlu katı elemanlar kullanılmıştır. Bu çalışmada, köprünün zeminle temas eden bölgeleri ankastre (fixed) mesnetli olarak modellenmiştir. Tağar köprüsünün üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ve tepki büyüklüklerinin incelendiği 9 nolu düğüm noktası Şekil 5'te verilmiştir.



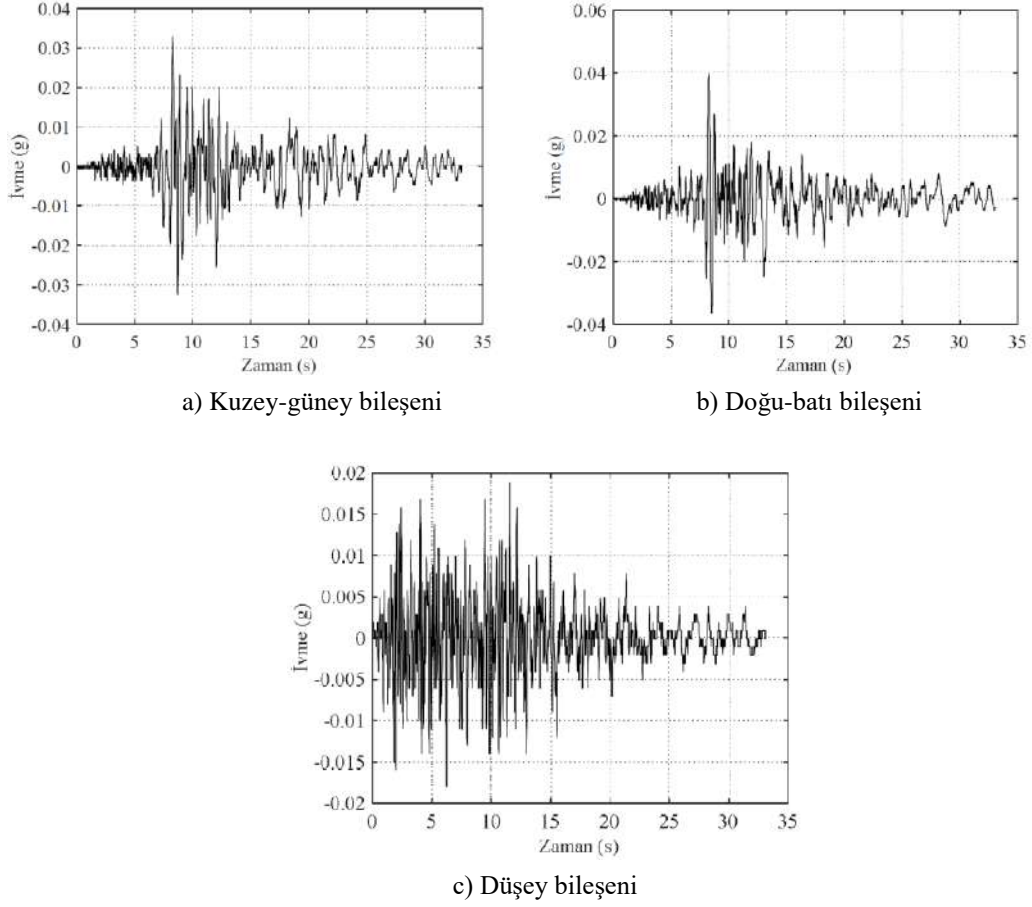
Şekil 5. Köprü'nün 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli

Köprü'nün dinamik karakteristiklerini elde etmek amacıyla ilk olarak modal analiz yapılmıştır. Modal analizde hesaplanan etkin kütle katılım oranlarının toplamı köprü'nün toplam kütlelerinin %90'ından büyük olacak şekilde yeterli mod sayısı hesaba katılmıştır. Şekil 6'da köprü'nün ilk üç mod şekli ve frekansları verilmiştir. Mod şekilleri incelendiğinde ilk modun y doğrultusunda öteleme, ikinci modun burulma-dönme, üçüncü modun ise x doğrultusunda öteleme olduğu görülmektedir. Tağar köprü'sünün zaman tanım alanında dinamik analizleri için 15.03.1992 Tunceli depreminin ivme kayıtları dikkate alınmıştır. 1992 Tunceli depremine ait Kuzey-Güney, Doğu- Batı ve düşey doğrultudaki ivme zaman grafikleri Şekil 7'de verilmiştir. Yapılan analizlerde depremin doğu-batı bileşeni köprüye suyun akış doğrultusunda (y doğrultusu) uygulanmıştır. İntegrasyon zaman adımı 0.01 s olarak dikkate alınmıştır. Dinamik analizler için HHT- $\alpha$  algoritmasının tahmin düzeltme yöntemi ile birleştirilmiş formu kullanılmıştır. Çalışma kapsamında kütle, rijitlik ve Rayleigh sönümleri dikkate alınarak hasarsız durumdaki köprü için %2, %5, %7 ve %10 sönüm oranı olacak şekilde Tağar köprü'sünün lineer dinamik analizleri yapılmıştır. Analizlerde köprü'nün kendi ağırlığı da hesaba katılmıştır. Bu çalışmada, analizlerde zamana bağlı gerilmelerin en büyük ve en küçük (envelope max, envelope min.) değerleri dikkate alınmıştır. Burada envelope min. basınç gerilmelerinin en büyük değerini, envelope max. ise çekme gerilmelerinin en büyük değerini ifade etmektedir.



Şekil 6. Tağar köprü'sünün ilk üç mod şekli ve doğal frekansları

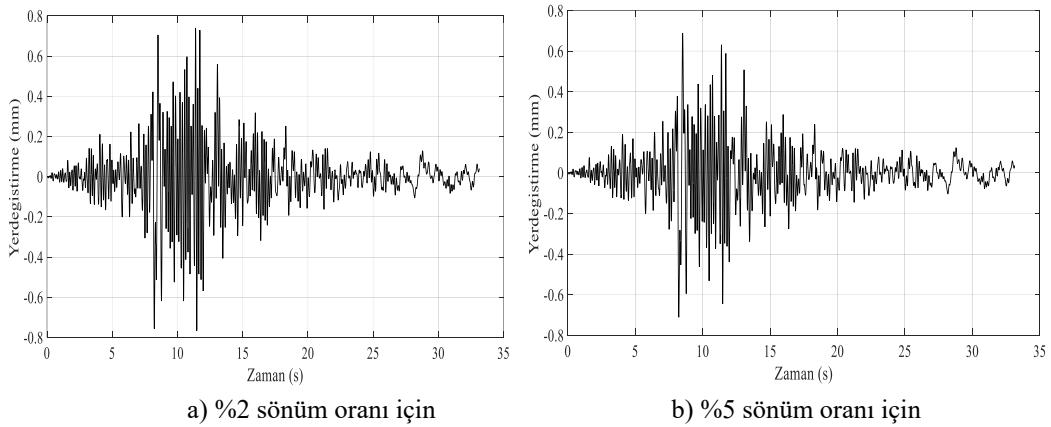
## Farklı Sönüm Tipleri Altında Tarihi Yığılma Köprülerinin Sismik Tepkilerinin Değerlendirilmesi

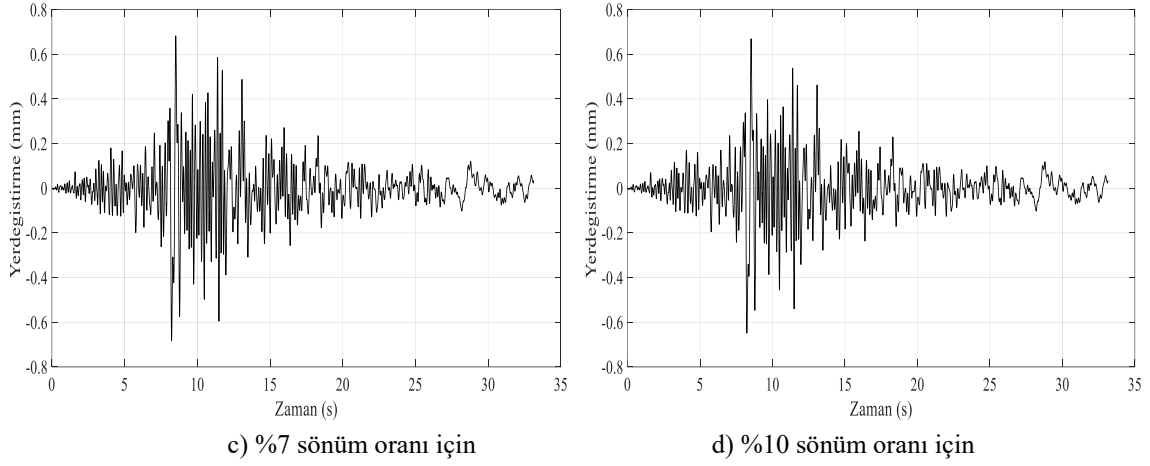


Şekil 7. 1992 Tunceli depremi ivme kayıtları

### 5. Dinamik Analiz Sonuçları

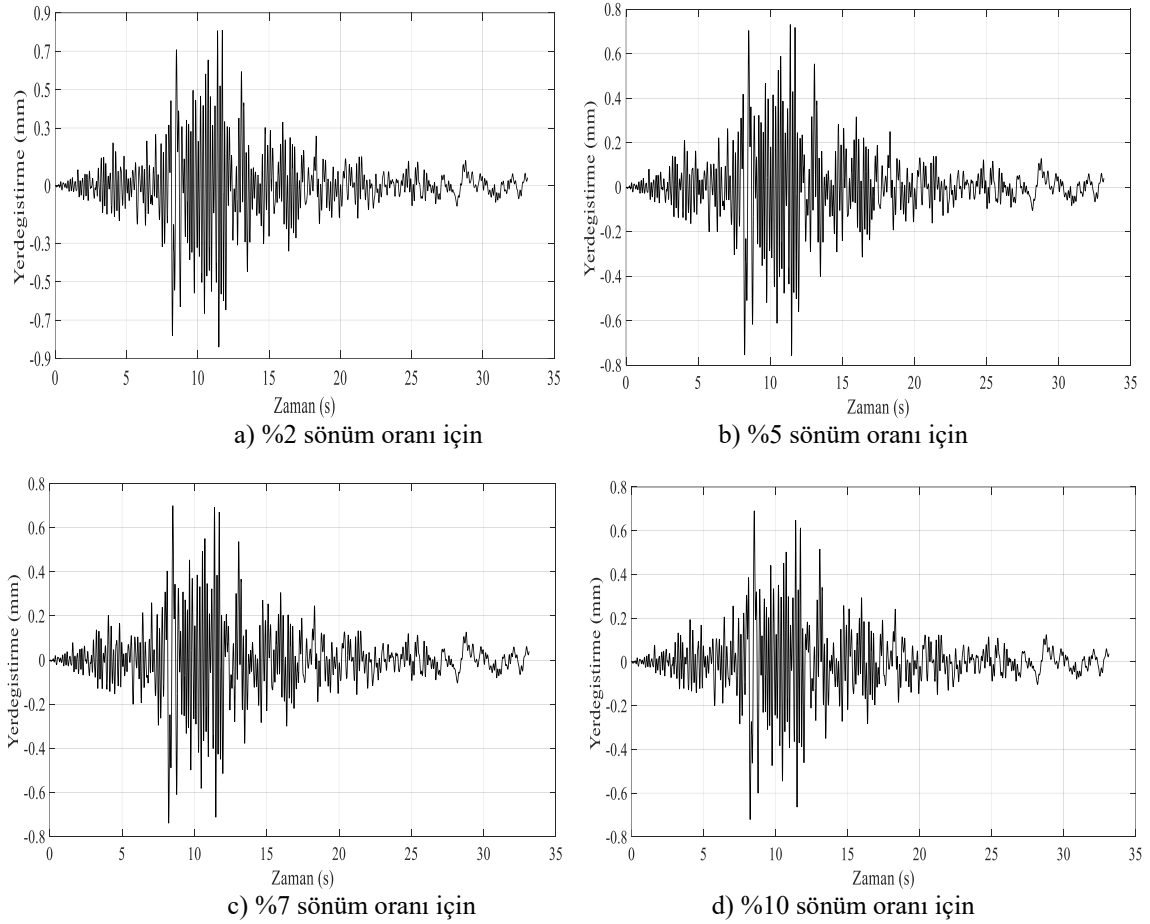
Kütle orantılı sönüm tipi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan analizlerde tarihi Tağar köprüsünün 9 nolu düğüm noktasının %2, %5, %7 ve %10 sönüm oranları için elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri Şekil 8'de verilmiştir. Bu analizlerde en büyük yer değiştirme değerleri y ekseninde elde edilmiştir. Y eksenindeki mutlak maksimum yer değiştirme değerleri %2, %5, %7 ve %10 sönüm oranları için sırasıyla 0.767 mm, 0.711 mm, 0.684 mm ve 0.670 mm olarak bulunmuştur. Sönüm oranının artması ile yer değiştirme değerleri azalmış köprüde ileri seviyede bir yer değiştirme oluşmamıştır.





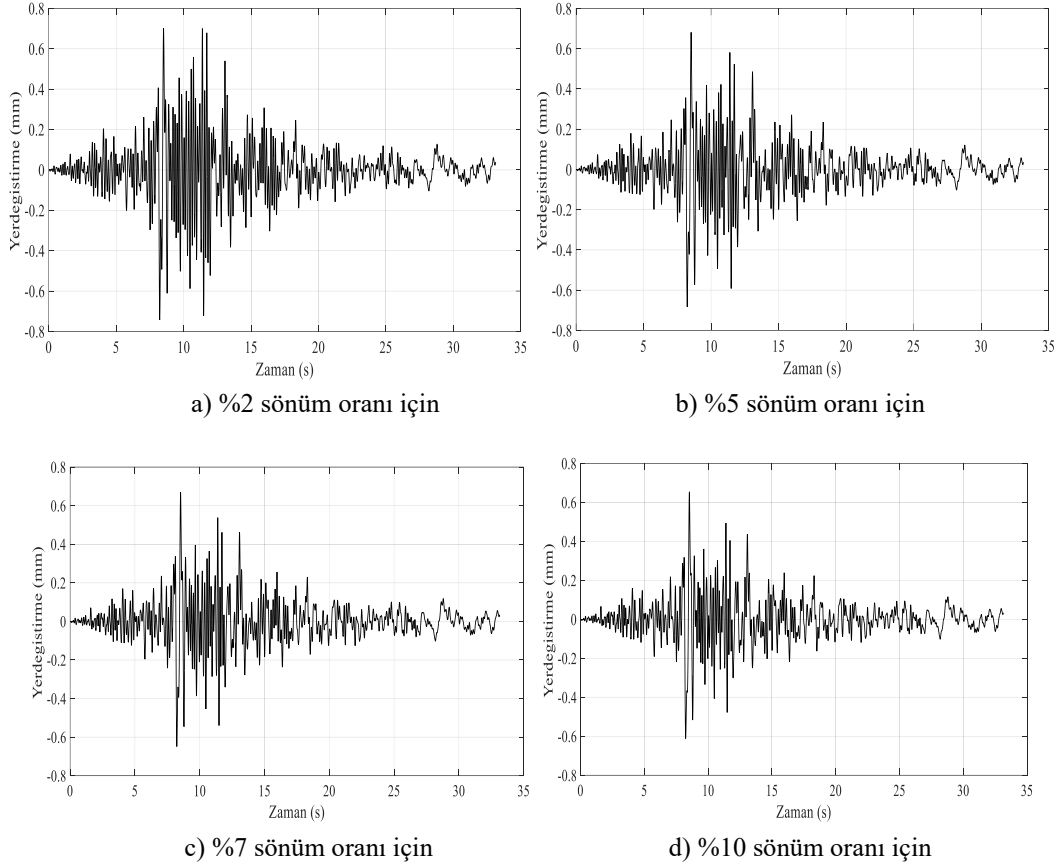
**Şekil 8.** Kütlesel sönüm oranları için 9 nolu düğüm noktasının yer değiştirme-zaman grafikleri

Rijitlik oranlı sönüm tipi için zaman tanım alanında yapılan analizlerde tarihi Tağar köprüsünün 9 nolu düğüm noktasının %2, %5, %7 ve %10 sönüm oranları için elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri Şekil 9'da verilmiştir. Bu analizlerde tüm sönüm oranlarında en büyük yer değiştirme değerleri y ekseninde bulunmuştur. Y eksenindeki mutlak maksimum yer değiştirme değerleri %2, %5, %7 ve %10 sönüm oranları için sırasıyla 0.841 mm, 0.757 mm, 0.740 mm ve 0.721 mm olarak elde edilmiştir. Sönüm oranının artması ile yer değiştirme değerleri azalmış köprüde ileri seviyede bir yer değiştirme meydana gelmemiştir.



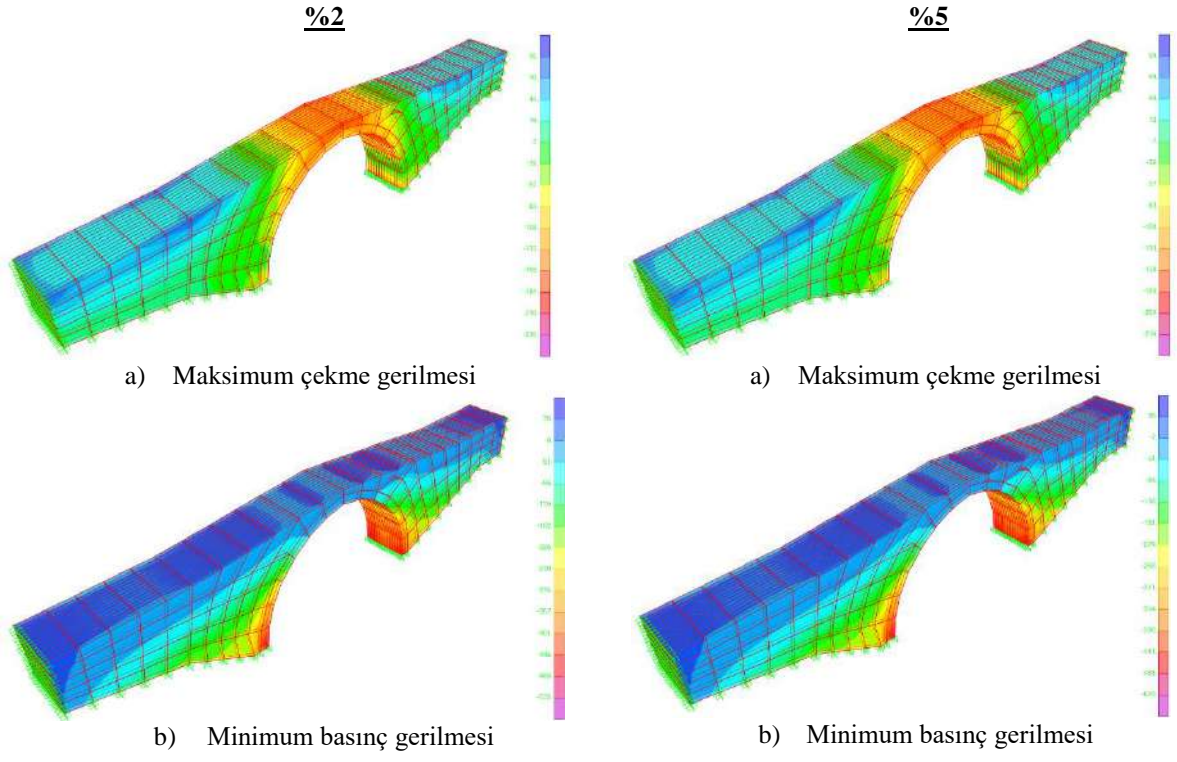
**Şekil 9.** Rijitlik oranlı sönüm oranları için 9 nolu düğüm noktasının yer değiştirme-zaman grafikleri

Rayleigh sönüm tipi dikkate alınarak zaman tanım alanında yapılan analizlerde tarihi Tağar köprüsünün 9 nolu düğüm noktasının %2, %5, %7 ve %10 sönüm oranları için elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri Şekil 10'da verilmiştir. Diğer sönüm tiplerinde olduğu gibi bu sönüm tipinde de en büyük yer değiştirme değerleri y ekseninde elde edilmiştir. Y eksenindeki mutlak maksimum yer değiştirme değerleri %2, %5, %7 ve %10 sönüm oranları için sırasıyla 0.743 mm, 0.683 mm, 0.669 mm ve 0.654 mm olarak bulunmuştur. Yer değiştirme grafikleri incelendiğinde sönüm oranının artması ile yer değiştirme değerleri azalmış olup tüm sönüm oranları için yapılan analizlerde köprüde ileri seviyede bir yer değiştirme oluşmamıştır.

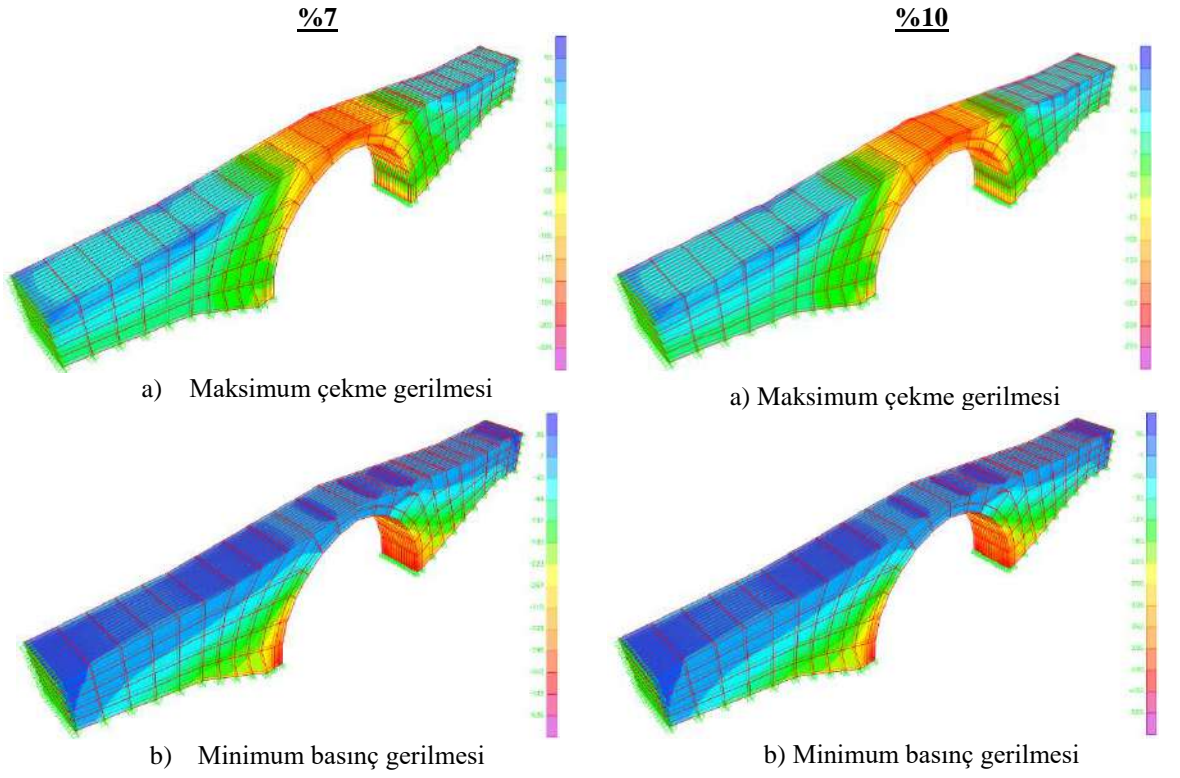


Şekil 10. Rayleigh tipi sönüm için 9 nolu düğüm noktasının yerdeğiştirme-zaman grafikleri

Köprü'nün dinamik analizleri sonucu kütle orantılı sönüm tipi için %2, %5, %7 ve %10 sönüm oranları için elde edilen gerilme diyagramları Şekil 11 ve 12'de verilmiştir. Gerilme diyagramlarında en büyük değerler %2 sönüm oranında elde edilmiştir. Şekil 11 incelendiğinde çekme gerilmelerinin en büyük değerinin 93.25 kPa olarak köprü yan duvarlarında, basınç gerilmelerinin ise en büyük değerlerinin -531.51 kPa olarak kemerin ayak bölgesinde yoğunlaştığını söylemek mümkündür. Rijitlik orantılı sönüm tipi için %2, %5, %7 ve %10 sönüm oranları için elde edilen gerilme diyagramları ise Şekil 13 ve 14'de verilmiştir. Gerilme diyagramlarında en büyük değerler %2 sönüm oranında bulunmuştur. Şekil 13 incelendiğinde çekme gerilmelerinin en büyük değerinin 93.30 kPa olarak köprü yan duvarlarında, basınç gerilmelerinin ise en büyük değerlerinin -533 kPa olarak kemerin ayak bölgesinde yoğunlaşmıştır. Rayleigh sönüm tipi için ise %2, %5, %7 ve %10 sönüm oranlarında elde edilen gerilme diyagramları Şekil 15 ve 16'da verilmiştir. Bu diyagramlarda en büyük gerilme değerleri %2 sönüm oranında elde edilmiştir. Şekiller incelendiğinde çekme gerilmelerinin en büyük değerinin 93.17 kPa olarak köprü yan duvarlarında, basınç gerilmelerinin ise en büyük değerlerinin -530.32 kPa olarak kemerin ayak bölgesinde oluşmuştur. Tüm sönüm oranları için elde edilen gerilme diyagramları köprü için kabul edilen basınç ve çekme dayanımının altındadır.

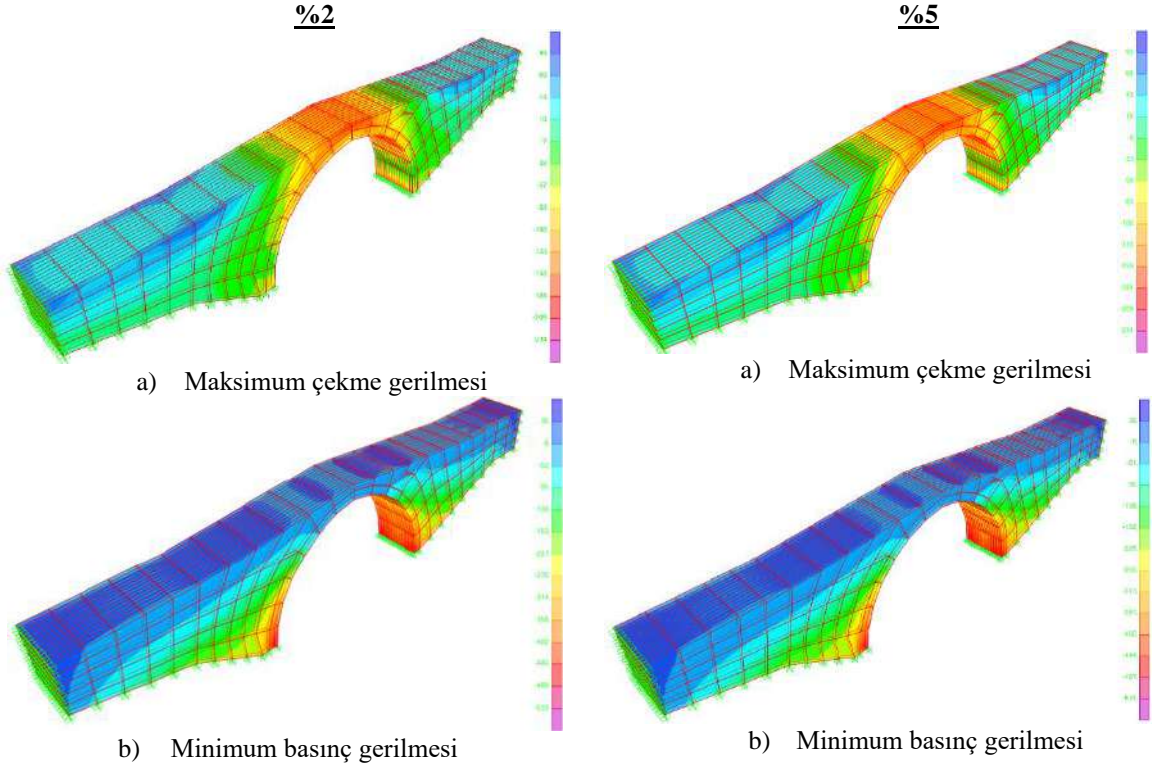


Şekil 11. Kütle orantılı sönüm tipinde %2 ve %5 sönüm oranı için elde edilen gerilme diyagramları (kPa)

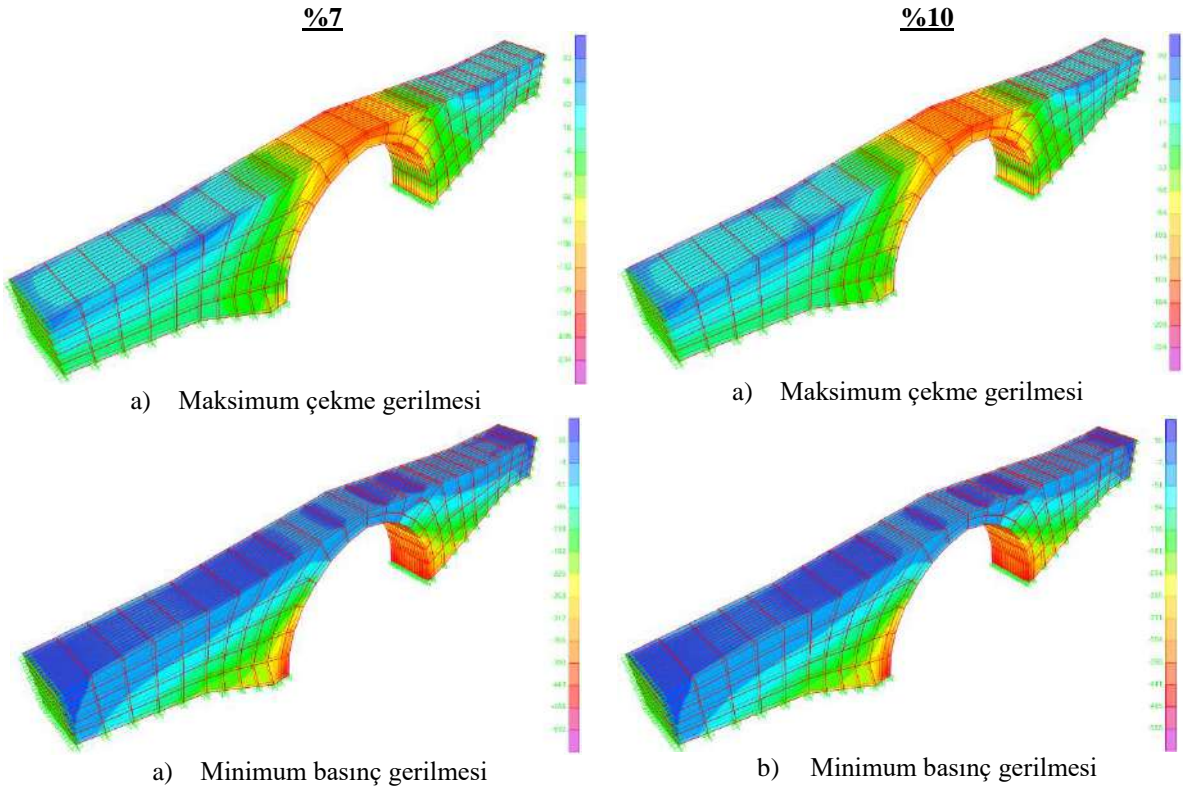


Şekil 12. Kütle orantılı sönüm tipinde %7 ve %10 sönüm oranı için elde edilen gerilme diyagramları (kPa)

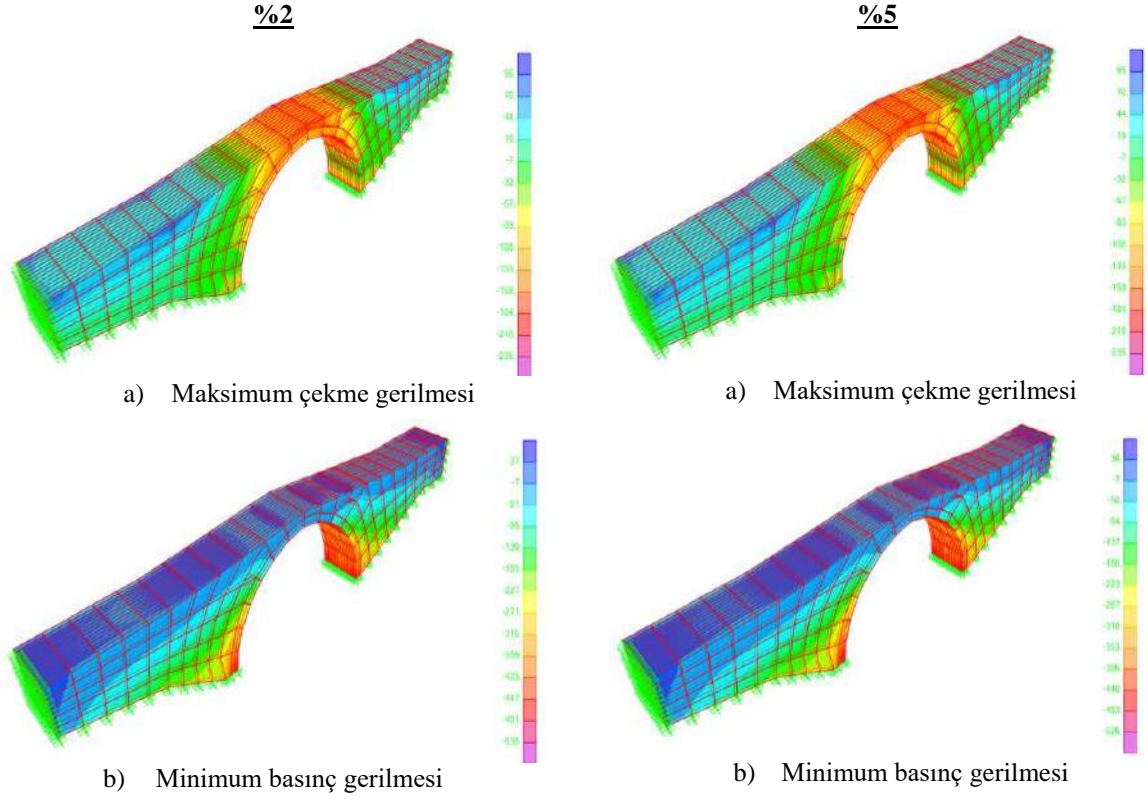




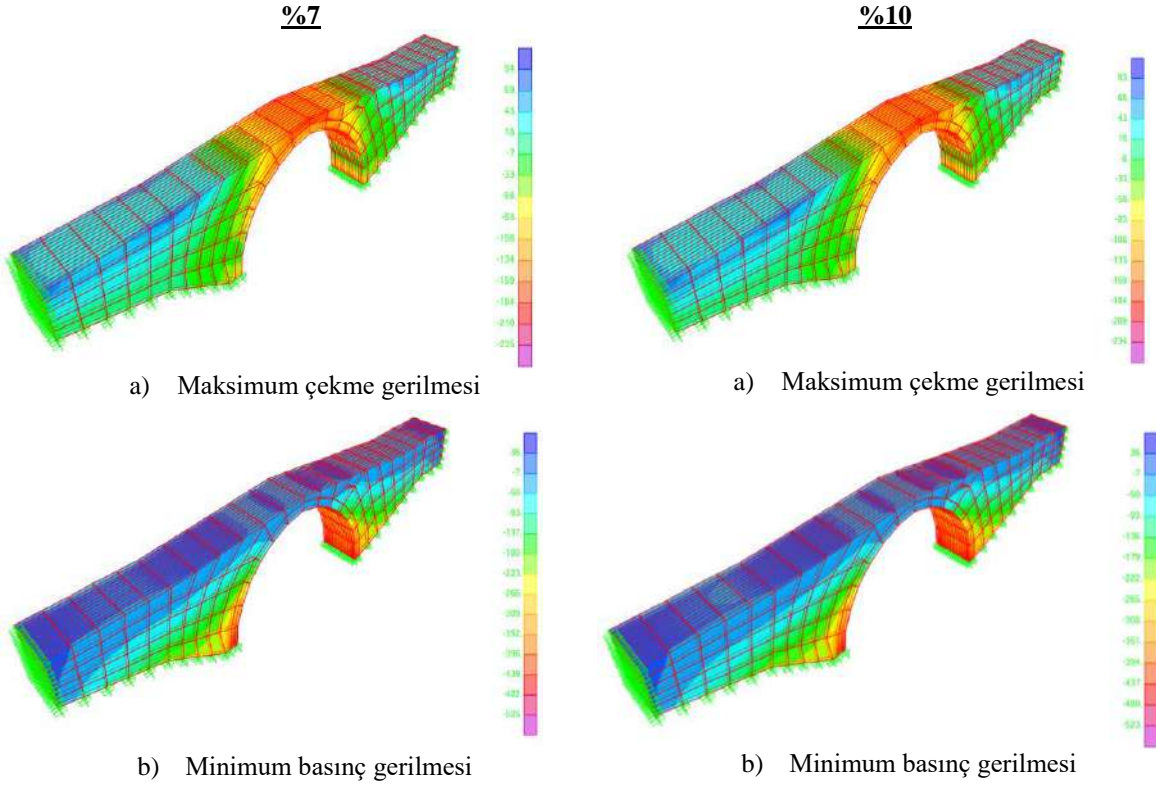
Şekil 13. Rijitlik orantılı sönüm tipinde %2 ve %5 sönüm oranı için elde edilen gerilme diyagramları (kPa)



Şekil 14. Rijitlik orantılı sönüm tipinde %7 ve %10 sönüm oranı için elde edilen gerilme diyagramları (kPa)



Şekil 15. Rayleigh sönüm tipinde %2 ve %5 sönüm oranı için elde edilen gerilme diyagramları (kPa)



Şekil 16. Rayleigh sönüm tipinde %7 ve %10 sönüm oranı için elde edilen gerilme diyagramları (kPa)



## 6. Sonuçlar

Bu çalışmada, tarihi yığma bir köprünün farklı sönüm tipleri ve oranları altında sismik tepkisi değerlendirilmiştir. Bu amaçla tarihi Tağar köprüsü dikkate alınarak üç boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Köprünün modal analizi yapılarak doğal titreşim frekansları, periyot ve mod şekilleri elde edilmiştir. Daha sonra sönüm tipinin kütle orantılı sönüm, rijitlik orantılı sönüm ve Rayleigh sönümü olduğu kabul edilerek zaman-tanım alanında farklı sönüm oranları için köprünün dinamik analizleri yapılmıştır. Dinamik analizler için köprünün bulunduğu konumda dikkate alınarak 1992 Tunceli depremi ivme kayıtları dikkate alınmıştır. Dinamik analizler sonucunda köprüde meydana gelen yer değiştirme ve gerilme değerleri elde edilmiştir. Yer değiştirme değerlerinin araştırıldığı düğüm noktasında en büyük yer değiştirme değeri köprünün y eksenine doğrultusunda bulunmuştur. En büyük yer değiştirme değeri ise rijitlik orantılı sönüm de elde edilmiştir. Analizler sonucunda çekme gerilmeleri yan duvarların üst kısımlarında ve köprünün her iki ucuna yakın bölgelerde yoğunlaşırken basınç gerilmeleri ise kemerin zemine oturduğu bölgede yoğunlaşmıştır. En büyük gerilme ve yer değiştirme değerleri %2, %5, %7 ve %10 sönüm oranları için elde edilmiştir. Farklı sönüm tipleri için elde edilen gerilme değerleri birbirine yakın olmakla beraber en büyük gerilme değerleri rijitlik orantılı sönüm tipinde bulunmuştur. Ancak elde edilen basınç ve çekme gerilmeleri çalışmada dikkate alınan taşın basınç ve çekme dayanımının altında kalmış ve sönüm oranının artmasıyla köprüde meydana gelen yer değiştirme ve gerilme değerleri azalmıştır.

## Teşekkür

Bu çalışma, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje birimi (FÜBAP) tarafından desteklenmiştir (Proje No: MF.20.28). Yazarlar bu projeye desteklerinden dolayı FÜBAP'a teşekkür ederler.

## Kaynaklar

- [1] Fanning P.J, Boothby TE. Three-dimensional modelling and full-scale testing of stone arch bridges. *Computers and Structures* 2001; 79(29-30): 2645-2662.
- [2] Sevim B, Bayraktar A, Altunışık AC, Atamtürkür S, Birinci F. Assessment of nonlinear seismic performance of a restored historical arch bridge using ambient vibrations. *Nonlinear Dynamics* 2011; 63(4): 755-770.
- [3] Sayın E, Calayır Y, Karaton M. Nonlinear seismic analysis of historical Uzunok bridge. *Seventh National Conference on Earthquake Engineering*, 30 May–3 June 2011; Istanbul, Turkey.
- [4] Tetik T. Tarihi yığma yapıların deprem performansı ve güçlendirme teknikleri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetimi Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2015.
- [5] Yılmaz B. Tarihi köprülerin yapısal davranışına kemer geometrisinin etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye, 2016.
- [6] Günaydın M. Tarihi bir yığma minarenin onarım sonrasındaki dinamik karakteristiklerinin deneysel olarak belirlenmesi. *GÜFBED* 2018; 8(2): 381-395.
- [7] Güllü H. Tarihi yığma yapıları cendere köprüsünün deprem etkisinin incelenmesi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2018; 7(1): 245-259.
- [8] Özmen A, Sayın E. Seismic assessment of a historical masonry arch bridge. *Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics* 2018; 1(2): 95-104.
- [9] Öncü M.E, Karaşın A, İzgi R, Karaşın İ.B. Tarihi Tuzluca köprüsünün yapısal durumunun değerlendirilmesi. 4. Köprüler ve Viyadükler Sempozyumu, 1-2 Kasım 2019; Ankara, Türkiye.
- [10] Demir O. Tarihi Diyarbakır Dicle (On Gözlü) köprüsü'nün sonlu elemanlar yöntemiyle analizi. Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzincan, Türkiye, 2019.
- [11] Gönül A, Sakcalı GB. Tarihi Irgandı köprüsünün deprem performansı. 5. International Conference on Earthquake Engineering and Seismology, 8-11 October 2019; Ankara, Türkiye.
- [12] Öksüz BA. Rize Timisvat köprüsünün sonlu elemanlar yöntemiyle dinamik analizi. *A Journal of Structural Science and Innovation* 2019; 1(1): 1-8.
- [13] Işık E, Antep B, Karaşın İB, Öncü ME. Ahlat ilçesinde yer alan Bezirhane beden duvarının sonlu elemanlar yöntemi ile analizi. *DÜMF Mühendislik Dergisi* 2019; 10(2): 721-730.
- [14] Hökelekli E. Yapı-zemin etkileşiminin tarihi yığma minarelerin deprem davranışına etkisi. *DÜMF Mühendislik Dergisi* 2020; 11(2): 825-838.
- [15] Özmen A, Sayın E. Tarihi yığma bir köprünün deprem davranışının değerlendirilmesi. *NÖHÜ Müh. Bilim. Derg.* 2020; 9(2): 956-965.
- [16] Homaei, F, Yazdani, M. The probabilistic seismic assessment of aged concrete arch bridges: The role of soil-structure interaction. *Structures* 2020; 28: 894-904.

- [17] Tokar S, Ünay Aİ. Kemerli taş köprülerin matematiksel modellenmesi ve sonlu elemanlar yöntemiyle analizi. G.Ü.Fen Bilimleri Dergisi 2004; 17(2): 129-139.
- [18] Hughes TG, Blackler MJ. A review of the UK masonry arch assessment methods. Proceedings of the Institution of Civil Engineers 1997; 122(3), 305-15.
- [19] Yıldırım S. Yusuf Ziya Paşa'nın hayatı ve yaptırmış olduğu eserler. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Elazığ, Türkiye, 2018.
- [20] Frunzio G, Monaco M, Gesualdo A. 3D F.E.M. analysis of a Roman arch bridge, Historical Constructions. P.B.Lourenço, P.Roca (Eds.), 591-598, Guimarães, 2001.
- [21] Bayraktar A, Altunışık AC, Türker T, Sevim B. Tarihi köprülerin deprem davranışına sonlu eleman model iyileştirilmesinin etkisi. Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 2007; İstanbul, Türkiye.
- [22] Pela L, Aprile A, Benedetti A. Seismic assessment of masonry arch bridges. Engineering Structures 2009; 31: 1777-1788.
- [23] Lourenço P.B. Computations on historic masonry structures, Prog. Struct. Eng. Mater. 2002; 4: 301–319.
- [24] Sayın E. Yığma yapıların lineer olmayan statik ve dinamik analizi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye, 2009.
- [25] Celep, Z. Yapı Dinamiği, Dördüncü Baskı, Beta Basım Yayımları, İstanbul, Türkiye, 2011.
- [26] Karahmetli S, Dündar C. Yapıların dinamik analizinde kullanılan sönüm modellerinin incelenmesi. Çukurova Üniversitesi Müh. Mimarlık Fakültesi Dergisi 2017; 32(2): 23-35.
- [27] SAP2000, Integrated Structural Analysis and Design Software, Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, 2016.



## İçme Suyu İsale Hatlarındaki Basınç Kırıcı Yapılarda Enerji Üretiminin Yapısal Tasarımı ve Analizi: Kahramanmaraş Örneği

Ahmet Fatih TAHİROĞLU<sup>1</sup>, Muhammet Ömer DİŞ<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş, Türkiye

<sup>1</sup> ahmetfatihthiroglu@hotmail.com, <sup>\*1</sup> momerdis@ksu.edu.tr

(Geliş/Received: 07/06/2021;

Kabul/Accepted: 15/11/2021)

**Öz:** Şehirlere içme suyu sağlayan isale hatlarının önemli bir kısmı daha yüksek rakımlı kaynak noktalarından şehir merkezlerine ulaşmaktadır. Onlarca kilometre uzunluğa sahip olabilen bu hatlarda düşü farkından oluşan suyun yüksek basıncı tasarım aşamasında konumlandırılan maslaklarda ve depolarda kırılmaktadır. Bu çalışma ile tasarım aşamasında enerji üretimi düşünülmeden projelendirilen ve inşa edilen mevcut içme suyu isale hatlarındaki potansiyelin, hat üzerinde değişikliğe gidilmeden değerlendirilmesi araştırılmıştır. Bu bağlamda Kahramanmaraş özelinde il merkezine içme suyu sağlayan hatlar üzerindeki potansiyel incelenmiştir. Yapılan ön fizibilite neticesinde savunulan hipotezin geçerli olduğu ve örnek projenin Kahramanmaraş Su ve Kanalizasyon İdaresi için verimli olacağı sonucuna ulaşılmıştır. Bu sonuçtan yola çıkarak, ayrıca, Türkiye genelindeki potansiyelin tespiti ve hayata geçirilmesine yönelik nasıl çalışmalar yapılabileceği hususunda değerlendirmeler yapılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** İçme Suyu İsale Hattı, Basınç Kırıcı Yapılar, Hidroelektrik Enerji

### Structural Design and Analysis of Energy Production in Pressure Breaker Structures at Drinking Water Pipelines: The Case Study over Kahramanmaraş

**Abstract:** A significant portion of the pipelines that provide drinking water to cities reach the city centers from higher altitude source points. In these lines, which may be tens of kilometers long, the high pressure of the water, which is caused by the difference of falling, breaks in the pressure breaker tank and storage plants located at the design stage. With this study, it was analyzed how the potential of the existing drinking water pipelines, designed and constructed without considering energy production, could be used without modifying the line. In this context, potential has been investigated on lines that provide drinking water to the city center in Kahramanmaraş. As a result of the preliminary feasibility, it was concluded that the hypothesis was valid and the sample project would be efficient for Kahramanmaraş Water and Sewage Directorate. Based on this result, additionally, assessments were made on how evaluation projects can be studied to identify and implement the potential throughout Turkey.

**Key words:** Drinking Water Pipeline, Pressure Breaker Structures, Hydroelectric Energy

#### 1. Giriş

Hidroelektrik enerji yenilenebilir enerji kaynakları arasında endüstriyel olarak en eskisidir. Bu enerji potansiyelinin çok büyük bir kısmı barajlardan ve nehir tipi hidroelektrik santrallerden elde edilmesine rağmen cazibeli içme suyu isale hatları, düzenli su rejimleri ile işletmeciyatırımcı idarelere verimli fırsatlar sunmaktadır. Örneğin, 1873 yılından bu yana Viyana içme suları Avusturya Alp Dağları'ndaki kaynaklardan sağlanmaktadır. İlk HidroElektrik Santral (HES) tesisinin 1929 yılında kurulduğu iki ana isale hattında toplam 14 adet küçük ölçekli HES tesisi bulunmaktadır. Bu tesislerde yıllık 65 milyon kWh enerji üretilmekte ve enterkonnekte sisteme aktarılmaktadır. Viyana'nın iki ana içme suyu temin hattındaki bu 14 HES'in tamamı elektrik şebekesine entegre (On-Grid) sistemlerdir. Ayrıca bu tesislere ilave olarak izole kullanıma örnek teşkil eden Viyana şehir merkezinde yer alan 100 kW gücündeki Schafberg mikro HES tesisinde üretilen enerji elektrik şebekesine entegre edilmeden (Off-Grid) olarak idareye ait bir pompa istasyonunda doğrudan kullanılmaktadır. Cazibeli isale hatlarının tasarım aşamasında enerji üretimi düşünülerek projelendirilmesi ve inşa edilmesi idarelere önemli faydalar sağlamaktadır. İsale hatlarından enerji üretimi kısıtlı kaynaklarla hizmet etmek zorunda olan belediyeler için ek bir gelir kaynağı oluşturmaktadır. Örneğin, Viyana Su İdaresi'nin yıllık enerji gelirinin yaklaşık 4,5 milyon € olduğu ifade edilmektedir [1]. Diğer bir örnek olarak ise, San Marcos ile Mira Mesa (San Diego, ABD) arasındaki boru hattı üzerine tasarım aşamasında projelendirilen ve 21 milyon USD maliyetle 28 aylık bir sürede kurulan HES tesisi

\* Sorumlu yazar: [momerdis@ksu.edu.tr](mailto:momerdis@ksu.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-1582-3187, <sup>2</sup> 0000-0002-3347-5112

2004 yılında faaliyete geçmiştir. Kurulu gücü 4,5 MW olup bu tesiste yıllık 30 milyon kWh enerji üretilmektedir [2]. Farklı bir örnek olarak, Melbourne Su İdaresi'nin 90 kW ile 7,4 MW arasında değişen 1984'den günümüze 14 farklı HES tesisi kurulmuştur. Bunlardan büyük güçte olan 10 tanesi isale hatlarının tasarımı aşamasında planlanan HES tesisleri olmakla birlikte; dört tanesi basınç kırıcı vanalar, maslaklar ya da depo girişlerine tesis edilmiş olan 1 MW gücün altındaki HES tesisleridir. Bu HES tesislerinden bir tanesinin işletmesi özel sektöre ait olup, diğerlerinde yıllık yaklaşık 70 milyon kWh enerji üretilmektedir. Daha küçük güçteki bazı HES tesislerinin ise kompakt şekilde ve bir bina olmaksızın konteynır şeklinde tesis edildiği tespit edilmiştir [3]. Hong Kong'da, diğer bir örnek olarak, 500 kW güce sahip Tuen Mun HES tesisi rezervuar önüne kurulmuş olup yıllık 3 milyon kWh enerji üretmektedir [4]. İsviçre'de de içme suyu ve atık su tesisleri üzerindeki enerji üretim potansiyeli incelenmiştir. Çalışmada kullanılan ve kullanılabilir potansiyel irdelenmiş olup atık suların arıtılmasına müteakip kurulan HES tesisleri de incelenerek gelecek yatırımlar için bir projeksiyon ortaya konmuştur. Değişik kantonlardaki içme suyu isale hatlarında toplam kurulu gücü yaklaşık 10 MW olan 90 adet HES tesisi bulunmaktadır [5]. İtalya'nın Kuzey Sardunya bölgesindeki Mulargia – Cagliari içme suyu isale hattı üzerindeki San Lorenzo HES tesisi 1,2 m<sup>3</sup>/sn debi ve 120 m brüt düşüye göre tasarlanan tek üniteli 1250 kW gücündeki yatay eksenli Francis türbinine sahiptir. Bu tesiste yıllık 7 milyon kWh enerji üretilmektedir [6]. 1.630 m rakımlı Boulder şehrinde (Colorado, ABD) içme suyu temini 3.015 m rakımlı Rocky Dağlarındaki kaynaklardan elde edilmektedir. İsale hattı üzerinde 1985-2001 arasında 7 adet HES tesisi kurulmuştur [7]. Atina'ya su temini sağlayan EYDAP Şirketi tarafından içme suyu hatları üzerine güçleri 590 kW ile 1.200 kW arasında değişen 6 adet HES tesisi kurulmuştur. Bu tesislerin EYDAP'a yıllık enerji katkısı 20 milyon kWh'tir [8]. Aynı zamanda, 200 kW'a kadar olan mikro ve mini HES'lerin gelişmekte olan ülkeler için sağladığı sürdürülebilir gelişme araştırılmıştır. Mozambik, Peru, Zimbabve ve Sri Lanka üzerindeki örnekler maliyet ve fayda açısından incelendiğinde tüm örneklerin buldukları bölge için kısa sürede sağladıkları yüksek faydayla rantabl projeler olduğu tespit edilmiştir [9]. Bu bağlamda, örneklerden de görüldüğü üzere, isale hatlarında enerji üretimi hususunda, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin yenilenebilir enerji kaynağına dayalı potansiyeli değerlendirmede istekli olduğu gözlemlenmiştir. Malatya içme suyu şebekeleri üzerinde enerji üretim verimliliği incelenmiş, isale hattı üzerindeki depo girişlerinde kurulması planlanan yeni bir türbin olan spherical tipinin klasik türbinlere nazaran fayda maliyet analizi yapılmıştır. Yeni tipin yerli imkanlarla geliştirilmesi halinde bölgeye daha katkılı olabileceği sonucuna ulaşılmıştır [10]. Diğer bir çalışmada ise İtalya'daki Campania bölgesindeki Cava de Tirreni Belediyesinin su teminindeki enerji potansiyeli incelenmiştir. Ausino içme suyu isale hattı üzerine 108kW gücündeki pelton türbinine sahip bir mikro HES tesisinin rantabl olduğu ve kurulabileceği sonucuna ulaşılmıştır [11]. Gelişen teknolojiye paralel olarak bilgisayar simülasyonlarının da etkin kullanımı ile isale hatlarının daha randımanlı kullanılmasına yönelik araştırmalar yapılmaktadır. Örneğin, İtalya'nın Piomonte bölgesindeki tüm içme suyu isale hatları üzerindeki basınç kırıcı yapılarda 200 kW güce kadar olan mikro HES tesislerinin kullanılması halinde sağlanacak ekonomik faydalar değişik modellerle yoluyla ortaya konmuştur [12].

Yunanistan'ın ve Türkiye'nin su temini hatları üzerindeki elektrik potansiyelleri incelendiğinde bu enerji üretiminin en az akarsular üzerindeki hidroelektrik santraller kadar faydalı olduğu sonucuna ulaşılmıştır [13-14]. Örneğin, Zonguldak'taki içme suyu barajında kurulması planlanan Kızılcapınar HES projesinde yıllık 2 milyon GWh üzerinde enerji üretilebileceği ifade edilmektedir [15]. Zonguldak'taki bir diğer içme suyu barajı olan Ulutan Barajında kurulacak bir HES projesi ile 4,5 milyon GWh enerji üretilebileceği; bu tesisin geri ödeme süresinin sadece 1,4 yıl olduğu ortaya konulmuştur [16]. Ülkemizde özellikle 4628 sayılı Elektrik Piyasası'na ilişkin kanunun 2001 yılında yayınlanmasına müteakip su kullanım haklarının özelleştirilmeye başlanması bu alandaki yatırımcıların içme suyu ya da sulama projeleri üzerine yoğunlaşmasına neden olmuştur [17]. Örneğin, Bursa İçmesuyu ve Kanalizasyon İdaresi (BUSKİ) tarafından isale hatları üzerine 2020 yılı itibari ile üç adet HES tesisi kurulmuştur. Halihazırda kurulu olan her biri tek üniteli Francis tip türbine sahip hidroelektrik santralinde yıllık 13,32 milyon kWh enerji üretilmekte olup, 3 milyon kWh enerji üretim potansiyeline sahip üçüncü tesis ise yapım aşamasındadır. Bu hidroelektrik santrallerden 500 kW gücündeki D0-HES mevcut içme suyu hatları üzerindeki depolama tesislerine kurulduğundan kendi alanında Türkiye'de öncü konumundadır [18]. Erzurum İçmesuyu ve Kanalizasyon İdaresi (ESKİ) tarafından içme suyu isale hattı üzerine hattın projelendirmesi esnasında tasarlanmış olan ve 420 kW gücündeki Banki (Cross Flow) türbini olan bir mikro HES tesisi bulunmaktadır [19]. Rize Belediyesi tarafından Andon Su Kaynağı ve Poşut Deresinden kaptaj edilen suların isalesi esnasında kademeli olarak iki adet HES tesisi projelendirilmiştir. İlk HES tesisinin iki ünitesi Francis türbin tipinde olup, sırasıyla (74,37 m net düşü ile) 520 kW gücünde ve (105,26 m net düşü ile) 670 kW gücündedir. İkinci HES tesisinin türbini ise 1 MW gücünde yine Francis türbinidir. 2017 yılında hizmete giren bu proje bir isale hattı üzerinde türbinleri kademeli olarak yerleştirilen nevi şahsına münhasır bir projedir [20]. Trabzon İçmesuyu ve Kanalizasyon İdaresi (TİSKİ)'nin de isale hatları üzerine HES kurulumuna ilişkin çalışmaları bulunmaktadır. Bu çalışmalardan en büyüğü Atasu ve Esiroğlu kaynaklarından gelen isale hatlarının bağlandığı arıtma tesisi önüne kurulmakta olan

2.240 kW gücündeki Esiroğlu HES'tir. Yıllık enerji üretimi 20 milyon kWh olarak planlanan Esiroğlu HES'in işletme giderleri sonrası yıllık net geliri 10 milyon ₺ ve kurulum maliyeti olarak ise 18,5 milyon ₺ olarak hesaplanmıştır. Bu bağlamda HES tesisinin iki yıldan daha kısa sürede kendini amorti etmesi beklenmektedir. Üstelik yatırım bedelinin %85'i Avrupa Birliği Merkezi Finans ve Kontrol Birimi (AB-CFCU) fonlarından "Belediyeler İçin Yenilenebilir Enerji ve Enerji Verimliliğine Yönelik Tedarik" kapsamında hibe olarak sağlanmıştır. TİSKİ tarafından isale hatları üzerine mikro HES tesisleri kurulumu için çalışmalar devam ettirilmektedir. TİSKİ'nin ayrıca yıllık 540.000 kWh üretimi olan pompa tipi (PAT) türbin kullanıldığı 90 kW gücünde bir mikro HES tesisi vardır [21]. Sakarya Su ve Kanalizasyon İdaresi (SASKİ) tarafından montaj çalışmaları devam eden ve Akçay Barajından elde edilen içme suyu isale hattı üzerinde bulunan 2 MW gücündeki Hızırilyas HES, 5,8 MW gücündeki Hacımercan HES ve 0,49 MW gücündeki Keremali HES projeleri yeni projelendirilen isale hatları üzerindeki HES projeleri hususunda ilgi çekici örneklerdir [22]. İfade edilen farklı örneklerden de görüleceği üzere Türkiye'de isale hatları üzerinde elektrik üretimine ilişkin çalışmalar özellikle 2010-2020 yılları arasında yoğunluk kazanmıştır. Ancak bu alanda ulusal ve kurumsal olarak bir stratejinin izlenmemesi kaynakların tam olarak tespit edilememesine sebep olmaktadır. Zira, Türkiye coğrafi özellikleri ile hidroelektrik kaynaklar açısından zengin bir ülkedir. Avrupa Küçük Hidroelektrik Santraller Derneğinin 2006 yılındaki raporunda Avrupa'da kullanılmamış hidroelektrik potansiyelin %80'inden fazlasının Türkiye'de olduğu yer almaktadır [23]. Doğu-batı doğrultusunda uzanan dağlar ve dağ eteklerinde kurulan şehirlerimizin birçoğunda içme suları şehirlerden daha yüksek noktalardaki kaynaklardan cazibeli içme suyu isale hatlarıyla iletilmektedir. Bu isale hatlarında genellikle 80 m'lik basınçtan fazlasına izin verilmemekte, fazla basınç maslaklarda ve/veya basınç kırıcı vanalarda kırılmaktadır. Ayrıca arıtma tesisleri ve şehir içi depo girişlerinde de su basıncı kırılmakta ve şebeke ihtiyacından daha fazla basınç oluşmasına izin verilmemektedir. Bu bağlamda dikkat ve çabalar yeni içme suyu hatlarının enerji üretimi düşünülerek tasarlanmasına yönelmişken, mevcut isale hatlarının potansiyellerinin değerlendirilmesi hususu nispeten bakir kalmıştır. Mevcut cazibeli isale hatlarının enerji üretiminde kullanılması için yeniden yapılmasını öngören çalışmalarda bazı zorluklarla karşılaşmıştır. Bunların bir kısmı şu şekilde özetlenebilir; kilometrelerce uzayan hattın yenilenmesinin getireceği yüksek maliyetler, yeni kamulaştırmaların doğuracağı maliyetler, mevcut borulara nazaran yüksek basınca dayanıklı boruların maliyeti ve yeni isale hattının doğuracağı çevresel tahribat. Bu sebeplerle ülkemizdeki birçok cazibeli içme suyu isale hatlarında su basıncı maslak, basınç kırıcı vana vb. yapılarda kırılmakta ve değerlendirilmesi için herhangi bir çalışma yapılmamaktadır. Bu çalışmanın amacı mevcut isale hatlarının yenilenmeye gerek kalmadan enerji üretimi yapar hale getirilebileceğinin gösterilmesidir. Ayrıca bu şekilde yapılacak yatırımların rantabl yatırımlar olduğu ispatlanmak istenmiştir. Bu çalışma ile mevcut içme suyu isale hatlarında enerji üretimi incelenerek; "İsale hatlarında enerji üretimi karlı bir yatırım mıdır?" sorusunun cevabı Kahramanmaraş örneği üzerinde araştırılacaktır. Bu makale aşağıdaki gibi düzenlenmiştir: Bölüm 2, çalışma alanının, veri setlerinin ve metodolojinin bir tanımını sunarken, Bölüm 3, örneklem üzerinden proje uygulanabilirliğini ve bulguları açıklar; sonuçlar ve öneriler ise Bölüm 4'te verilmiştir.

## 2. Metodoloji

Bu çalışmada bir içme suyu isale hattındaki basınç kırıcı yapıda nasıl enerji üretiminin sağlanabileceği ve bunun fayda-maliyet analizi üzerine çalışılmaktadır. Bu kapsamda, Kahramanmaraş İl Merkezi örneklem bölge olarak seçilirken, örneklem içerisinde ve şehir şebekesi içerisindeki hatlar üzerinde kullanılmamış hidroelektrik potansiyel tespit edilip şehir şebekesindeki bir tesisin ön fizibilitesi yapılarak araştırma konusu test edilecektir. Bu çalışmanın amacı doğrultusunda, "Mevcut isale hatları üzerindeki basınç kırıcı yapılarda enerji üretilmesi" incelenerek; "İsale hatları üzerindeki basınç kırıcı yapılarda kurulacak enerji üretim tesisleri yatırım yapılabilecek verimli projelerdir" hipotezi araştırılacaktır. İncelemede, projelendirme aşamasında enerji üretimi planlanmamış olan isale hatları üzerindeki maslak ya da depo girişi gibi basınç kırıcı yapılarda hat yenilemesi yapılmadan enerji üretim tesislerinin yapısal tasarımının üzerinde durulmaktadır. Öte yandan, hipotez ile isale hatları üzerindeki basınç kırıcı yapılarda kurulacak bir HES tesisinin verimli ve yatırım yapmaya değer olduğu iddia edilmiştir. Hipotezin test edilmesi için örneklem alanındaki mevcut isale hatları üzerinde pilot olarak seçilen projenin yapısal özellikleri belirlenecektir. Seçilen pilot projenin ön fizibilitesinin yapılarak keşif listelerinin hazırlanmasıyla kurulum maliyeti tespit edilecek olup, yıllık enerji üretim getirisinin hesaplanmasıyla rantabilite analizi yapılacaktır. Pilot projenin iç (verim) karlılık oranının tespit edilerek yatırım yapmaya değer verimli bir proje olup/olmadığı ortaya konacaktır. Ortaya çıkacak sonucun geri ödeme yöntemi ile de sınaması yapılacaktır.

## 2.1 Çalışma Alanı ve Veri Setleri

Kahramanmaraş il merkezi, Onikişubat ve Dulkadiroğlu isminde iki metropol ilçeden oluşmaktadır. Kahramanmaraş İl Merkezinin içme suyu ihtiyacı dört ana kaynaktan sağlanmaktadır (Tablo 1). Bu ana kaynaklardan sondaj kuyuları gereksinim halinde ihtiyaca binaen kullanılmaktadır. Mevcut isale hatları ve bu hatlardan beslenen şebeke üzerindeki teorik ve ekonomik hidroelektrik potansiyel araştırmanın çalışma alanıdır. Bu bağlamda dört su temin yolu ile şehir içindeki su şebekesinin elektrik üretimine ilişkin potansiyeli içerisinde rantabl olacağı düşünülen bir noktada kurulacak mini hidroelektrik santral pilot proje olarak seçilecektir. Karasu İsale hattı üzerinde projelendirme aşamasında tasarlanan ve kurulan 2,4 MW gücündeki Karasu HES ile Karasu isale hattındaki hidroelektrik potansiyelin tamamı değerlendirilmiştir. Diğer taraftan, şehrin en eski su kaynağı olan Pınarbaşı İsale Hattı 670 m kotundan başlayarak hemen 300 m mesafesinde yakın yükseltide şebeke başladığı için bu hat üzerinde bir hidroelektrik potansiyel söz konusu değildir. Ayvalı barajından başlayan isale hattının uzunluğu 24.800 m'dir. İsale hattının kapasitesi 1.000 lt/sn olup halen Kahramanmaraş Su ve Kanalizasyon İdaresi (KASKİ) tarafından 700 lt/sn'lik kısmı kullanılmaktadır. Hat üzerinde bir adet arıtma tesisi vardır. Baraj isale hattı başlangıç kotu 784 m olup, arıtma tesisinin kotu 766 m'dir. Arıtma tesisinden sonra dağıtım noktalarına ulaşımında kayda değer bir basınç kırılımı bulunmamaktadır [24-25]. Bu bağlamda gerek Ayvalı Barajından gelen isale hattı üzerinde, gerekse elektrik harcanarak çıkarılan ve pompayla yüksek irtifaya aktarılan sondaj kuyusu kaynakları üzerinde bir hidroelektrik potansiyel bulunmamaktadır.

**Tablo 1.** Kahramanmaraş Merkez İçme Suyu İsale Hattı Kapasiteleri [24]

<i>İsale Hattı</i>	<i>Kapasite (lt/sn)</i>
Karasu	1.500
Pınarbaşı	500
Ayvalı Barajı	1.000
Sondaj Kuyuları	645

29 şebeke bölgesinden oluşan Kahramanmaraş Şehir Merkezindeki hidroelektrik potansiyelin tespit edilmesi son derece zordur. Çünkü her bir depo girişindeki basıncın ayrı ayrı ölçülmesi gerekmektedir. Bu bağlamda ekonomik potansiyelin tespit edilmesi amacıyla düşü farkının daha yüksek olduğu ve kapasitesi geniş hatların öncelikle incelenmesi gerekir. Ek-1'de KASKİ tarafından 29 alt dağıtım şebekesine ayrılan Kahramanmaraş içme suyu şebekesinde her bir alt dağıtım şebekesinin tüketim değerleri ile bu şebekeleri besleyen depoların kotları yer almaktadır. Ayrıca, her bir deponun beslediği alt dağıtım şebekesinin minimum ve maksimum kotları ile depoların kotları da verilmektedir. Her bir depo kendisinin beslediği alt dağıtım şebekesinin su ihtiyacıyla birlikte kendisinden beslenen bir sonraki deponun ihtiyacı kadar su almaktadır. Depoların beslediği alt şebekelerin farklı depolardan aynı anda beslenmesi de söz konusu olduğundan depolara gelen su miktarının ve türbin tasarım debisinin tespitinde işletme kaynaklarının verileri esas alınmıştır. Bu bağlamda elektromekanik teçhizatın devir ve verimlilik gibi esasları göz önünde bulundurularak dağıtım şebekesinde depo girişinde yılın en az üç çeyreğinde 100 lt/sn tasarım debisine ve depo girişinde en az 40 m basınca sahip hatların bilgileri KASKİ idaresinden talep edilmiştir. Depo giriş basıncının ve buna bağlı olarak türbin tasarım düşüsünün 40 m'den daha az olması türbin devir sayısını düşürerek generatörle türbin arasındaki dişli grubunun oranını artıracak ve kayıpların artmasına sebep olacaktır. Keza tasarım debisinin 100 lt/sn'den daha az olması durumunda, debi rejimindeki dalgalanmalarda verim kaybı çok yüksek olacaktır. Bu noktada, herhangi bilimsel sınırlama olmamasına rağmen seçilen 40 m düşü ve 100 lt/sn debi sınır parametreleri elektrik şebekesine entegre edilecek bir mini/mikro hidroelektrik santralin en az 40 kW güce sahip olması gerektiği öngörüsü çerçevesinde tespit edilmiştir.

Araştırmanın verileri iki aşamada toplanmıştır. Birinci aşamada, Kahramanmaraş İl Merkezinin içme suyu isale hatlarının ve şebeke içerisindeki depoların kot, debi ve yer gibi özellikleri KASKİ'den temin edilmiştir. KASKİ'den temin edilen veriler ışığında örneklem alanının kapasitesi ve pilot proje tespit edilmiştir. İkinci aşamada ise, pilot proje için önerilen tesisin ve teçhizatın yaklaşık maliyetleri 2020 Nisan ayı piyasa koşullarından sağlanmıştır. Döviz bazlı hesaplamalarda 15 Nisan 2020 TCMB döviz kurları olan 1 USD=6,85 ₺ ve 1 EUR=7,50 ₺ baz alınmıştır.

## 2.2 Pilot Projenin Seçimi

En az 40 kW kapasiteye sahip olabilecek mini/mikro HES'lerin kurulabileceği depo girişleri göz önüne alındığında yaklaşık 0,5 MW'lık (470kW) bir kapasite söz konusudur. Literatürde 100kW gücün altındaki HES tesisleri mikro, 100 kW ile 5 MW arasındaki HES tesisleri ise mini olarak tabir edilmektedir [26]. Ek-3'deki veriler

ve KASKİ ile yapılan istişareler ışığında, isale hattı güzergahları üzerinde yapılan inceleme neticesinde depolar arasındaki hatların kapasiteleri ve kot farkları kullanılarak Tablo 2’de belirtilen potansiyel tespiti yapılmıştır. Bu bağlamda şehir şebekesindeki girişlerine mini/mikro HES tesisi kurulabilecek olan depoların toplam hidroelektrik güç potansiyeli 470 kW olarak öngörülmüştür. Bu araştırma kapsamında en büyük kurulu güce sahip olması sebebiyle D13-D16 iletim hattının sonunda D16 depo girişine kurulabilecek olan yaklaşık 200 kW gücündeki bir mini HES tesisi pilot proje olarak belirlenmiştir.

**Tablo 2.** Kahramanmaraş Merkez İsale Hatları Muhtemel mini/mikro HES Projeleri

Mini/Mikro HES Yeri	Brüt Düşü (m)	Proje Debisi (lt/sn)	Potansiyel Güç (kW)
D6-D23 Hat Sonu	53	100	40
D13-D16 Hat Sonu	45	605	200
D10-D12 Hat Sonu	50	300	100
D12-D14 Hat Sonu	50	240	80
D14-D18 Hat Sonu	45	155	50

D16 su deposu Dulkadiroğlu Mahallesi 297 ada 1 parsel tapu alanında yer almaktadır. Toplam 5.202 m<sup>2</sup> alana kurulu su deposunun hacmi 10.000 m<sup>3</sup>’tür. D13-D16 İsale Hattı 800 mm çapında ve 2.100 m uzunluğundadır. En yüksek kotu 650 m olan iletim hattının 605 m olan bitiş kotuna kadar 1,5 m/sn iletim hızı elde edilmektedir [24]. D13 su deposu ile D16 deposu arasındaki 2.100 m uzunluğundaki isale hattının sonuna tesis edilmesi planlanan ve pilot proje olarak seçilen mini HES projesi D16 HES olarak adlandırılmıştır. Yapılacak ön fizibilite çalışması ile D16 HES’in sahip olacağı karakteristik özellikler ile keşif, maliyet ve getiri hesapları yapılacaktır. Bu bağlamda öncelikle önerilen tesisin ve teçhizatın teknik özellikleri tespit edilecektir. Elektromekanik teçhizat seçimi için öncelikle tasarım parametrelerinin netleştirilmesi gerekmektedir. Bu aşamada net düşü tespit edilecek ve kurulu güç optimizasyonu ile tasarım debisi tespit edilecektir. D13 ve D16 depoları arasındaki isale hattının eksenel kot farkı 45 m’dir. Net düşü hesabı için brüt düşüden hidrolik düşü kaybının ( $h_k$ ) çıkarılması gerekmektedir. Hidrolik düşü kaybının tespiti için çok iyi bilinen Darcy-Weisbach denkleminde faydalanılabilir (Denklem 1). Burada,  $L$  ve  $D$  sırasıyla boru boyu ve çapını simgelerken, akımın ortalama hızı  $V$  olarak ifade edilmektedir.  $\lambda$ , ise boru ve akım tipine göre değişen sürtünme faktörü olup, laminer ( $\frac{64}{Re}$ ) ve türbülanslı ( $\frac{0,316}{Re^{1/4}}$ ) akımlar için Reynolds ( $Re$ ) sayısına bağlı olarak değişiklik gösterir [27-29].

$$h_k = \lambda \frac{L V^2}{D 2g} \quad (1)$$

Net düşünün ( $h$ ) hesabı ve tasarım debisinin ( $Q$ ) belirlenmesini müteakip toplam verim ( $\mu$ ) ve suyun özgül ağırlığı ( $\gamma$ ) kullanılarak denklem (2)’den yararlanılarak hidroelektrik gücü ( $P$ ) hesaplanabilir.

$$P = \mu \cdot h \cdot Q \cdot \gamma \quad (2)$$

### 2.3 Maliyet ve Gelir Hesaplamaları

Elektromekanik, hidromekanik ve inşaat işleri tek bir keşif listesinde birleştirilerek piyasa fiyatları toplanacak ve üzerine %10 öngörülemeyen maliyetler eklenerek D16 HES’in kurulum maliyeti hesaplanacaktır. D16 HES’in yıllık enerji üretimi ise KASKİ’den temin edilen debi rejimi ve Tablo 4’de gösterilen verim değerlerinden faydalanılarak hesaplanacaktır. Türbinin çalışma sürelerinde gerekli bakım-onarım ve operasyonel durma süreleri de göz önünde bulundurulacaktır. 4628 sayılı elektrik piyasası kanunu kapsamında lisanssız bir üretim tesisi olacak D16 HES’te üretilen enerji Yenilenebilir Enerji Destekleme Mekanizması (YEKDEM) kapsamında değerlendirilecektir. AG Dağıtım şebekesi üzerinden bağlantı yapıldığı için elektrik enerjisi birim fiyatından dağıtım bedeli birim fiyatı çıkarılacaktır. 2020 yılı ikinci çeyreği dönemi içerisinde yapılan hesaplamalarda kullanılan birim fiyatlar Tablo 3’te verilmiştir. Yatırım projelerini değerlemek amacıyla kullanılan yöntemler belirlilik koşulu altında ve belirsizlik koşulu altında kullanılan yöntemler olmak üzere iki kısımda ele alınmaktadır [30]. Genel olarak belirlilik şartları altında kullanılan proje değerlendirme metodları, paranın zaman değerini dikkate alan ve almayan yöntemler olmak üzere iki başlık altında incelenmektedir [31]. Bu çalışmada projenin hesaplanan maliyet ve getiri değerlerinden faydalanılarak öncelikle paranın zaman değerini dikkate alan iç karlılık oranı yöntemiyle araştırma hipotezi test edilecektir. Paranın zaman değerini dikkate almayan geri ödeme süresi yöntemiyle iç karlılık oranı yöntemiyle elde edilen sonucun tutarlığı kontrol edilecektir. Kullanılacak bu



yöntemlerde D16 HES'in ömrünün 50 yıl olduğu, finansman maliyetinin aylık %1,2 olduğu, yıllık mevduat faizinin ise %10 olduğu parametreleri esas alınmıştır. İç karlılık oranı, sermayenin başka yatırım alanlarında kullanılması halinde sağlayacağı gelir olan sermayenin fırsat maliyetinden küçük olduğu zaman söz konusu proje, ekonomik yönden olumsuz, en az onun kadar ya da daha fazla olduğu zaman olumlu bulunur [32]. İç karlılık oranı pilot projenin 50 yıllık periyottaki nakit akışı oluşturularak Denklem 3'te gösterildiği şekilde tespit edilecektir. Burada, sırasıyla  $\Delta NG_{a,t}$  ve  $\Delta N\mathcal{C}_{a,t}$   $a$  projesinin  $t$  zamandaki net nakit girişi ve çıkışını simgelerken, projenin ekonomik ömrü  $n$  ile iç karlılık oranı ise  $r$  ile gösterilmektedir. Bu bağlamda hesaplanacak iç karlılık oranının sermayenin fırsat maliyetini oluşturan yıllık mevduat faizinden yüksek olması projenin yatırım yapılabilir olduğunu gösterecektir. Geri ödeme süresi yönteminde ise tesisin kurulum maliyetinin yıllık net getirisine oranı elde edilerek; yıllık %10 mevduat faizi baz alındığından 7 yıldan önce kendini ödeyen proje verimli kabul edilecektir.

**Tablo 3.** 2020 Yılı İkinci Çeyrek (Nisan-Mayıs-Haziran) Elektrik Birim Fiyatlandırması [33]

Birim Fiyat Kodu	Açıklama	Birim Fiyat (kr/kWh)
TB	Ticarethane Birim Fiyatı	57,38
TD	Dağıtım Bedeli Birim Fiyatı	14,69
TB-TD	Faturalandırma Satış Birim Fiyatı	42,69

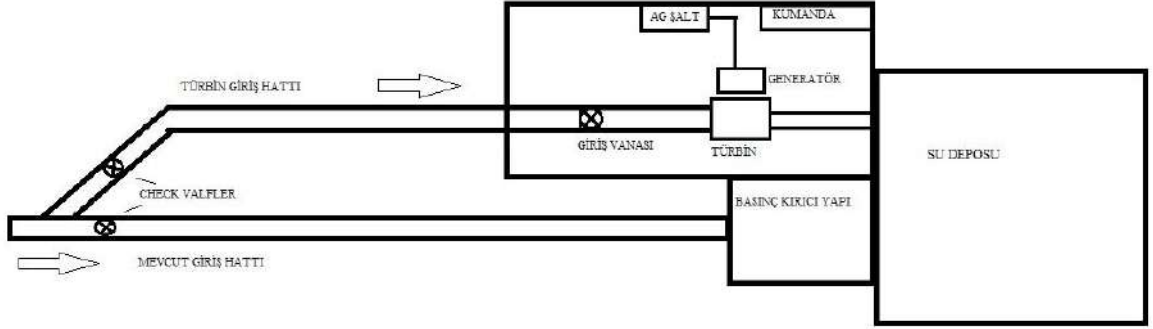
$$\sum_{t=1}^n \frac{\Delta NG_{a,t}}{(1+r)^t} = \sum_{t=0}^n \frac{\Delta N\mathcal{C}_{a,t}}{(1+r)^t} \quad (3)$$

### 3. Bulgular

#### 3.1 Pilot Projenin Tasarımı

Kurulması planlanan santral binası D16 su deposunun kuzeyinde, isale hattının depo girişine paralel olarak tesis edilecektir. Hatlarda kullanılacak check valve sistemi ile ani kapama ve açma durumlarında oluşabilecek su koçu etkileri minimize edilecektir. Türbin girişinde DN800 kelebek vana kullanılacaktır. Türbin çarkından deşarj olan içme suyu emme borusu vasıtasıyla depoya boşalacaktır. Türbin ve generatör devir sayıları eşit olmaması sebebiyle akuple şaft yerine kayış kasnak sistemi kullanılacaktır. Yük kontrol panosu, uzaktan ve yerel izleme ve kontrol panoları türbin odasında yer alacaktır. Aynı şekilde Alçak Gerilim (AG) çıkış panosu da türbin odasında yer alacaktır (Şekil 1). Boru boyu 2.100 m, çapı 800 mm, akımın ortalama hızı 1,5 m/sn, yerçekimi ivmesi ( $g$ ) 9,81 m<sup>2</sup>/sn ve yoğunluk ( $\rho$ ) 1 t/m<sup>3</sup> için, paket programdan (Pressure Drop Calculator) faydalanılarak Re 85.944 elde edilmiş bunun sonucu ise akımın türbülanslı olduğu tespit edilmiştir [34]. Denklem 1'den faydalanılarak sürtünme faktörü ve buna karşılık gelen hidrolik düşü kaybı sırasıyla 0,0185 ve 5,57 m olarak bulunur. Buradan hareketle D13-D16 arası net düşü yüksekliği 39,43 m olarak elde edilebilir. Bu yaklaşımda yerel kayıpların ihmal edilebilecek düzeyde olduğu öngörülerek hesap yapılmıştır. Ayrıca, hat üzerindeki debinin ihtiyaca göre 490-690 lt/sn arasında salınım göstermekle kış aylarında tüketimin azaldığı tespit edilmiştir. Ancak kurulu güç optimizasyonu için debinin yıl içindeki değişimini gösteren herhangi bir somut veri bulunmamaktadır [35]. Tasarım debisinin 600-lt/sn seçilmesi değişen ortalama debi ve buna bağlı değişen türbin verimi baz alındığında yıllık toplam enerji üretimini maksimize etmektedir. İçme suyu isale hatlarındaki bazı projelerde türbin tipi Muhammetoğlu ve arkadaşları tarafından belirtildiği gibi PAT (Pump As Turbine) tipinde tercih edilebilmektedir [36]. Türbin tipinin seçimi hususunda iki ana parametre debi ve düşü olmakla birlikte maliyet ve enerji üretim verimliliği gibi unsurlar belirleyici olmaktadır. 39,43 m net düşü ve 600 lt/sn tasarım debisi baz alındığında türbin tipi olarak Francis ya da Banki (Crossflow) türbin tiplerinden biri seçilebilir. Bosco ve arkadaşları tarafından içme suyu hatlarındaki optimum türbin tasarımının ayrıca bir çalışma olacak kadar geniş olduğunu gösterir çalışmada Banki (Crossflow) tipi türbinlerin içme suyu hatlarındaki kullanımı analiz edilmiştir. [37]. Pilot projede Banki tipi türbinlerin fiyatlarının Francis tipi türbinlerinin fiyatlarına göre daha düşük olması ve Banki tipi türbinlerin işletme ve bakım maliyetlerinin diğer türbin tiplerine göre daha düşük olması sebebiyle Banki tipi türbin tercih edilmiştir. Banki tip türbinlerin Francis tipi türbinlere nazaran düşük olan verimleri (%5 civarı) 200 kW civarı bir güç için kabul edilebilir bir güç kaybına karşılık gelirken tasarım debisinin %90'nın altındaki debi değerlerinde Francis tipine nazaran daha stabil verim değerlerine sahip olması bu kaybı da telafi etmektedir [38]. Bu bağlamda su tüketim alışkanlıklarından yola çıkılarak 12 ay için bir aylık tüketim ortalaması tablosu ortaya konmuştur (Tablo 4). Tablo 4'ten de görüleceği üzere, kullanılması planlanan Banki tip türbine ilişkin imalatçının ortalama

debi/tasarım debisi oranına (%) karşılık gelen türbin verimi pilot projenin kurulacağı yerdeki aylık ortalama debi verileri ile karşılaştırıldığında pilot projede kullanılacak türbinin aylara göre beklenen verimi %79 ila %86 (ortalaması %83 olmak üzere) arasında değişiklik göstermektedir.



Şekil 1. D16 HES Genel Yerleşimi

Tablo 4. D16 HES Debi Değişimi ve Aylık Türbin Verimi

Aylar	Ortalama Debi (lt/s)	Ortalama Debi/Tasarım Debisi (600lt/s) (%)	Türbin Verimi (%)
Ocak	490	81.67	79
Şubat	500	83.33	80
Mart	520	86.67	81
Nisan	550	91.67	83
Mayıs	590	98.33	84
Haziran	600	100.00	86
Temmuz	620	103.33	85
Ağustos	630	105.00	84
Eylül	610	101.67	85
Ekim	580	96.67	83
Kasım	550	91.67	83
Aralık	540	90.00	82

Tablo 5'te D16 HES'te kullanılması planlanan elektromekanik teçhizatın karakteristik özellikleri verilmiştir. Devir sayısı, türbininkine eşit olan bir generatör piyasada standart olarak imal edilmemektedir. Türbin ve generatörü akuple edebilmek amacıyla generatör için özel bir tasarım ve imalat yapılması ise tesis maliyetini olağanüstü artıracaktır. Bu sebeple kayış kasnak yardımıyla güç aktarımın sağlanması öngörülmüştür. 380 V alçak gerilim seviyesinden bağlanacağı için ayrıca bir transformatöre ihtiyaç bulunmamaktadır. Pilot proje seçilen D16 HES projesi kapsamında, Ø800 mm'lik mevcut isale hattına pantolon yapılarak Ø800 mm çapında boru bağlanacaktır. Bu hat üzerinde debimetre yerleştirilecek sonra pantolon ile ikiye ayrılacak, ikiye ayrılan Ø800 mm çapında boruların bir tanesi türbinde meydana gelebilecek herhangi bir aksaklık olması durumuna karşın iğne vana kontrolünde suyun doğrudan santral kuyruk suyuna aktarılmasını sağlayacak, diğeri ise türbin giriş vanasına (kelebek vana) bağlanacaktır. Yine kesin proje aşamasında, cebri boru dirseklerinde ve bransman bölgesinde su darbesi basınçları da dikkate alınarak dirsek kitleleri yerleştirilecektir. Pozitif ve negatif basınç dalgalanmaları ya da olası su koçu darbeleri check valve sistemi ile erken tespit edilecek ve kelebek vanaları yürüten servomotorlarla açma-kapama işlemi yapılmak suretiyle isale hattının korunması sağlanacaktır. Santral binasına tesis edilecek generatör 380 V çıkışlı olacak olup AG Şalt Panosu çıkışından sonra su deposunun kuzeyinde yer alan AG dağıtım direkleri üzerinden mahalle trafosundan AG dağıtım şebekesine entegre edilecektir.

**Tablo 5.** Elektromekanik Teçhizat Karakteristikleri

Teçhizatın Adı	Teçhizatın Özellikleri
Türbin	200 kW Yatay Eksenli Banki Türbini (1 Ünite) Net Düşü: 39,43 m- Tasarım Debisi: 600 lt/sn-Türbin Tasarım Verimi: %86, 300 d/dk
Generatör	210 kVA Yatay Eksenli Asenkron (1 Ünite)-Güç Faktörü: 0,90, 1.000 d/dk. Gerilim: 380 V, Frekans:50 Hz, 3 Fazlı
Aktarma Organı	Kayış ve kasnak
Transformatör	Doğrudan alçak gerilim sistemine bağlantı yapılacağından transformatör kullanılmayacak
Kumanda ve Kontrol	Scada sistemi ile güçlendirilmiş arayüz ile bilgisayar üzerinden kontrol
Ölçme	Alçak gerilim sayaç ve bağlantı panoları
Kesintisiz Güç Kaynağı	50 kVA UPS ve şehir şebekesi bağlantısı

### 3.2 Pilot Proje Keşif Maliyeti ve Rantabilite Analizi

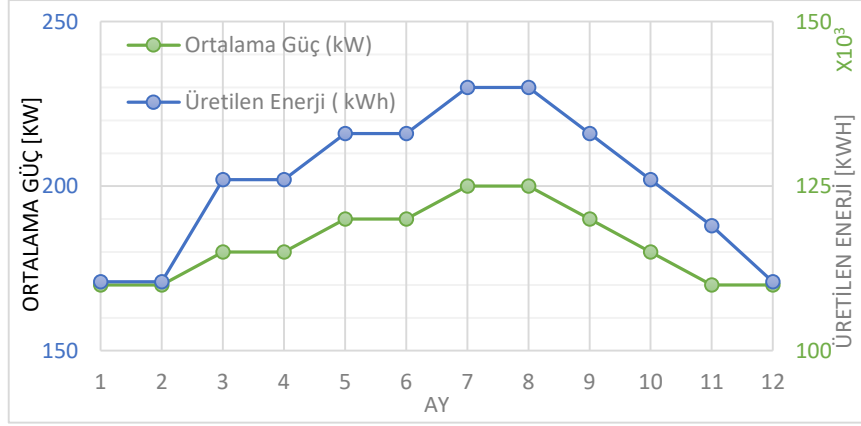
İnşaat, hidromekanik ve elektromekanik işlerine ilişkin için Nisan 2020 piyasa koşullarına göre hazırlanmış olan Ek-2'deki keşif listesinde D16 HES'in %10'luk öngörülemez maliyetler dahil 798.817,00 ₺ maliyet ile tesis edilebileceğini ortaya koymuştur. D16 HES tesisinin fizibilite ve projelendirme çalışmalarının ilk 9 ay içerisinde, yapım aşamasının ise son 6 aylık periyot içerisinde tamamlanabileceği öngörülmüştür. Tablo 6'da sunulan termin programında da görüleceği üzere 2020 yılı sonbaharında başlayabilecek proje çalışmalarının 15 ay içerisinde tamamlanarak tesisin devreye alınması planlanmıştır. D16 HES projesinin enerji üretimi doğrudan D13 deposundan iletilen akıma bağlıdır. Yıl içerisinde su tüketimine bağlı olarak akımın değişimi elde edilen verilere göre incelendiğinde debi değişimi için bir yaklaşım yapmak mümkün olmaktadır. Yapılan debi değişim yaklaşımına göre, D16 HES projesinin aylık enerji üretim projeksiyonu Şekil 2'de hesaplanarak gösterilmiştir. Kış aylarında hatlardan kaynaklı operasyonel durmalar daha fazla beklendiğinden ocak, şubat ve aralık aylarında çalışma süresi 650 saat diğer aylarda ise 700 saat olarak öngörülmektedir. Değişen debi değeri dolayısıyla ortalama güç minimum 170 kW (kış aylarında), maksimum 200 kW (Temmuz ve Ağustos) olmak üzere değişmektedir. Ortalama güç ve çalışma saatinin ürünü olan üretilen enerji kış aylarında 110.500 kWh bandında olup yaz aylarında ise artış trendine geçerek 140.000 kWh'e ulaşmaktadır. Gerekli bakım-onarım durumları ile operasyonel sebepler kaynaklı durmaların da hesap edilerek D16 HES'te yıllık toplam enerji üretimi ise 1.500.000 kWh olarak tespit edilmiştir. Bu bağlamda KASKİ tarafından elektrik dağıtım şirketi AKEDAŞ'a kesilecek ve akabinde mahsuplaşacak faturaların yıllık toplamı Tablo 3'deki faturalandırma birim fiyatından yararlanılarak 640.350 ₺ olarak hesaplanacaktır. Ancak mevzuat gereği mahsuplaşmalar aylık olarak yapılacaktır.

**Tablo 6.** D16 HES Termin Programı

İş Kalemi	2020			2021												
	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1 Ön Fizibilite	■	■														
2 Nihai Fizibilite Hazırlanması, Lisansız Üretim Prosedürleri & Gerekli İzinler		■	■	■	■	■	■	■								
3 Hidromekanik & Elektromekanik Projelendirme					■	■	■	■								
4 İnşaat Projelendirmesi								■	■	■						
5 AKEDAŞ AG Bağlantı Antlaşması								■	■	■						
6 İş Programının Yapılması						■										
7 Elektromekanik Teçhizat Siparişi ve Temini									■	■	■	■	■			
8 Hidromekanik & Diğer Teçhizat Siparişi ve Temini										■	■	■	■			
9 İnşaat Sahasının Hazırlanması											■	■	■			
10 İnşaat İşleri												■	■	■		
11 Hidromekanik & Elektromekanik Montaj													■	■	■	
12 AG Dağıtım Şebekesi Bağlantısı														■	■	
13 Kontrol & Test Uygulamaları															■	■
14 Devreye Alma																■

D16 HES'in 3 vardiya şeklinde çalışacak operatörler tarafından kontrol ve kumanda edilmesi planlanmıştır. D16 HES yıllık işletme maliyeti hesabında ise personel maliyeti (180.000 ₺) ve rutin bakım onarım giderleri (20.000 ₺) olmak üzere toplamda 200.000 ₺ olarak öngörülmektedir. Buna göre, mahsuplaşılacak faturalardan işletme gelirleri düşüldüğünde yıllık net gelir toplamı 440.350 ₺ olarak bulunmuştur. Türbin çarkındaki kavitasyonlar nedeniyle çarkın yenilenmesi, generatör sargılarının yenilenmesi ve yatak aşınması gibi hususlar göz önüne alındığında tesiste her 10 yılda bir rutin bakım onarım dışında bugünkü değerlere göre 100.000 ₺ tutarında büyük bakım-onarım masrafının olacağı öngörülmüştür. Tesisin bu büyük bakım-onarım işlemleri ile

kurulum yılı dahil 50 yıllık ömrünün olduğu ve 50 yıl sonunda tamamen yenilenmesi gerekeceği öngörülmüştür. Ayrıca tesisin kurulum maliyetinin tamamen finansman kullanılarak %15 faizle ve 24 ay eşit taksitle ödenecek 230.000 ₺ tutarında bir finansman maliyeti öngörülmüştür. Hesaplanan maliyetler ve getiriler Ek-3'deki nakit akış grafiğine aktarıldığında D16 HES'in iç karlılık (verim) oranının %44 olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Bu sonuç projenin rantabl ve verimli görülmesi için baz alınan en az %10'luk değer bir hayli üzerindedir. Bu bağlamda projenin yatırım yapmaya değer rantabl bir proje olduğu rahatlıkla görülecektir. İç verim oranı yöntemi ile içme suyu hatları üzerine enerji üretmek için kurulan tesislerin rantabl projeler olduğu görüşünü savunan hipotez örnek bir tesis üzerinden güçlü bir şekilde ispatlamıştır. Bununla birlikte geri ödeme süresi yöntemi, ilk yöntemle bulunan sonucu test etmek ve desteklemek için kullanılmıştır. Geri ödeme süresi yöntemine göre, tesisin kurulum maliyetinin yıllık net getirisine oranı olarak tesisin kurulum maliyetini 1,8 yılda karşılayabileceği görülmüştür.



Şekil 2. D16 HES Yıllık Enerji Üretim Grafiği

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Araştırma kapsamında mevcut içme suyu isale hatları üzerindeki basınç kırıcı yapılarda enerji üretilmesi üzerinde çalışılmıştır. Bu amaçla, Dünya ve Türkiye özelinde enerji üretmek amacıyla kurulan projeler incelenerek mevcut isale hatlarında enerji üretimi potansiyeli ve uygulaması Kahramanmaraş örneği üzerinde analiz edilmiştir. Çalışma bu alanda yapılmış az sayıdaki çalışmalardan biri olduğundan yeni araştırmalar için kullanışlı bir kaynak olma özelliği sunmaktadır. Ayrıca, içme suyu isale hatları üzerinde enerji üretiminin yapısal, mali ve yasal özellikleri irdelenerek tek bir kaynak üzerinden konu hakkında geniş bilgiye ulaşma imkânı sağlanmaktadır. Araştırma hipotezinde ise isale hatları üzerindeki basınç kırıcı yapılarda kurulacak enerji üretim tesislerinin verimli ve maliyet geri dönüşü kısa olan projeler olduğu savunulmuştur. Tüm projeleri incelemek mümkün olmadığından bir pilot proje seçilerek hipotez sınamıştır. Yapılan keşif çalışması ile pilot proje olarak seçilen D16 HES'in kurulum maliyeti tespit edilmiştir. Yıllık enerji üretimi ve işletme gideri gibi hesaplamalar sonunda tesisin kendini 1,8 yıl gibi kısa sürede amorti edebilen ve %44'lük iç verim oranına sahip rantabl bir proje olduğu sonucuna ulaşılmıştır. %44'lük iç verim (karlılık) oranı fırsat maliyeti olarak baz alınan yıllık %10 mevduat faiz oranından çok daha yüksek hesaplandığından hipotez güçlü bir şekilde kabul edilmiştir. Tesisin geri ödeme süresinin %10 mevduat faizine göre kendini katlama süresi olan 7 yıldan çok daha az bir süre olarak sadece 1,8 yıl olarak hesaplanması da bu sonucu kuvvetli şekilde desteklemiştir. Bu bağlamda pilot proje özelinde içme suyu isale hatları üzerinde bulunan basınç kırıcı yapılar üzerinde kurulacak mini/mikro HES tesislerinin yatırım yapmaya değer son derece verimli projeler olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

İçme suyu isale hatları üzerinde bulunan basınç kırıcı yapılar bir maslak, depo ya da basınç kırıcı bir vana olabilmektedir. Bu yapılarda kırılan su basıncından üretilen enerji yenilenebilir enerji kaynağı olması ve eşdeğerinde harcanacak olan fosil yakıtı engellemesi sebebiyle çevrecidir. Türkiye'nin en büyük ithalat kalemi olan enerjide yerli bir kaynak oluşturması ile dış ticaret açığının kapanmasına da katkı sağlamaktadır. Yerel yönetimlerin en büyük gider kalemlerinden olan elektrik enerjisi faturalarını düşürmesi, yüksek potansiyelle sahip beldelerde ayrıca gelir kalemi oluşturması yerel yönetim bütçelerine sürdürülebilir bir katkı sağlamaktadır. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Belediyeler Birliği, İlbank ve Üniversiteler gibi ilgili kurumlar arasında iş birliği ile yapılacak TÜBİTAK-KAMAG projesi ile Türkiye genelindeki potansiyelin tespiti için saha araştırması ve raporlaması yapılabilir. Akabinde geliştirilecek projeler ile yol haritaları ortaya konabilir. Bu sayede her bir

belediye proje ekibinin oluşturacağı kolektif akıl ile hızlı ve verimli sonuçlar alınabilir. Bu çalışmalar kapsamında çok sayıda benzer projenin ortaya çıkabileceği tahmin edilmekte olup, bu durum standardizasyon ile maliyetlerin düşmesini sağlayacaktır. Yenilenebilir enerji projelerine için cazip finansman olanakları bu projeler için de kullanılabilir. Bu bağlamda özellikle Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından benzer enerji üretim tesislerin tespit, teşvik ve tesis edilmesine yönelik adımlar atılmalıdır.

## Teşekkür

Yazarlar katkılarından dolayı KASKİ İçme Suyu ve Kanalizasyon Dairesi Başkanı Sayın Halil İbrahim DURAN'a teşekkür etmeyi bir borç bilirlir.

## Kaynaklar

- [1] Tomassovits M. (2020). Energy Production at Water Pipeline. Vienna Water Viyana Su İdaresi Yetkilisi, 27 Şubat 2020 e-posta İletisi.
- [2] SDCWA (2020). San Diego Şehri Su İdaresi, Basınç Kontrolü ve Hidroelektrik, <https://www.sdcwa.org/pressure-controlhydroelectric-facility>, [Erişim Tarihi: 24 Şubat 2020]
- [3] Melbourne (2020), Melbourne Su İdaresi Hydropower Generation and How It Benefits <https://www.melbournewater.com.au/community-and-education/about-our-water/liveability-and-environment/energy/hydropower> [Erişim Tarihi: 24 Şubat 2020]
- [4] WSD (2020). Hong Kong Special Region Water Supply Department, Hong Kong Özel Bölgesi Su İdaresi <https://www.wsd.gov.hk/en/home/climate-change/mitigating/hydropower-plant/index.html>, [Erişim Tarihi: Şubat 27 2020]
- [5] Punys P., Choulot A., ve Denis V. (2012). Integration of Small Hydro Turbines into Existing Water Infrastructures Aleksandras Stulginskis University Publications March 2012 Sf. 12
- [6] Lombardi S. (2020), Lombardi SA Firması San Lorenzo ve Simbirizzi HES Referansları [https://www.lombardi.ch/engb/Pages/References/Hydroelectric%20plants/References\\_338.aspx](https://www.lombardi.ch/engb/Pages/References/Hydroelectric%20plants/References_338.aspx) [Erişim Tarihi: 26 Şubat 2020]
- [7] Boulder (2020). Colorado Eyaleti Boulder Şehir Yönetimi, Hidroelektrik, <https://boulder.colorado.gov/water/hydroelectricity> [Erişim Tarihi: 26 Şubat 2020]
- [8] EYDAP, (2020) EYDAP Atina Su ve Kanalizasyon Şirketi, Hidroelektrik Projeleri, <https://www.eydap.gr/en/TheCompany/Energy/HydroProjects/> [Erişim Tarihi: 26 Şubat 2020]
- [9] Khennas I. & Barnett A. (2000), Best Practices For Sustainable Development Of Micro Hydro Power In Developing Countries, Final Sythesis Report.
- [10] Gül E., Aydoğdu M., Dursun Ö.F. ve Fırat M. (2015). İçme Suyu Şebekelerinde Enerji Üretiminin Verimliliği: Malatya Örneği, Makale, 7. Kentsel Altyapı Sempozyumu, Trabzon.
- [11] Viccione G., Amato R. ve Martucciello M. (2018) Hydropower Potential from the Ausino Drinking Water System.Proceedings,2,688.
- [12] Soffia C., Miotto F., Poggi D. ve Claps P. (2010). Hydropower potential from the drinking water systems of the Piemonte region (Italy) SEEP2010 Conference Proceedings, June 29th – July 2nd, Bari, İtalya
- [13] Byns N., Leunis K., Peeters K., ve Tonnet L., (2011) The Use of Hydropower in Water Supply, [eau3e.hypotheses.org](http://eau3e.hypotheses.org)
- [14] Demirel İ.H., Yüksel İ., Yüksek Ö. Ve Serencam U. (2015). Yenilenebilir ve Sürdürülebilir Enerji Olarak Küçük HES'lerin İçme Suyu Kaynaklı Enerji Üretimindeki Rolü, Makale, 7. Kentsel Altyapı Sempozyumu, Trabzon.
- [15] Özelçer İ.H., Aksoy B. Dünder O. (2020) Kızılcapınar İçmesuyu Barajında Hidroelektrik Potansiyeli Değerlendirilmesi, Türk Hidrolik Dergisi Sayı:4 Sf.29
- [16] Küçükali S. (2010), Hydropower potential of municipal water supply dams in Turkey: A case study in Ulutan Dam, Energy Policy , vol.38, pp.6534-6539,
- [17] EPDK, (2001). Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, Elektrik Piyasası Kanunu. <https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/1.5.4628.pdf>. [Erişim Tarihi:03.10.2020]
- [18] BUSKİ (2020), Bursa Büyükşehir Belediyesi, BUSKİ Bursa Su ve Kanalizasyon İdaresi, [http://www.buski.gov.tr/tr/haber/buskinin\\_hes\\_yatirimlari\\_turkiyeye\\_ornek\\_1476](http://www.buski.gov.tr/tr/haber/buskinin_hes_yatirimlari_turkiyeye_ornek_1476) [Erişim Tarihi:29.12.2020]
- [19] ESKİ (2019), Erzurum Büyükşehir Belediyesi, ESKİ Erzurum Su ve Kanalizasyon İdaresi, 2018 Faaliyet Raporu, Sf.88
- [20] Karapınar (2013), Karapınar Proje Mühendislik Ltd. Şti., Rize Andon HES Fizibilite Raporu Sf. 21-28
- [21] Dertli S. (2018). İçme Suyu Tesislerinden Enerji Üretimi ve Karbon Salınımı Azaltılması, Enerji Verimliliği Forum ve Fuarı Sunumu.
- [22] SASKİ, Sakarya Su ve Kanalizasyon İdaresi, (2020). Akçay Barajı ve İsale Hattı HES Projeleri, <https://www.sakaryasaski.gov.tr/haberler/detay.aspx?Id=10201> [Erişim Tarihi: 26 Nisan 2020]
- [23] Esha (2006), Avrupa Küçük Hes Sunumu, European Small Hydro Association Sf.12
- [24] KASKİ, Kahramanmaraş Su ve Kanalizasyon İdaresi, (2020). İçme Suyu ve Kanalizasyon Dairesi Başkanlığı, [Görüşme Tarihi: Nisan 15, 2020]

- [25] Ünsal M., Yücel P., İşliyen K., Tekin E. ve Akgün İ. (2013) Kahramanmaraş'taki Barajlar ve Kullanım Amaçları Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi İnşaat Mühendisliği BEÜ Fen Bilimleri Dergisi Sf. 109-118
- [26] Öztürk D., Özdemir M.T., Cebeci M. (2011). Çok Küçük Güçlü Hidroelektrik Santrallerde Plc İle Gerilim Ve Frekans Kontrolü, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23(2) sf.119
- [27] Darcy, H. (1857). Recherches Experimentales Relatives au Mouvement de L'Eau dans les Tuyaux, 2 volumes, Mallet-Bachelier, Paris. 268 pages and atlas. ("Experimental Research Relating to the Movement of Water in Pipes")
- [28] Weisbach, J., (1845). Lehrbuch der Ingenieur- und Maschinen-Mechanik, Braunschweig
- [29] Manning, Francis S.; Thompson, Richard E. (1991), Oilfield Processing of Petroleum. Vol. 1: Natural Gas, PennWell Books, ISBN 0-87814-343-2, 420 pp.
- [30] Uygurtürk, H. (2012). Stratejik Yatırım Kararlarının Verilmesinde Reel Opsiyonlar Yaklaşımı: Kömür Sektöründe Bir Uygulama. Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme A.B.D., Yayınlanmış Doktora Tezi, Zonguldak Sf.19
- [31] Yılıgör, A. G., Yücel, E. (2008). Sermaye Bütçelemesi Kararları: Mersin ve Adana İllerinde Bir Uygulama. Ç.Ü Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 17(2), 449-464.
- [32] Ankara Üniversitesi Yayınları (2020). Su Kaynakları Projelerinin Değerlendirilmesi Açık Ders Notları Sf.3
- [33] AKEDAŞ (2020). AKEDAŞ Elektrik Dağıtım Şirketi, Erişim adresi: [https://www.akedasdagitim.com.tr/Guncel\\_Tarifeler](https://www.akedasdagitim.com.tr/Guncel_Tarifeler), [Erişim Tarihi 17 Mayıs 2020].
- [34] Carf E. (2020), Carf Engineering, Pressure Drop Calculator, Açık Paket Program
- [35] Duran H. İ. (2020). Kahramanmaraş Kaski İçme Suyu ve Kanalizasyon Dairesi Başkanı, Telefon Görüşmeleri, 19.05.2020, 23.05.2020, 26.01.2020, 10.08.2020
- [36] Muhammetoğlu, A., Karadirek, I.E., Özen, Ö., Muhammetoğlu H. (2017), Full-Scale PAT Application for Energy Production and Pressure Reduction in a Water Distribution Network, Journal of Water Resources Planning and Management, Volume 143 Issue 8
- [37] Bosco, C., Pezzinga, G., Sinagra, M., Tullio, T., (2018). Optimal Design Of Water Pipeline And Microhydro Turbine by Genetic Algorithm, 13th International Conference on Hydroinformatics Sf.302-309
- [38] TEMSAN, Türkiye Elektromekanik Sanayi A.Ş., (2020). Banki Türbinleri, Erişim Adresi: <https://www.temsan.gov.tr/Sayfa/banki/60>, [Erişim Tarihi: Mayıs 27 2020]

**Ekler:**

Şebeke No	Tüketim Değerleri			Depo Adı	Depo Kot (m)	Şebeke Kotu <sup>Min-Maks</sup> (m)
	Q <sub>ort</sub> (m <sup>3</sup> /gün)	Q <sub>maks</sub> (m <sup>3</sup> /gün)	Q <sub>maks</sub> (lt/sn)			
Ş1	4229	5497	64	D1	880	820-850
Ş2	2037	2648	31	D2	850	770-820
Ş3	1716	2231	26	D4	800	720-770
Ş4	3668	4768	55	D6	750	670-720
Ş5	6118	7953	92	D3	854,2	770-820
Ş6	10300	13391	155	D5	799	720-770
Ş7	10320	13417	155	D7	754	670-720
Ş8	842	1095	13	D8	750	700-720
Ş9	11011	14314	166	D8	750	670-720
Ş10-11	22156	28802	333	D11	700	620-670
Ş12	25085	32610	377	D13	650	570-620
Ş13	18962	24651	285	D16	605	520-570
Ş14	11786	15321	177	D15	604	520-570
Ş15	10283	13368	155	D18	555	470-520
Ş16	7496	9744	113	D10	700	620-670
Ş17	4363	5672	66	D12	650	570-620
Ş18	5597	7276	84	D14	600	520-570
Ş19	3174	4127	48	D17	550	470-520
Ş20	3740	4862	56	D19	497	450-470
Ş21	2722	3539	41	D20	750	670-720
Ş22	1730	2249	26	D21	800	720-770
Ş22A	205	267	3	D22	845	770-820
Ş23	6836	8886	103	D23	697	620-670
Ş24	6320	8216	95	D24	647	570-620
Ş25	2537	3298	38	D25	600	520-570
Ş26	2011	2614	30	D26	650	570-620
Ş27	785	1021	12	D27	520	440-490
Ş28	3999	5199	60	D28	546	480-514
Ş29	264	343	4	---	---	469-484

**Ek-1. Kahramanmaraş İl Merkezi Depo Kotları ve Tüketim Değerleri [23]**

İçme Suyu İsale Hatlarındaki Basınç Kırıcı Yapılarda Enerji Üretimini Yapısal Tasarımı ve Analizi: Kahramanmaraş Örneği

NO	Poz No	İşin Cinsi	Birim	Miktar	Birim Fiyatı (TL)	Tutar (TL)			
1	B-15.301	Barajlarda kaya ve bataklık zeminler hariç her cins ve klasta zeminlerin kazılması ve depoya konulması	m <sup>3</sup>	500	5,00	2.500,00			
2	B-15.306	Barajlarda yumuşak kaya zeminlerin kazılması ve tahliyesi	m <sup>3</sup>	100	30,00	3.000,00			
3	B-15.310	Barajlarda kaya kazılması, dolgu ve/veya depoya konulması	m <sup>3</sup>	50	23,00	1.150,00			
4	B-16.501-B	B - Portland çimentosu	ton	20	238,00	4.760,00			
5	B-16.513	Barajlarda idarece istenilen dozda konkasör kumu ve kırmataş kullanılarak betoniyerle karıştırılan ve vibratörle dövülen betonarme betonu	m <sup>3</sup>	80	220,00	17.600,00			
6	B-21.015	Her cins düz yüzeyli beton ve betonarme betonu kalıbı yapılması	m <sup>2</sup>	200	55,00	11.000,00			
7	B-23.002	Barajlarda betonarme demiri	ton	15	3.800,00	57.000,00			
8	B-23.D/4-a	Açıktaki cebri borular ve çelik mesnetleri	kg	2.500	22,00	55.000,00			
9	B-07.D/1	Çimento Taşınması	K.Maraş KÇS	30	km	ton	100	30,00	3.000,00
10	B-07.D/2	Demir Taşınması	Muhtelif	10	km	ton	15	100,00	1.500,00
11	B-07.D/4	Karayolu ile taşımalar	Agrega Nakli	20	km	m <sup>3</sup>	300	10,00	3.000,00
12	B-07.D/3	Karayolu ile taşımalar	Kazı Nakli	20	km	m <sup>3</sup>	500	10,00	5.000,00
13	B-07.D/5	Karayolu ile taşımalar	Kazı Nakli	20	km	m <sup>3</sup>	500	10,00	5.000,00
14	ÖZEL	DN800 İğne Vana ve Check Valve Sistemi	Adet	1	26.000,00	26.000,00			
15	ÖZEL	DN800 Kelebek Vana	Adet	1	16.000,00	16.000,00			
16	ÖZEL	DN800 Debi Ölçer	Adet	1	12.000,00	12.000,00			
17	Y.21.311-01	Ahşap Lambri Alın Kapatma Levhası	m <sup>2</sup>	100	70,00	7.000,00			
18	Y.18.201	Altve üst kiremit (dar tip) ile çatı örtüsü yapılması (grup 1)(alaturka)	m <sup>2</sup>	30	250,00	7.500,00			
19	Y.18.461/051A	1.5 mm kalınlıkta, PVC esaslı, (DuzTip yada sinyal tabakalı) jeomembran ile su yalıtımı yapılması	m <sup>2</sup>	15	200,00	3.000,00			
20	Y.18.245-001	Eğimli çatılarda, minimum 1 mm kalınlıkta iki yüzü polietilen film kaplı laminesiz polimer bitümlü örtü ile su yalıtımı yapılması	m <sup>2</sup>	40	220,00	8.800,00			
21	MSB.503	Çatı örtüsü altına lifli levha (OSB-3) (11 mm) ile kaplama yapılması	m <sup>2</sup>	20	200,00	4.000,00			
22	24,011	12 Nolu Çinkodan 185 mm Yağmur Oluğu Yapılması	m	40	30,00	1.200,00			
23	24,006	12 Nolu Çinkodan 80 mm Düşey Yağmur iniş Borusu	m	25	30,00	750,00			
24	Y.23.081	Profil demirlerden Çatı makası yapılması veyerine konulması	kg	1.500	12,00	18.000,00			
25	04.553-04	Silikon esaslı su bazlı dış cephe boyası	kg	50	125,00	6.250,00			
26	27,582	Mala perdahlı şap yapılması	m <sup>2</sup>	8	280,00	2.240,00			
27	04.555-03	Su bazlı brut beton astarı	kg	5	160,00	800,00			
28	23,002	(14 mm'lik ve Daha Büyük Çaplı) Kalın Betonarme Demirlerin Temini, Bukülmesi ve Yerine Konması (GEMİCİ MERDİVENİ)	kg	300	10,00	3.000,00			
29	KGM/26.041/K	Karo Mozaik Kaplama (Tesviye Betonsuz)	m <sup>2</sup>	40	300,00	12.000,00			
31	04.644-04B	4+4 mm kalınlıkta Renksiz Opak 0,76 PVB li Lamine Camlar (İS EN ISO 12543-1)	m <sup>2</sup>	40	18,00	720,00			
32	B.03	Vasistas takımının yerine takılması (Çelik makas, kromaj kol tutanak)	Adet	10	10,00	100,00			
33	04.773-B03	Vasistas takımı (Çelik makas kromaj kol ve tutamak) pencere dograma madeni aksamı (ahşap, metal ve plastik)	Adet	10	150,00	1.500,00			
34	25,137	Demir, madeni imalatı korozyona karşı 2kat boyama	m <sup>2</sup>	12	250,00	3.000,00			
35	Y.23.155	2,00 mm kalınlığında sıcak haddelenmiş sacdan bükme kapı kasası yapılması ve yerine konulması	kg	40	80,00	3.200,00			
36	Y.23.220	Demir borudan kaynakla korkuluk yapılması, yerine konulması	kg	6	300,00	1.800,00			
37	ÖZEL	Banki (Crossflow) Türbini - 200 kW	set	1	163.000,00	163.000,00			
38	ÖZEL	Kayış Kasnak Grubu	set	1	4.000,00	4.000,00			
39	ÖZEL	Asenkron Generatör - 210 kVA	set	1	48.900,00	48.900,00			
40	ÖZEL	Kumanda ve Kontrol Sistemi	set	1	40.000,00	40.000,00			
41	ÖZEL	AG Şalt Panosu ve AG Bağlantısı	set	1	20.000,00	20.000,00			
42	ÖZEL	UPS 50 kVA	set	1	42.300,00	42.300,00			
43	ÖZEL	Gezer Vinç (5 Ton, 5m)	Adet	1	24.000,00	24.000,00			
44	ÖZEL	Montaj, Test ve Devreye Alma	set	1	25.900,00	25.900,00			
45	ÖZEL	Müşavirlik Hizmetleri	set	1	20.000,00	20.000,00			
46	ÖZEL	Projelendirme Hizmetleri	set	1	30.000,00	30.000,00			
47		Öngörülemeyen Giderler (%10)	set	1	72.347,00	72.347,00			
					TOPLAM	798.817,00			

**Ek-2. D16 HES Keşif Listesi**

Yıl	Kurulum Maliyeti	Brüt Gelir	İşletme Gideri	Finansman Gideri	Büyük Bakım/Onarım Gideri	Net Değer
1	-798.817			-115.000		-913.817
2		640.350	-200.000	-115.000		325.350
3		640.350	-200.000			440.350
4		640.350	-200.000			440.350
5		640.350	-200.000			440.350
6		640.350	-200.000			440.350
7		640.350	-200.000			440.350
8		640.350	-200.000			440.350
9		640.350	-200.000			440.350
10		640.350	-200.000		-100.000	340.350
11		640.350	-200.000			440.350
12		640.350	-200.000			440.350
13		640.350	-200.000			440.350
14		640.350	-200.000			440.350
15		640.350	-200.000			440.350
16		640.350	-200.000			440.350
17		640.350	-200.000			440.350
18		640.350	-200.000			440.350
19		640.350	-200.000			440.350
20		640.350	-200.000		-100.000	340.350
21		640.350	-200.000			440.350
22		640.350	-200.000			440.350
23		640.350	-200.000			440.350
24		640.350	-200.000			440.350
25		640.350	-200.000			440.350
26		640.350	-200.000			440.350
27		640.350	-200.000			440.350
28		640.350	-200.000			440.350
29		640.350	-200.000			440.350
30		640.350	-200.000		-100.000	340.350
31		640.350	-200.000			440.350
32		640.350	-200.000			440.350
33		640.350	-200.000			440.350
34		640.350	-200.000			440.350
35		640.350	-200.000			440.350
36		640.350	-200.000			440.350
37		640.350	-200.000			440.350
38		640.350	-200.000			440.350
39		640.350	-200.000			440.350
40		640.350	-200.000		-100.000	340.350
41		640.350	-200.000			440.350
42		640.350	-200.000			440.350
43		640.350	-200.000			440.350
44		640.350	-200.000			440.350
45		640.350	-200.000			440.350
46		640.350	-200.000			440.350
47		640.350	-200.000			440.350
48		640.350	-200.000			440.350
49		640.350	-200.000			440.350
50		640.350	-200.000			440.350
<b>İç Verim Oranı:</b>						<b>44%</b>

Ek-3. Türk Lirası Cinsinden Nakit Akışı Tablosu ve İç Verim (Karlılık) Hesabı





## Kronik Böbrek Hastalığının Teşhisi İçin Genetik Algoritma-Dalgacık Çekirdeği-Uç Öğrenme Makinesine Dayalı Uzman Bir Sistem

Derya AVCI<sup>1\*</sup>, Akif DOĞANTEKİN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Teknik Bilimler MYO, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>2</sup> Özel Gaziantep Emek Hastanesi, Gaziantep, Türkiye

\*<sup>1</sup> davci@firat.edu.tr, <sup>2</sup> akifdogantekin@gmail.com

(Geliş/Received: 05/07/2021;

Kabul/Accepted: 01/01/2022)

**Öz:** Böbrekler, sağlıklı bir yaşam sürdürebilmemiz için gerekli olan bir takım işlevleri yerine getirmektedir. Kronik Böbrek Hastalığı (KBH), böbreklerin görevini yerine getiremediği durumlarda ortaya çıkmaktadır. KBH verileri UCI makine öğrenimi veri tabanından alınmıştır. KBH veri seti 400 kişiye ait 24 farklı özelliğinden oluşmaktadır. Bu çalışmada, KBH tanısı için KBH verilerine Genetik Algoritma - Dalgacık Çekirdeği - Uç Öğrenme Makinesi (GA-DÇ-UÖM) yöntemi uygulanmıştır. Geliştirilen DÇ-UÖM sınıflandırıcısı, KBH verilerini sınıflandırmak için kullanılmıştır. GA, UÖM 'nin gizli katman nöron sayısı ve dalgacık çekirdeğinin k, l, m parametre değerlerini optimize etmek için kullanılmıştır. Ayrıca, DÇ-UÖM 'nin sınıflandırma performansını artırmak için GA uygulanmaktadır. 400\*24 öznitelik vektörü, DÇ-UÖM sınıflandırıcısına girdi olarak verilmiştir. GA-DÇ-UÖM 'nin başarısı, sınıflandırma doğruluğu, duyarlılık ve özgüllük analizi kullanılarak hesaplanmıştır. Önerilen GA-DÇ-UÖM yönteminin sınıflandırma başarısı %98,42 olarak hesaplanmıştır. Dalgacık çekirdek fonksiyonunun k, l, m parametrelerinin optimum değerleri sırasıyla 5, 3 ve 12 olarak bulunmuştur. Gizli katman nöron sayısının optimum değeri 220 olarak bulunmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Uç Öğrenme Makinesi, Dalgacık Çekirdeği, Genetik Algoritma, Kronik Böbrek Hastalığı, Tanı Sistemi.

### An Expert System Based On Genetic Algorithm - Wavelet Kernel - Extreme Learning Machine For The Diagnosis of Chronic Kidney Disease

**Abstract:** The kidneys perform a number of functions that are necessary for us to maintain a healthy life. Chronic Kidney Disease (CKD) occurs when the kidneys can not perform their duty. The CKD data have been taken from the UCI machine learning database. The CKD data set comprise of 24 different properties of 400 individuals. In this study, Genetic Algorithm-Wavelet Kernel-Extreme Learning Machine (GA-WK-ELM) method is applied to CKD data for the diagnosis of CKD. Developed WK-ELM classifier has been used to classify CKD data. GA has been used to optimize the hidden layer neuron number of ELM and the k, l, m parameter values of Wavelet Kernel(WK). In addition, GA is applied to increase the classification performance of WK-ELM. The feature vector of 400 \* 24 is given as input to the WK-ELM classifier. The success of GA-WK-ELM is calculated by using classification accuracy, sensitivity and specificity analysis. The classification success of the suggested GA-WK-ELM method has been calculated 98.42%. The optimal values of k, l, m parameters of the wavelet kernel function have been found 5, 3 and 12 respectively. The optimum value of the hidden layer neuron number has been found 220.

**Key words:** Extreme Learning Machine, Wavelet Kernel, Genetic Algorithm, Chronic Kidney Disease, Diagnostic System.

#### 1. Giriş

Böbrek hastalığı, son yıllarda görülen ve kötü sonuçlar doğurabilen bir halk sağlığı sorunudur. Ayrıca, böbrek fonksiyon kaybı, kardiyovasküler hastalık ve erken ölüm dahil olmak üzere olumsuz sonuçlarla birlikte kronik böbrek hastalığının (KBH) erken aşamalarında daha yüksek bir risk bulunmaktadır[1]. Kronik böbrek hastalığı, böbrek fonksiyonlarında değişikliklere yol açması gereken glomerüler filtrasyon hızında kalıcı bir azalmanın belirtisidir. Bu durum sıklıkla glomerüler uyum oranı 25 ml / dk' nın altına düştüğünde ortaya çıkar. Glomerüler uyum oranı normal miktarın % 75' i kadar azaldığında, bu durum ortadan kaldırılsa da böbrek fonksiyonlarındaki yetersizlik devam eder [2]. Kronik böbrek hastalığı, böbrek hasarının etiyojisine bakılmaksızın en az 3 ay boyunca objektif böbrek hasarı ve / veya <60 mL / dak / 1.73 m<sup>2</sup> veya daha düşük bir glomerüler uyum oranına sahip olması olarak tanımlanır. Böbrek hasarının varlığı, böbrek histolojisinden üreyen böbreğin yapısal veya fonksiyonel anomalileri veya idrar veya kan kombinasyonundaki anormallikler veya görüntüleme testlerindeki

\* Sorumlu yazar: [davci@firat.edu.tr](mailto:davci@firat.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-9708-3425, <sup>2</sup> 0000-0001-6078-540X

anormallikler ile tanımlanabilir. Böbrek hasarının en yaygın ve en kolay gerçek belirteci, mikroalbüminüri dahil proteinüri varlığıdır [3], [4].

Literatürde KBH alanında yapılan sınıflandırma çalışmaları incelendiğinde, yapay sinir ağları [5], naive bayes [6,7], K-En Yakın Komşu (KNN)[7], radial tabanlı sinir ağları [8], destek vektör makinesi [9], rastgele orman [10,11], karar ağacı [12], ve Kyıldız[12] algoritması olarak karşımıza çıkmaktadır. Gunarathne, W.H.S.D. ve ark. [13], KBH alanında teşhis yapabilmek için makine öğrenmesi sınıflandırma algoritmalarını kullanmışlardır. Çalışmada farklı sınıflandırma algoritmaları kullanarak KBH teşhisi yapılmıştır. Veri kümesindeki 25 öznelik, 14 özneliğe indirgenmiştir. Elde edilen bu öznelikler, çok sınıflı karar ormanı algoritması ve farklı modellerle elde edilen özneliklerle karşılaştırılmıştır. Charleonnan, A. ve ark. [14], KBH' yi tahmin etmek için makine öğrenmesi tekniklerini karşılaştırmıştır. Bu çalışmada kullanılan dört adet makine öğrenmesi tekniği sırasıyla, KNN, Destek Vektör Makinesi (DVM), Lojistik Regresyon (LR) ve Karar Ağacı sınıflandırıcılarıdır. KBH' i tahmin etmek ve en iyi sınıflandırıcıyı seçmek için bu çalışma gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak bu çalışmada, DVM ile en iyi sınıflandırma sonucu % 98,3 olarak bulunmuştur. Sharma, S. ve ark. [15], karar ağacı algoritmasını kullanarak bir doğruluk analizi yapmıştır. Bu çalışmada veri kümesinin tüm özelliklerini kullanmak ve karar ağaçlarını kategorize etmek için çoklu karar ağaçları kullanılmıştır. Yıldırım, P. [16], KBH ile ilgili tıbbi karar sistemi için sinir ağı sınıflandırıcısı geliştirmiştir. Ahmad, M. ve ark. [17], KBH'yi DVM kullanarak sınıflandırmıştır. Sistemin geliştirilmesinin amacı, KBH tanısında bir karar destek sistemi kurarak KBH'nin olup olmadığını tahmin etmektir. Bu tanısal karar destek sisteminin doğruluğu %98.34'tür. Sinha, P. ve ark. [18], KBH için KNN ve DVM sınıflandırıcı performansını karşılaştırmıştır. Deneysel sonuçlardan, KNN sınıflandırıcısının başarısının DVM' den daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Mat, A.N. ve ark. [19], KBH teşhisinde KNN sınıflandırıcının performansını arttırmak amacıyla genetik algoritmalar ve temel bileşenler analizini (PCA) hibrit şekilde kullanmıştır. Arora, M. ve ark.[20], Vijayarani, S. ve ark.[21], çalışmalarında KBH verilerinin sınıflandırması için DVM ve sinir ağları gibi sınıflandırma algoritmalarını kullanarak doğruluk açısından iyi sonuçlar üretmiştir. Baby, P. S. ve ark.[22], ADT ağaçlar, Naive Bayes, J48, Kyıldız algoritmalarını kullanarak KBH verilerini sınıflandırmıştır. Saurabh, N. Ve ark[23], KBH verilerinin sınıflandırması için Naive Bayes, DVM, J48, Rastgele orman ve KNN algoritmalarını kullanmıştır. Shanthakumari, A. S. ve ark.[24], kronik böbrek hastalığı tahmini için toplu öğrenmeli destek vektör makinesi yöntemini kullanarak karşılaştırmalı analiz, sınıflandırma doğruluğu, f-ölçümü, yüzde hatası vb. çeşitli metrikler açısından karşılaştırmıştır.

Bu çalışmada, KBH tanısı için Genetik Algoritma - Dalgacık Çekirdeği – Uç Öğrenme Makinesi (GA-DÇ-UÖM) hibrit yöntemi uygulanmıştır. Geliştirilen DÇ-UÖM sınıflandırıcısı, KBH verilerini sınıflandırmak için kullanılmıştır. GA, UÖM 'nin gizli katman nöron sayısını ve dalgacık çekirdeğinin k, l, m parametre değerlerini optimize etmek için kullanılmıştır.

Bu makalenin organizasyonu şu şekildedir:

Bölüm 2'de, Dalgacık Çekirdeği – Uç Öğrenme Makinesi yöntemi anlatılmıştır. Bölüm 3'te, Genetik Algoritma ile ilgili bilgi verilmiştir. Bölüm 4'te, veri seti tanıtılmaktadır. Bölüm 5'te önerilen yöntem açıklanmıştır. Son olarak, Bölüm 6'da deneysel sonuçlar verilmiştir.

## 2. Uç Öğrenme Makinesi

Uç Öğrenme Makinesi(UÖM), tek gizli katmanlı ileri beslemeli Yapay Sinir Ağlarını (YSA) eğitmek için önerilen bir yöntemdir [25], [26]. Bu modelde UÖM, giriş ve çıkış ağırlıkları rastgele hesaplanmaktadır. UÖM, gizli katmanda sigmoid, sinüs, gauss ve sabit limit aktivasyon fonksiyonlarını kullanmaktadır [27]. UÖM, çıkış katmanında doğrusal fonksiyonlar kullanmaktadır. Ayrıca türevi olmayan veya aralıklı aktivasyon fonksiyonlarını da kullanabilir [28].

Bir tek gizli katmanlı ileri beslemeli ağdaki eşik değerleri ve giriş-çıkış ağırlıkları ağ performansını etkilemez. UÖM'de eşik değerleri ve girdi ağırlıkları rastgele oluşturulur, çıkış ağırlıkları hesaplanır. Bu nedenle UÖM, geleneksel yöntemlerden daha iyi ve daha hızlıdır[29]. UÖM, gizli katmanın başlangıç parametrelerini ayarlamaz. Bu algoritma, doğrusal olmayan fonksiyonlarda gizli nöronları kullanır. Farklı örnek veri setleri için  $\{p_j, m_j\} | p_j \in Q^l, m_j \in Q^k, j = 1, \dots, M\}$  k, UÖM' nin gizli bir nöron olarak hedef fonksiyonudur [30].

$$u_K(p) = \sum_{j=1}^K N_j h_j(p) = h(p)N, \quad (1)$$

$h = [h_1(p), h_2(p), \dots, h_K(p)]$  p, gizli katmanın hedef vektörünü temsil eder. hedef nöronlar ve gizli katman nöronları arasındaki ağırlık vektörünü temsil eder. h vektörü, girdi alanını UÖM özellik alanına dönüştürür [15]. UÖM' yi

optimize etmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Eğitim ve çıkış hatalarını azaltmak için ağırlıklar en aza indirilebilir. Böylece sinir ağının tüm performansı iyileştirilir [31].

$$\text{Minimize: } \|TN - W\|, \quad \|N\| \quad (2)$$

$$N = T^T \left( \frac{1}{R} + TT^T \right)^{-1} W \quad (3)$$

T, gizli katman hedef matrisini W, örneklerin beklenen hedef matrisini R, regresyon katsayısını temsil etmektedir. Denklem 4'te UÖM öğrenme algoritması için çıkış fonksiyonu gösterilmektedir.

$$u(p) = h(p)T^T \left( \frac{1}{R} + TT^T \right)^{-1} W \quad (4)$$

Özellik vektörü bilinmiyorsa, UÖM' nin çekirdek matrisi Mercer' in koşullarıyla açıklanabilir [32].

$$K = TT^T: \quad k_{jz} = h(p_j)h(p_z) = b(p_j, p_z), \quad (5)$$

UÖM fonksiyonuna dayalı dalgacık çekirdeği Denklem 6'da gösterilmektedir.

$$u(p) = [b(p, p_1), \dots, b(p, p_M)] \left( \frac{1}{R} + K \right)^{-1} W \quad (6)$$

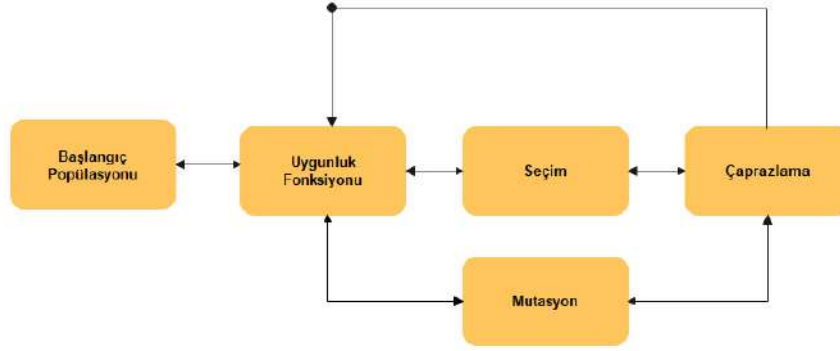
$K = TT^T$  çekirdek matrisini,  $b(p, g)$  UÖM' nin çekirdek fonksiyonunu temsil etmektedir. Bu çalışmada, DÇ-UÖM performans testi için Denklem 7 kullanılmıştır[33], [34].

$$b(p, g) = \cos \left( k \frac{\|p - g\|}{l} \right) \exp \left( - \frac{\|p - g\|^2}{m} \right) \quad (7)$$

DÇ' nin k, l ve m ayarlanabilir parametreleri sınıflandırmanın başarısını etkilemektedir. Bu nedenle k, l ve m parametrelerinin değerleri dikkatlice ayarlanmalıdır. DÇ-UÖM öğrenme algoritması, literatürdeki diğer algoritmalarından daha iyi genelleme yeteneğine sahiptir. DÇ-UÖM, klasik UÖM' den daha hızlıdır [35-38].

### 3. Genetik Algoritma

Genetik algoritma(GA), doğada gözlemlenen evrimsel süreçlere benzer şekilde çalışan bir optimizasyon yöntemidir. GA, sorunlara tek bir çözüm üretmek yerine, farklı çözümlerden oluşan bir dizi çözüm üretir. Böylelikle arama alanında birçok nokta aynı anda değerlendirilmekte ve bütüncül çözüme ulaşma olasılığı artmaktadır [39]. Sorunun olası çözümlerini simgeleyen kümeler GA'da popülasyon denir. Popülasyon, birey adı verilen bir sayı dizisinden oluşur. Etkili bireyler, evrimsel bir süreçte GA tarafından tespit edilir. Popülasyondaki her bir bireyin soruna bir çözüm olup olmayacağına karar veren bir uygunluk fonksiyonu vardır [40]. Uygunluk fonksiyonları, diğer bireylerle çoğalma fırsatı verir. Bu bireyler geçiş sürecinin sonunda çocuk adı verilen yeni bireyler üretirler. Çocuk, ebeveynlerin (anne, baba) özelliklerini taşır. Yeni popülasyon, önceki popülasyondaki yüksek uyumlu bireylerin bir araya gelmesiyle oluşur [41, 42]. En yüksek uygunluk değerine sahip bireyler ne kadar çok bir araya gelir ve yeni bireyler oluşturursa, arama alanında o kadar iyi çalışma alanı elde edilir. GA'nın yapısı Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. GA'da Evrim Döngüleri

#### 4. Veri Seti Özellikleri

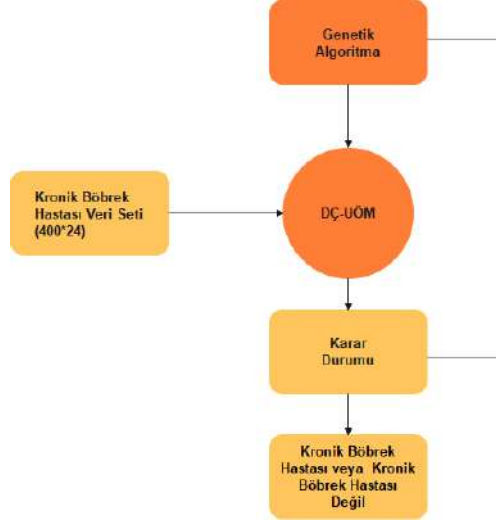
KBH verileri, UCI makine öğrenimi veritabanından alınmıştır [43]. Veri seti, 2-90 yaş aralığındaki insanlara ait 250 kronik böbrek hastası ve 150 sağlıklı kişi olmak üzere toplam 400 kişinin özelliklerini içermektedir. Çalışmada kronik böbrek hastalığının belirlenmesinde 400 kişiye ait 24 farklı özellikten oluşan veri seti kullanılmıştır. 24 farklı değer miktarının hastalığın oluşumunda etkili olduğu düşünülmektedir. Veri setinde kullanılan öznitelikler Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Veri seti özellikleri

Öznitelik	Açıklama	Değer
age	yaş	sayısal
bp	kan basıncı	sayısal
sg	idrarda özgül ağırlık	sayısal (1.005,1.010,1.015,1.020,1.025)
al	albumin	sayısal (0,1,2,3,4,5)
su	şeker	sayısal (0,1,2,3,4,5)
rbc	kırmızı kan hücreleri	nominal (normal,anormal)
pc	iltihap hücresi	nominal(normal,anormal)
pcc	iltihap hücre kümeleri	nominal (mevcut,mevcut değil)
ba	bakteri	nominal (mevcut,mevcut değil)
bgr	rastgele kan şekeri	sayısal
bu	kanda üre	sayısal
sc	serum kreatinin	sayısal
sod	sodyum	sayısal
pot	potassium	sayısal
hemo	hemoglobin	sayısal
pcv	paketlenmiş hücre hacmi	sayısal
wc	Beyaz kan hücre sayısı	sayısal
rc	kırmızı kan hücresi sayısı	sayısal
htn	Hipertansiyon	nominal (Evet,Hayır)
dm	şeker hastalığı	nominal (Evet,Hayır)
cad	koroner arter hastalığı	nominal(Evet,Hayır)
appet	iştah	nominal (iyi,kötü)
pe	ödem	nominal (Evet,Hayır)
ane	anemi	nominal (Evet,Hayır)
class	sınıf	nominal (KBH, KBH değil)

## 5. Materyal Metot

Bu çalışmadaki uygulama Matlab R2018b kullanılarak yapılmıştır[44]. Genetik Algoritma –Dalgacık Çekirdeği-Uç Öğrenme Makinesi(GA-DÇ-UÖM) üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama, Kronik Böbrek Hastalığı(KBH) veri setinden alınan verileri içermektedir. Veri seti toplam 400 vaka ve 24 özneliği içermektedir. İkinci aşamada, GA ile UÖM'nin gizli katman nöron sayısı ve dalgacık çekirdeğinin parametreleri optimize edilir. 3. aşamada, veri setindeki 24 öznelik, GA tarafından hesaplanan optimum değerlerle DÇ-UÖM sınıflandırıcısına verilir. Çıkışta kronik böbrek hastalığı olan veya kronik böbrek hastalığı olmayan şekilde iki sınıf bulunmaktadır. Kronik böbrek hastalığı için akıllı teşhis sistemine dayalı GA-DÇ-UÖM sisteminin akış şeması Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. GA-DÇ-UÖM'nin akış şeması

Kronik böbrek hastalığı veritabanındaki 400X24 boyutundaki özellik vektörü, DÇ-UÖM sınıflandırıcısına girdi olarak verilir. DÇ-UÖM'nin yapısında, dalgacık çekirdeğinin ayarlanabilir üç parametresi vardır. Bu parametreler UÖM'nin dalgacık çekirdeğinin  $k$ ,  $l$ ,  $m$  parametreleri ve gizli katman nöron sayısı UÖM'nin performansında önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle bu parametreler ve gizli katman nöron sayısı değerleri dikkatli seçilmelidir. Bu çalışmada, DÇ-UÖM'nin  $k$ ,  $l$ ,  $m$  değerleri ve gizli katman nöron sayısı parametrelerinin optimum değerleri GA kullanılarak elde edilmiştir. GA yapısında, bir birey toplam 20 bitten oluşur. 20 kişinin 1., 2., 3. ve 4. bitleri, dalgacık çekirdeğinin  $k$  parametre değerlerini, 5., 6., 7. ve 8. bitleri, dalgacık çekirdeğinin  $l$  parametre değerini, 9., 10., 11. ve 12. bitleri, dalgacık çekirdeğinin  $m$  parametre değerini (1 ile 16 arası) temsil etmektedir. Son 8 bit gizli katman nöron sayısını (5 ile 259 arasında) temsil etmektedir. İlk popülasyonda bireyler rastgele seçilmektedir. GA kullanılarak DÇ-UÖM sınıflandırıcısının en iyi performansının elde edilmesi amaçlanmaktadır. DÇ-UÖM sınıflandırıcı 260 veri seti ile eğitilmiştir. Kalan 140 veri seti, DÇ-UÖM'yi test etmek için kullanılır. Kronik böbrek hastalığı olan veya kronik böbrek hastalığı olmayan şekildeki 2 durum, sınıflandırıcının çıkışı temsil etmektedir. DÇ fonksiyonunun parametresinin ve UÖM'nin gizli katman nöron sayısının optimum değerleri, önerilen GA-DÇ-UÖM yöntemi ile hesaplanmıştır. Sonuç olarak GA-DÇ-UÖM, kronik böbrek hastalığının teşhisi için çok güçlü ve gerçek zamanlı bir sistemdir. Bu çalışmada, GA-DÇ-UÖM'nin performansını bulmak için ortalama değerler hesaplanmıştır. GA'da ilk popülasyon, 40 bireyden rastgele seçilmektedir.

Tablo 2'de DÇ fonksiyonunun  $k$ ,  $l$ ,  $m$  parametrelerinin kodlama değerleri, Tablo 3'te gizli katman nöron sayısını kodlanması verilmiştir. GA'daki 20 bireyin ilk dört biti (1., 2., 3. ve 4. bitler) DÇ fonksiyonunun  $k$  parametre değerlerini (1 ile 16 arası), 5., 6., 7. ve 8. bitler DÇ fonksiyonunun  $l$  parametre değerini (1 ile 16 arası), 9., 10., 11. ve 12. bitler DÇ fonksiyonunun  $m$  parametre değerini (1 ile 16 arası), son 8 bit ise gizli katman nöron sayısını (5 ile 259 arasında) temsil etmektedir [38].

**Tablo 2.** Çekirdek fonksiyon parametreleri için kodlama

k, l, m parametrelerinin değerleri	Kodlama
1	0 0 0 0
2	0 0 0 1
3	0 0 1 0
4	0 0 1 1
5	0 1 0 0
6	0 1 0 1
7	0 1 1 0
8	0 1 1 1
9	1 0 0 0
10	1 0 0 1
11	1 0 1 0
12	1 0 1 1
13	1 1 0 0
14	1 1 0 1
15	1 1 1 0
16	1 1 1 1

**Tablo 3.** Gizli katman nöron sayısının kodlanması

Gizli katman nöron sayısı	Kodlama
5	0 0 0 0 0 0 0 0
6	0 0 0 0 0 0 0 1
7	0 0 0 0 0 0 1 0
8	0 0 0 0 0 0 1 1
.	.
.	.
.	.
259	1 1 1 1 1 1 1 1

GA-DÇ-UÖM 'nin başarısı, sınıflandırma doğruluğu, ROC eğrileri, duyarlılık ve özgüllük analizi kullanılarak hesaplanmaktadır. Veri setleri için sınıflandırma performansı Denklem 8 kullanılarak hesaplanmaktadır. Duyarlılık ve özgüllük analizi ise Denklem 9, Denklem 10 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$Correct\ accuracy(C) = \frac{\sum_{k=1}^{|C|} assess(c_k)}{|C|}, \quad c_k \in C \quad (8)$$

$$assess(C) = \begin{cases} 1 & \text{if } classify(c) = c.m \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$assess(c) = \begin{cases} 1, & \text{if } classify(c) = c.d \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

$$sensitivity(\%) = \frac{TP}{TP + FN} \quad (10)$$

$$specificity(\%) = \frac{TN}{FN + TN} \quad (11)$$

Burada; TP gerçek pozitifleri, TN gerçek negatifleri, FP yanlış pozitifleri, FN yanlış negatifleri sembolize etmektedir [45], [46].

## 6. Sonuçlar ve Karşılaştırmalar

Önerilen GA-DÇ-UÖM 'nin performansı, sınıflandırma doğruluğu, ROC eğrileri, duyarlılık ve özgüllük analizi kullanılarak hesaplanmaktadır. Farklı gizli katman nöron sayısı ve çekirdek fonksiyonlarından oluşan klasik UÖM sınıflandırıcıların performansı, optimal gizli katman nöron sayısı ve optimal k, l, m parametrelerinden oluşan GA-DÇ-UÖM yönteminin performansı ile karşılaştırılmaktadır. Tablo 4'te Önerilen GA-DÇ-UÖM 'nin dalgacık çekirdeği k, l ve m parametre değerleri ve gizli katman nöron sayısının en iyi 5 performansının parametre değerleri verilmektedir. UÖM'nin optimum parametrelerini bulmak için farklı aktivasyon fonksiyonları kullanılmaktadır. En iyi performans, gizli katman nöron sayısı sayısının aşamalı olarak l'den 100 adıma çıkarılmasıyla test edilmiştir. Tablo 5'te ise klasik UÖM'nin farklı parametreler ve farklı aktivasyon fonksiyonları için performansı verilmiştir. Tablolardan görüldüğü gibi önerilen GA-DÇ-UÖM 'nin sınıflandırma başarımı klasik UÖM' den daha başarılı sonuçlar vermektedir.

**Tablo 4.** Önerilen GA-DÇ-UÖM 'nin en iyi 5 performansının parametre değerleri

<i>k</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	Gizli Katman Nöron Sayısı	Doğruluk (%)
5	3	12	220	98.42
5	13	16	188	97.84
10	9	10	207	96.68
16	5	9	198	95.97
15	16	4	166	95.2

**Tablo 5.** UÖM'nin farklı parametreler ve farklı aktivasyon fonksiyonları için performansı

Aktivasyon Fonksiyonu	Gizli Katman Nöron	Doğruluk (%)	
		Eğitim	Test
<i>Logarithmic-sigmoid</i>	10	79.69	76.02
	20	78.65	75.00
	30	77.60	76.50
	40	77.08	76.04
	50	77.08	76.04
	60	80.73	75.52
	70	77.60	75.52
	80	80.73	79.17
	90	80.73	72.40
	100	81.25	74.48
<i>Tangent - sigmoid</i>	10	78.47	78.13
	20	81.03	80.21
	30	82.05	81.25
	40	80.73	77.08
	50	85.02	84.61
	60	80.73	80.21
	70	82.64	76.56
	80	84.03	76.56
	90	84.03	75.52
	100	84.55	79.69

Önerilen GA-DÇ-UÖM için en iyi sınıflandırma başarımı % 98.42 olarak bulunmuştur. Buna bağlı olarak dalgacık çekirdeğinin k, l, m parametrelerinin değerleri 5, 3 ve 12 olarak, gizli katman nöron sayısı 220 olarak bulunmuştur.

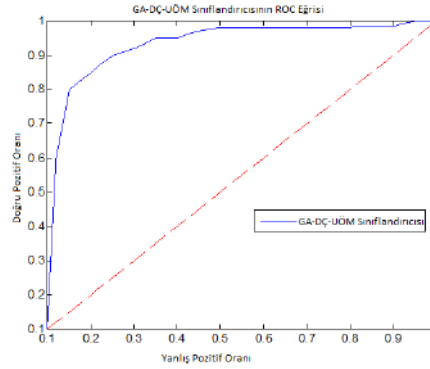
Tablo 6'da, önerilen GA-DÇ-UÖM 'nin en iyi performansının doğruluk ve duyarlılık değerleri gösterilmektedir.



**Tablo 6.** Önerilen GA-DÇ-UÖM yönteminin duyarlılık ve özgüllük değerleri

Method	Sınıflandırma Başarımı (%)
Doğruluk Analizi	97.96
Duyarlılık Analizi	98.88
Ortalama	98.42

ROC eğrileri ve AUC değerleri TP, TN, FP ve FN değerleri kullanılarak bulunur. Bu uygulamanın ROC eğrisi şekil 3'te gösterilmektedir. ROC eğrilerinin AUC değeri, kronik böbrek hastalığı verileri için GA-DÇ-UÖM kullanılarak 0,984 olarak hesaplanmaktadır.

**Şekil 3.** GA-DÇ-UÖM'nin ROC eğrisi

Kronik böbrek hastalığı teşhisi için önerilen GA-DÇ-UÖM yönteminin eğitim ve test süresi Tablo 7'de gösterilmektedir.

**Tablo 7.** GA-DÇ-UÖM yönteminin eğitim ve test süresi

	Zaman (s)	
	Eğitim	Test
GA-DÇ-UÖM	0.0164	0.0141

## 7. Tartışma

Bu çalışmada, kronik böbrek hastalığı teşhisi için GA-DÇ-UÖM 'ye dayalı akıllı bir teşhis sistemi geliştirilmiştir. Önerilen yöntem, özellik vektörünü doğrudan kullanma yeteneği, hızlı eğitim-test süresi ve geleneksel sinir ağları üzerinde genelleme gibi birçok avantaja sahiptir. Kronik böbrek hastalığı veritabanındaki 400X24 boyutundaki özellik vektörü, DÇ-UÖM sınıflandırıcısına girdi olarak verilir. DÇ-UÖM 'nin yapısında, dalgacık çekirdeğinin ayarlanabilir üç parametresi vardır. Bu parametreler UÖM'nin dalgacık çekirdeğinin k, l, m parametreleri ve gizili katman nöron sayısı UÖM'nin performansında önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle bu parametreler ve gizili katman nöron sayısı değerleri dikkatli seçilmelidir. Bu çalışmada, DÇ-UÖM'nin k, l, m değerleri ve gizili katman nöron sayısı parametrelerinin optimum değerleri GA kullanılarak elde edilmiştir. GA kullanılarak elde edilen optimum değerler, DÇ-UÖM sınıflandırıcısının yapısında kullanılmıştır. GA-DÇ-UÖM tabanlı kronik böbrek hastalığı teşhis sistemi %98.42'lik sınıflandırma performansına sahiptir. Önerilen yöntem yardımıyla doktorlar hastalıkla ilgili nihai bir karar verebilirler. Bu noktada doktorlar, kronik böbrek hastalığı teşhisi konusunda daha doğru bir karar vermek için önerilen yöntemi kullanabilirler.

## Kaynaklar

- [1] Levey, A. S., Eckardt, K. U., Tsukamoto, Y., Levin, A., Coresh, J., Rossert, J., ... & Eknoyan, G. (2005). Definition and classification of chronic kidney disease: a position statement from Kidney Disease: Improving Global Outcomes (KDIGO). *Kidney international*, 67(6), 2089-2100.
- [2] Türkiye'de, Nefroloji-Diyaliz ve Transplantasyon. Registry 2009 İstanbul: Türk Nefroloji Derneği 2010.

- [3] Süleymanlar, G., Utaş, C., Arinsoy, T., Ateş, K., Altun, B., Altıparmak, M. R., ... & Serdengeçti, K. (2010). A population-based survey of Chronic REnal Disease In Turkey—the CREDIT study. *Nephrology Dialysis Transplantation*, 26(6), 1862-1871.
- [4] Tanrıverdi, M. H. (2010). Kronik böbrek yetmezliği. *Konuralp tıp dergisi*, 2010(2), 27-32.
- [5] İLKUÇAR, M. (2015). Kronik Böbrek Hastalarının Yapay Sinir Ağı ve Radyal Temelli Fonksiyon Ağı ile Teşhisi. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(2), 82-88.
- [6] Eroğlu, K., & Palabaş, T. (2016, December). The impact on the classification performance of the combined use of different classification methods and different ensemble algorithms in chronic kidney disease detection. In *2016 National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering (ELECO)* (pp. 512-516). IEEE.
- [7] Alm Mustafa, K. M. (2021). Prediction of chronic kidney disease using different classification algorithms. *Informatics in Medicine Unlocked*, 100631.
- [8] İlkuçar M. Kronik Böbrek Hastalarının Yapay Sinir Ağı ve Radyal Temelli Fonksiyon Ağı ile Teşhisi. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2015; 6.2: 82-88.
- [9] Polat H, Mehr H, Cetin A. Diagnosis of Chronic Kidney Disease Based on Support Vector Machine by Feature Selection Methods, *Journal of Medical Systems* 2017; 41.4: 55.
- [10] Kumar M. Prediction of Chronic Kidney Disease Using Random Forest Machine Learning Algorithm Running Title: Prediction of Chronic Kidney Disease, *International Journal of Computer Science and Mobile Computing* 2016; 52522: 24-33.1
- [11] Kılıçarslan S, Çelik M. (2019). Rotasyon orman sınıflandırma algoritması kullanarak kronik böbrek rahatsızlığının tahmini.
- [12] Baby P, Vital P. Statistical Analysis and Predicting Kidney Diseases using Machine Learning Algorithms, *International Journal of Engineering Research & Technology* 2015; 407: 206-210.
- [13] Gunarathne, W. H. S. D., Perera, K. D. M., & Kahandawaarachchi, K. A. D. C. P. (2017, October). Performance Evaluation on Machine Learning Classification Techniques for Disease Classification and Forecasting through Data Analytics for Chronic Kidney Disease (CKD). In *Bioinformatics and Bioengineering (BIBE), 2017 IEEE 17th International Conference on* (pp. 291-296). IEEE.
- [14] Charleonnann, A., Fufaung, T., Niyomwong, T., Chokchueypattanakit, W., Suwannawach, S., & Ninchawee, N. (2016, October). Predictive analytics for chronic kidney disease using machine learning techniques. In *Management and Innovation Technology International Conference (MITicon), 2016*(pp. MIT-80). IEEE.
- [15] Sharma, S., Sharma, V., & Sharma, A. (2016). Performance Based Evaluation of Various Machine Learning Classification Techniques for Chronic Kidney Disease Diagnosis. arXiv preprint arXiv:1606.09581
- [16] Yıldırım, P. (2017, July). Chronic Kidney Disease Prediction on Imbalanced Data by Multilayer Perceptron: Chronic Kidney Disease Prediction. In *Computer Software and Applications Conference (COMPSAC), 2017 IEEE 41st Annual* (Vol. 2, pp. 193-198). IEEE.
- [17] Ahmad, M., Tundjungsari, V., Widiyanti, D., Amalia, P., & Rachmawati, U. A. (2017, November). Diagnostic decision support system of chronic kidney disease using support vector machine. In *Informatics and Computing (ICIC), 2017 Second International Conference on* (pp. 1-4) IEEE.
- [18] Sinha, P., & Sinha, P. (2015). Comparative study of chronic kidney disease prediction using KNN and SVM. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 4(12), 608-12.
- [19] MAT, A. N., & Onur, İ. N. A. N. (2020). Tiroid Ve Kronik Böbrek Hastalığı Verilerinin Sınıflandırılmasında Genetik Algoritmalar Ve Pca İle Hibrit Özellik Seçimi. *Selçuk-Teknik Dergisi*, 19(3), 137-155.
- [20] Chronic Kidney Disease Detection by Analyzing Medical Datasets in Weka. *International Journal of Computer Application*, 6(4), 20-26.
- [21] Vijayarani, S., Dhayanand, S., & Phil, M. (2015). Kidney disease prediction using SVM and ANN algorithms. *International Journal of Computing and Business Research (IJCBR)*, 6(2), 1-12.
- [22] Baby, P. S., & Vital, T. P. (2015). Statistical analysis and predicting kidney diseases using machine learning algorithms. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 4(7), 206-210.
- [23] Saurabh, N., & Nargis, T. (2019). Chronic Disease Prediction Using Effective Feature Selection. *Int J Recent Technol Eng*, 8(2).
- [24] Shanthakumari, A. S., & Jayakarthish, R. (2021). Utilizing support vector machines for predictive analytics in chronic kidney diseases. *Materials Today: Proceedings*.
- [25] Huang, G. B., Ding, X., & Zhou, H. (2010). Optimization method based extreme learning machine for classification. *Neurocomputing*, 74(1-3), 155-163.
- [26] Zhu, Q. Y., Qin, A. K., Suganthan, P. N., & Huang, G. B. (2005). Evolutionary extreme learning machine. *Pattern recognition*, 38(10), 1759-1763
- [27] Huang, G. B., Zhu, Q. Y., & Siew, C. K. (2006). Extreme learning machine: theory and applications. *Neurocomputing*, 70(1-3), 489-501.
- [28] Suresh, S., Saraswathi, S., & Sundararajan, N. (2010). Performance enhancement of extreme learning machine for multi-category sparse data classification problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23(7), 1149-1157.
- [29] Li, B., Rong, X., & Li, Y. (2014). An improved kernel based extreme learning machine for robot execution failures. *The Scientific World Journal*, 2014.

- [30] Min, M., Chen, X., Lei, Y., Chen, Z., & Xie, Y. (2020). A Novel Kernel-based Extreme Learning Machine with Incremental Hidden Layer Nodes. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 11836-11841.
- [31] Jahromi, A. N., Hashemi, S., Dehghantanha, A., Choo, K. K. R., Karimipour, H., Newton, D. E., & Parizi, R. M. (2020). An improved two-hidden-layer extreme learning machine for malware hunting. *Computers & Security*, 89, 101655.
- [32] Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine learning*, 20(3), 273-297.
- [33] Ding, S., Zhang, J., Xu, X., & Zhang, Y. (2016). A wavelet extreme learning machine. *Neural Computing and Applications*, 27(4), 1033-1040.
- [34] K.,Kayaer, & T. Yıldırım, (2003). Medical diagnosis on pima indian diabetes using general regression neural networks, artificial neural networks and neural information processing (ICANN/ICONIP) (pp. 181–184), Istanbul, Turkey, June 26–29.
- [35] Ertam, F., & Avcı, E. (2017). A new approach for internet traffic classification: GA-WK-ELM. *Measurement*, 95, 135-142.
- [36] Huang, G. B., & Chen, L. (2008). Enhanced random search based incremental extreme learning machine. *Neurocomputing*, 71(16-18), 3460-3468.

## Küresel Optimizasyon için Gauss Kaotik Haritası ile Kartal Optimizasyonu

Salih Berkan AYDEMİR<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Amasya Üniversitesi, Amasya, Türkiye  
\*<sup>1</sup> salih.aydemir@amasya.edu.tr

(Geliş/Received: 09/07/2021;

Kabul/Accepted: 05/10/2021)

**Öz:** Bu çalışmada, Gauss kaotik haritası, kartal (Aquila) optimizasyon algoritmasındaki rastgele değişkenlerin yerine kullanılmaktadır. Kaotik haritaların tekrar edilemezlik özelliği ile küresel optimum noktaya yakınsama durumu incelenir. Gauss kaotik haritası, çözüm uzayının farklı noktalarını ele alıp, algoritmanın yerel optimum noktada takılmasını önler. Önerilen kaotik kartal optimizasyonu 13 kalite test fonksiyonu üzerinde test edilir. 13 test fonksiyonu içerisinde, 12 test fonksiyonunda yeni Gauss tabanlı kaotik kartal optimizasyonunun klasik kartal optimizasyonuna göre daha iyi yakınsama gösterdiği görülür. Ek olarak önerilen kaotik tabanlı kartal optimizasyonu ile üç test fonksiyonunda, küresel minimum noktaya yakınsar. Önerilen algoritma ve klasik algoritmanın yakınsama eğrileri, grafikler halinde özetlenir. Ayrıca önerilen kaotik tabanlı yöntem yapay arı kolonisi algoritması, diferansiyel evrim algoritması ve parçacık sürü optimizasyon algoritması ile karşılaştırılır. Deney sonuçları ise Gauss kaotik haritası tabanlı kartal algoritmasının diğer yöntemlerden daha erken iterasyonlarda yakınsadığı görülür.

**Anahtar kelimeler:** Meta-sezgisel Algoritmalar, Kalite Test Fonksiyonları, Optimizasyon, Kaotik Haritalar, Kaos Teori.

### Aquila Optimization with Gaussian Chaotic Map for Global Optimization

**Abstract:** In this study, the Gaussian chaotic map is replaced with random variables in the eagle (Aquila) optimization algorithm. The non-repeatability of chaotic maps and the convergence to the global optimum point are examined. The Gaussian chaotic map handles different points of the solution space and prevents the algorithm from getting stuck at the local optimum. The proposed chaotic eagle optimization is tested on 13 quality test functions. Among the 13 test functions, it is seen that the new Gaussian-based chaotic eagle optimization in 12 test functions converges better than the classical eagle optimization. In addition, with the proposed chaotic-based eagle optimization, it converges to the global minimum in the three test functions. The proposed algorithm and the convergence curves of the classical algorithm are summarized in graphs. In addition, the proposed chaotic-based method is compared with artificial bee colony algorithm, differential evolution algorithm and particle swarm optimization algorithm. The experimental results show that the eagle algorithm based on the Gaussian chaotic map converges in earlier iterations than the other methods.

**Key words:** Meta-heuristic Algorithms, Benchmark Functions, Optimization, Chaotic Maps, Chaos Theory.

### 1. Giriş

Son yıllarda, doğadan esinlenerek önerilen birçok optimizasyon algoritması bulunmaktadır. Bu tip algoritmalar meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları (MOA) adı verilir [1]. Canlıların, besine yaklaşma, besin arama ve en uygun besin için yer değiştirme stratejileri meta-sezgisel algoritmaların temelini oluşturur. Amaç, bir çözüm uzayı içerisinde en ideal çözüm kümesine ulaşabilmektir.

MOA'lar, türev tabanlı optimizasyon algoritmalarının aksine, türev bilgisi gereksiz yakınsama yapılar [1]. Metasezgisel algoritmaların en önemli özelliklerinde biri de yerel optimum noktaya takılmadan, küresel minimum noktaya yakınsama davranışı içinde olmalarıdır [2]. Diğer yandan MOA'lar kısıtlı ve kısıtsız olmak üzere, günlük hayattaki birçok gerçek dünya problemine de uygulanabilirler. Kısıtlı olan problemlerde, ilgili kısıtlar göz önüne alınarak amaç fonksiyonunun optimum değerine yakınsaması test edilmektedir [3]. Kısıtsız olan MOA problemlerinde ise amaç sadece amaç fonksiyonunun optimum değerine yakınsamasını test etmektir [4]. Kimya mühendisliğinde proses tasarımı ve sentez problemleri, karışık tamsayı doğrusal olmayan kısıtlı optimizasyon problemi olarak tanımlanabilir [5]. Kaynaklı kiriş tasarımı yapılabilmektedir. Kaynaklı kiriş tasarım probleminin temel amacı, kaynaklı kiriş minimum maliyetle tasarlamaktır. Bu problem beş kısıtlama içerir ve kaynaklı bir kiriş geliştirmek için dört değişken kullanılır [6]. Ayrıca MOA'lar medical görüntü işleme ve tip alanda da sıkça kullanılmaktadır [7-9].

\* Sorumlu yazar: [salih.aydemir@amasya.edu.tr](mailto:salih.aydemir@amasya.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0003-0069-3479

MOA, iki temel safhadan oluşurlar. Bunlar sömürü ve keşif safhalarıdır [10]. Keşif ve sömürü safhası, çözüm uzayı içerisinde rastgele değerler ele alınarak belirlenir. Dolayısıyla bütün çözüm uzayının keşfedilmesi sağlanır. Keşif safhasında en kaliteli besin keşfedilip, sömürü safhasında ise keşfedilen besinin sömürülmesi söz konusudur. Sömürü ve keşif safhaları arasındaki denge, küresel optimuma ulaşmak için çok önemlidir [10]. Eğer keşif aşaması ön planda olursa, en uygun besin keşfedilmiş ancak sömürülemediği olur. Diğer yandan sömürü aşaması ön planda olursa, küresel optimum keşfedilmediği için yerel optimum sömürülebilir. Bu iki safhanın sonucunda küresel optimum noktaya ulaşılması hedeflenmektedir. Bir optimizasyon algoritmasında en büyük problemlerden biri de algoritmanın yerel optimum noktaya takılıp kalmasıdır. Böylece algoritma küresel optimum noktaya yakınsayamayacak ve ideal çözüm vektörü de yerel optimum değer için hesaplanacaktır. MOA’da sömürü ve keşif safhalarında rastgele parametrelerin kullanılması problemin yerel minimum noktada takılmasını çözebilmektedir. Bu kapsamda MOA, dört ana başlık altında incelenebilir: Sürü tabanlı, fizik ve matematiksel tabanlı, insan temelli ve evrimsel algoritmalar. Sürü tabanlı algoritmaların temel özellikleri kendi kendilerine örgütlenmeleri ve iş bölümü yapmalarıdır. Bir sistemin bileşenlerini dönüştürme yeteneği olarak herhangi bir dış yardım olmaksızın uygun bir forma dönüştürürler [11]. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) [12], Karga Arama Algoritması (KAA) [13], Yusufçuk Böceği Algoritması (YBA) [14], Yapay Arı Kolonisi algoritması (YAK)[15], Guguk Kuşu Algoritması (GKA)[16], Balina Optimizasyon Algoritması (BOA) [17] ve Gri Kurt Optimizasyon (GKO) [18], Harris Şahinleri Algoritması (HŞA) [19], Kartal (Aquila) Optimizasyon Algoritması (KOA) [20] sürü tabanlı bazı optimizasyon algoritmalarının örnekleridir. Fizik ve matematiksel problemlere dayalı optimizasyon algoritmaları ise matematiksel denklemler ve fiziksel bazı kurallar hesaba katılarak oluşturulmuştur. Çoklu Evren Algoritması (ÇEA) [21], Yüklü Sistem Araması (YSA) [22], Yerçekimsel Arama Algoritması (YAO) [23] fiziksel tabanlı optimizasyon algoritmalarına örnek olarak gösterilebilir. Diğer yandan, bazı matematiksel denklemler ve bu denklemlerin modellenmesi ile oluşturulan optimizasyon yöntemlerine, Sin-Cos Algoritması (SCA) [24] ve Aritmetik Optimizasyon [25] algoritmaları örnek olarak gösterilebilir. Doğada biyolojik evrimin süreci boyunca çeşitli, evrimsel optimizasyon algoritmaları önerilmiştir. Genetik Algoritmalar (GA) [26], Evrim Stratejisi (ES) [27] ve Diferansiyel Evrim (DE) [28] bu algoritmalar içerisinde yer almaktadır. İnsan temelli optimizasyon algoritmaları, insan davranışı ve işbirliğinden esinlenerek önerilen yöntemlerdir. Emperyalist Rekabetçi Algoritma (ERA) [29], Öğrenmeye Dayalı Öğretim algoritması (ÖDÖA) [30] ve politik optimizasyonu (PO) [31] gibi algoritmalar, insan temelli optimizasyon algoritmalarına örnektir.

Günümüze kadar bir çok optimizasyon algoritması önerilmiş ve hala daha önerilmeye de devam etmektedir. Bunun sebebi bir her optimizasyon problemi için küresel optimum noktayı garanti eden bir yöntemin olmamasıdır. Bu durum ise No Free-Lunch (NFL) teoriye göre ispatlanmıştır [32]. NFL’ye göre önerilen bazı yöntemler daha hızlı çalışabilir veya belli kalite test fonksiyonlarında daha iyi yakınsama gösterebilirler. Ancak tek bir optimizasyon yöntemi hiçbir zaman bütün problemleri çözememektedir. Bu nedenle erken iterasyonda optimum noktaya yakınsama, yerel optimuma takılmama, MOA’da rastgeleliğin ele alınması gibi özellikler literatürde önerilen optimizasyon algoritmalarını birbirinden ayırmaktadır.

Bu çalışmada KOA’da rastgele parametreler Gauss/Mouse kaotik harita ile düzenlenir. Kaotik haritaların tekrar edilemezlik ve ergodik yapıları [33] sayesinde önerilen Gauss kartal optimizasyon algoritması (GKOA), KOA’dan daha iyi yakınsamaya sahip olduğu kalite test fonksiyonlarıyla gösterilmiştir. GKOA’nın, KOA’ya göre üstün olan tarafları aşağıda listelenmiştir.

- Gauss/Mouse kaotik haritası, KOA’nın yapısında yer alan rastgele sayılar ile değiştirildiğinden çözüm uzayındaki farklı noktalara atlanabilir.
- Gauss/Mouse kaotik haritasının tekrar edilemezlik özelliği ile geniş bir çözüm uzayı sunar.
- GKOA, küresel optimuma yakınsamada, bir çok kalite test fonksiyonuna göre KOA’dan daha iyi yakınsama kabiliyetine sahiptir.

## 2. İlgili Çalışmalar

Günümüze kadar bir çok optimizasyon algoritması kaotik haritalar ile birlikte kullanılmıştır. Özellikle kaotik haritaların rastgele değerlerin yerine kullanılması, optimizasyon algoritmalarının geliştirilmesinde sıkça kullanılmaktadır. Bu bölümde, literatürde yer alan, kaotik haritaların diğer optimizasyon yöntemleriyle kullandığı çalışmalar bahsedilir. Kaur ve Arora’nın yaptığı çalışmada, BOA kaotik haritalar ile birleştirilmiş ve 20 farklı kalite test fonksiyonu üzerinde test edilmiştir [34]. Bütün rastgele değerler farklı kombinasyonlarda ele alındığında, 10 farklı senaryoya göre rastgele değerler, kaotik haritalar ile değiştirilmiştir. Wilcoxon’s rank-sum test sonuçlarına göre de BOA ve kaotik BOA karşılaştırılmıştır. Önerilen kaotik BOA’nın, BOA’ya göre daha erken iterasyonda yakınsadığı görülmüştür. Diğer bir çalışmada altın bölgesi arama algoritması (ABA) [35] kaotik haritalar ile birlikte kullanılmıştır [36]. Önerilen kaotik ABA algoritması benzer şekilde 20 farklı kalite test

fonksiyonu test edilmiş ve literatürdeki diğer bazı algoritmalar ile karşılaştırılmıştır. Kohli ve Arora, sınırlandırılmış optimizasyon problemleri için kaotik GKO önermişlerdir [37]. Kaotik GKO'de 10 farklı kaotik harita ve 13 kalite test fonksiyonu kullanılmıştır. Kaotik GKO'nun klasik GKO'ya göre daha hızlı yakınsadığı görülmüştür. Diğer bir çalışmada, SCA 5 farklı kaotik harita ile 10 kalite test fonksiyonu üzerinde test edilmiştir [38]. Wilcoxon's rank-sum test sonuçlarına göre SCA ve kaotik SCA'nın arasındaki farklılık incelenmiştir [42]. Kuşların sürü hareketlerinde esinlenerek önerilen kuş sürüsü algoritmasında rastgele değerlerin kontrolü için kaotik haritalar kullanılmıştır. Ayrıca bütün rastgele değerler kaotik haritalar ile yer değiştirilmiş ve çalışmada 8 farklı kombinasyon oluşturulmuştur. Önerilen kaotik yöntem mühendislik problemleri üzerinde test edilmiştir [39].

Literatürdeki optimizasyon algoritmaları ile önerilen bütün kaotik yapılar, klasik optimizasyon yöntemlerine göre geniş bir çözüm uzayının taranmasını sağlar ve bu sayede yerel optimuma takılmadan, küresel optimuma yakınsama ihtimalini artırır. Dolayısıyla önerilen kaotik tabanlı optimizasyon algoritmaları, klasik yöntemlerine göre daha iyi yakınsama kabiliyetine sahiptir. Yukarıda bahsedilen bütün çalışmalar göz önüne alındığında, kaotik haritaların optimizasyon yöntemleri üzerinde uygulanabilen etkili bir strateji olduğu söylenebilir. Bu çalışmada ise yakın zamanda önerilen KOA, Gauss kaotik haritası ile birlikte kullanılmıştır.

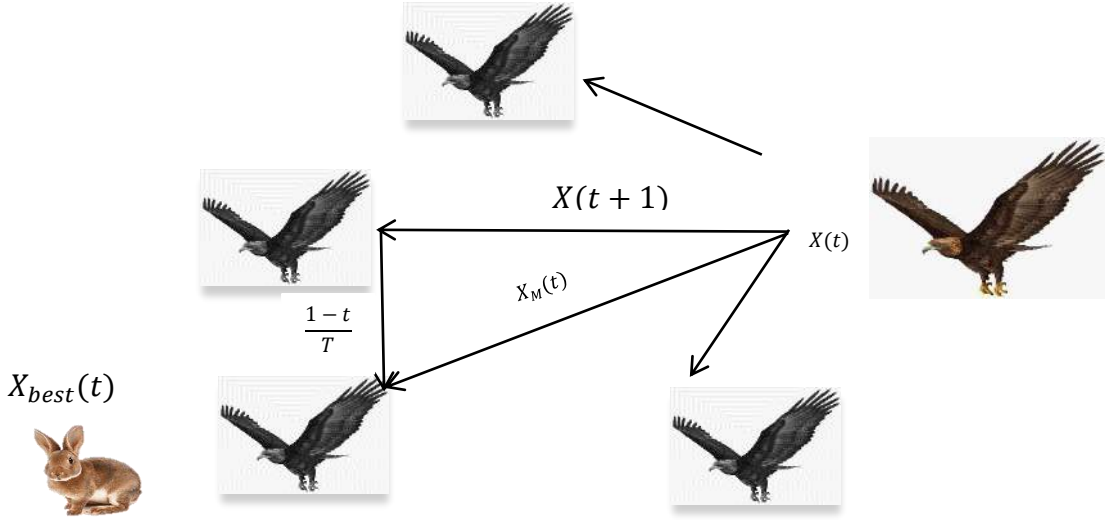
### 3. Kartal Optimizasyon Algoritması

Kuzey Yarımküre'de Aquila, en popüler yırtıcı kuşlardan biridir. Aquila tipik olarak koyu kahverengidir ve boynunun arkasında daha açık altın-kahverengi tüyleri bulunur. Bu grubun genç Aquila'sı çoğunlukla kuyruksız beyaz renge sahiptir ve genellikle kanatlarında küçük beyaz lekeler vardır. Aquila, sağlam ayakları ve büyük, keskin pençeleriyle birleşen hızını ve çevikliğini, başta tavşanlar olmak üzere dağ sıncapları gibi çeşitli avları yakalamak için kullanır [40]. Aquila, alanı 200 km<sup>2</sup>'ye kadar çıkabilen bölgeleri korur. Yuvalarını dağlarda veya diğer yüksek kesimli yerlerde oluştururlar. Esas olarak, Aquila'nın dört farklı avlanma yöntemi kullanıldığı kabul edilmektedir ve çoğu Aquila'nın avlanma yöntemleri arasında akıllıca ve hızlı bir şekilde değişiklik yapma yeteneğine sahiptir. Aquila'nın avlanma yöntemleri şu şekildedir[20]. İlk yöntem olan dikey eğimli yüksek uçuş, Aquila'nın yerden yüksek bir seviyeye yükseldiği uçuş sırasında kuşları avlamak için kullanılır. Avını keşfettikten sonra Aquila, yaklaştıkça hızla yükselen uzun, düşük açılı bir süzölmeye girer [41]. İkinci yöntem olan yerden düşük bir seviyede yükselerek kısa süzölme saldırısı ile kontur uçuşu, Aquila tarafından en çok kullanılan yöntem olarak kabul edilmektedir [42]. Üçüncü yöntem, yavaş bir alçalma saldırısı ile alçak bir uçuştür. Bu durumda Aquila yere iner ve bir sonraki saldırıda aşamalı olarak avına saldırır [43]. Dördüncü yöntem, Aquila'nın karada yürüdüğü ve avını çekmeye çalıştığı avı yakalamaktır [44].

Keşif ve sömürü aşamaları bir metasezgisel algoritmada iki ana unsurdur. Keşif safhasında en kaliteli besin keşfedilmektedir. Sömürü safhasında ise keşfedilen besinin en uygun şekilde sömürülmesi söz konusudur. Diğer bir deyişle, keşif aşaması, çözüm uzayını olabildiğince geniş, rastgele ve küresel olarak arama sürecini ifade eder. Sömürü aşaması, algoritmanın keşif aşamasıyla elde edilen alanda daha doğru arama yapma yetkinliğini ifade eder ve kesinlik arttıkça rastgeleliği azalır.

Aquila'nın avını yakalama stratejileri göz önüne alınarak zekice ve hızlı bir şekilde avına yaklaşması, optimizasyonun ana konusunu oluşturmaktadır. KOA,  $t \leq \left(\frac{2}{3}\right) * T$  koşuluna göre keşif aşamasından sömürü aşamasına geçmektedir. Eğer  $t \leq \left(\frac{2}{3}\right) * T$  ise keşif aşaması aktiftir. Aksi durumda keşif aşaması aktiftir. Burada  $t$  o anki iterasyon sayısıdır.  $T$  ise maximum iterasyon sayısıdır. KOA'nın Aquila'dan esinlenerek matematiksel modellere dönüştürülmesi aşağıda adım adım anlatılmıştır.

**Adım 1 Genişletilmiş keşif yeteneği (X<sub>1</sub>):** Aquila, hem av bölgesini tanır hem de dikey eğim ile yüksek uçarak en iyi avlanma alanını seçer. KAO, avın bulunduğu arama alanının alanını belirlemek için yüksekten uçarak geniş çapta keşifler yapar. Aquila'nın davranışı matematiksel olarak aşağıdaki gibi modellenenir.



Şekil 1. Aquila'nın süzülerek avına yaklaşma davranışı

Şekil-1'de verilen Aquila'nın davranışı matematiksel olarak aşağıdaki gibi modellenebilir.

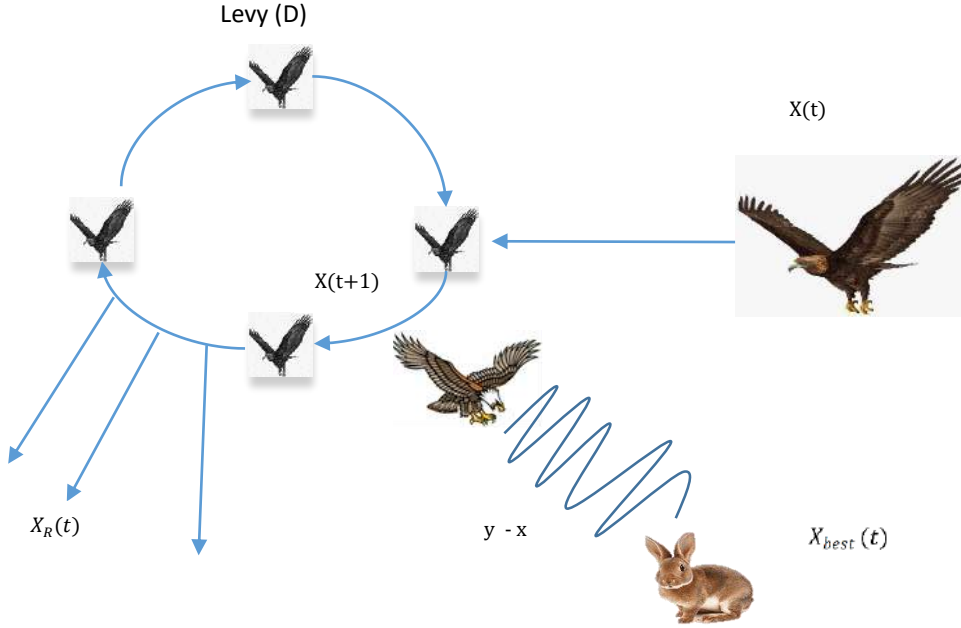
$$X_1(t+1) = X_{best}(t) \times \left(\frac{1-t}{T}\right) + (X_M(t) - X_{best}(t) \times rand) \quad (1)$$

Burada  $X_1(t+1)$ ,  $t$ 'nin bir sonraki iterasyonunun çözümüdür.  $X_1$  ilk aday çözümdür.  $X_{best}(t)$ ,  $t$ 'ninci iterasyona kadar elde edilen en iyi çözümdür.  $\left(\frac{1-t}{T}\right)$ , iterasyon sayısı aracılığıyla geniş bir keşif kontrolü sağlar.  $X_M(t)$ ,  $t$ 'ninci iterasyonda mevcut çözümlerin ortalama değerini ifade eder.  $rand$  ise 0 ve 1 arasında rastgele bir sayı üretir.

$$X_M(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i(t), \text{ Her } j=1,2,\dots, \text{Boy}. \quad (2)$$

Burada  $Boy$ , problemin boyutunu,  $N$  ise aday çözümlerin sayısı temsil eder.

**Adım 2 Daraltılmış keşif yeteneği ( $X_2$ ):** Yüksek uçuş ile av bölgesi bulunduğu anda, Aquila hedef avın üstünde çember çizer, hedefe inmeye hazırlanır ve ardından avına saldırır. Bu metot kısa kayma saldırısı ile kontur uçuşu olarak adlandırılır.



Şekil 2. Aquila'nın kısa kayma saldırısı ile kontur uçuşu

Şekil-2'ün matematiksel modeli denklem-3 ile gösterilmiştir.

$$X_2(t + 1) = X_{best}(t) \times Levy(D) + X_R(t) + (y - x) \times rand \quad (3)$$

Burada  $X_2(t + 1)$ ,  $t$ 'nin bir sonraki iterasyonunun çözümü ve  $X_2$ , ikinci arama metodu olarak ifade edilir.  $D$  uzayın boyutu ve  $Levy(D)$  levy flight dağılım fonksiyonu olarak adlandırılır ve denklem-4 ile gösterilir.  $X_R(t)$ ,  $t$ 'ninci iterasyonda  $[1 N]$  aralığındaki rastgele değerdir.

$$Levy(D) = s \times \frac{u \times \sigma}{|v|^{\frac{1}{\beta}}} \quad (4)$$

Burada  $s$  değeri 0.01 olarak sabit alınır.  $u$  ve  $v$ , 0 ve 1 arasındaki rastgele sayılardır.  $\sigma$  ise denklem 5 ile hesaplanır.

$$\left( \frac{\Gamma(1 + \beta) \times \sin\left(\frac{\pi\beta}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1 + \beta}{2}\right) \times \beta \times 2^{\frac{\beta-1}{2}}}\right) \quad (5)$$

$\beta$  sabit değeri genellikle 1.5 olarak kabul edilir.  $x$  ve  $y$  aramadaki spiral şekli temsil eder ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\begin{aligned} y &= r \times \cos(\theta) \text{ ve } x = r \times \sin(\theta), \\ r &= r_1 + U \times D_1 \text{ ve } \theta = -\omega \times D_1 + \theta_1, \theta_1 = \frac{3\pi}{2} \end{aligned} \quad (6)$$

$r_1$ , arama döngüsü sayısı 1 ile 20 arasındaki sabit bir sayıdır.  $U$ , 0.00565 sayısına sabitlenmiştir.  $D_1$ , 1 ile arama uzayının boyutu arasındaki bir tam sayıdır ve  $\omega$  sayısı 0.005'e sabitlenmiştir.

**Adım 3 Genişletilmiş sömürü yeteneği ( $X_3$ ):** Av alanı doğru bir şekilde belirlendiğinde ve Aquila iniş ve saldırı için hazır olduğunda, Aquila av reaksiyonunu keşfi için bir ön saldırı ile dikey olarak alçalır. Bu davranışa yavaş alçalma saldırısı ile alçak uçuş denir. Aquila'nın bu davranışı denklem 7 ile modellenir.

(7)



$$X_3(t + 1) = (X_{best}(t) - X_M(t)) \times \alpha - rand + ((UB-LB) \times rand + LB) \times \delta$$

Burada  $X_3(t + 1)$ ,  $t$ 'nin bir sonraki iterasyonunun çözümü ve  $X_3$ , üçüncü arama metodu olarak ifade edilir.  $rand$  değeri 0 ve 1 arasında rastgele bir değer üretir.  $\alpha$  ve  $\delta$ , sömürü ayarlama parametreleridir ve 0.1 değerine sabitlenmiştir. LB verilen problemin alt sınırı, UB ise verilen problemin üst sınırıdır.

**Adım 4 Daraltılmış sömürü yeteneği (X4):** Bu metotta, Aquila avına yaklaştığında, onun stokastik hareketlerine göre karada saldırır. Bu yöntemle yürüyüş ve av yakalama adı verilir. Bu davranışın matematiksel formu denklem 8'de verilmiştir.

$$X_4(t + 1) = QF \times X_{best}(t) - (G_1 \times X(t) \times rand) - G_2 \times Levy(D) + rand \times G_1 \quad (8)$$

Burada  $X_4(t + 1)$ ,  $t$ 'nin bir sonraki iterasyonunun çözümü ve  $X_4$ , dördüncü arama metodu olarak ifade edilir. QF, arama stratejilerini dengelemek için kullanılan bir kalite fonksiyonunu ifade eder. QF denklem 9 ile ifade edilir.  $G_1$ , kaçış sırasında avı izlemek için kullanılan Aquila çeşitli hareketlerini gösterir.  $G_2$ , 2'den 0'a azalan değerleri alır ve denklem 10 ile gösterilir.  $G_2$ , ilk konumdan son konuma kadar kaçış sırasında avı takip etmek için kullanılan Aquila'nın uçuş eğimini gösterir ve denklem 11 ile gösterilir.

$$QF(t) = t^{\frac{2 \times rand() - 1}{(1-T)^2}} \quad (9)$$

$$G_1 = 2 \times rand() - 1 \quad (10)$$

$$G_2 = 2 \times \left(1 - \frac{t}{T}\right) \quad (11)$$

QF(t),  $t$ 'ninci iterasyondaki kalite fonksiyonu olmak üzere,  $t$  ve  $T$  sırasıyla mevcut iterasyon ve en son iterasyon sayısıdır. KOA, Aquilaların avına yaklaşım tarzları ve avlanma stratejilerinden esinlenerek önerilen bir algoritma olduğundan sömürü ve keşif safhaları arasındaki denge, genişletilmiş ve daraltılmış olarak 2'ye ayrılmaktadır.

#### 4. Kaotik Kartal Optimizasyonu

Bu çalışmada, KOA içerisindeki rastgele değerler Gauss kaotik haritası ile değiştirilir. Kaotik haritaların kendine has tekrar edilemezlik özelliği bu yapıları optimizasyon algoritmalarında etkili bir şekilde kullanılabilir hale getirmiştir. Matematiksel olarak kaos, doğrusal olmayan ve dinamik sistemlere dayanan basit bir deterministik rastgeleliktir [45]. Kaotik haritalar genellikle dinamik ve doğrusal olmayan sistemlerin çalışmasında oluşur [46]. Optimizasyon algoritmalarında, rastgele değerlere bağlı olarak genellikle arama alanı içinde bir arama stratejisi uygulanır. Kaotik haritaların avantajı, rastgele değerler yerine kaotik değerlerin kullanılmasıdır. Kaotik haritalara dayalı optimizasyon algoritmalarında, kaosun tekrarlanmaması ve ergodikliği nedeniyle stokastik aramalardan daha genel arama stratejisi sergilerler [33]. Bu çalışmada Chebyshev, Circle, Gauss/Mouse, Iterative, Logistic, Piecewise, Sine, Singer, Sinusoidal ve Tent haritası olmak üzere 10 farklı kaotik harita kullanılmıştır. Ancak çalışmanın sadeliği ve kısalığı açısından sadece en iyi sonuç veren kaotik harita kullanılmıştır (Gauss/Mouse).

Kaosun doğası rastgele ve öngörülemez görünse de, aynı zamanda kendi içinde bir uyum içerir. Ayrıca, rastgelelik kaotik haritalarla ayarlandığı için yerel optimum tuzağından kaçınabilir. Bu çalışmada kullanılan kaotik harita denklem 12 ile ifade edilmektedir.

$$x_{k+1} = \begin{cases} 1, & x_k = 0 \\ \frac{1}{\text{mod}(x_k, 1)}, & d. d. \end{cases} \quad (12)$$

---

**ALGORİTMA 1: KAOTİK AQUİLA OPTİMİZASYONU**


---

**Başlangıç Aşaması:**

Popülasyonun başlangıç değerleri: X

KKO'nun başlangıç parametreleri:  $\alpha, \delta$ 

Rastgele değerlere Gauss kaotik haritası atanır.

**while**(iterasyon < max\_iterasyon) **do**

Amaç fonksiyonu hesapla

 $X_{best}(t)$  = Amaç fonksiyonuna (Fitness function) göre elde edilen en iyi çözümü belirle**for** (i=1,2,...,N)Şu an ki çözümün ortalama değerini  $X_M(t)$  güncellenir $G_1, G_2$  ve Levy(D) gibi parametreleri güncellenir**if**  $t \leq \frac{2}{3}T$  **then**

Gauss kaotik harita vektörü güncellenir.

**if**  $Gauss_{rand} \leq 0.5$  **then****Adım 1: Genişletilmiş keşif ( $X_1$ )**

Denklem 1 kullanılarak mevcut çözüm güncellenir.

**if**  $Fitness(X_1(t+1)) < Fitness(X(t))$  **then**X(t) = ( $X_1(t+1)$ )**if**  $Fitness(X_1(t+1)) < Fitness(X_{best}(t))$  **then** $X_{best}(t) = X_1(t+1)$ **end if****end if****else****Adım 2: Daraltılmış keşif ( $X_2$ )**

Denklem 3 kullanılarak mevcut çözüm güncellenir.

**if**  $Fitness(X_2(t+1)) < Fitness(X(t))$  **then**X(t) = ( $X_2(t+1)$ )**if**  $Fitness(X_2(t+1)) < Fitness(X_{best}(t))$  **then** $X_{best}(t) = X_2(t+1)$ **end if****end if****end if** // Kaotik haritanın sonu**else** // sömürü veya keşif seçimi**if**  $Gauss_{rand} \leq 0.5$  **then****Adım 1: Genişletilmiş sömürü ( $X_3$ )**

Denklem 7 kullanılarak mevcut çözüm güncellenir.

**if**  $Fitness(X_3(t+1)) < Fitness(X(t))$  **then**X(t) = ( $X_3(t+1)$ )**if**  $Fitness(X_3(t+1)) < Fitness(X_{best}(t))$  **then** $X_{best}(t) = X_3(t+1)$ **end if****end if****else****Adım 2: Daraltılmış sömürü ( $X_4$ )**

Denklem 8 kullanılarak mevcut çözüm güncellenir.

**if**  $Fitness(X_4(t+1)) < Fitness(X(t))$  **then**X(t) = ( $X_4(t+1)$ )**if**  $Fitness(X_4(t+1)) < Fitness(X_{best}(t))$  **then** $X_{best}(t) = X_4(t+1)$ **end if****end if****end if****end if****end for****end while****return en iyi çözüm ( $X_{best}$ )**


---

Denklem 12'de görüldüğü gibi eğer mevcut konum 0 ise bir sonraki konum 1'e sabitlenir. Denklem 12, algoritma -1'de görüldüğü gibi, lokal ve global aramayı birbirinden ayırmak için kullanılmıştır. Diğer durumlarda ise mod işlemi uygulanır. Kaotik haritaların özellikleri dikkate alındığında bu çalışmada önerilen kaotik tabanlı

optimizasyona kaotik kartal optimizasyonu adı verilir (KKO). Kaotik haritaların ergodik yapıları sayesinde, çözüm uzayı daha hızlı taranır ve bu durum erken iterasyonlarda yakınsamayı sağlar. Diğer yandan çözüm uzayı genişler ve bu durum da yerel optimum noktaya takılmadan küresel optimum noktaya yakınsama ihtimalini artırır. Önerilen KKO yöntemin algoritması, Algoritma-1’de verilmiştir.

## 5. Deneysel Sonuçları ve Analizler

Bu çalışmada KKO algoritması, tek modlu ve çok modlu olmak üzere 13 kalite test fonksiyonu için klasik KOA ile karşılaştırılmıştır. Algoritmalar 1000 iterasyonda, 50 farklı çalıştırmanın ortalamaları ile grafik haline getirilmiştir. Algoritmalar, R2020b matlab programı üzerinde ve i7-4700MQ CPU, 2.40GHz 8,00 GB RAM, 64 bit işletim sistemine sahip bilgisayar ile kodlanmıştır. Çalışmada kullanılan kalite test fonksiyonları Tablo-1’de verilmiştir.

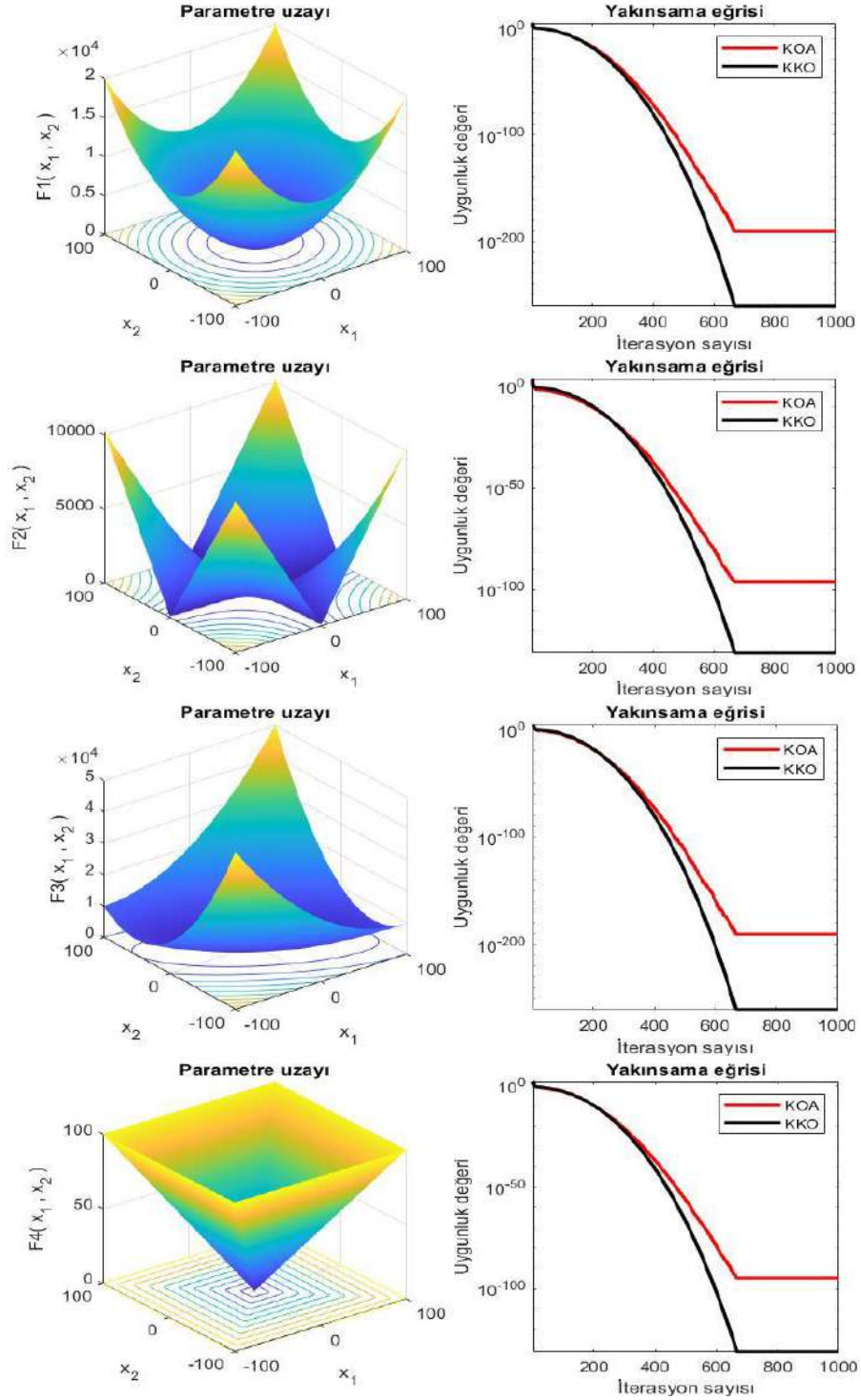
**Tablo 1.** Kalite test fonksiyonları

Fonk..	Matematiksel denklemi	Boyut	Aralık	$f_{min}$
F1	$f(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$	10	[-100, 100]	0
F2	$f(x) = \sum_{i=0}^n  x_i  + \prod_{i=0}^n  x_i $	10	[-10, 10]	0
F3	$f(x) = \sum_{i=1}^d (\sum_{j=1}^i x_j)^2$	10	[-100, 100]	0
F4	$f(x) = \max\{ x_i , 1 \leq i \leq n\}$	10	[-100, 100]	0
F5	$f(x) = \sum_{i=1}^{n-1} [100(x_i^2 - x_{i+1})^2 + (1 - x_i)^2]$	10	[-30, 30]	0
F6	$f(x) = \sum_{i=1}^n (x_i + 0.5)^2$	10	[-100, 100]	0
F7	$f(x) = \sum_{i=0}^n ix_i^4 + \text{random}[0,1]$	10	[-1.28, 1.28]	0
F8	$f(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10$	10	[-5.12, 5.12]	0
F9	$f(x) = -20 \exp\left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)\right) + 20 + e$	10	[-32, 32]	0
F10	$f(x) = 1 + \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right)$	10	[-600, 600]	0
F11	$f(x) = \frac{\pi}{n} 10 \sin(\pi y_1) + \sum_{i=1}^{n-1} (y_i - 1)^2 [1 + 10 \sin^2(\pi y_{i+1}) + \sum_{i=1}^n u(x_i, 10, 100, 4)]$		[-50, 50]	0
F12	$f(x) = 0.1 \left( \sin^2(3\pi x) + \sum_{i=1}^n (x_i - 1)^2 [1 + \sin^2(3\pi x_i + 1)] + (x_n - 1)^2 (1 + \sin^2(2\pi x_n)) \right) + \sum_{i=1}^n u(x_i, 5, 100, 4)$	10	[-50, 50]	0
F13	$f(x) = \sum_{i=1}^{11} \left[ a_i - \frac{x_1(b_i^2 + b_i x_2)}{b_i^2 + b_i x_3 + x_4} \right]^2$	4	[-5, 5]	0.0003

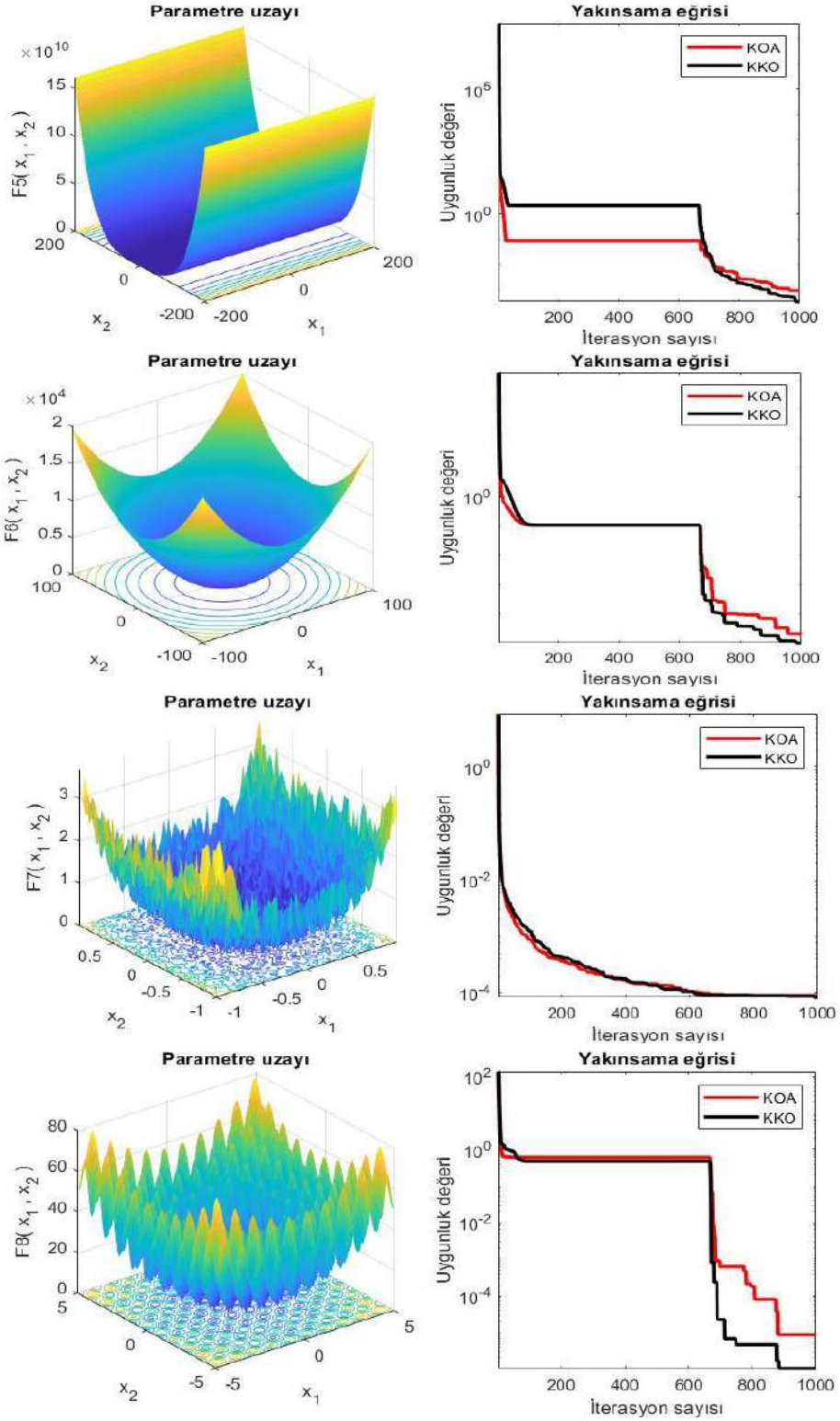
Tablo-1’de  $y_i = 1 + \frac{x_i+1}{4}$  ve  $u(x_i, a, k, m) = \begin{cases} K(x_i - a)^m & x_i > a \\ 0 & -a \leq x_i \leq a \\ K(-x_i - a)^m & -a \leq x_i \end{cases}$  olarak ifade edilir. Boyutlar ve

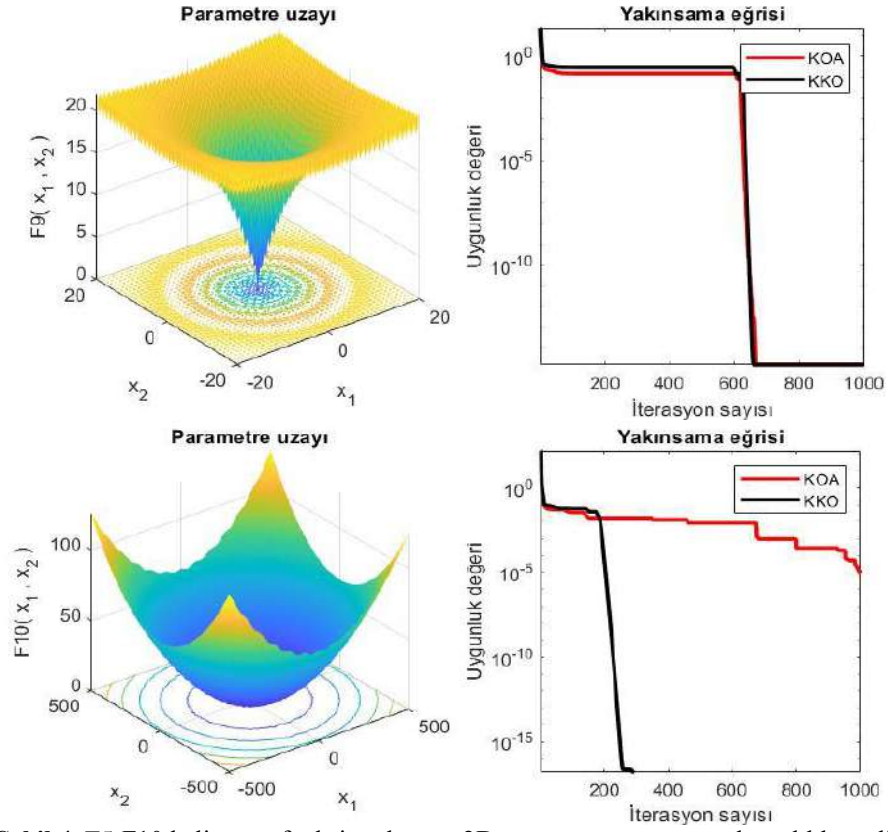
çözüm uzayı aralıkları, karşılaştırmada adillik olması açısından klasik KOA yöntemiyle aynı seçilmiştir [20]. Bu çalışmada önerilen yöntemi test etmek için hem tek modlu hem de çok modlu kalite test fonksiyonları kullanılmıştır. Tek modlu test fonksiyonları tek yerel minimum noktaya sahipken, çok modlu test fonksiyonları birden fazla yerel min. noktaya sahiptir. F1-F7 fonksiyonları tek modlu, F8-F13 fonksiyonları ise çok modlu kalite test fonksiyonlarıdır. Bütün test fonksiyonları için Şekil-1,2 ve 3’de 2D parametre uzayları ve yakınsaklık analizleri verilmektedir. 2D parametre uzayları netlik açısından farklı aralıklarda alınmıştır. KOA ve KKO yöntemleri için, 1000 iterasyon sonucunda uygunluk değeri (fitness function value) açısından yakınsaklık analizleri yorumlanabilir. Öncelikle Şekil-1 göz önüne alındığında, KOA ve KKO optimizasyon algoritmalarının benzer yakınsama gösterdikleri görülebilir. Ancak F1, F2, F3 ve F4 kalite test fonksiyonları için KKO’nun daha düşük uygunluk değerlerine yakınsadığı görülebilir. Şekil-2’de, F5-F10 fonksiyonlarının yakınsaklık analizleri verilmiştir (Sıralamalar soldan sağa F5-6-7-8-9-10 şeklindedir). F5 ve F6 incelenirse her iki yöntemde etkili yakınsama kabiliyetine sahip olduğu söylenebilir. Ancak 700. iterasyondan sonra KKO’nun yerel min. değerine daha yakın değere ulaştığı görülebilir. Diğer yandan, F7 ve F9’da, KOA ve KKO benzer sonuçlara sahiptir. Ancak

F8'de KKO'nın açık bir şekilde küresel min. değere daha yakın olduğu görülebilir. KKO, özellikle F10'da düşük iterasyon sayısında erken yakınsama özelliğine sahiptir.

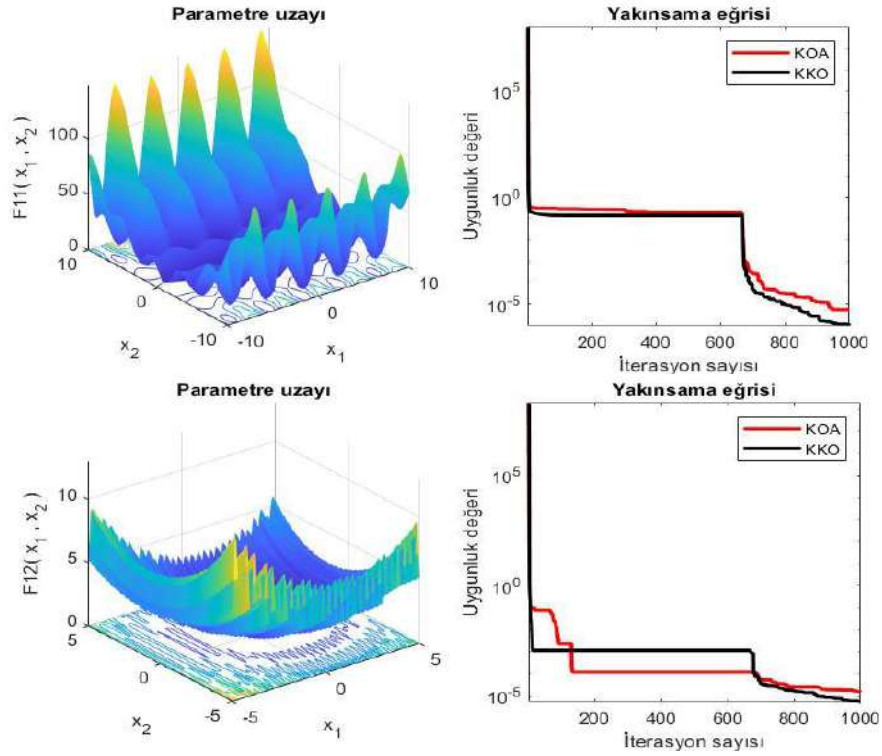


Şekil 3. F1-F4 kalite test fonksiyonlarının 2D parametre uzayı ve yakınsaklık analizleri

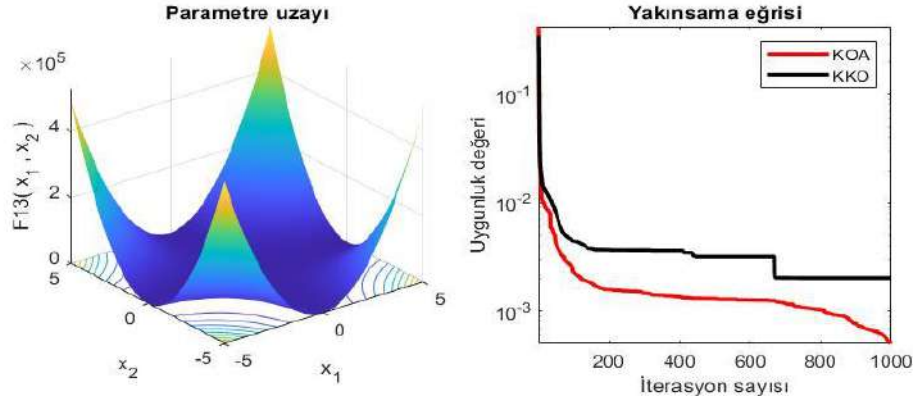




Şekil 4. F5-F10 kalite test fonksiyonlarının 2D parametre uzayı ve yakınsaklık analizleri







Şekil 5. F11- F13 kalite test fonksiyonunun 2D parametre uzayı ve yakınsaklık analizi

Son olarak, Şekil-3'de F11 ve F12 için KKO daha iyi sonuç verirken, F13'de klasik KOA yönteminin daha iyi sonuç verdiği görülebilir. Bütün kalite test fonksiyonları ele alınırsa, F9 ve F13 hariç, bütün test fonksiyonlarında önerilen KKO algoritması daha iyi sonuç vermektedir. Bir metasezgisel optimizasyon algoritmasında sömürü ve keşif arasındaki denge oldukça önemlidir. Bu çalışmada sömürü ve keşif arasındaki denge; rastgele sayılar yerine, Gauss/Mouse kaotik haritası ile kontrol edilmiştir. Kaotik yapıların tekrar edilmemezlilik ve ergodik özelliği Şekil 5'de görselleştirilmiştir. Dolayısıyla Gauss/Mouse kaotik haritası ile arama uzayının farklı noktalarının taranması sağlanmıştır.



Şekil 6. Ergodik (b) ve ergodik olmayan (a) sistemlerin davranışları [47]

Tablo 2. KOA ve KKO için kalite test fonksiyonlarının sonuçları

Opt. Alg.	KOA			KKO		
	Ortalama	En iyi	Standart Sapma	Ortalama	En iyi	Standart Sapma
F1	2.65E-198	6.11E-294	0.00E+000	<b>8.07E-262</b>	0.00E+000	0.00E+000
F2	6.15E-097	1.46E-147	4.23E-096	<b>7.62E-132</b>	3.40E-275	3.13E-131
F3	1.35E-190	6.45E-293	0.00E+000	<b>1.48E-261</b>	0.00E+000	0.00E+000
F4	1.63E-096	2.34E-150	1.14E-095	<b>4.77E-132</b>	4.89E-277	2.80E-131
F5	1.41E-003	1.40E-006	3.36E-003	<b>3.28E-004</b>	2.45E-008	7.23E-004
F6	4.78E-005	8.80E-008	1.08E-004	<b>1.48E-005</b>	7.82E-009	2.36E-005
F7	8.58E-005	1.81E-006	7.05E-005	<b>6.67E-005</b>	2.95E-006	8.19E-005
F8	1.45E-005	0.00E+000	9.85E-005	<b>5.01E-007</b>	0.00E+000	2.62E-006
F9	<b>9.59E-016</b>	8.88E-016	4.97E-016	1.74E-015	8.88E-016	1.51E-015
F10	6.38E-006	0.00E+000	4.47E-005	<b>0.00E+000</b>	0.00E+000	0.00E+000
F11	4.03E-006	1.63E-008	700E-006	<b>1.09E-006</b>	5.99E-010	1.82E-006
F12	8.81E-006	2.07E-007	1.04E-005	<b>5.31E-006</b>	2.06E-008	7.88E-006
F13	<b>4.64E-004</b>	3.19E-004	8.84E-005	1.50E-003	4.61E-004	4.07E-004

Tablo-2'de, KOA ve KKO yöntemlerinin, 1000 iterasyonda, 50 kez bağımsız çalıştırma sonucunda elde edilen ortalama, en iyi ve standart sapma değerleri verilmektedir. Çok küçük sayılarda ( $< 1.00E-150$ ) standart

sapma değerleri 0.00E+000 olarak yuvarlanmaktadır. Tablo-2’de F9 ve F13 fonksiyonları hariç diğer bütün durumlarda KKO algoritmasının daha iyi sonuç verdiği görülebilir. F9’da ise Şekil-2’den de yorumlanabildiği gibi KOA ve KKO birbirine çok yakın sonuçlar üretmektedir. Diğer yandan KOA’dan farklı olarak, KKO algoritması F1 ve F3’ün en iyi değerlerinde küresel minimum noktaya yakınsadığı görülmektedir.

### 5.1. İstatistiksel test

MOA’ların performansını değerlendirmek için istatistiksel testler yapılmalıdır [48-50]. Özellikle algoritmaları ortalama, standart sapma ve en iyi sonuçlara göre kıyaslama yeterli değildir [51]. Önerilen yeni bir algoritmanın klasik algoritmaya kıyasla önemli bir gelişme gösterdiğini kanıtlamak için istatistiksel bir test gereklidir. Algoritmaların sonuçlarının istatistiksel olarak anlamlı bir şekilde birbirinden farklı olup olmadığına karar vermek için birçok istatistiksel test kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise optimizasyon algoritmaları üzerine sıkça kullanılan Wilcoxon işaretli-sıralı test kullanılmıştır [52].

**Tablo 3.** KOA ve KKO için Wilcoxon işaretli-sıralı test sonuçları

Algoritmalar	KKO ve KOA karşılaştırılması	
	p değeri	Önem
Kalite test fonksiyonları		
F1	1.1300E-07	+
F2	4.4985E-04	+
F3	1.1155E-06	+
F4	6.9928E-08	+
F5	2.1900E-02	+
F6	2.0800E-02	+
F7	1.9700E-02	+
F8	4.6526E-04	+
F9	8.7500E-01	-
F10	1.6219E-04	+
F11	1.5200E-02	+
F12	2.9000E-03	+
F13	1.0872E-09	+
Toplam	12/1	

Wilcoxon işaretli-sıralı test %5 anlamlılık düzeyinde 50 kez bağımsız çalıştırmanın sonucunda, son iterasyondaki değerler dikkate alınarak hesaplanmıştır. Bu istatistiksel testte p değeri KOA ve KKO algoritmaları arasındaki önem değerini temsil eder. Eğer  $p < 0.05$  ise iki yöntem %95 ihtimal ve %5 anlamlılık düzeyinde birbirinden farklıdır denilebilir. Aksi takdirde,  $p > 0.05$  ise karşılaştırılan iki yöntem arasında, istatistiksel olarak önemli bir ölçüde fark olmadığı söylenebilir. Tablo-3’de KOA ve KKO’nın her bir kıyaslama test fonksiyonu için Wilcoxon işaretli-sıralı teste göre karşılaştırmaları sonucunda elde edilen p değerleri ve istatistiksel olarak anlamlı olup olmadıkları verilmektedir. “+/-” ifadesinde “+” istatistiksel olarak anlamlı olduğunu, “-” ise karşılaştırılan iki yöntem arasında önemli bir farklılık olmadığını, dolayısıyla istatistiksel olarak anlamlı olmadığını göstermektedir. Tablo-3 incelendiğinde, sadece F9 kıyaslama fonksiyonunda iki yöntem arasındaki belirgin bir fark olmadığı görülebilir. Benzer şekilde, Şekil-7’deki F9’un yakınsama eğrisi göz önüne alınarak benzer yorumlama yapılabilir. Diğer bütün kıyaslama test fonksiyonları için KOA ve KKO algoritmaları arasında 0.05 anlamlılık düzeyinde önemli bir fark bulunmaktadır. O halde önerilen KKO algoritmasının klasik KOA’dan farklı bir algoritma olduğu söylenebilir.

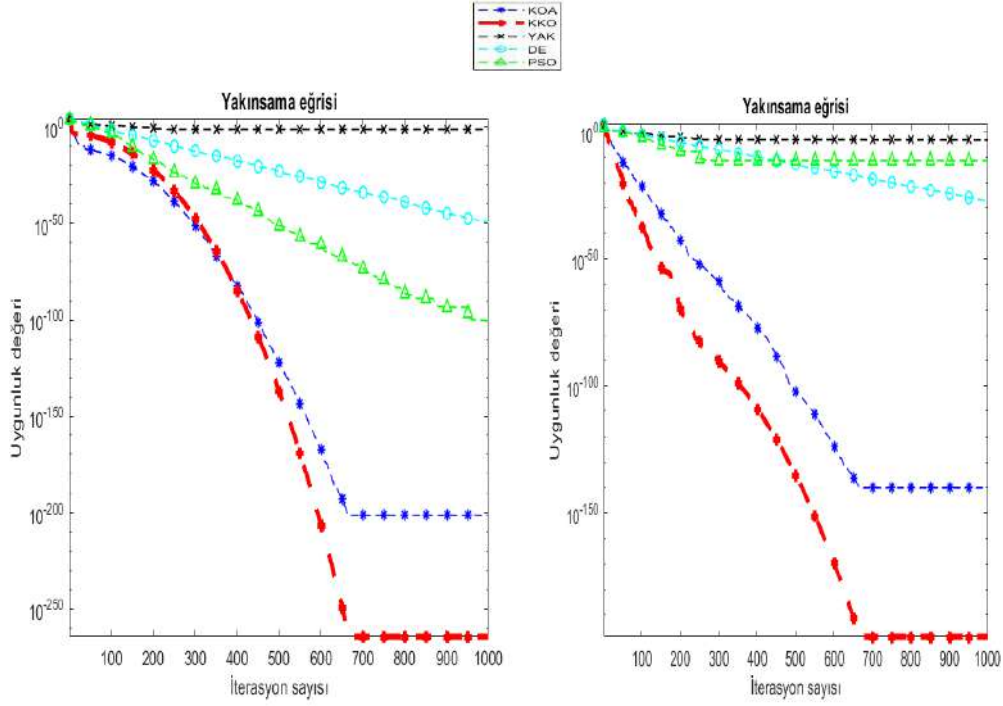
### 5.2. Önerilen KKO algoritmasının literatürdeki yöntemlerle karşılaştırılması

Bu bölümde KKO ve KOA algoritmaları, literatürdeki diğer iyi bilinen; diferansiyel evrim, yapay arı kolonisi ve parçacık sürü optimizasyonu algoritmalarıyla karşılaştırılmıştır. Bütün çalışmalarda, aday çözüm sayısı 20 olarak alınmış ve 1000 iterasyonda, 50 tekrar ile çalıştırılmıştır. Karşılaştırma yapılan algoritmaların kendilerine has parametreleri Tablo-4’de verilmiştir. Tablo-4, genellikle çalışmalarda kullanılan parametreler esas alınarak oluşturulmuştur [53].

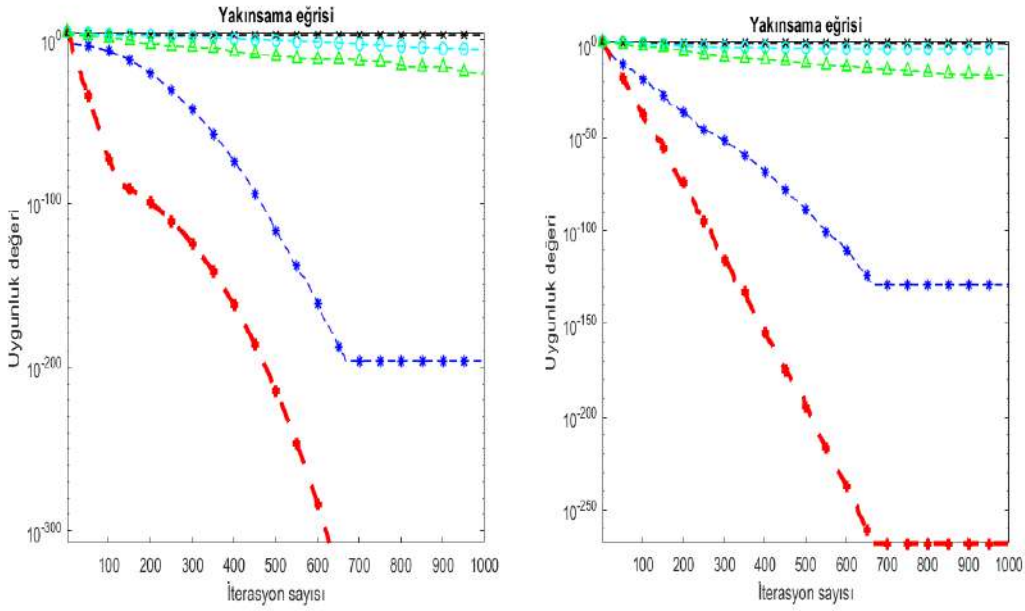


**Tablo 4.** Karşılaştırılan algoritmalar için parametre ayarları

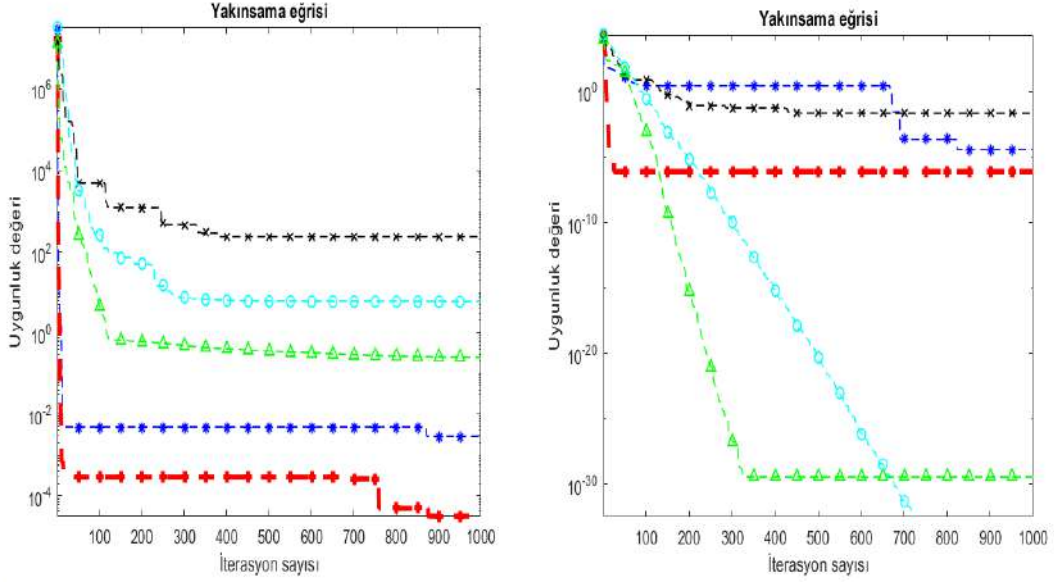
Algoritma	Parametre ayarları
Yapay Arı Kolonisi	$\alpha = 1$
Diferansiyel Evrim	Ölçekleme Faktörü= 0.5; Çaprazlama olasılığı= 0.5
Parçacık Sürü Optimizasyonu	$c_1 = 1.5; c_2 = 2; v_{max} = 6$



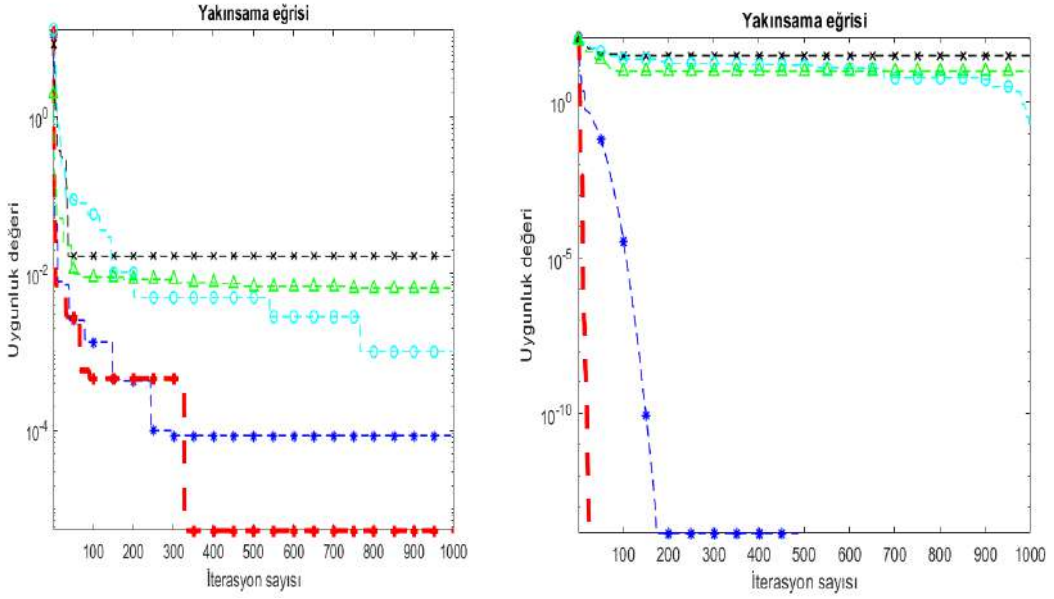
**Şekil 7.** F1-F2 kalite test fonksiyonları için karşılaştırma analizleri



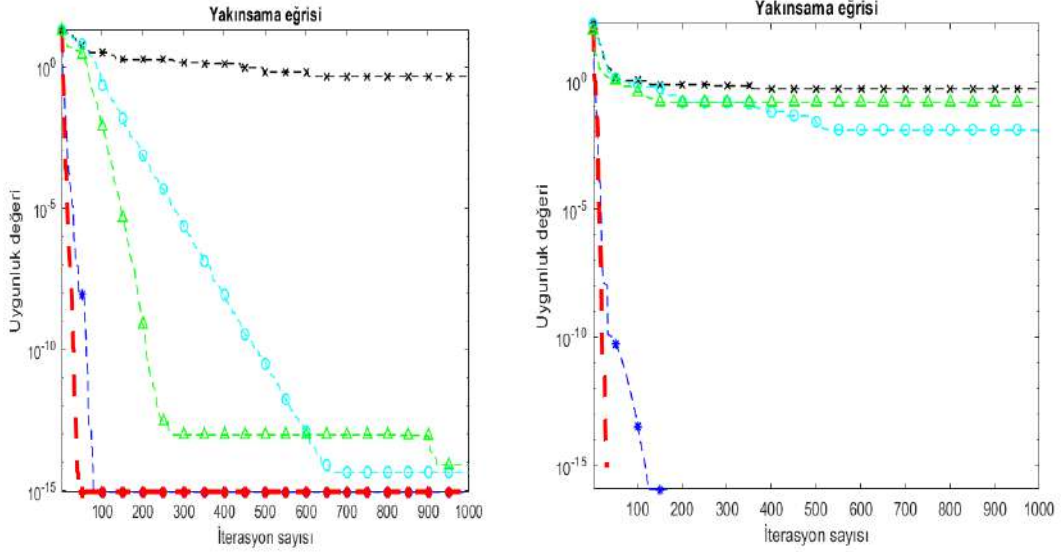
**Şekil 8.** F3-F4 kalite test fonksiyonları için karşılaştırma analizleri



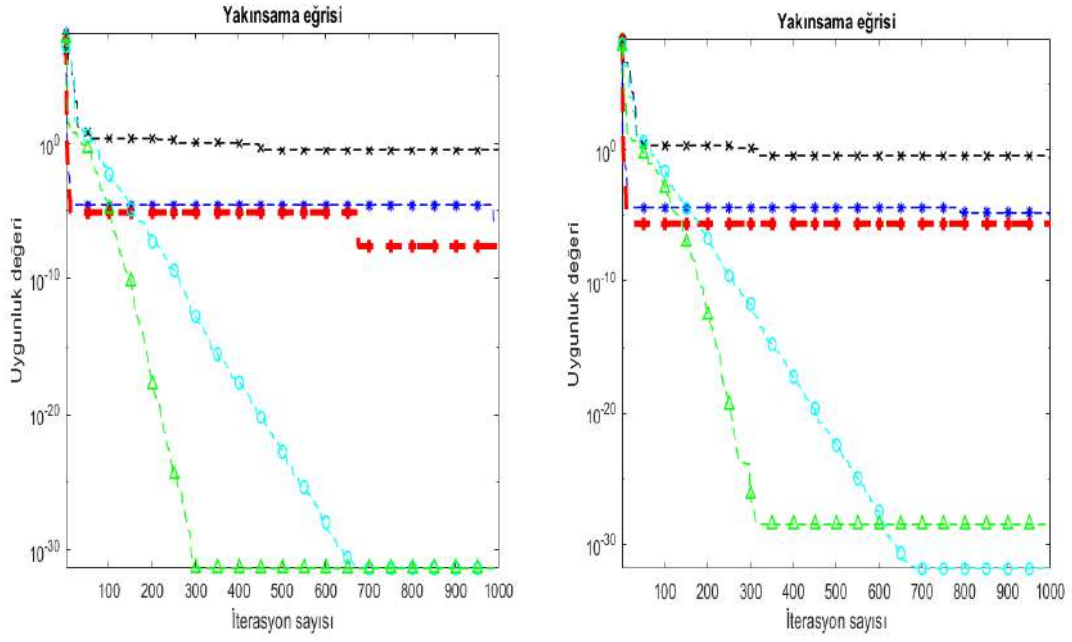
Şekil 9. F5-F6 kalite test fonksiyonları için karşılaştırma analizleri



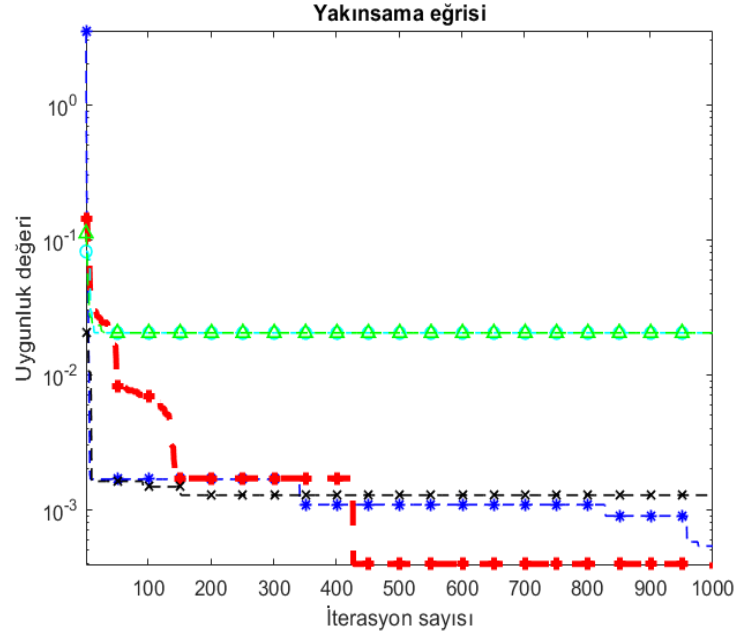
Şekil 10. F7-F8 kalite test fonksiyonları için karşılaştırma analizleri



Şekil 11. F9-F10 kalite test fonksiyonları için karşılaştırma analizleri



Şekil 12. F11-F12 kalite test fonksiyonları için karşılaştırma analizleri



Şekil 13. F13 kalite test fonksiyonu için karşılaştırma analizleri

Şekil 7-13 arasındaki figürler, KKO algoritmasının literatürdeki diğer bazı temel optimizasyon yöntemleri ile karşılaştırılması sonucundaki yakınsama davranışlarını sırasıyla göstermektedir. Şekil 7’de F1 ve F2, Şekil 8’de F3, F4, Şekil 9’da F5, Şekil 10’da F7, Şekil 13’de, F13 fonksiyonları için KKO’nun küresel minimuma diğer yöntemlerden daha iyi yakınsadığı ve daha düşük değerlere ulaştığı görülebilir. Diğer yandan KKO algoritması Şekil 10’da F8 ve Şekil 11’de F10 fonksiyonları için düşük iterasyonlarda direkt olarak küresel minimum değere yakınsamıştır. Son olarak, Şekil 9’da F6 ve Şekil 12’de F11 ve F12 fonksiyonlarında DE ve PSO daha iyi yakınsama göstermektedirler.

Tablo 5. KKO algoritmasının diğer yöntemler ile arasındaki Wilcoxon işaretli-sıralı test sonuçları

Algoritmalar	YAK		DE		PSO	
	p değeri	Önem	p değeri	Önem	p değeri	Önem
Kalite test fonksiyonları						
F1	7.5569E-10	+	7.5569E-10	+	7.5569E-10	+
F2	7.5569E-10	+	7.5569E-10	+	7.5569E-10	+
F3	7.5569E-10	+	7.5569E-10	+	7.5569E-10	+
F4	7.5569E-10	+	7.5569E-10	+	7.5569E-10	+
F5	7.5569E-10	+	7.5569E-10	+	7.5569E-10	+
F6	7.5569E-10	+	7.5569E-10	+	7.5569E-10	+
F7	7.5569E-10	+	7.5569E-10	+	7.5569E-10	+
F8	7.5569E-10	+	2.0195E-04	+	7.5382E-10	+
F9	7.5569E-10	+	2.5396E-10	+	9.4640E-10	+
F10	7.5569E-10	+	3.5862E-04	+	7.5569E-10	+
F11	7.5569E-10	+	7.5569E-10	+	1.4172E-08	+
F12	7.5569E-10	+	7.5569E-10	+	7.832E-01	-
F13	5.3067E-07	+	6.3945E-06	+	1.9410E-05	+
Toplam	13/0		13/0		12/1	

Tablo-5 göz önüne alındığında, önerilen KKO ile YAK, DE ve PSO arasında Wilcoxon işaretli-sıralı test sonuçlarına göre %5 anlamlılık düzeyinde belirgin bir fark vardır. Dolayısıyla hem Tablo 3 hem de Tablo 5 dikkate

almırsa, önerilen KKO algoritmasının hem orijinal KOA'dan hem de literatürdeki diğer üç algoritmadan (YAK, DE, PSO) farklı olduğu söylenebilir.

## 6. Sonuçlar

Bu çalışmada son zamanlarda önerilen KOA yönteminin rastgele değerleri kaotik haritalar ile yer değiştirilmiştir. Önerilen KKO algoritması, klasik KOA ile kalite test fonksiyonları üzerinde karşılaştırılmıştır. Kaotik harita olarak Gauss haritası kullanılmış, sonuçlar tablo ve şekiller ile desteklenmiştir. Kaotik haritaların tekrar edilemezlik ve ergodiklik özellikleri sayesinde KKO algoritması çözüm uzayını daha geniş taramaktadır. Dolayısıyla yerel minimum noktada takılmadan küresel minimum noktaya yakınsama ihtimalini arttırmaktadır. Tablo-2'de, F9 ve F13 hariç diğer bütün kalite test fonksiyonlarında önerilen KKO algoritması daha iyi sonuç vermektedir. Bütün bulgular göz önüne alındığında, KKO'nun, KOA'dan çok daha iyi yakınsama kabiliyetine sahip olduğu görülebilir. Özellikle Şekil-3 ve 4'de, F1, F2, F3, F4, F10 kalite test fonksiyonlarında KOA yerel minimum noktasında takılırken, KKO'nun küresel minimum noktaya daha yakın bir yakınsama sergilediği görülebilir. Diğer yandan Tablo-2'den, F1, F3 ve F10 fonksiyonlarında, direkt küresel minimum olan 0 noktasına yakınsadığı görülebilir. Diğer yandan, KKO algoritması literatürde sıkça kullanılan YAK, DE ve PSO algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 7-13'de, KKO'nun diğer algoritmalar ile karşılaştırılmasındaki yakınsama analizlerine yer verilmiştir. F1, F2, F3, F4, F5, F7, F8, F9, F10 ve F13 kalite test fonksiyonlarında KKO'nun diğer algoritmalarından daha iyi yakınsama kabiliyetinde sahip olduğu görülebilir. Ayrıca KKO ile YAK, DE ve PSO arasında yapılan Wilcoxon işaretli-sıralı teste göre, KKO'nun diğer 3 yöntemden istatistiksel olarak farklı olduğu söylenebilir. Bütün deneysel ve istatistiksel sonuçlar göz önüne alınırsa KKO algoritmasının yeni bir algoritma olduğu ve düşük iterasyonlarda küresel minimum değere yakınsama açısından başarılı sonuçlar ürettiği söylenebilir. KKO, başlangıç parametrelerinin öğrenilmesi için Sinir ağları, Aşırı öğrenme, ANFIS gibi yöntemlerde de uygulanabilir.

## Kaynaklar

- [1] Osman, I.H. and J.P. Kelly, Meta-heuristics theory and applications. *Journal of the Operational Research Society*, 1997. 48(6): p. 657-657.
- [2] Laporte, G., et al., Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem. *International transactions in operational research*, 2000. 7(4-5): p. 285-300.
- [3] Kumar, A., et al., A test-suite of non-convex constrained optimization problems from the real-world and some baseline results. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2020. 56: p. 100693.
- [4] Andrei, N., An unconstrained optimization test functions collection. *Adv. Model. Optim.*, 2008. 10(1): p. 147-161.
- [5] Angira, R. and B. Babu, Optimization of process synthesis and design problems: A modified differential evolution approach. *Chemical Engineering Science*, 2006. 61(14): p. 4707-4721.
- [6] He, X. and Y. Zhou, Enhancing the performance of differential evolution with covariance matrix self-adaptation. *Applied Soft Computing*, 2018. 64: p. 227-243.
- [7] Kockanat, S. and N. Karaboga, Medical image denoising using metaheuristics, in *Metaheuristics for medicine and biology*. 2017, Springer. p. 155-169.
- [8] Kumar, A., S. Singh, and A. Kumar. Grey wolf optimizer and other metaheuristic optimization techniques with image processing as their applications: a review. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. IOP Publishing.
- [9] Nakib, A. and E.-G. Talbi, *Metaheuristics for medicine and biology*. Vol. 704. 2017: Springer.
- [10] Črepinšek, M., S.-H. Liu, and M. Mernik, Exploration and exploitation in evolutionary algorithms: A survey. *ACM computing surveys (CSUR)*, 2013. 45(3): p. 1-33.
- [11] Ab Wahab, M.N., S. Nefti-Meziani, and A. Atyabi, A comprehensive review of swarm optimization algorithms. *PloS one*, 2015. 10(5): p. e0122827.
- [12] Kennedy, J. and R. Eberhart. Particle swarm optimization. in *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks*. 1995. IEEE.
- [13] Hussien, A.G., et al., Crow search algorithm: theory, recent advances, and applications. *IEEE Access*, 2020. 8: p. 173548-173565.
- [14] Mirjalili, S., Dragonfly algorithm: a new meta-heuristic optimization technique for solving single-objective, discrete, and multi-objective problems. *Neural Computing and Applications*, 2016. 27(4): p. 1053-1073.
- [15] Karaboga, D. and B. Basturk, On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm. *Applied soft computing*, 2008. 8(1): p. 687-697.
- [16] Yang, X.-S. and S. Deb, Engineering optimisation by cuckoo search. *International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation*, 2010. 1(4): p. 330-343.
- [17] Mirjalili, S. and A. Lewis, The whale optimization algorithm. *Advances in engineering software*, 2016. 95: p. 51-67.

- [18] Mirjalili, S., S.M. Mirjalili, and A. Lewis, Grey wolf optimizer. *Advances in engineering software*, 2014. 69: p. 46-61.
- [19] Heidari, A.A., et al., Harris hawks optimization: Algorithm and applications. *Future generation computer systems*, 2019. 97: p. 849-872.
- [20] Abualigah, L., et al., Aquila Optimizer: A novel meta-heuristic optimization Algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 2021: p. 107250.
- [21] Mirjalili, S., S.M. Mirjalili, and A. Hatamlou, Multi-verse optimizer: a nature-inspired algorithm for global optimization. *Neural Computing and Applications*, 2016. 27(2): p. 495-513.
- [22] Kaveh, A. and S. Talatahari, A novel heuristic optimization method: charged system search. *Acta Mechanica*, 2010. 213(3): p. 267-289.
- [23] Rashedi, E., H. Nezamabadi-Pour, and S. Saryazdi, GSA: a gravitational search algorithm. *Information sciences*, 2009. 179(13): p. 2232-2248.
- [24] Mirjalili, S., SCA: a sine cosine algorithm for solving optimization problems. *Knowledge-based systems*, 2016. 96: p. 120-133.
- [25] Abualigah, L., et al., The arithmetic optimization algorithm. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 2021. 376: p. 113609.
- [26] Booker, L.B., D.E. Goldberg, and J.H. Holland, Classifier systems and genetic algorithms. *Artificial intelligence*, 1989. 40(1-3): p. 235-282.
- [27] Hansen, N., S.D. Müller, and P. Koumoutsakos, Reducing the time complexity of the derandomized evolution strategy with covariance matrix adaptation (CMA-ES). *Evolutionary computation*, 2003. 11(1): p. 1-18.
- [28] Storn, R. and K. Price, Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of global optimization*, 1997. 11(4): p. 341-359.
- [29] Atashpaz-Gargari, E. and C. Lucas, Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition. in *2007 IEEE congress on evolutionary computation*. 2007. Ieee.
- [30] Rao, R.V., V.J. Savsani, and D. Vakharia, Teaching–learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems. *Computer-Aided Design*, 2011. 43(3): p. 303-315.
- [31] Askari, Q., I. Younas, and M. Saeed, Political Optimizer: A novel socio-inspired meta-heuristic for global optimization. *Knowledge-Based Systems*, 2020. 195: p. 105709.
- [32] Wolpert, D.H. and W.G. Macready, No free lunch theorems for optimization. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 1997. 1(1): p. 67-82.
- [33] Jenkinson, O., Ergodic optimization in dynamical systems. *Ergodic Theory and Dynamical Systems*, 2019. 39(10): p. 2593-2618.
- [34] Kaur, G. and S. Arora, Chaotic whale optimization algorithm. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2018. 5(3): p. 275-284.
- [35] Kiefer, J., Sequential minimax search for a maximum. *Proceedings of the American mathematical society*, 1953. 4(3): p. 502-506.
- [36] Koupaei, J.A., S.M.M. Hosseini, and F.M. Ghaini, A new optimization algorithm based on chaotic maps and golden section search method. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2016. 50: p. 201-214.
- [37] Kohli, M. and S. Arora, Chaotic grey wolf optimization algorithm for constrained optimization problems. *Journal of computational design and engineering*, 2018. 5(4): p. 458-472.
- [38] 38. Dunia, S. and S. Ramzy, Chaotic Sine-Cosine Algorithms. *International Journal of Soft Computing*, 2018. 13(3): p. 108-122.
- [39] Altay, E.V. and B. Alatas, Bird swarm algorithms with chaotic mapping. *Artificial Intelligence Review*, 2020. 53(2): p. 1373-1414.
- [40] Steenhof, K., M.N. Kochert, and T.L. McDonald, Interactive effects of prey and weather on golden eagle reproduction. *Journal of Animal Ecology*, 1997: p. 350-362.
- [41] Carnie, S.K., Food habits of nesting golden eagles in the coast ranges of California. *The Condor*, 1954. 56(1): p. 3-12.
- [42] Meinertzhagen, R., How do larger raptorial birds hunt their prey. *Ibis*, 1940. 4: p. 530-535.
- [43] Dekker, D., HUNTING BEHAVIOR OF GOLDEN EAGLES, AQUILA-CHRYSAETOS, MIGRATING IN SOUTHWESTERN ALBERTA. 1985, OTTAWA FIELD-NATURALISTS CLUB PO BOX 35069, WESTGATE PO, OTTAWA ON K1Z 1A2 .... p. 383-385.
- [44] Watson, J., *The golden eagle*. 2010: Bloomsbury Publishing.
- [45] Eubank, S. and D. Farmer, An introduction to chaos and randomness, in *1989 lectures in complex systems*. *Proceedings: Lectures*, Volume 2. 1990.
- [46] dos Santos Coelho, L. and V.C. Mariani, Use of chaotic sequences in a biologically inspired algorithm for engineering design optimization. *Expert Systems with Applications*, 2008. 34(3): p. 1905-1913.
- [47] Ollagnier, J.M., *Ergodic theory and statistical mechanics*. Vol. 1115. 2007: Springer.
- [48] Derrac, J., et al., A practical tutorial on the use of nonparametric statistical tests as a methodology for comparing evolutionary and swarm intelligence algorithms. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2011. 1(1): p. 3-18.
- [49] Güvenc, U. and F. Katircioğlu, Escape velocity: a new operator for gravitational search algorithm. *Neural Computing and Applications*, 2019. 31(1): p. 27-42.
- [50] KATIRCIOĞLU, F. and U. GÜVENÇ, Sequentially Modified Gravitational Search Algorithm for Image Enhancement. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2020. 8(4): p. 2266-2288.

- [51] García, S., et al., A study on the use of non-parametric tests for analyzing the evolutionary algorithms' behaviour: a case study on the CEC'2005 special session on real parameter optimization. *Journal of Heuristics*, 2009. 15(6): p. 617-644.
- [52] Wilcoxon, F., Individual comparisons by ranking methods, in *Breakthroughs in statistics*. 1992, Springer. p. 196-202.
- [53] Yang, Y., et al., Hunger games search: Visions, conception, implementation, deep analysis, perspectives, and towards performance shifts. *Expert Systems with Applications*, 2021. 177: p. 114864.

## Yüksek Dayanımlı Betonların Erken Yaş Dayanımının RSM Metodu Kullanılarak Belirlenmesi

Tuba DEMİR<sup>1\*</sup>, Muhammed ULUCAN<sup>2</sup>, Kürşat Esat ALYAMAÇ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> İnşaat Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye  
<sup>2,3</sup> İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye  
<sup>\*1</sup> t.demir@firat.edu.tr, <sup>2</sup> mulucan@firat.edu.tr, <sup>3</sup> kealyamac@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 17/07/2021;

Kabul/Accepted: 02/12/2021)

**Öz:** Bu çalışmanın amacı çevre dostu yüksek dayanımlı betonların (ÇYDB) taze beton özellikleri ve erken yaş beton dayanımlarını yüksek doğrulukla tahmin eden matematiksel modeller geliştirmek, pratik bir karışım hesabı sunmaktır. Bu amaçla 72 seri beton karışımı hazırlanmıştır. Bu seriler hazırlanırken su/çimento (W/C) oranları 0.20-0.25-0.30, çimento dozajı ise 400-450-500 kg/m<sup>3</sup> olarak seçilmiştir. Hazırlanan beton karışımlarında mineral katkı olarak silis dumanı ve mermer tozu kullanılmıştır. Silis dumanı, çimento ile hacimce %5-10-15 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmıştır. Mermer tozu ise ince agrega ile hacimce %8-10-12 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmıştır. Bu karışım oranları sonucunda elde edilen veriler tepki yüzeyi metodu (RSM) kullanılarak analiz edilmiştir. Analizler yapılırken değişken olarak W/C, agrega/çimento (A/C) ve mermer tozu/ince agrega (MP/FA) değerleri kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda slump ve  $f_c-3$  gün değerlerini tahmin etmek için matematiksel bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen bu modelin etkinliğini test etmek için 9 kontrol serisi hazırlanmıştır. Bu kontrol serileri üzerinde deney sonuçları ile modelin tahmin sonuçları kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamalar sonucunda bağıl hata oranları (BHO) hesaplanmıştır. Geliştirilen modelin slump ve  $f_c-3$  gün değerlerini oldukça yüksek doğrulukla tahmin ettiği görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Yüksek Dayanımlı Beton, Erken Yaş Beton Dayanımı, Mermer Tozu, Silis Dumanı, RSM.

### Determination of the Early Age Strength of High-Strength Concrete Using RSM Method

**Abstract:** This study aims to develop mathematical models to predict the fresh concrete and early age strength properties of environmentally friendly high-strength concretes (EHSC) with high accuracy and to present a practical mix design. For this purpose, 72 series of concrete mixtures were prepared. While preparing these series, water-to-cement (W/C) ratios were selected as 0.20-0.25-0.30, and cement dosage as 400-450-500 kg/m<sup>3</sup>. Silica fume and marble powder were used as mineral additives in the prepared concrete mixtures. Silica fume was used by displacing it with cement at 5-10-15% by volume. Marble powder was used by displacing it with fine aggregate at 8-10-12% by volume. These mix ratios were analyzed using the response surface methodology (RSM). W/C, aggregate-to-cement (A/C) and marble powder-to-fine aggregate (MP/FA) ratios were used as variables during the analysis. As a result of the analysis, a mathematical models was developed for each of slump flow and  $f_c-3$  days, 9 control series were prepared to test the effectiveness of these developed models. The results of the experiments and the estimation results of the models were compared on these control series. Absolute relative deviation (ARD) were calculated as a result of these comparisons. It was observed that the developed models detected the slump flow and  $f_c-3$  days values with high accuracy.

**Key words:** High Strength Concrete, Early Age Concrete Strength, Marble Powder, Silica Fume, RSM.

### 1. Giriş

Yüksek Dayanımlı Betonların (YDB), basınç dayanımı ve durabilite gibi mühendislik özellikleri sebebiyle kullanım alanları giderek yaygınlaşmıştır. YDB, ortalama basınç dayanımı 50 MPa ve üstü olan özel beton türüdür [1]. 1970'li yılların başında İnşaat Mühendisliği literatürüne girmiştir [2]. YDB'lerin uygulama alanlarında yaygın olarak yüksek katlı yapılar, köprüler, açık deniz platformları, yollar, tüneller gibi uzun dönem performans istenen yapılar bulunmaktadır. Bu beton türünün dayanımı, dayanıklılığı ve kompasitesi yüksektir [3,4]. Malzeme teknolojisinin de gelişimi ile birlikte YDB üretimi popülerlik kazanmıştır. Dahası çeşitli endüstriyel atıklar kullanılarak yüksek dayanımlı beton (YDB) üretimi ile ilgili çalışmalar daha popüler hale gelmiştir. Endüstriyel atıklar kullanılarak elde edilen YDB'ler; yüksek dayanım ve durabilite açısından inşaat sektörüne, CO<sub>2</sub> salımının azaltılması ile çevreye ve atık malzemelerin kullanılması ile ekonomiye olumlu katkı sağlamaktadır.

\* Sorumlu yazar: [t.demir@firat.edu.tr](mailto:t.demir@firat.edu.tr). <sup>1</sup> 0000-0003-2092-1029, <sup>2</sup> 0000-0001-7629-6846, <sup>3</sup> 0000-0002-3226-4073



Beton üretiminde temel unsurlardan biri agregadır. İnşaat sektörünün hızla ilerlemesiyle, bu malzemelerin kullanımı giderek artmaktadır [5]. Bu yüzden beton karışımlarda agregayla yer değiştirilerek kullanılan mermer tozu vb. atıkların kullanımı yaygınlaşmıştır [6]. Mermer tozunun betonda kullanılması ile betonun boşluk oranı azalmakta ve daha yüksek kompasiteye sahip beton elde edilmektedir [7]. Dolayısıyla mermer tozu betonda filler etkisi oluşturmaktadır [6,7].

YDB üretiminde yaygın olarak silis dumanı kullanılmaktadır [10]. Silis dumanının beton basınç dayanımına katkı sağladığı birçok çalışmada mevcuttur. Ancak silis dumanı ve mermer tozunun birlikte kullanıldığı çalışma bulunmamaktadır.

Bu çalışmanın genel amaçlarından birincisi, atık malzeme olan mermer tozunun betonda kullanılarak, doğal kaynakların kullanımının azaltılmasına katkı sağlamaktır. İkicisi, yüksek dayanıma sahip betonların erken yaş dayanımlarını, istatistik analiz metodu kullanarak yüksek doğrulukla tahmin etmek ve pratik bir karışım hesabı sunmak için matematiksel model geliştirmektir. Bunun için 72 seri YDB karışımı hazırlanmıştır. Bu seriler hazırlanırken W/C oranları 0.20-0.25-0.30, çimento dozajı ise 400-450-500 kg/m<sup>3</sup> olarak seçilmiştir. Hazırlanan beton karışımlarında mineral katkı olarak silis dumanı ve mermer tozu kullanılmıştır. Silis dumanı, çimento ile hacimce %5-10-15 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmıştır. Mermer tozu ise ince agregaya ile hacimce %8-10-12 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmıştır. Bu karışım oranları sonucunda elde edilen veriler RSM kullanılarak analiz edilmiştir. Analizler yapılırken değişken olarak W/C, A/C ve MP/FA değerleri kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda slump ve  $f_c$ -3 gün değerinin her biri için üç farklı matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen bu modellerin etkinliğini test etmek için 9 kontrol serisi hazırlanmıştır. Bu kontrol serileri üzerinde deney sonuçları ile modellerin tahmin sonuçları kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamalar sonucunda bağıl hata değerleri hesaplanmıştır. Geliştirilen modelin slump değerini ve  $f_c$ -3 gün değerlerini oldukça yüksek doğrulukla tespit ettiği görülmüştür.

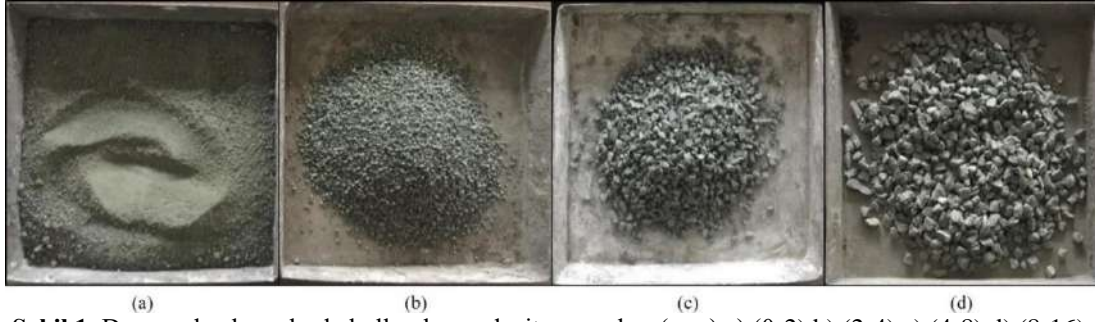
## 2. Malzeme ve Yöntem

Bu çalışmada Elazığ Seza çimento fabrikasından temin edilen, CEM I 42.5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Bu çimento türü, TS EN 197-1 standardına uygun olup 28 günlük basınç dayanımı 48.3 MPa'dır [11]. Mineral katkı maddesi olarak mermer tozu ve silis dumanı kullanılmıştır. Mermer tozu, Elazığ organize sanayi bölgesinden temin edilmiştir. Silis dumanı (mikro silika) Antalya Eti Metalurji'den temin edilmiştir. Bu malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Kullanılan malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri (%).

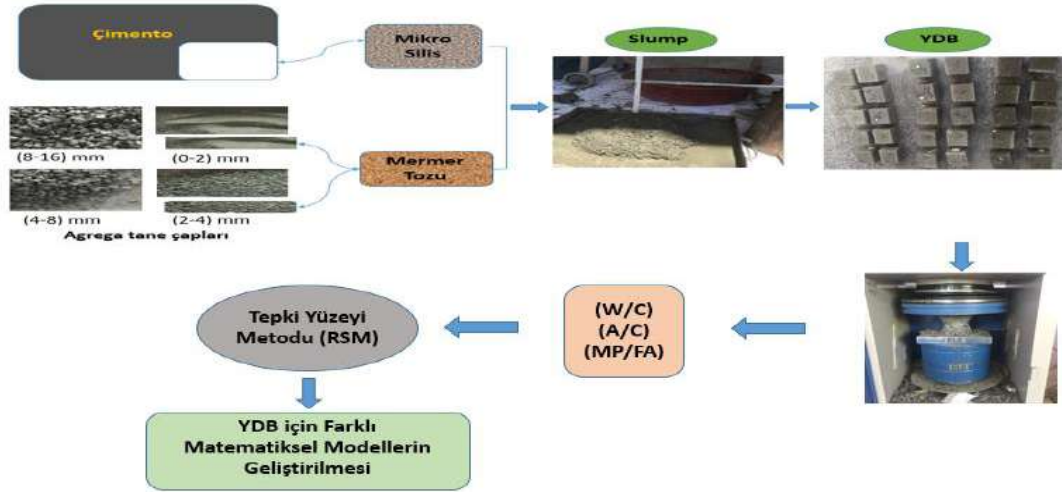
Kimyasal Özellikler	Çimento (C)	Silis Dumanı (SD)	Mermer Tozu (MT)
CaO	63.19	0.40	40.45
SiO <sub>2</sub>	19.07	94.10	28.35
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.72	1.50	9.70
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.82	0.90	0.17
SiO <sub>3</sub>	2.94	94.10	0.02
Na <sub>2</sub> O	0.39	0.40	0.05
K <sub>2</sub> O	0.62	0.90	0.01
MgO	1.83	0.10	16.25
Cl	0.0101	-	-
Çözünmeyen kalıntı	0.56	-	-
Kızdırma kaybı	3.43	-	4.84
<b>Fiziksel Özellikler</b>			
Özgül yüzey (Blaine)	3838		3920
Özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	3.13	2.20	2.71
Priz başlangıcı (dk)	135	-	-
Priz sonu (dk)	215	-	-
Hacim sabitliği (mm)	1	-	-

Beton karışımlarında yüksek kompasite ve dayanıma sahip andezit agregası kullanılmıştır. Bu agregaya türü, koyu renkli, emici olmayan, dağılmayan ve yoğun dokusu nedeniyle yüksek mukavemetli betonlar için uygundur. Aynı zamanda % 52-63 oranında kuvars içeren bir agregaya türüdür [12]. Deneysel çalışmalarda kullanılan maksimum agregaya tane çapı 16 mm olup, agregalar 0-2, 2-4, 4-8, 8-16 mm olarak 4 farklı gruba ayrılmıştır. Elek sınıflarına göre ayrılmış agregalar Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Deneysel çalışmalarda kullanılan andezit agregaları (mm) a) (0-2) b) (2-4) c) (4-8) d) (8-16).

Mineral katkı olarak silis dumanı çimento ile mermer tozu ise ince agrega ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. Tüm karışımlarda, kimyasal katkı malzemesi olarak hiper akışkanlaştırıcı CHRYSO Fluid 518 kullanılmıştır. Silis dumanı, çimento ile hacimce %5-10-15 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmıştır. Mermer tozu ise ince agrega ile hacimce %8-10-12 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmıştır. Çalışmayı özetleyen akış şeması Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Çalışmanın akış şeması

## 2.1. Numunelerin Hazırlanması

Deneylerde farklı karışım oranlarına sahip 72 seri beton karışımı hazırlanmıştır. Karışımlara ait veriler Tablo 2'de verilmiştir. Karışımlar sonucunda üretilen numuneler üzerinde taze beton özelliklerini belirlemek için slump deneyleri uygulanmış ve slump değerleri tespit edilmiştir. Daha sonra üretilen numuneler 100x100x100 mm'lik kalıplara yerleştirilmiş, 24 saat laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Prizini alan numuneler kalıplardan çıkarılarak kür havuzuna bırakılmıştır. Sertleşmiş beton özelliklerini tespit etmek amacıyla numuneler kür havuzundan çıkarılmış, numunelere 3. günde standart basınç dayanımı testi uygulanmış ve basınç dayanımları tespit edilmiştir. Elde edilen basınç dayanımı, slump değerleri ve karışım miktarları kullanılarak RSM yardımıyla analizleri yapılmış ve matematiksel model geliştirilmiştir. Yapılan analizlere ait detaylı bilgiler Bölüm 3'te verilmiştir.

Tablo 2. Beton karışım miktarları (kg/m<sup>3</sup>).

Seri Adı	Çimento	Su	Mikro silis	Mermer Tozu	İnce Agrega (0-2) mm	İnce Agrega (2-4) mm	Orta Agrega (4-8) mm	Kaba Agrega (8-16) mm
ÇYDB400-1	380	80	14.1	83	577	380	411	615
ÇYDB400-2	380	80	14.1	104	564	372	411	615
ÇYDB400-3	380	80	14.1	125	552	363	411	615
ÇYDB400-4	360	80	28.1	82	571	376	406	609
ÇYDB400-5	360	80	28.1	103	559	368	406	609
ÇYDB400-6	360	80	28.1	124	546	360	406	609

Yüksek Dayanımlı Betonların Erken Yaş Dayanımının RSM Metodu Kullanılarak Belirlenmesi

CYDB400-7	340	80	42.2	82	565	372	402	603
CYDB400-8	340	80	42.2	102	553	364	402	603
CYDB400-9	340	80	42.2	122	541	356	402	603
CYDB400-10	380	100	14.1	81	562	370	400	599
CYDB400-11	380	100	14.1	101	550	362	400	599
CYDB400-12	380	100	14.1	122	537	354	400	599
CYDB400-13	360	100	28.1	80	556	366	395	593
CYDB400-14	360	100	28.1	100	544	358	395	593
CYDB400-15	360	100	28.1	120	532	350	395	593
CYDB400-16	340	100	42.2	79	550	362	391	587
CYDB400-17	340	100	42.2	99	538	355	391	587
CYDB400-18	340	100	42.2	119	526	347	391	587
CYDB400-19	380	120	14.1	79	547	360	389	583
CYDB400-20	380	120	14.1	99	535	352	389	583
CYDB400-21	380	120	14.1	118	523	344	389	583
CYDB400-22	360	120	28.1	78	541	356	385	577
CYDB400-23	360	120	28.1	117	517	341	385	577
CYDB400-24	340	120	42.2	77	535	352	381	571
CYDB400-25	340	120	42.2	116	512	337	381	571
CYDB450-1	428	90	15.8	80	557	367	396	594
CYDB450-2	428	90	15.8	100	545	359	396	594
CYDB450-3	428	90	15.8	120	532	351	396	594
CYDB450-4	405	90	31.6	79	550	362	391	587
CYDB450-5	405	90	31.6	119	526	346	391	587
CYDB450-6	383	90	47.4	78	544	358	387	580
CYDB450-7	383	90	47.4	98	532	350	387	580
CYDB450-8	383	90	47.4	118	520	342	3867	580
CYDB450-9	428	113	15.8	78	540	355	384	576
CYDB450-10	428	113	15.8	97	528	348	384	576
CYDB450-11	405	113	31.6	77	533	351	379	569
CYDB450-12	405	113	31.6	115	510	336	379	569
CYDB450-13	383	113	47.4	76	526	347	374	562
CYDB450-14	383	113	47.4	95	515	339	374	562
CYDB450-15	383	113	47.4	114	504	332	374	562
CYDB450-16	428	135	15.8	75	523	344	372	557
CYDB450-17	428	135	15.8	94	511	337	372	557
CYDB450-18	428	135	15.8	113	500	329	372	557
CYDB450-19	405	135	31.6	74	516	340	367	550
CYDB450-20	405	135	31.6	112	494	325	367	550
CYDB450-21	383	135	47.4	74	509	336	362	543
CYDB450-22	383	135	47.4	92	498	328	362	543
CYDB450-23	383	135	47.4	110	487	321	362	543
CYDB500-1	475	100	17.6	77	536	353	381	572
CYDB500-2	475	100	17.6	97	525	345	381	572
CYDB500-3	475	100	17.6	116	513	338	381	572
CYDB500-4	450	100	35.1	76	529	348	376	564
CYDB500-5	450	100	35.1	95	517	341	376	564
CYDB500-6	450	100	35.1	114	506	333	376	564
CYDB500-7	425	100	52.7	75	522	344	371	556
CYDB500-8	425	100	52.7	94	510	336	371	556
CYDB500-9	425	100	52.7	113	499	329	371	556
CYDB500-10	475	125	17.6	75	517	341	368	552
CYDB500-11	475	125	17.6	93	506	333	368	552
CYDB500-12	450	125	35.1	74	510	336	363	544
CYDB500-13	450	125	35.1	110	488	321	363	544
CYDB500-14	425	125	52.7	73	503	331	358	536
CYDB500-15	425	125	52.7	91	492	324	358	536
CYDB500-16	425	125	52.7	109	481	317	358	536
CYDB500-17	475	150	17.6	72	498	328	354	532
CYDB500-18	475	150	17.6	90	488	321	354	532
CYDB500-19	475	150	17.6	108	477	314	354	532
CYDB500-20	450	150	35.1	71	491	324	349	524
CYDB500-21	450	150	35.1	106	470	309	349	524
CYDB500-22	425	150	52.7	70	484	319	344	516
CYDB500-23	425	150	52.7	87	473	312	344	516
CYDB500-24	425	150	52.7	105	463	305	344	516
KÇYDB-1	360	120	28.1	98	529	349	385	577
KÇYDB-2	340	120	42.2	97	523	345	381	571
KÇYDB-3	405	90	31.6	99	538	354	391	587
KÇYDB-4	428	113	15.8	117	516	340	384	576
KÇYDB-5	405	113	31.6	96	521	343	379	569
KÇYDB-6	405	135	31.6	93	505	332	367	550
KÇYDB-7	475	125	17.6	112	495	326	368	552
KÇYDB-8	450	125	35.1	92	499	329	363	544
KÇYDB-9	450	150	35.1	89	480	316	349	524

### 3. İstatistik Analiz

#### 3.1. Modelin Tasarımı

Yanıt yüzeyi yöntemi, değişkenler ve yanıtlar arasındaki ilişkiyi belirlemede etkili bir araç olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır [13]. Ayrıca bu yöntemle geliştirilen modeller, değişkenlerin bireysel etkilerini ve değişkenlerin yanıt değişkeni üzerindeki etkileşimini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Bir RSM modeli geliştirmek, üç ana adımı içerir. Bunlar; ilgilenilen yanıtın deneysel verilerini toplamak, bir RSM modeli oluşturmak ve doğruluğunu onaylamak, son olarak, istenen yanıt değişkenlerini hesaplamak için değişkenleri optimize etmektir [14]. RSM'nin, her yanıt için modeli tahmin etme, az sayıda deneysel veri noktasıyla sağlam bir model oluşturma, değişkenler arasındaki etkileşimini değerlendirme ve en uygun yanıtı bulma gibi çeşitli avantajları vardır [15].

Bu çalışmada model geliştirilirken kullanılan değişkenler su/çimento (W/C), agrega/çimento (A/C), ve mermer tozu/ince agrega (MP/FA) oranlarıdır. W/C ve A/C oranı betonun dayanımı ve işlenebilirliği üzerinde önemli etkiye sahiptir [16]. Dolayısıyla W/C ve A/C oranları değişken olarak kesinlikle dikkate alınmalıdır. Bunlara ek olarak, mermer tozunun kullanımıyla betonun boşluk oranı azalmaktadır. Yani, dolgu özelliği nedeniyle basınç dayanımını arttırmaktadır [2]. Ancak optimum değerden sonra dayanım değerlerinde azalmaya sebep olmaktadır [8]. Bu çalışmada mermer tozu ile ince agrega hacimce yer değiştirilmiş ve bu nedenle MP/FA oranı da değişken olarak dikkate alınmalıdır. Mermer tozunun inceliği yüksek olduğundan slump değerlerinde azalmaya neden olmaktadır. Değişkenler, basınç dayanımı, ve slump üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenerek belirlenmiştir. Bu değişkenlere ait değişim aralıkları Tablo 3'te sunulmuştur. Çalışmada kullanılan değişkenlerin düşük değerleri -1, yüksek değerleri ise +1 olarak değerlendirilmektedir. Aynı zamanda 0 olarak belirtilen değer ise düşük ve yüksek değerlerin aritmetik ortalamasıdır.

**Tablo 3.** Değişkenler ve varyasyon aralığı

Semboller		Değişim Aralıkları		
Gerçek	Kod	-1	0	1
W/C	A	0.21	0.28	0.35
A/C	B	3.53	4.62	5.71
MP/FA	C	0.087	0.112	0.136

#### 3.2. Modelin Geliştirilmesi

Bu çalışmada, toplam 72 veriye sahip bir RSM modeli oluşturulmuştur. Deneysel tasarım ve analiz için piyasada bulunan bir yazılım paketi (Design Expert) kullanılmıştır [17]. Yapılan analizlerde kullanılan değişkenlere ve yanıtlara ait değerler Tablo 4'te verilmiştir. Tabloda karışım kodlarına isimler verilirken, ÇYDB değerleri çevre dostu yüksek dayanımlı betonu, 400-450-500 çimento dozajı olarak verilen değerler ve sağda verilen numaralar ise hazırlanan seri numarasına göstermektedir. Ayrıca KÇYDB kodları, kontrol çevre dostu yüksek dayanımlı betonu, sağda verilen numaralar ise hazırlanan seri numarasını belirtir.

**Tablo 4.** Analizde kullanılan yanıtlar ve değişkenlere ait değerler.

Karışım Kodu	W/C	A/C	MP/FA	Slump (cm)	f <sub>c</sub> -3 gün (MPa)
CYDB400-1	0.21	5.22	0.087	4	51.3
CYDB400-2	0.21	5.16	0.111	3	53.4
CYDB400-3	0.21	5.11	0.136	2	52.6
CYDB400-4	0.22	5.45	0.087	3	52.7
CYDB400-5	0.22	5.39	0.111	2	54.3
CYDB400-6	0.22	5.34	0.136	2	53.4
CYDB400-7	0.24	5.71	0.087	2	53.3
CYDB400-8	0.24	5.65	0.111	1	55.0
CYDB400-9	0.24	5.59	0.136	1	54.1
CYDB400-10	0.26	5.08	0.087	8	55.7
CYDB400-11	0.26	5.03	0.111	7	56.9
CYDB400-12	0.26	4.97	0.136	6	56.3
CYDB400-13	0.28	5.31	0.087	7	56.5
CYDB400-14	0.28	5.25	0.111	6	58.1
CYDB400-15	0.28	5.20	0.136	6	57.3
CYDB400-16	0.29	5.56	0.087	6	56.3
CYDB400-17	0.29	5.50	0.111	5	57.7

Yüksek Dayanımlı Betonların Erken Yaş Dayanımının RSM Metodu Kullanılarak Belirlenmesi

CYDB400-18	0.29	5.44	0.136	5	57.1
CYDB400-19	0.32	4.94	0.087	14	54.6
CYDB400-20	0.32	4.89	0.111	13	55.7
CYDB400-21	0.32	4.84	0.136	12	55.0
CYDB400-22	0.33	5.16	0.087	13	53.0
CYDB400-23	0.33	5.05	0.136	10	54.4
CYDB400-24	0.35	5.41	0.087	12	50.7
CYDB400-25	0.35	5.29	0.136	11	51.0
CYDB450-1	0.21	4.47	0.087	6	53.9
CYDB450-2	0.21	4.43	0.111	4	55.1
CYDB450-3	0.21	4.38	0.136	3	54.4
CYDB450-4	0.22	4.67	0.087	5	54.9
CYDB450-5	0.22	4.57	0.136	2	55.5
CYDB450-6	0.24	4.88	0.087	2	55.8
CYDB450-7	0.24	4.83	0.111	1	57.4
CYDB450-8	0.24	4.78	0.136	1	56.4
CYDB450-9	0.26	4.34	0.087	12	57.9
CYDB450-10	0.26	4.29	0.111	10	58.9
CYDB450-11	0.28	4.52	0.087	11	59.4
CYDB450-12	0.28	4.43	0.136	8	60.0
CYDB450-13	0.29	4.73	0.087	9	58.6
CYDB450-14	0.29	4.68	0.111	7	59.8
CYDB450-15	0.29	4.63	0.136	7	59.1
CYDB450-16	0.32	4.20	0.087	18	57.0
CYDB450-17	0.32	4.16	0.111	16	58.0
CYDB450-18	0.32	4.11	0.136	16	57.4
CYDB450-19	0.33	4.38	0.087	17	55.7
CYDB450-20	0.33	4.29	0.136	14	56.1
CYDB450-21	0.35	4.58	0.087	15	52.5
CYDB450-22	0.35	4.53	0.111	13	53.6
CYDB450-23	0.35	4.48	0.136	13	52.8
CYDB500-1	0.21	3.88	0.087	9	56.0
CYDB500-2	0.21	3.84	0.111	7	57.5
CYDB500-3	0.21	3.80	0.136	6	56.6
CYDB500-4	0.22	4.04	0.087	8	57.3
CYDB500-5	0.22	4.00	0.111	6	58.9
CYDB500-6	0.22	3.95	0.136	5	57.7
CYDB500-7	0.24	4.22	0.087	4	58.6
CYDB500-8	0.24	4.17	0.111	3	59.9
CYDB500-9	0.24	4.13	0.136	3	59.0
CYDB500-10	0.26	3.74	0.087	17	59.9
CYDB500-11	0.26	3.70	0.111	16	60.8
CYDB500-12	0.28	3.89	0.087	16	61.6
CYDB500-13	0.28	3.81	0.136	13	62.2
CYDB500-14	0.29	4.06	0.087	15	60.6
CYDB500-15	0.29	4.02	0.111	13	61.7
CYDB500-16	0.29	3.98	0.136	12	61.3
CYDB500-17	0.32	3.61	0.087	23	58.6
CYDB500-18	0.32	3.57	0.111	21	59.9
CYDB500-19	0.32	3.53	0.136	20	59.2
CYDB500-20	0.33	3.75	0.087	22	57.6
CYDB500-21	0.33	3.67	0.136	19	58.1
CYDB500-22	0.35	3.91	0.087	18	54.4
CYDB500-23	0.35	3.87	0.111	18	55.7
CYDB500-24	0.35	3.83	0.136	17	55.1
KCYDB-1	0.33	5.11	0.111	11	55.0
KCYDB-2	0.35	5.35	0.111	11	51.5
KCYDB-3	0.22	4.62	0.111	3	56.5
KCYDB-4	0.26	4.25	0.136	10	58.5
KCYDB-5	0.28	4.47	0.111	9	60.7
KCYDB-6	0.33	4.33	0.111	15	56.9
KCYDB-7	0.26	3.66	0.136	15	60.2
KCYDB-8	0.28	3.85	0.111	14	62.9
KCYDB-9	0.33	3.71	0.111	20	58.7

Değişkenlerin ÇYDB'ler üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla matematiksel model geliştirilmiştir. Bu model geliştirilirken  $W/C$ ,  $A/C$  ve  $MP/FA$  değişkenleri dikkate alınmıştır. Geliştirilen modeldeki önemsiz terimler, model üzerinde t testi yapılarak kaldırılmıştır. Son olarak, model kalan değerlere göre oluşturulmuştur. Modelin yeterliliğini doğrulamak için temel olarak P değerleri ve F değerleri kullanılmaktadır. Bu değerleri belirlemek için varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Modellere ait ANOVA sonuçları Tablo 5'te sunulmuştur.

**Tablo 5.** Modele ait ANOVA sonuçları.

Sonuç	Model		
	MSE	F-value	P-value
Slump (cm)	262.4	80.55	< 0.0001
$f_c$ -3 gün (MPa)	53.5	91.73	< 0.0001

Bu çalışmada, slump ve  $f_c$ -3 gün değerlerini tahmin etmek için bir model geliştirilmiştir. Slump ve  $f_c$ -3 gün için geliştirilen modele ait MSE değerleri sırasıyla 262.4-53.5, belirlilik katsayıları ( $R^2$ ) ise 0.90-0.92'dir. Belirlilik katsayıları arttıkça modelin tahmin gücü giderek artmakta ve MSE değerleri giderek azalmaktadır. Aynı zamanda modelin yeterliliğini doğrulamak için kullanılan F-value değerleri de slump ve  $f_c$ -3 gün için sırasıyla 80.55-91.73'dir. Buradan da modelin belirlilik katsayısı arttıkça F-value değerinin arttığı da görülmektedir. Ayrıca, geliştirilen modelin P-value değerinin de <0.0001 olması modelin anlamlı ve değerli olduğunu bir kez daha göstermektedir.

Modelin anlamlı ve değerli olduğu belirlendikten sonra, her değişkenin yanıtlar üzerindeki etkisini değerlendirmek için ANOVA analizi yapılmıştır. Her değişkenin önemi, analiz sonucunda elde edilen P değerine bağlıdır. Modelde kullanılan değişkenler, P değerinin genellikle 0.05'in altında olup olmadığı dikkate alınarak belirlenmiştir. Değişkenlere ait P değerleri, terimlerin anlamlı olduğunu ve katkılarının modeli iyileştirdiğini göstermektedir. Geliştirilen modele ait katsayılar ve ilgili P değerleri Tablo 6'da sunulmuştur.

**Tablo 6.** Modelin analiz sonuçları

Model Terms	Slump		$f_c$ -3 gün	
	Coefficient	P-value	Coefficient	P-value
A	239.3	<0.0001	554.97	0.0008
B	-26.59	<0.0001	-4.35	<0.0001
C	-378.45	<0.0001	329.03	0.0504
AB	-14.31	0.0743	5.67	0.0784
AC	-	-	-	-
BC	28.49	0.0940	-	-
A <sup>2</sup>	-159.9	0.1608	-1049.97	<0.0001
B <sup>2</sup>	2.41	0.0006	-	-
C <sup>2</sup>	864.95	0.2703	-1437.59	<0.0001
Constant	60.62	-	-19.7	-

## 4. Sonuçlar ve Tartışma

### 4.1. ÇYDB'nin Taze Beton Özellikleri

Bu çalışmada ÇYDB'lerin taze ve sertleşmiş beton özelliklerini incelemek için 72 seri beton karışımı hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerden alınan verilerle yapılan analizler sonucunda matematiksel bir model geliştirilmiştir. Daha sonra geliştirilen modelin doğruluğunu test etmek amacıyla 9 kontrol serisi hazırlanmıştır. Bu kontrol serilerine ait slump değerleri ile modelin tahmin ettiği slump değerleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda modele ait BHO hesaplanmıştır. BHO değerleri, Denklem 1 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\text{BHO (\%)} = \frac{\text{Deney} - \text{Model}}{\text{Deney}} \times 100 \quad (1)$$

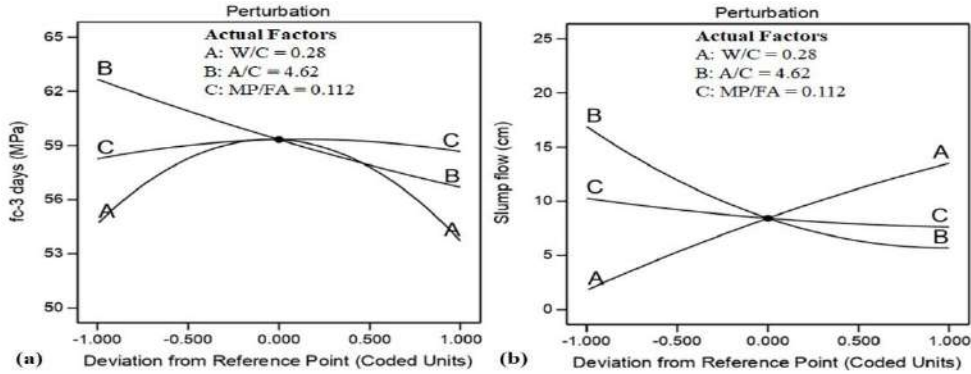
Geliştirilen modelin tahmin ettiği slump ve BHO değerleri Tablo 7'de verilmiştir. Geliştirilen model dikkate alındığında slump değerlerine ait BHO değerlerinin çoğu %10'un altında kalmaktadır. Böylece, geliştirilen modelin kontrol numunelerini tahmin etmede oldukça başarılı sonuçlar elde ettiği görülmektedir.

**Table 7.** Geliştirilen modele ait deney sonuçları

Sonuçlar	Karışım kodu	Deney	Model	ARD (%)
Slump (cm)	YDB-1	11	10.1	8.3
	YDB-2	11	10.4	5.4
	YDB-3	3	3.0	-1.6
	YDB-4	10	8.0	19.8
	YDB-5	9	9.0	-0.2
	YDB-6	15	14.3	4.5
	YDB-7	15	12.3	17.7
	YDB-8	14	13.6	3.1
	YDB-9	20	19.8	1.0
$f_c$ -3 gün (MPa)	YDB-1	55	54.9	0.2
	YDB-2	51.5	51.7	-0.5
	YDB-3	56.5	56.2	0.5
	YDB-4	58.5	59.6	-1.9
	YDB-5	60.7	59.7	1.6
	YDB-6	56.9	56.7	0.4
	YDB-7	60.2	61.5	-2.1
	YDB-8	62.9	61.6	2.1
	YDB-9	58.7	58.4	0.5

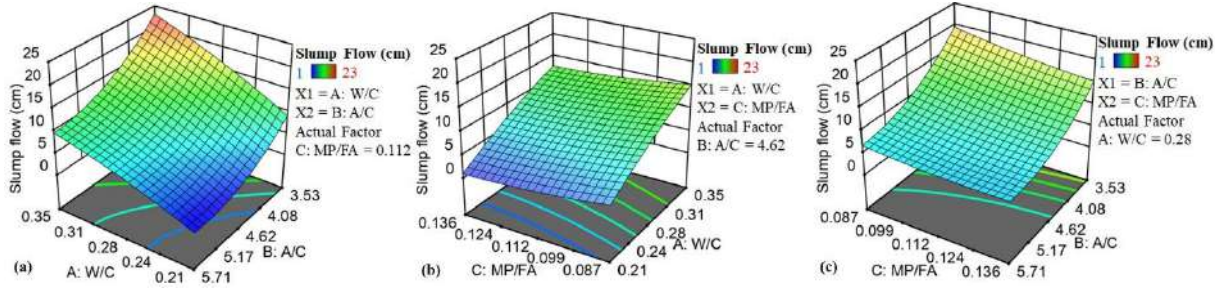
Geliştirilen modele ait değişkenlerin, yanıtlar üzerindeki sonuçlarını daha iyi açıklayabilmek için pertürbasyon eğrileri kullanılmaktadır. Değişkenlerin  $f_c$ -3 gün ve slump değerlerini tahmin etmek için geliştirilen modele ait değişkenlerin etkilerini açıklayan pertürbasyon eğrisi Şekil 3'te verilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde W/C oranı 0.21-0.28 aralığındayken  $f_c$ -3 gün değerlerinin arttığı, 0.28-0.35 aralığında ise  $f_c$ -3 gün değerlerinin azaldığı görülmektedir. Aynı zamanda A/C miktarı arttıkça  $f_c$ -3 gün değerlerinde azalma meydana gelmektedir. MP/FA oranı 0.087-0.112 aralığındayken  $f_c$ -3 gün değerleri artmakta, 0.112-0.136 aralığında ise  $f_c$ -3 gün değerleri azalmaktadır.

Slump değerine ait eğri incelendiğinde W/C oranı arttıkça slump değerlerinin arttığı görülmektedir. Aynı zamanda A/C ve MP/FA oranları arttıkça slump değerlerinde azalma meydana gelmektedir. Pertürbasyon eğrilerinde 0.28, 4.62 olarak verilen değerler, değişkenlere ait en düşük ve en yüksek değerlerin aritmetik ortalamasını ifade etmektedir. Bu değerler, pertürbasyon eğrisinde 0 noktasına karşılık gelen değerleri belirtmektedir.

**Şekil 3.** Geliştirilen modelin  $f_c$ -3 gün ve slump değerlerine ait pertürbasyon eğrileri

Modellere ait sonuçların en iyi şekilde görselleştirilmesi için üç boyutlu etki grafikleri kullanılmaktadır. Slump için geliştirilen modele ait üç boyutlu etki grafiği Şekil 4'te verilmiştir. Bu etki grafiği incelendiğinde W/C oranı arttıkça slump değerlerinin arttığı görülmektedir. Aynı zamanda A/C ve MP/FA oranları arttıkça slump değerinin azaldığı üç boyutlu etki grafiğinden açıkça görülmektedir. Bunun nedeni, A/C oranı arttıkça karışımdaki agrega miktarının artmasıdır. Böylece, karışımın su emme miktarı artmakta ve daha kuru bir karışım elde edilmektedir.





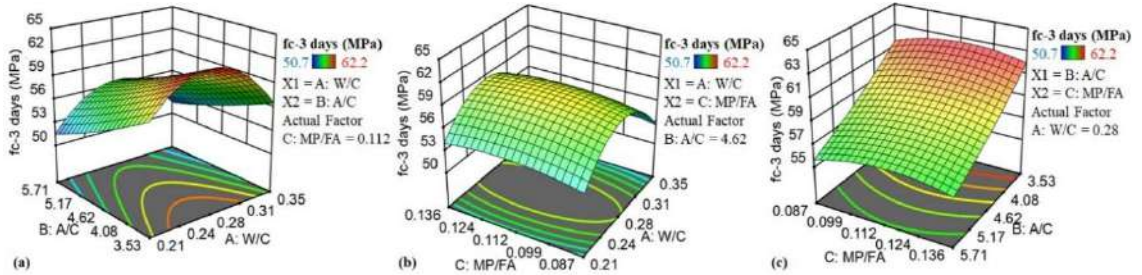
Şekil 4. Slump değerine ait üç boyutlu etki grafiği

#### 4.2. Basınç Dayanımı

Betonun kullanımının yaygınlaşması ile beraber, beton üzerine yapılan teknik ve akademik araştırmalar artmış ve yoğunlaşmıştır. Bu araştırmalar sonucunda, betonun kalitesini belirlemek için en etkin yolun betonun basınç dayanımını belirlemek olduğu ortaya konulmuştur [18]. Basınç dayanımı sonuçları; kalite kontrol, kalıp sıyırma süreleri, kür süreleri, araştırma çalışmaları ve betonun yerinde dayanımını belirlemek için kullanılabilir [19].

Geliştirilen modelin tahmin ettiği  $f_{c-3}$  gün ve BHO değerleri Tablo 7’de verilmiştir. Geliştirilen model dikkate alındığında  $f_{c-3}$  gün değerlerine ait BHO değerlerinin hepsi %5’in altında kalmaktadır. Böylece, geliştirilen modelin kontrol numunelerini tahmin etmede oldukça başarılı sonuçlar elde ettiği görülmektedir. Böylece, bu model kullanılarak erken yaş beton basınç dayanımının pratik ve ekonomik bir şekilde tespit edildiği de görülmüştür.

Geliştirilen modelde  $f_{c-3}$  gün değerlerini tahmin etmek için geliştirilen modele ait üç boyutlu etki grafikleri Şekil 5’te verilmiştir. Bu etki grafikleri incelendiğinde W/C miktarı 0.21-0.28 aralığındayken  $f_{c-3}$  gün değerleri artmakta, 0.28-0.35 aralığında azalmaktadır. Bunun en büyük nedeni W/C oranı 0.21’de betonun işlenebilirliğinin istenilen düzeyde olmamasıdır. Böylece, betonun dayanımı incelendiğinde betonun işlenebilirliğinin ne kadar önemli olduğu görülmüştür. Etki grafikleri incelendiğinde  $f_{c-3}$  gün değerleri için optimum W/C oranının 0.28 olduğu da görülmektedir. Aynı zamanda A/C miktarı azaldıkça  $f_{c-3}$  gün değerlerinin arttığı görülmektedir. Çünkü A/C miktarı azaldıkça çimento dozajı artmakta ve buna bağlı olarak da basınç dayanımı artmaktadır. Ayrıca, MP/FA oranı 0.087-0.112 aralığında  $f_{c-3}$  gün değerleri artmakta, 0.112-0.136 aralığında azalmaktadır. Bunun nedeni mermer tozunun optimum değere kadar basınç dayanımını artırması, optimum değerden sonra basınç dayanımı değerlerinde olumsuz etki yaratmasıdır.

Şekil 5.  $f_{c-3}$  gün değerine ait üç boyutlu etki grafiği

#### 5. Sonuçlar

Betonun kalitesini belirlemek için taze ve sertleşmiş beton özelliklerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle beton basınç dayanımı ve slump değerlerinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada farklı değişkenler kullanılarak RSM yardımıyla ÇYDB’lerin taze ve sertleşmiş beton özelliklerini yüksek doğrulukla tahmin etmek ve pratik bir karışım hesabı sunmak için matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen bu model hazırlanan 9 kontrol serisi üzerinde test edilmiş ve modelin etkinliği incelenmiştir. Yapılan bu çalışma ve modele ait sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Model’de W/C, A/C ve MP/FA değişkenleri dikkate alınmıştır. Bu değişkenlerin beraber kullanılmasının sebebi taze ve sertleşmiş beton özellikleri üzerinde oldukça etkili olmalarıdır. Ayrıca literatürde bu



değişkenlerin birlikte kullanılmasıyla üretilen ÇYDB'lere rastlanılmamıştır. Geliştirilen model incelendiğinde belirlilik katsayılarının slump ve  $f_c-3$  gün için 0.90'ın üzerinde çıkmıştır.

- Üretilen ÇYDB numunelerinin taze beton özelliklerini belirlemek için RSM tabanlı matematiksel bir model geliştirilmiştir. Bu model incelendiğinde betonların slump değerleri hesaplanırken ARD değerleri %20'ye kadar çıkmaktadır. Ancak, plastik ve akıcı kıvama sahip olan betonlarda ARD değerlerinin çoğu %10'un altında kalmaktadır. Günümüzde üretilen betonların çoğu plastik ve akıcı kıvama sahiptir. Bu nedenle, geliştirilen modelin uygulamada kullanılmasının önemli avantajlar sağlayacağı düşünülmektedir.
- Üretilen ÇYDB numunelerinin erken yaş dayanımlarını incelemek amacıyla 3. günde numuneler teste tabi tutulmuşlardır. Bu çalışmada  $f_c-3$  gün için bir RSM modeli geliştirilmiştir. Bu model yardımıyla erken yaş dayanımları yüksek doğrulukla tahmin edilebilmektedir. Özellikle kalıp alma sürelerinin, yani erken yaş dayanımının önemli olduğu büyük ve prestijli inşaatlarda bu modellerin kullanılmasının önemli kazançlar sağlayacağı düşünülmektedir.
- Bu çalışmada erken yaş beton basınç dayanımı ve slump değerlerini tahmin etmek ve pratik bir karışım hesabı sunmak için RSM tabanlı matematiksel bir model geliştirilmiştir. Bu model incelendiğinde BHO değerlerinin genelinin %10'un altında kaldığı görülmüştür. Böylece, RSM kullanılarak geliştirilen modelin kontrol numunelerini tahmin etmede oldukça başarılı sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Son yıllarda RSM'in beton teknolojisinde kullanımında giderek yaygınlaşmaktadır.

## Teşekkür

Yazarlardan, K.E.A., fikir sahibi, T.D. ve M.U. deneyleri gerçekleştirdi. K.E.A, T.D ve M.U. sonuçları yorumladı, T.D., makaleyi yazdı.

## Kaynaklar

- [1] A. C. I. C. 363, Report on High-Strength Concrete (ACI 363R-10). ACI, 2010.
- [2] İ. B. Topçu and A. Uğurlu, "TS 500/2000 Standardının Beton Açısından İncelenmesi," ECAS2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu, vol. 14, pp. 492–499, 2002.
- [3] D. Wang, C. Shi, Z. Wu, J. Xiao, Z. Huang, and Z. Fang, "A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties," Constr. Build. Mater., vol. 96, pp. 368–377, 2015.
- [4] V. S. Ramachandran, Concrete admixtures handbook: properties, science and technology. William Andrew, 1996.
- [5] A. Köken, M. A. Köroğlu, and F. Yonar, "Atık betonların beton agregası olarak kullanılabilirliği," 2008.
- [6] E. Güneysi, M. Gesoğlu, Z. Algin, and K. Mermerdaş, "Optimization of concrete mixture with hybrid blends of metakaolin and fly ash using response surface method," Compos. Part B Eng., vol. 60, pp. 707–715, 2014.
- [7] D. K. Ashish, "Concrete made with waste marble powder and supplementary cementitious material for sustainable development," J. Clean. Prod., vol. 211, pp. 716–729, 2019.
- [8] K. E. Alyamaç and A. B. Aydın, "Concrete properties containing fine aggregate marble powder," KSCE J. Civ. Eng., vol. 19, no. 7, pp. 2208–2216, 2015.
- [9] V. Singhal, R. Nagar, and V. Agrawal, "Use of marble slurry powder and fly ash to obtain sustainable concrete," Mater. Today Proc., vol. 44, pp. 4387–4392, 2021.
- [10] Z. Wu, C. Shi, K. H. Khayat, and L. Xie, "Effect of SCM and nano-particles on static and dynamic mechanical properties of UHPC," Constr. Build. Mater., vol. 182, 2018.
- [11] Ö. ve U. K. Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar Bileşim, "TS EN 197-1," Turkey, 2012.
- [12] O. SOYKAN, Ö. Cengiz, and Ö. Cenk, "Arduvaz ve Andezit'in Beton Agregası Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması," Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg., vol. 19, no. 1, 2015.
- [13] S. Ray, M. Haque, T. Ahmed, and T. T. Nahin, "Comparison of artificial neural network (ANN) and response surface methodology (RSM) in predicting the compressive and splitting tensile strength of concrete prepared with glass waste and tin (Sn) can fiber," J. King Saud Univ. Sci., 2021.
- [14] K. E. Alyamac, E. Ghafari, and R. Ince, "Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method," J. Clean. Prod., vol. 144, pp. 192–202, 2017.
- [15] R. H. Myers, D. C. Montgomery, and C. M. Anderson-Cook, Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments. John Wiley & Sons, 2016.
- [16] S. Pyo and H. K. Kim, "Fresh and hardened properties of ultra-high performance concrete incorporating coal bottom ash and slag powder," Constr. Build. Mater., vol. 131, 2017.
- [17] "Design-expert software." Inc., S.-E, Minneapolis, MN, USA., 2016.
- [18] D. A. Abrams, "Water-cement ratio as a basis of concrete quality," in Journal Proceedings, 1927, vol. 23, no. 2, pp. 452–457.
- [19] R. Jones, Non-destructive testing of concrete. University Press, 1962.

## Regresyon Yöntemlerine Dayalı Suç Tespit Analizi Karşılaştırması Elazığ İli Örneği

Abdulkadir BİLEN<sup>1\*</sup>, Ahmet Bedri ÖZER<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Emniyet Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye

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

\*<sup>1</sup> abdulkadir.bilen82@gmail.com, <sup>2</sup> bozer@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 27/07/2021;

Kabul/Accepted: 10/10/2021)

**Öz:** Ülkelerin ve toplumların önce gelen sorunlarından biri olan suçu önlemek, devletin ilk görevleri arasındadır. Bu suçların önemli bir türü siber suçtur. Siber suçlarla mücadele edebilmek için öncelikle bu suçun nasıl gerçekleştiğini ve yöntemini bilmek gerekmektedir. Siber saldırıları önceden tahmin etmek kişilerin ve kurumların uğrayacağı zararları azaltacaktır. Bu tahminleri yapabilmek için lineer regresyon, polinom regresyon, ridge regresyon ve lasso regresyon yöntemlerinden oluşan dört farklı model uygulanmıştır. Elazığ ilinde işlenen siber suçların öznitelikleri çıkarılmış ve bu dört modele dayalı tahminler yapılmıştır. Ortalama mutlak hata (MAE), ortalama kare hatası (MSE), kök ortalama kare hatası (RMSE) ve R Square değerlendirme kriterlerine göre modeller karşılaştırılmıştır. Yapılan uygulama neticesinde 0.79 doğruluk oranıyla kendi içinde en iyi yöntem polinom regresyon sonuç vermiştir. Diğer yöntemlerin başarı oranı çok düşük sonuç vermiştir. Elde edilen sonuçlar suç analizine ve suçla mücadeleye bir ön adım olacaktır.

**Anahtar kelimeler:** Yapay Zekâ, Regresyon, Suç Analizi, Siber Suç.

### Comparison of Crime Detection Analysis Based on Regression Methods The Case of Elazığ

**Abstract:** Preventing crime, which is one of the foremost problems of countries and societies, is among the first duties of the state. An important type of these crimes is cybercrime. To fight against cybercrimes, it is necessary to know how this crime took place and its method. Predicting cyber-attacks will reduce the damage to individuals and institutions. To make these estimations, four different models consisting of linear regression, polynomial regression, ridge regression and lasso regression methods have been applied. Attributes of cybercrimes committed in Elazığ province were extracted and predictions were made based on these four models. Models were compared according to mean absolute error (MAE), mean square error (MSE), root mean square error (RMSE) and R Square evaluation criteria. As a result of the application, polynomial regression was the best method with an accuracy rate of 0.79. The success rate of other methods gave extremely low results. The results obtained will be a preliminary step towards crime analysis and the fight against crime.

**Key words:** Artificial Intelligence, Regression, Crime Analysis, Cybercrime.

### 1. Giriş

Suç toplumların ve ülkelerin önde gelen problemlerinden biridir. Suçun işlenmesi nüfus, eğitim, maddi durum ve işsizlik gibi faktörlere göre değişebilmektedir [1]. Suç oranlarının ve çeşitliliğinin artması suç örüntüsünü değiştirmekte ve suçun önlenmesine ilişkin analiz çalışmalarını zorlaştırmaktadır [2]. Suçla ilgili tüm veriler bazen düzenli veri tabanlarında bazen sosyal medyada bazen de diğer depolama birimlerinde tutulmaktadır. Bu verileri toplamak ve sonrasında anlam çıkarmak için analiz etmek oldukça zorlu bir süreçtir. Suç analizi yapılırken istatistiksel yaklaşım, uzman bilgi yaklaşımı, veri madenciliği teknikleri, kümeleme, birliktelik kuralı madenciliği ve makine öğrenimi gibi yöntemler bulunmaktadır [3]. Suç analizi, suçu tahmin etmek veya suç kayıtlarına göre suçlu grupları oluşturmak için gerçekleştirilmektedir. Elde edilen veriler çeşitli öz işleme süreçlerinden geçirildikten sonra metin içeriği, suç faktörleri, suç özellikleri, suçun coğrafi konumu vb. şeklinde olabilecek öznitelikler çıkarılmaktadır. Daha sonra bu yöntemlerle tahmin ya da analiz işlemi yapılmaktadır [4]. Suçlar dolandırıcılık tespiti, trafik şiddeti, şiddet suçu, cinsel suç, siber suç gibi bazı kategorilere ayrılmaktadır. Bu suçlar içerisinde siber suç analizi kolluk kuvvetleri için önemli bir sorumluluktur [5]. Yine yüksek doğrulukta bir suç tahmini yapabilmek için suçun doğasını anlamak önemlidir [6]. Matlhare ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada Botswana üniversitesindeki gençlerin siber suçların farkında olduğunu fakat bu farkındalığın yetersiz olduğu ortaya koyulmuştur. Yine siber suçların düşük düzeyde tespit edilmesinden kaynaklı olarak bu suçlarla mücadele ederken kanun koyucular ve kamu-özel sektör iş birliğinin önemi vurgulanmıştır [7].

\* Sorumlu yazar: [abdulkadir.bilen82@gmail.com](mailto:abdulkadir.bilen82@gmail.com). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0003-2359-8829, <sup>2</sup> 0000-0002-8005-7386

Suç analiz ederken ve çeşitli tahminler yapılırken makine öğrenmesi yöntemlerin başarılı olduğu görülmüştür. Bhuriya ve arkadaşları tarafından borsa yatırımcılarına yardımcı olmak amacıyla 5 farklı regresyon yöntemi kullanarak hisse senedi fiyatlarını tahmin etmişlerdir ve lineer regresyon yöntemi en başarılı olarak bulunmuştur [8]. Obagbuwa ve Abidoye tarafından Kaggle isimli web sitesinden Güney Afrika'da işlenen 27 farklı kategorideki suç verisi elde edilmiştir. Doğrusal regresyon yöntemi kullanılarak suç tahminine dayalı analiz yapılmıştır ve Güney Afrika makamlarının ve güvenlik kurumlarının suç eğilimleri hakkında fikir sahibi olmaları sağlanmıştır [9]. Awal ve arkadaşları tarafından Bangladeş polisinin web sitesinden alınan veriler lineer regresyon yöntemi ile model oluşturularak eğitilmiştir. Soygun, cinayet, kadın ve çocuk şiddeti, adam kaçırmaya, hırsızlık ve diğer suçlarla ilgili tahminler yapılmıştır, çalışmanın sonucunda nüfus artışıyla suçların da arttığı gözlemlenmiştir. Suç eğilimlerini tahmin etme, önleme veya çözme konusunda kolluk birimlerine yardımcı olmak amaçlanmıştır [10].

Siber güvenlik, yük tahmininde araştırmaya yeni bir boyut kazandırmıştır ve Luo ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada geçmiş verilere kötü niyetli bir şekilde yanlışlık dayatma saldırısı ele alınmıştır. Yük tahmini yapmak için üç sağlam regresyon modeli önerilmiştir. Yapılan deneyler neticesinde karşılaştırılan modeller arasında en iyi yöntem sağlam regresyon olmuştur. Siber uzaydaki diğer veri bütünlüğü saldırı türleri altında yük tahmini için yeni teori ve metodolojilerin araştırılmasına yol açabilecektir [11]. Qian ve arkadaşları tarafından örüntü sınıflandırması için yeni bir ikili sağlam regresyon modeli önerilmiştir. LFW yüz görüntüsü, FRGC yüz görüntüsü, CUHK yüz çizimi, PolyU Palm, NUST-RF yüz görüntüsü ve Caltech 101 olmak üzere altı kamuya açık veri tabanı üzerinde kapsamlı deneyler gerçekleştirmişlerdir ve önerilen modelin son teknoloji regresyon tabanlı sınıflandırma yöntemlerine göre daha başarılı olduğu görülmüştür [12].

Kibria ve Banik tarafından yapılan çalışmada çoklu doğrusal bağlantı probleminin çözümü için beş ridge tahmincisi için kapsamlı bir araştırma yapılmıştır. Simülasyonların ve sayısal örneklerin sonuçlarına dayanılarak tahmin karşılaştırmaları yapılmıştır [13]. Pereira ve arkadaşları tarafından 2010-2012 yıllarında konaklama endüstrisine ait 401 iflas eden ve 2032 iflas etmeyen firmadan oluşan bir veri seti ile çalışma yapılmıştır. Şirket iflasını tahmin etmek için ampirik modeller geliştirmek için birçok nicel yöntem ve farklı değişken seçim teknikleri kullanılmıştır. SPSS'de uygulanan kademeli yöntemlere kıyasla, ridge ve lasso regresyon modellerinin eğitim setinde daha ağır ağırlıkla görünen bağımlı değişken kategorisini tercih etme eğiliminde olduğunu göstermiştir [14].

Wang ve arkadaşları tarafından lasso regresyon algoritmasına bağlı gemi yakıt tüketimini tahmin eden bir çerçeve önerilmiştir. Gemilerin operasyonel verileri ve hava durumu verileri kullanılmıştır. Geleneksel yöntemlerden daha iyi performans gösteren lasso regresyon aynı zamanda yorumlanabilirlik, genelleme yeteneği ve sayısal kararlılık gibi özelliklere sahiptir [15]. Reid ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada çeşitli varyans tahmincileri gözden geçirilerek yapılan simülasyon neticesinde geniş bir seyreklik ve sinyal gücü ayarları aralığında iyi bir performans göstermiştir [16]. Alves ve arkadaşları tarafından kentsel metrikleri kullanarak regresyon yöntemine dayalı bir suç analiz tahmini yapılmıştır [17].

Yapılan çalışmalarda özellikle suç analizinde ve diğer çalışmalarda regresyon yöntemlerinin başarısı görülmüştür. Suçu analiz ederken diğer makine öğrenmesi yöntemleri de ciddi başarı gösterdiğinden daha önce aynı verilerle yapılan çalışma ile [18] karşılaştırılmıştır. Çalışmada özellikle regresyon yöntemlerinin analizdeki başarısının önceki çalışma ile karşılaştırılması amaçlanmaktadır. Yine en iyi performans gösteren regresyon yöntemini belirlemektir.

İlk bölümde daha önce yapılan çalışmalar incelenmiştir, ikinci bölümde kullanılan yöntem detayları ve veri seti tanıtılmıştır. Üçüncü bölümde sonuçlar tartışılmış ve son bölümde çalışmanın sonuçları verilmiştir.

## 2. Materyal ve Yöntem

Çalışmada Elazığ ilinde işlenen siber suç dataları veri seti olarak kullanılmıştır. Veri seti elde edilirken tüm siber suç detayları incelenmiş ve içerisinden gerekli olmayan alanlar çeşitli veri bilimi yöntemiyle temizlenmiştir. Veri setinde suç, cinsiyet, yaş, gelir, meslek, medeni durum, eğitim, saldırı şekli, saldırı zararı ve saldırı yöntemi öznitelikleri kullanılmıştır. Tüm algoritmalar için verinin %80'i eğitim, %20'si test için ayrılmıştır. Regresyon yöntemlerinin kullanılmasının sebebi, yapılandırılmış ve yapılandırılmamış birçok veri desenini tanıması, suç analizinde başarılı olması, karmaşık veriler arasındaki ilişkileri ortaya çıkarmasıdır.

### 2.1. Lineer Regresyon (Linear Regression)

Lineer regresyon, karşılıklı bağımlılığa sahip iki rastgele değişken arasındaki doğrusal ilişkinin ölçümüdür. Regresyon analizi, bir veya daha fazla yanıt değişkeni ile tahmin ediciler arasındaki ilişkiyi keşfetme yöntemidir.

$y$  ile gösterilen bağımlı değişkenler, açıklanan değişkenler, tahmin değerleri veya gerilemeler olarak adlandırılabilir.  $x_1, x_2, \dots, x_p$  ile gösterilen değişkenler açıklayıcı değişken, kontrol değişkeni ya da regresör olarak adlandırılmaktadır. Basit doğrusal regresyon, iki değişken arasındaki doğrusal ilişkiyi modellemek içindir. Bunlardan biri bağımlı değişken  $y$ , diğeri ise bağımsız değişken  $x$ 'tir. Örneğin, basit doğrusal regresyon, kas gücü ( $y$ ) ile yağsız vücut kütlesi ( $x$ ) arasındaki ilişkiyi modelleyebilmektedir. Basit regresyon modeli genellikle Denklem 1'deki biçimde yazılmaktadır [19].

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon, \quad (1)$$

Burada  $y$  bağımlı değişkendir,  $\beta_0$   $y$  kesişimidir,  $\beta_1$  regresyon çizgisinin gradyanı veya eğimidir,  $x$  bağımsız değişkendir ve  $\varepsilon$ , rastgele hatadır. Basit lineer regresyonda genellikle  $\varepsilon$ , hatasının  $E(\varepsilon) = 0$  ve sabit bir varyans  $Var(\varepsilon) = \sigma_2$  ile normal olarak dağıldığı varsayılmaktadır. Bir bağımlı değişkeni ve birden fazla bağımsız değişkeni olan doğrusal bir regresyon modeli çoklu doğrusal regresyondur. Çoklu doğrusal regresyonda, yanıt değişkeninin model parametrelerinin doğrusal bir fonksiyonu olduğu ve modelde birden fazla bağımsız değişken olduğu varsayılmaktadır. Çoklu doğrusal regresyon modelinin genel formülü Denklem 2'deki gibidir [19].

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p + \varepsilon, \quad (2)$$

Burada  $y$  bağımlı değişken,  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$  regresyon katsayıları ve  $x_1, x_2, \dots, x_p$  modeldeki bağımsız değişkenlerdir. Klasik regresyon ayarında genellikle hata terimi  $\varepsilon$ 'nin  $E(\varepsilon) = 0$  ve sabit bir varyans  $Var(\varepsilon) = \sigma_2$  ile normal dağılımı takip ettiği varsayılmaktadır.

Basit doğrusal regresyon, bir bağımlı değişken ile bir bağımsız değişken arasındaki doğrusal ilişkiyi araştırırken, çoklu doğrusal regresyon, bir bağımlı değişken ile birden fazla bağımsız değişken arasındaki doğrusal ilişkiye odaklanmaktadır. Çoklu doğrusal regresyon, ortak doğrusallık, varyans artırıcı, regresyon teşhisinin grafiksel gösterimi ve regresyon aykırı değerinin ve etkili gözlemin tespiti gibi basit doğrusal regresyondan daha fazla konuyu içermektedir [19].

## 2.2. Polinom Regresyon (Polynomial Regression)

Polinom regresyon, yalnızca bağımsız bir  $X$  değişkeni ile çoklu regresyonun özel bir durumudur. Tek değişkenli polinom regresyon modeli aşağıdaki formüldeki gibi ifade edilmektedir. Burada  $k$  polinomun derecesidir. Polinomun derecesi modelin sırasındadır. Etkin şekilde bu,  $X_1 = X$ ,  $X_2 = X^2$ ,  $X_3 = X^3$  değişkenleri ile çoklu bir modele sahip olmakla aynıdır ve formülü Denklem 3'te verilmiştir [20].

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 x_i^2 + \beta_3 x_i^3 \dots + \beta_k x_i^k + \varepsilon_i, \text{ for } i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

## 2.3. Ridge Regresyon

Ridge regresyon, bağımlı bir değişken ile bazı açıklayıcı değerler arasındaki doğrusal bir ilişkiyi modelleyen istatistiksel bir yöntemdir. Öneri sistemleri gibi birçok öğrenme algoritmasında önemli bir rol oynayan bir yapı taşıdır. Bu kullanıcı profillerini geri bildirim yoluyla öğrenmektedir ve kullanıcının belirgin bir sorgu yapmasına gerek kalmadan ilgi alanında yer almaktadır. Regresyon tekniği, toplanan bir dizi veriyi analiz etmektedir ve öğenin kullanıcı ile ne kadar ilgili olduğunu belirlemek için bunları kompakt formda özetlemektedir. Diğer geleneksel makine öğrenimi algoritmalarına benzer şekilde ridge regresyon modeli oluştururken verilerin düz metin formunda olması gerekmektedir. Bu, çevrimiçi hizmetle meşgul olan kullanıcının regresyon için hizmet sağlayıcıyla sahip olduğu verilerini paylaşması gerektiği anlamına gelmektedir. Ancak paylaşılan veriler kişisel bilgileri içeriyorsa, kullanıcı bunu yapmayı reddedebilmektedir [21].

$1 \leq u \leq N$  için, girdi dizisi  $x_u = (x_{u,1}, x_{u,2}, \dots, x_{u,d}) \in \mathbb{R}^d$  ve buna karşılık gelen  $y_u \in \mathbb{R}$  çıktı olarak verilmektedir. Çoklu doğrusal regresyon problemi,  $w = (w_1, w_2, \dots, w_d) \in \mathbb{R}^d$ 'yi  $y = Xw$  olarak öğrenmektedir, burada  $X = [x_{u,j}]_{N \times d}$  ve  $y = [y_u]_{N \times 1}$  olarak ifade edilir.  $y = Xw$ 'yi karşılayan  $w$  parametresi mevcut olmayabilir. Bu nedenle, ridge regresyon yöntemi, Denklem 4'teki amaç fonksiyonunu  $E: \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$  en aza indirerek  $w$ 'nin en yakınlığını tahmin etmektedir [21].

$$E(w) := \|y - Xw\|^2 + \alpha \|w\|^2 \quad (4)$$

Pozitif  $\alpha$  için, modellerin fazla takılmasını önlemek için  $\alpha\|w\|^2$  düzenleme terimi kullanılır. W.r.t'nin türevi alındığında;  $w$ , formülün minimizasyonu doğrusal sistemi çözerek hesaplanmaktadır.  $Aw = b$ , burada  $A = X^T X + \alpha I$  ve  $b = X^T y$  olarak ifade edilmektedir.  $\alpha \geq 0$  olduğunda,  $A$  matrisinin simetrik ve pozitif tanımlı olduğuna dikkat etmek gerekmektedir [21].

## 2.4. LASSO Regresyon

Regresyon modelleri genellikle aşırı risk öngörerek özellikle düşük performans gösterme eğilimindedir. Bu sorunu çözmek için düzenleme yapan lasso regresyon uygun bir tercihtir. Öznitelik seçimini otomatik olarak yapar ve çıktı olarak da ayırık bir model vermektedir. Tahmin hatasını en aza indiren modeli oluşturan değişkenleri ve karşılık gelen regresyon katsayılarını belirlemeyi amaçlamaktadır. Lasso regresyonu bazı ayarlarda standart yöntemlerden daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Tek tek değişkenlerin katkısının tahmin ve yorumunun doğruluğuna değil, en iyi kombine tahmine odaklandığı için regresyon katsayılarının bağımsız risk faktörleri açısından güvenilir bir şekilde yorumlanamamasıdır [22].

## 2.5. Değerlendirme Metrikleri

Ortalama kare hatası (Mean Squared Error-MSE), rastgele hata teriminin  $\sigma^2$  varyansının tarafsız bir tahminidir ve Denklem 5 ile tanımlanmaktadır. Burada  $y_i$  gözlemlenen değerlerdir ve  $\hat{y}_i$ ,  $i$ 'nci durum için  $Y$  bağımlı değişkenin uygun değerleridir. Ortalama kare hatası, ortalamanın serbestlik derecesine bölünerek yapıldığı ortalama kare hatası olduğu için, MSE, regresyonun verilere ne kadar iyi uyduğunun bir ölçüsüdür. MSE'nin karekökü, rastgele hata teriminin standart sapması  $\sigma$ 'nın bir tahmincisidir. Kök ortalama kare hatası (Root Mean Squared Error-RMSE)  $RMSE = \sqrt{MSE}$ ,  $\sigma$ 'nın tarafsız tahmincisi değildir, ancak yine de iyi bir tahmin edicidir. MSE ve RMSE, regresyondaki hataların boyutunun ölçüleridir ve regresyon uyumunun açıklanan bileşeni hakkında bir işaret vermemektedir [20].

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - (k - 1)} \quad (5)$$

Ortalama mutlak hata (Mean Absolute Error-MAE), göreceli performansı ölçtüğü için farklı ögeler veya ürünler arasındaki tahminlerin doğruluğunu karşılaştırmak için en kullanışlı ölçümdür. Nicel tahmin yöntemlerinde yaygın şekilde kullanılan bir doğruluk ölçümüdür. Denklem 6'da tanımlanmaktadır. MAE hesaplanan değeri 0,1'den az ise, mükemmel doğrulukta tahmin, 0,1 – 0,2 arasında iyi derecede tahmin, 0,2 – 0,5 arasında kabul edilebilir tahmin ve 0,5'ten fazla yanlış tahmin olarak yorumlanmaktadır [20].

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (6)$$

Çoklu regresyonun  $R^2$ 'si, determinasyon katsayısının Denklem 7'de tanımlandığı gibi basit regresyona benzerdir. Burada  $\bar{y}$ ,  $Y$  değişkeninin aritmetik ortalamasıdır.  $R^2$ , açıklayıcı değişken  $X$  tarafından açıklanan  $Y$  yanıt değişkenindeki varyasyon yüzdesini ölçer. Dolayısıyla, regresyon modelinin verilere ne kadar iyi uyduğunun önemli bir ölçüsüdür.  $R^2$ 'nin değeri her zaman sıfır ile bir arasındadır ( $0 \leq R^2 \leq 1$ ). 0,9 veya üzeri bir  $R^2$  değeri çok iyidir, 0,8'in üzerindeki bir değer iyidir ve 0,6 veya üzeri bir değer bazı uygulamalarda tatmin edici olabilmektedir, ancak bu gibi durumlarda tahmindeki hataların nispeten yüksek olabileceği gerçeğinin farkında olmak gerekmektedir.  $R^2$  değeri 0,5 veya altında olduğunda, regresyon verilerdeki varyasyonun yalnızca %50 veya daha azını açıklar bu nedenle tahmin zayıf olmaktadır [20].

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (7)$$

## 3. Bulgular ve Tartışma

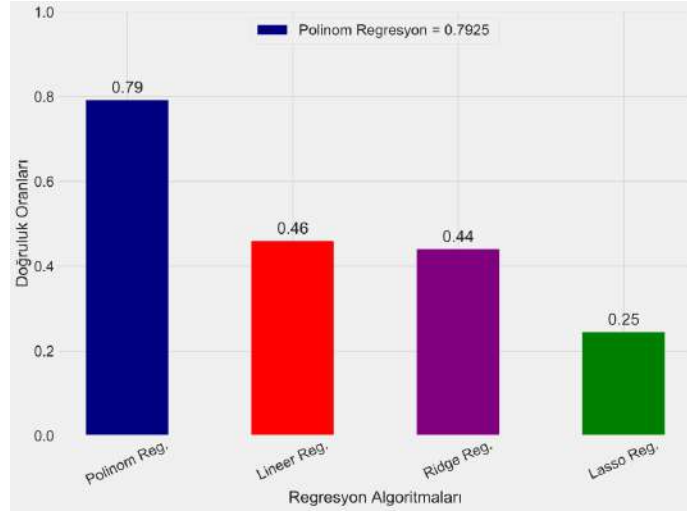
Çalışmada Python 3.7 programıyla lineer regresyon, polinom regresyon, ridge regresyon, lasso regresyon yöntemlerini kullanarak dört farklı modelde saldırı yöntemi tahmin edilmiştir. Eğitim aşamasında öznitelik olarak suç, cinsiyet, yaş aralığı, gelir, meslek, medeni hal, eğitim, saldırı şekli, saldırı amacı ve fail durumu kullanılmıştır.

Model sonuçları, Ortalama mutlak hata (MAE), Ortalama kare hatası (MSE), Kök ortalama kare hatası (RMSE), R Square kullanılarak değerlendirilmiştir ve sonuçlar Tablo 1’de gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Model sonuçları

Model	MAE	MSE	RMSE	R Square	Cross Validation
1 <b>Lineer Regresyon</b>	1,2159	2,2475	1,4991	0,4602	-0,8280
2 <b>Polinom Regresyon</b>	0,6563	0,8640	0,9295	0,7925	0,0000
3 <b>Ridge Regresyon</b>	1,2622	2,3274	1,5255	0,4410	-0,8254
4 <b>Lasso Regresyon</b>	1,5699	3,1425	1,7727	0,2452	-0,3489

Regresyon modellerinde R square açısından lineer, ridge ve lasso regresyonların başarı oranı çok düşük olmakla birlikte en başarılısı polinom regresyon olmuştur. Ancak polinom regresyonunda başarı oranı da tatmin edici değildir. MAE, MSE ve RMSE değerleri açısından bakıldığında 0’a en yakın sonuçlar polinom regresyon tarafından elde edilmiştir. Diğer regresyon yöntemlerinde başarı oranlarının düşük olduğu ve hata oranının yüksek olduğu gözlemlenmiştir. R Square karşılaştırması Şekil 1’de grafiksel olarak gösterilmiştir.

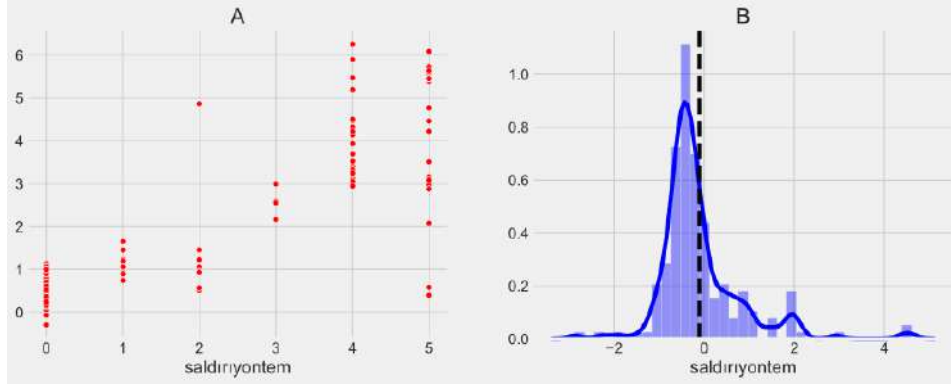


**Şekil 1.** Algoritmaların doğruluk karşılaştırması

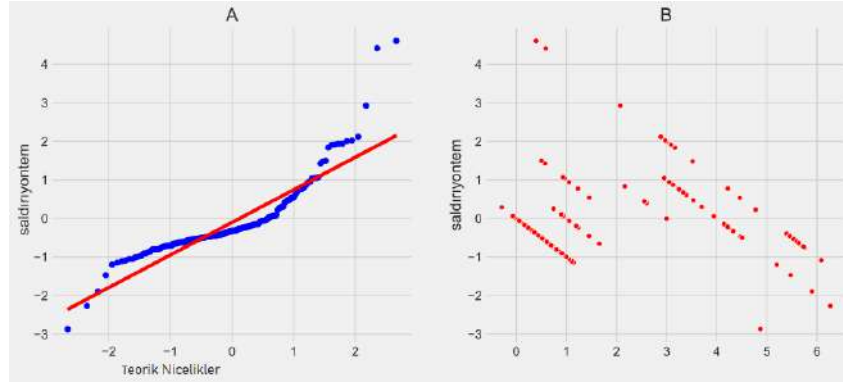
Regresyonda bağımlı ve bağımsız değişken arasındaki ilişki doğrusal olmaktadır, bu da gerçek değer ile tahmin edilen değer arasındaki farktan anlaşılmaktadır. Artık hata grafiği normal dağıtılmalı ve olabildiğince 0’a yakın olmalıdır. Tüm değişkenlerin çok değişkenli normal olması gerekmektedir ve Q-Q grafiği ile kontrol edilmektedir. Varyans enflasyon faktörü (Variance Inflation Factor-VIF) bağımsız değişkenler arasındaki kolerasyonu ve bu kolerasyonun gücünü tanımlamaktadır. Eşvaryanslılık durumunda artıklar regresyon çizgisi boyunca eşit olması gerekmektedir. Şekil 2 (A) da gösterildiği gibi polinom regresyon modeli gerçek ve tahmin verileri nispeten başarılı olduğunu yeterince tatmin edici olmadığını göstermiştir. Şekil 2 (B) de görüldüğü üzere artık grafiği sağa çarpıktır.

Şekillerde saldırı yöntemi türleri ”0 = Hack Araçları veya Zararlı Yazılım Kullanarak”, “1 = Kart Kopyalama, Üretim Cihazlarını Kullanarak”, “2 = Phising (ortalama) Saldırısı Kullanarak”, “3= Sahte Alışveriş Sitesi Oluşturarak”, “4= Sosyal Medyadaki Herkese Açık Verilerini Alarak”, “5= Sosyal Mühendislik Kullanarak” şeklinde ifade edilmektedir. Şekil 3 (A) daki Q-Q grafiğinde 2’den büyük değerler artış eğilimindedir. Şekil 3 (B) de değişen varyans sergilediğinden belli noktadan sonra hata artmaktadır. VIF değeri 5’ten küçük olduğu için çoklu bağlantı zayıf olarak tespit edilmiştir.

Daha önce yapılan çalışma [18] ile karşılaştırıldığında Lineer, Polinom, Lasso ve Ridge Regresyon modellerinin daha başarısız olduğu yeni modelin yeterince başarı elde edemediği görülmüştür.



**Şekil 2. A)** Doğrusallık Kontrolü (Gerçek & Tahmin Değerleri) **B)** Artık Normalliği Kontrolü & Ortalama Artık Hata



**Şekil 3. A)** Çok Değişkenli Normallik Kontrolü (Q-Q Grafiği) **B)** Eşvaryanslık Kontrolü (Artık & Tahmin)

#### 4. Sonuçlar

Araştırmadaki temel amaç suç istatistiğinden elde edilen siber saldırıları analiz ederek, saldırı yönteminin ne olacağını ve regresyon yöntemlerinin başarı oranını tespit etmektir. Suç analizinde lineer regresyon, polinom regresyon, ridge regresyon ve lasso regresyon olmak üzere dört farklı tahmin yöntemi kullanılmıştır. Uygulanan modelde lineer, ridge ve lasso regresyon doğruluk oranlarının çok düşük olduğundan başarısız olduğu tespit edilmiştir. Polinom regresyon yönteminde ise 0.79 R Square doğruluk oranıyla 4 yöntem arasında en başarılı yöntem olduğu görülmüş olsa da daha önce benzer yapılan çalışmaya [18] göre başarı oranı düşük kalmıştır. Yapılan çalışmada polinom regresyon modelinin geliştirilmesi halinde suç analizi ve tahminlerde kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Gelecek çalışmalar için hibrit yöntemler geliştirilerek suç ve suçlu analizinde kullanılabilecektir.

#### Teşekkür

Bu çalışmadaki veriler Elazığ Valiliği ve Elazığ İl Emniyet Müdürlüğünden alınan izin neticesinde kullanılmıştır ve vermiş oldukları izin ve destekler için teşekkür ederiz.

#### Kaynaklar

- [1] Kim, S., Joshi, P., Kalsi, P. S., & Taheri, P. Crime analysis through machine learning. In 2018 IEEE 9th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON) pp. 415-420. IEEE.
- [2] Yadav, S., Timbadia, M., Yadav, A., Vishwakarma, R., & Yadav, N. (2017, April). Crime pattern detection, analysis & prediction. In 2017 International conference of Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA) (Vol. 1, pp. 225-230). IEEE.

- [3] Sujatha, R., S., Ezhilmaran, A. A Comparative Study On Prediction Of Crime Patterns, *International Journal of Pharmacy and Technology* 2016; 8(4):5104-5117
- [4] David, H., & Suruliandi, A. (2017). Survey On Crime Analysis And Prediction Using Data Mining Techniques. *ICTACT journal on soft computing*, 7(3).
- [5] Prabakaran, S., & Mitra, S. (2018, April). Survey of analysis of crime detection techniques using data mining and machine learning. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1000, No. 1, p. 012046). IOP Publishing.
- [6] Ingilevich, V., & Ivanov, S. (2018). Crime rate prediction in the urban environment using social factors. *Procedia Computer Science*, 136, 472-478.
- [7] Matlhare, B., Faimau, G., & Sechele, L. Risk Perception And Knowledge Of Cybercrime And Its Preventive Strategies Among Youth At The University Of Botswana.
- [8] Bhuriya, D., Kaushal, G., Sharma, A., & Singh, U. Stock market predication using a linear regression. In 2017 international conference of electronics, communication and aerospace technology (ICECA) 2017; Vol. 2, pp. 510-513.
- [9] Obagbuwa, I. C., & Abidoye, A. P. South Africa Crime Visualization, Trends Analysis, and Prediction Using Machine Learning Linear Regression Technique. *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*, 2021.
- [10] Awal, M. A., Rabbi, J., Hossain, S. I., & Hashem, M. M. A. Using linear regression to forecast future trends in crime of Bangladesh. In 2016 5th International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV) pp. 333-338.
- [11] Luo, J., Hong, T., & Fang, S. C. Robust regression models for load forecasting. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2008; 10(5), 5397-5404.
- [12] Qian, J., Zhu, S., Wong, W. K., Zhang, H., Lai, Z., & Yang, J. Dual robust regression for pattern classification. *Information Sciences*, 2021; 546, 1014-1029.
- [13] Kibria, B. M., & Banik, S. Some ridge regression estimators and their performances, 2020.
- [14] Pereira, J. M., Basto, M., & da Silva, A. F. The logistic lasso and ridge regression in predicting corporate failure. *Procedia Economics and Finance*, 2016; 39, 634-641.
- [15] Wang, S., Ji, B., Zhao, J., Liu, W., & Xu, T. Predicting ship fuel consumption based on LASSO regression. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018; 65, 817-824.
- [16] Reid, S., Tibshirani, R., & Friedman, J. A study of error variance estimation in lasso regression. *Statistica Sinica*, 2016; 35-67.
- [17] Alves, L. G., Ribeiro, H. V., & Rodrigues, F. A. Crime prediction through urban metrics and statistical learning. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2018;505, 435-443.
- [18] Bilen, A., & Özer, A. B. Cyber-attack method and perpetrator prediction using machine learning algorithms. *PeerJ Computer Science*, 2021; 7, e475.
- [19] Yan, X., & Su, X. G. Linear regression analysis. *Theory and Computing*, 2003.
- [20] Ostertagová, E. Modelling using polynomial regression. *Procedia Engineering*, 2012; 48, 500-506.
- [21] Chen, Y. R., Rezapour, A., & Tzeng, W. G. Privacy-preserving ridge regression on distributed data. *Information Sciences*, 2018; 451, 34-49.
- [22] Ranstam, J., & Cook, J. A. LASSO regression. *Journal of British Surgery*, 2018; 105(10), 1348-1348.





## Bitkilerdeki Yaprak Hastalığı Tespiti için Derin Özellik Çıkarma ve Makine Öğrenmesi Yöntemi

Orhan YAMAN<sup>1\*</sup>, Türker TUNCER<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Adli Bilişim Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

\*<sup>1</sup> orhanyaman@firat.edu.tr, <sup>2</sup> turkertuncer@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 13/08/2021;

Kabul/Accepted: 30/10/2021)

**Öz:** Derin öğrenme yöntemlerinin gelişmesi akıllı tarım uygulamalarını olumlu yönde etkilemiştir. Ağaç ve bitki yapraklarındaki hastalıkların tespit edilmesi, meyve ve sebze rekoltelevlerinin tahmin edilmesi gibi birçok alanda derin öğrenme ve makine öğrenmesi kullanılmaktadır. Bu çalışmada derin öğrenme ve özellik seçme yöntemi kullanılarak yaprak hastalığı tespit edilmiştir. Önerilen yöntem için ceviz yapraklarından oluşan 726 görüntü toplanmıştır. Bu görüntüler sağlıklı ve hastalıklı olmak üzere iki sınıftan oluşmaktadır. Bu görüntülerden özellik çıkarımı yapmak için derin öğrenme modelleri kullanılmıştır. 17 adet derin öğrenme modeli test edilmiş ve en iyi iki model seçilmiştir. Bu iki model DarkNet53 ve ResNet101 olarak belirlenmiştir. Bu iki modelden elde edilen özellikler birleştirilmiştir. Böylece hibrit bir özellik çıkarımı oluşturulmuştur. Özellik seçimi için ReliefF algoritması kullanılmıştır. Böylece en ağırlıklı özellikler seçilmiştir. Seçilen özelliklerin sınıflandırılması için Destek Vektör Makinesi (DVM) algoritması kullanılmıştır. Önerilen yöntem ile %99.58 doğruluk hesaplanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Yaprak Hastalığı Tespiti, Derin Özellik Çıkarma, ReliefF, DenseNet53, ResNet101.

### Deep Feature Extraction and Machine Learning Method for Leaf Disease Detection in Plants

**Abstract:** The development of deep learning methods has positively affected smart agriculture practices. Deep learning and machine learning are used in many areas such as detecting diseases in tree and plant leaves, predicting fruit and vegetable yields. In this study, leaf disease has been detected by using deep learning and feature selection methods. For the proposed method, a total of 726 images of walnut leaves were collected. These images consist of two classes, healthy and diseased. Deep learning models have been used to extract features from these images. 17 deep learning models were tested and the best two models were selected. These two models are designated as DarkNet53 and ResNet101. The features from these two models are combined. Thus, hybrid feature extraction has been created. ReliefF algorithm is used for feature selection. Thus, the most weighty features have been selected. Support Vector Machine (SVM) algorithm is used for the classification of selected features. With the proposed method, 99.58% accuracy has been calculated.

**Key words:** Leaf Disease Detection, Deep Feature Extraction, ReliefF, DenseNet53, ResNet101.

### 1. Giriş

Yapay zekâ ve makine öğrenmesi uygulamaları günümüzde tarım alanında da kullanılmaktadır. Seraların izlenmesi, analiz edilmesi, yabancı otların kontrol edilmesi, bitki ve toprak izleme gibi birçok alanda yapay zeka kullanılarak tarımdaki verimliliğin artırılması amaçlanmıştır. Bitkilerin sürekli olarak izlenmesi ve analiz edilmesi üretim kalitesini de arttırmaktadır. Bitki yaprak ve meyvelerde oluşan hastalıkların tespit edilmesi üretimi etkilemektedir. Ağaçlardaki yaprak ve meyve hastalıklarının erken tespiti ve zamanında yapılacak ilaçlama ile üretimin düşmesi önlenmektedir. Aksi halde bu hastalık diğer ağaçlara da bulaşarak büyük zararlara neden olmaktadır. İnsansız Hava Araçları (IHA) kullanılarak alınan görüntülerden hastalık tespiti yapılabilmekte ve doğru bir şekilde ilaçlama gerçekleştirilmektedir.

Yapay zekâ ve makine öğrenme algoritmaları günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Son zamanlarda, literatürde derin öğrenme modelleri tercih edilmektedir. Çünkü derin öğrenme sınıflandırmada yüksek başarı sağlamaktadır. Bu çalışmada yaprak hastalıklarının tespit edilmesine odaklanılmıştır. Bu nedenle ceviz yapraklarından oluşan bir veri seti elde edilmiştir. Bu veri seti 365 hastalıklı ve 361 sağlıklı olmak üzere toplamda 726 görüntü içermektedir. Hastalıklı ve sağlıklı yapraklar toplanarak görüntülenmiştir. Bu görüntülerden derin öğrenme modelleri kullanılarak özellik çıkarımı yapılmıştır. Başarı oranının yüksek olması için hibrit bir model kullanılmıştır. Çok sayıda derin öğrenme modeli içerisinde en yüksek başarıyı gösteren iki model seçilmiştir. Bu modellerden elde edilen özellikler birleştirilmiş ve birleştirilen özellikler içerisinde en anlamlı özellikler seçilmiştir. Seçilen özellikler DVM algoritması ile sınıflandırılmıştır. Önerilen yöntem ile yüksek sonuçlar elde

\* Sorumlu yazar: [orhanyaman@firat.edu.tr](mailto:orhanyaman@firat.edu.tr). Yazarların ORCID Numaraları: <sup>1</sup> 0000-0001-9623-2284, <sup>2</sup> 0000-0002-5126-6445

edilmiştir. Bu çalışmadaki temel motivasyon ağaç üzerindeki hastalıklı bölgelerin tespit edilerek bölgesel ilaçlamanın yapılabilmesidir. Bu durumda ağaca az miktarda ilaç verilerek hastalıklar yok edilecektir. Ağaçlar daha az ilaca maruz kalarak meyvelerdeki kalite artacaktır.

Literatürde yaprak hastalıklarının tespiti ve sınıflandırılması için birçok yöntem vardır. Bitki yaprak ve meyvelerinde çok sayıda hastalık türü bulunmaktadır [2–4]. Bu hastalıkların erken tespit edilmesi ve müdahale edilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde sebze ve meyvelerde verim kaybına neden olmaktadır. Yaprak hastalıklarının tespit edilmesi ve sınıflandırılması için derin öğrenme tabanlı birçok yöntem geliştirilmiştir [5–7]. Literatürde yapılan diğer çalışmalar Tablo 1’de özetlenmiştir. Tabloda çalışmaya ait metot, görüntü sayısı ve performans kriteri sunulmuştur.

**Tablo 1.** Literatürde yapılan çalışmaların özeti

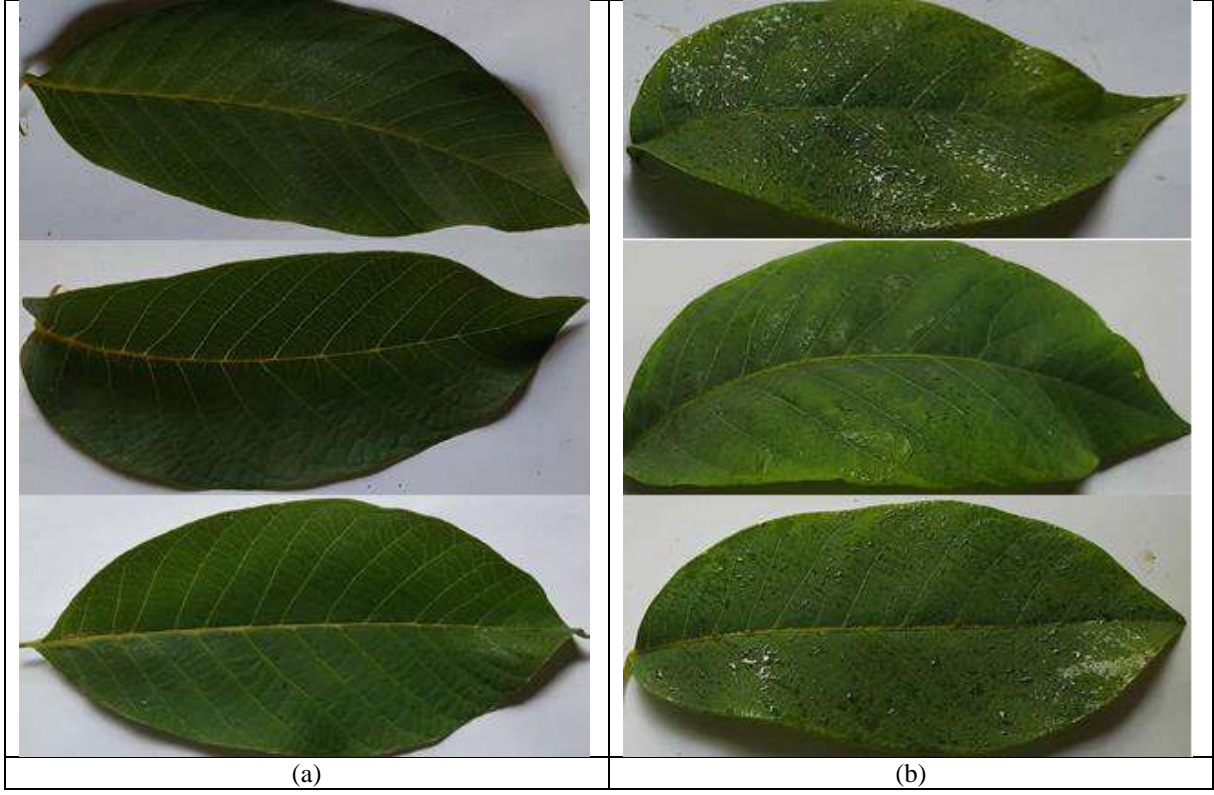
Referans	Yıl	Yöntem	Görüntü sayısı	Bitki Türleri	Sınıf Sayısı	Performans metrikleri
Ganatra ve dig. [8]	2020	Görüntü işleme ve makine öğrenmesi	14956	Domates, Biber, Patates	38	Doğruluk, Kesinlik, Duyarlılık, F-Skor
Ahmad ve dig. [9]	2020	Konvolüsyonel Sinir Ağları	2364	Domates	4	Doğruluk, Kesinlik, Duyarlılık, F-Skor
Sibiya ve dig. [10]	2019	Konvolüsyonel Sinir Ağları	-	Mısır	4	Doğruluk
Wang ve dig. [11]	2017	Derin öğrenme (VGG16)	2086	Elma	4	Doğruluk
Türkoğlu ve dig. [12]	2019	AlexNet + DVM	1965	Kayısı, Ceviz, Şeftali, Kiraz	8	Doğruluk, Duyarlılık, F-Skor
Meena ve dig. [13]	2018	Görüntü işleme + DVM	60	-	2	Doğruluk
Durmus ve dig. [14]	2017	AlexNet	-	Domates	10	Doğruluk
Mohanty ve dig. [15]	2016	GoogleNet	54306	Çeşitli sebze ve meyve yaprakları	38	Doğruluk
Mohameth ve dig. [16]	2020	ResNet50 + DVM	54000	Çeşitli sebze ve meyve yaprakları	36	Doğruluk, F-Skor
Rajesh ve dig. [17]	2020	Karar ağacı	1000	Domates, Limon, Gül, Papaya, Muz	5	Doğruluk
Das ve dig. [18]	2020	DVM	14000	Domates	8	Doğruluk
Panigrahi ve dig. [19]	2020	Rasgele Orman	3852	Mısır	4	Doğruluk, Kesinlik, Duyarlılık, F-Skor
Tiwari ve dig. [20]	2020	VGG19 + Lojistik Regrasyon	2152	Patates	3	Doğruluk
Jiang ve dig. [21]	2019	VGG-INCEP	26377	Elma	5	Doğruluk
Divakar ve dig. [22]	2021	DenseNet	3642	Elma	4	Doğruluk, Kesinlik, F-Skor

Literatürde çeşitli bitkilere ait hastalıkların tespiti için birçok yöntem sunulmuştur. Bu çalışmalar genellikle görüntü işleme, makine öğrenmesi ve derin öğrenme tabanlıdır [23,24]. Geliştirilen yöntemlerin bazıları gömülü sistemler üzerinde uygulanarak bir ürün haline dönüştürülmüştür [25]. Mattihalli ve dig. [26] yaprak hastalıklarının tespit edilebilmesi için gömülü sistem tabanlı bir yöntem geliştirmiştir. Raspberry pi modül geliştirme kartı ile kameradan alınan görüntüler üzerinde hastalık tespiti yapmıştır. Ayrıca geliştirme kartı üzerine yerleştirilen sıcaklık, nem gibi verileri alarak otomatik sulama ve ilaçlama gerçekleştirmektedir. Hem hastalık tespiti hem de akıllı tarım için bir model geliştirmiştir. Nalawade ve dig. [27] ESP geliştirme kartı ve sensörler kullanarak akıllı tarım uygulaması geliştirmiştir. Bunun yanı sıra bitkilerdeki yaprakların hastalıklarını tespit edebilen bir yöntem geliştirmiştir. Önerilen yöntemde yaklaşık %98.07 doğruluk sağlamıştır. Chouhan ve dig. [28] bitkilerdeki yaprak hastalığının tespiti için Nesnelerin İnterneti (IoT) ve bulanık tabanlı bir model geliştirmiştir. Yaprak hastalıklarının tespiti için geliştirilen yöntem ile yaklaşık %80.66 doğruluk hesaplamıştır.

## 2. Materyal ve Metot

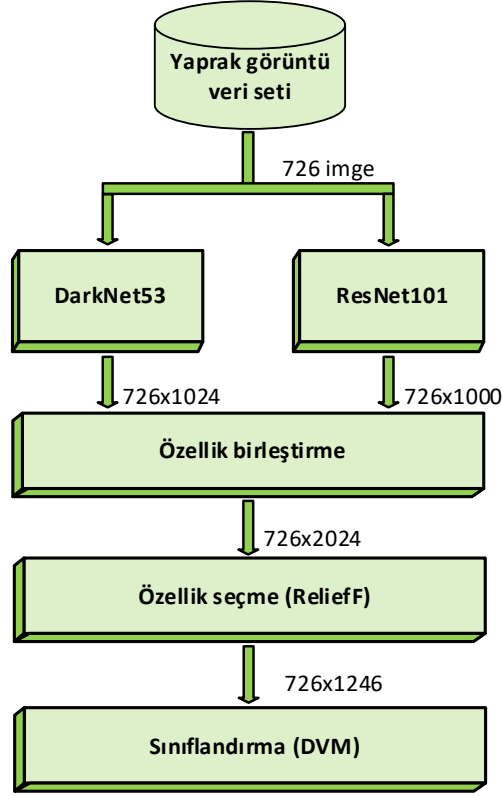
Bu çalışmada sağlıklı ve hastalıklı ceviz yapraklarından yeni bir veri seti oluşturulmuştur. 361 sağlıklı ve 365 hastalıklı ceviz yaprakları toplanarak beyaz bir zemin üzerine yerleştirilmiş ve görüntüler elde edilmiştir

([https://github.com/orhanyaman/leaf\\_images.git](https://github.com/orhanyaman/leaf_images.git)). Toplanan sağlıklı ve hastalıklı ceviz yapraklarına ait örnek görüntüler Şekil 1’de gösterilmiştir



Şekil 1. Ceviz yaprağı veri setine ait örnek görüntüler (a) Sağlıklı (b) Hastalıklı

Şekil 1’de verilen sağlıklı ve hastalıklı görüntülerin sınıflandırılması için derin özellik çıkarım tabanlı bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemin blok şeması Şekil 2’de görülebilmektedir.



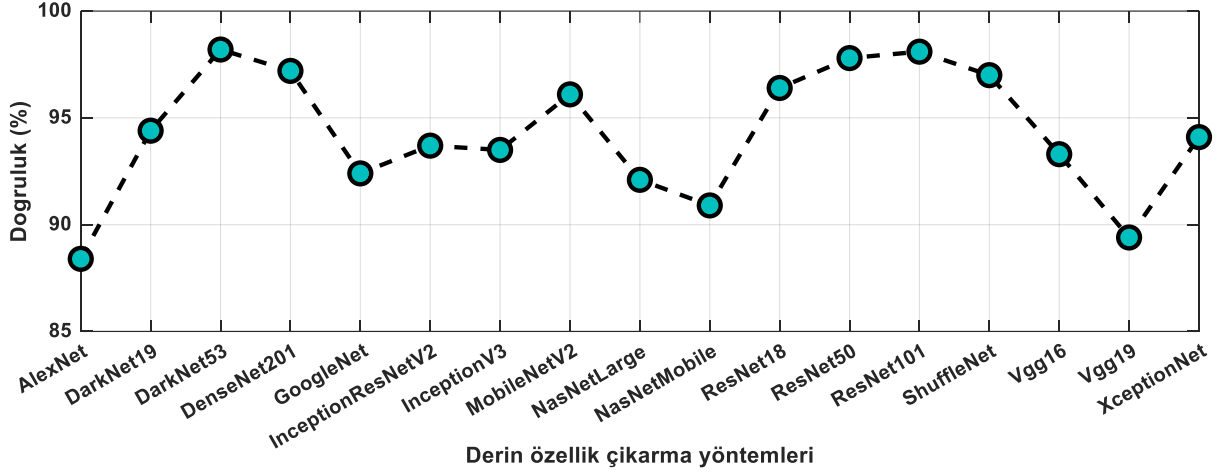
Şekil 2. Önerilen yöntemin blok şeması

Önerilen yöntem üç ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm, derin özellik çıkarım yöntemleri kullanılarak özellik çıkarımı yapmak ve özellikleri birleştirmektir. İkinci bölüm, çıkarılan özelliklerden en ağırlıklı özelliklerin seçilmesidir. Üçüncü bölüm ise seçilen özelliklerin sınıflandırılmasıdır. Önerilen yöntemin sözde kodu Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Önerilen yöntemin sözde kodu

Prosedür: <i>FusedDeep – Özellik seçme (Im)</i>	
<b>Giriş</b>	Yaprak görüntüsü veri seti ( <i>IM</i> ) 726 adet görüntü
<b>Çıkış</b>	Tahmin edilen değerler ( <i>pv</i> )
00:	<i>D</i> boyutundaki yaprak görüntü veri setinin yüklenmesi
01:	<b>for</b> <i>k=1</i> <b>to</b> <i>d</i> <b>do</b> // Her yaprak görüntüsünün okunması.
02:	$feature^1 = DN53(Im)$ ; // DarkNet53 kullanılarak özellik çıkarımı
03:	$feature^2 = RN101(Im)$ ; // ResNet101 kullanılarak özellik çıkarımı
04:	<b>for</b> <i>i=0</i> <b>to</b> 1 <b>do</b>
05:	$X(k, 1000 * i + 1: 1000 * (i + 1)) = feature^{(i+1)}$ // Özellik birleştirme
06:	<b>end for</b> <i>i</i>
07:	<b>end for</b> <i>k</i>
11:	$last = IRF(X, taget)$ ; // ReliefF kullanarak en anlamlı özelliklerin seçilmesi
13:	$pv = DVM(last, taget, 10)$ ; //Seçilen özelliklerin DVM algoritması ile sınıflandırılması

Literatürde derin öğrenme ile nesne tanıma, sınıflandırma ve özellik çıkarımı için birçok çalışma vardır [29–31]. Derin öğrenme genellikle konvolüsyon ve havuzlama adımlarından oluşmaktadır. Bu adımların art arda yerleştirilmesiyle derin öğrenme modeli oluşturulmaktadır. Bu çalışmada AlexNet, DarkNet19, DarkNet53, DenseNet201, GoogleNet, InceptionResNetV2, InceptionV3, MobileNetV2, NasNetLarge, NasNetMobile, ResNet18, ResNet50, ResNet101, ShuffleNet, VGG16, VGG19 ve XceptionNet derin öğrenme modelleri test edilmiştir. Bu derin öğrenme modellerinden elde edilen özellikler DVM algoritması ile sınıflandırılmıştır. Sınıflandırma için MATLAB 2020A programında Classification Learner Toolbox kullanılmıştır ve 10-Kat Çapraz Doğrulama seçilmiştir. Sınıflandırma sonuçları Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. 10-Kat Çapraz Doğrulama kullanılarak derin öğrenme modellerinden elde edilen sonuçlar

Şekil 3'te görülebileceği gibi en yüksek sonuçlar DarkNet53 ve ResNet101 modelleri ile hesaplanmıştır. DarkNet53 modeli ile %98.2 ve ResNet101 modeli ile %98.1 doğruluk hesaplanmıştır. Özellik çıkarımı için en yüksek doğruluğa sahip DarkNet53 ve ResNet101 modelleri birlikte kullanılmıştır. Bu iki derin öğrenme modellerinde elde edilen özellikler birleştirilmiş ve hibrit bir yöntem sunulmuştur. DarkNet53 modeli ile her görüntüden 1024 adet özellik, ResNet101 modeli ile her görüntüden 1000 özellik çıkarılmıştır. Özelliklerin birleştirilmesi sonucunda 726 görüntü için 726×2024 boyutunda özellik matrisi elde edilmiştir. Birleştirilen bu özelliklerden en ağırlıklı olanların seçilmesi için ReliefF algoritması kullanılmıştır.

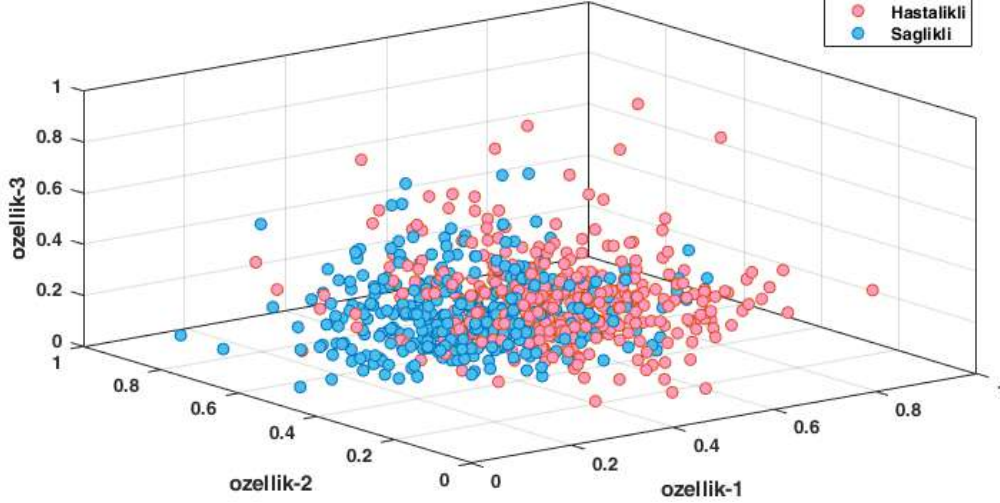
Relief algoritması özellik seçme yöntemidir [32]. Kira et al. [33] tarafından geliştirilen bu algoritma, literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır [33]. Bu algoritma iki sınıflı veri seti için başarılı sonuçlar vermektedir. Kononenko çoklu sınıfa sahip veri setleri için ReliefF algoritmasını geliştirmiştir [34]. Bu yöntem ilk olarak tüm özneliklerin ağırlıklarını 0 olarak belirlemektedir. Her bir adımda veri setinden rastgele bir veri seçer ve bu veri ile aynı sınıfa ait en yakın  $k$  adet veri bulmaktadır. Böylece her sınıfa ait en yakın verileri hesaplamaktadır. Burada  $k$  değeri sınıf sayısının bir eksiğidir. Daha sonra her bir özelliğe ait ağırlıklar bu veriler kullanılarak güncellenir. Son adımda belirlenen şartı sağlamayan özellikler veri setinden atılarak yeni veri seti oluşturulmaktadır. Denklem 1, 2 ve 3'te relief algoritması verilmiştir.

$$W(X^a) = W(X^a) - \frac{\sum_{j=1}^k \text{distance}(A, R_i, H_j)}{m \cdot k} + \frac{\sum_{C \neq \text{class}(R_i)} \left[ \frac{P(C)}{1 - P(\text{class}(R_i))} \sum_{j=1}^k \text{distance}(A, R_i, M_j) \right]}{m \cdot k} \quad (1)$$

$$\text{distance}(A, I_1, I_2) = \begin{cases} 0, & I_1 = I_2 \\ 1, & I_1 \neq I_2 \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{distance}(A, I_1, I_2) = |I_1 - I_2| * \frac{1}{\max(A) - \min(A)} \quad (3)$$

Bu denklemlerde verilen  $W(X^a)$   $a$ 'nıncı özneliğin ağırlığını,  $k$  sınıf sayısının bir eksiğini,  $m$  döngü sayısını,  $R_i$   $i$ 'ninci döngüde seçilmiş olan veriyi,  $H_j$  seçilen veri ile aynı sınıfa ait  $j$ 'ninci yakın veriyi,  $M_j$   $j$ 'ninci sınıfa ait seçilen veriye en yakın olan veriyi ifade etmektedir.  $726 \times 2024$  adet özelliğin ağırlıkları hesaplanmıştır. Böylece  $726 \times 1246$  özellik seçilmiştir. Seçilen özelliklerin üç boyutlu gösterimi Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Relief algoritması ile seçilen özelliklerin üç boyutlu gösterimi

Şekil 4'teki grafik 726 görüntü için seçilen rastgele üç özelliği kullanılarak elde edilmiştir. Seçilen  $726 \times 1246$  özellik DVM algoritması kullanılarak sınıflandırılmıştır.

### 3. Deneysel Sonuçlar

Bu çalışmada önerilen yöntemin sonuçları MATLAB 2020A programı kullanılarak hesaplanmıştır. Özellik çıkarımı için kullanılan derin öğrenme modelleri birleştirilerek Relief algoritması ile özellikler seçilmiştir. Seçilen özellikler Classification Toolbox kullanılarak sınıflandırılmıştır. Sınıflandırma için DVM algoritması kullanılmıştır. DVM algoritması ile diğer makine öğrenmesi algoritmalarına göre daha yüksek doğruluk hesaplanmıştır. Önerilen yöntemin hata matrisi sonucu Şekil 5'te gösterilmiştir.

Doğru sınıf	1	362	3
	2	0	361
		1	2

Tahmin sınıfı

Şekil 5. Önerilen yöntemin hata matrisi sonucu

Şekil 5'te görülebileceği gibi sınıflandırma başarısının yüksektir. Yöntemin performans sonuçlarını elde etmek için doğruluk, kesinlik, duyarlılık, geometrik ortalama ve F-skor parametreleri hesaplanmıştır. Bu performans metrikleri, gerçek pozitiflerin (TP), yanlış pozitiflerin (FP), gerçek negatiflerin (TN) ve yanlış negatiflerin (FN) sayısı kullanılarak hesaplanır [35]. Kullanılan performans ölçülerinin matematiksel gösterimleri denklem 4-8'de gösterilmiştir.

$$\text{Dogruluk} = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (4)$$

$$\text{Kesinlik} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (5)$$



$$\text{Duyarluluk} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (6)$$

$$\text{Geometrik ortalama} = \sqrt{\frac{TP*TN}{(TP+FN)*(TN+FP)}} \quad (7)$$

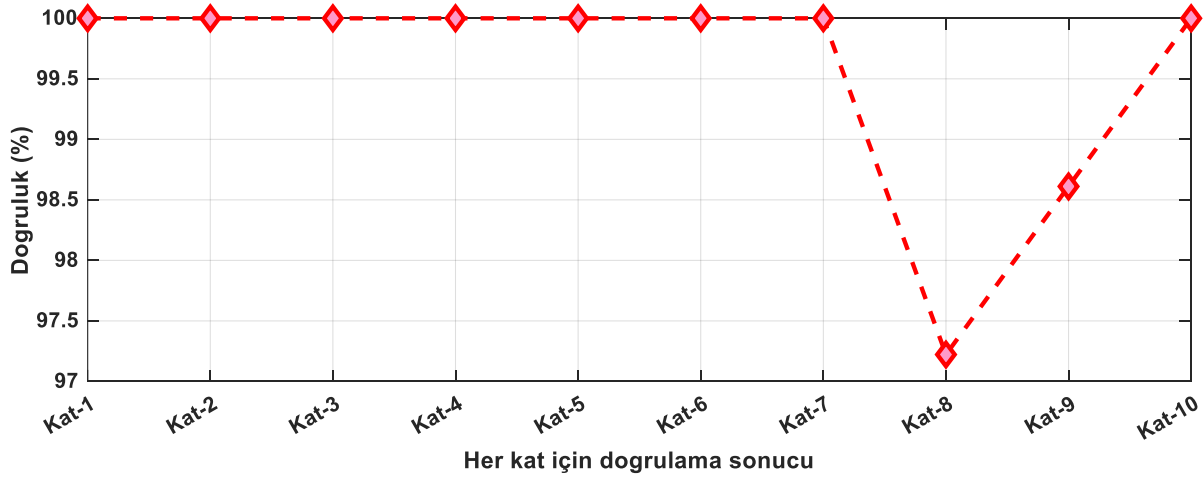
$$F - \text{skor} = \frac{2TP}{2TP+FP+FN} \quad (8)$$

Önerilen yöntemde kullanılan derin öğrenme, özellik seçme ve sınıflandırma algoritmaları kullanılmış ve sonuçlar hesaplanmıştır. Bu sonuçların analiz edilebilmesi için sınıflandırma algoritmaları 1000 iterasyon çalıştırılmıştır. 1000 iterasyon sonucunda maksimum, minimum, ortalama ve standart sapma hesaplanmıştır. Önerilen yöntemin performans sonuçları Tablo 3'te gösterilmiştir.

**Tablo 3.** Önerilen yöntemin performans sonuçları

	Doğruluk	Kesinlik	Duyarluluk	Geometrik ortalama	F-Skor
<b>Maksimum</b>	99.58	99.58	99.58	99.58	99.58
<b>Minimum</b>	98.76	99.18	99.17	99.17	99.18
<b>Ortalama</b>	99.13	99.48	99.48	99.48	99.48
<b>Standart sapma</b>	0.13	0.06	0.06	0.06	0.064

Tablo 3'te görülebileceği gibi ceviz yapraklarında hastalığın tespiti %99.58 olarak hesaplanmıştır. Maksimum kesinlik, duyarlılık, geometrik ortalama ve F-Skor değerleri %99.58 olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar 10 kat çapraz doğrulama yapılarak hesaplanmıştır. Önerilen yöntemin her kat doğrulama sonucu Şekil 6'da verilmiştir.



**Şekil 6.** Önerilen yöntemin her kat doğrulama sonucu

Şekil 6'da görülebildiği gibi Kat-8 ve Kat-9 sonuçları diğer Katlara göre düşüktür. Kat-8 ve Kat-9 haricindekiler %100 olarak hesaplanmıştır.

#### 4. Tartışma

Bu çalışmada derin öğrenme modelleri ile hibrit bir yöntem geliştirilmiştir. İki sınıflı yeni bir veri seti kullanılmış ve ceviz yapraklarındaki hastalıklar tespit edilmiştir. Literatürde birçok meyve ve sebze yapraklarındaki hastalıklar tespit edilmiştir. Literatürde PlantVillage veri seti yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu veri setinde birçok sebze ve meyve yapraklarına ait hastalık türleri mevcuttur. Önerilen yöntem hem yeni veri seti ile hem de literatürde yaygın olarak kullanılan PlantVillage veri seti ile test edilmiş ve performans sonuçları hesaplanmıştır.



**Tablo 4.** Önerilen yöntem ile literatürdeki sonuçların karşılaştırılması

Referans	Veri seti	Görüntü sayısı	Sınıf Sayısı	Doğruluk (%)	Kesinlik	Duyarlılık	F-Skor
Ganatra ve dig. [8], 2020	PlantVillage	14956	38	73.38	72.88	72.90	71.98
Ahmad ve dig. [9], 2020	Laboratuvar tabanlı	2364	4	99.6	99.6	99.6	99.5
Sibiya ve dig.[10], 2019	PlantVillage	-	4	92.85	-	-	-
Wang ve dig.[11], 2017	-	2086	4	90.4	-	-	-
Türkoğlu ve dig.[12], 2019	-	1965	8	95.5	-	94.34	94.58
Meena ve dig.[13], 2018	PlantVillage	60	2	90	-	-	-
Durmus ve dig.[14], 2017	PlantVillage	-	10	95.65	-	-	-
Mohanty ve dig.[15], 2016	PlantVillage	54306	38	99.35	-	-	-
Mohameth ve dig.[16], 2020	PlantVillage	54000	36	98.01	-	-	97.13
Rajesh ve dig.[17], 2020	-	1000	5	95	-	-	-
Das ve dig.[18], 2020	PlantVillage	14000	8	87.6	-	-	-
Panigrahi ve dig.[19], 2020	Mısır veriseti	3852	4	79.23	81	79	78
Tiwari ve dig.[20], 2020	PlantVillage	2152	3	97.8	-	-	-
Jiang ve dig.[21], 2019	-	26377	5	97.14	-	-	-
Divakar ve dig.[22], 2021	Plant Pathology 2020-FGVC7”	3642	4	92.28	91.93	-	91.24
Önerilen Yöntem	Ceviz yaprağı veriseti	<b>726</b>	<b>2</b>	<b>99.58</b>	<b>99.58</b>	<b>99.58</b>	<b>99.58</b>
	PlantVillage	<b>16011</b>	<b>10</b>	<b>99.46</b>	<b>99.37</b>	<b>99.35</b>	<b>99.35</b>

Tablo 4’te görülebildiği gibi bitki yapraklarındaki hastalığın tespiti iki ile 38 sınıf arasında değişmektedir. Önerilen yöntem iki sınıf ve 736 görüntüden oluşan ceviz yaprağı veri setinde uygulanmış ve %99.58 doğruluk sağlamıştır. Önerilen yöntemin başarısını literatürle karşılaştırmak için literatürde yaygın olarak kullanılan PlantVillage veri seti test edilmiştir. PlantVillage veri setinde 10 sınıf 16011 görüntü kullanılarak yaklaşık %99.46 doğruluk sağlanmıştır. Sibiya ve dig.[10] çalışmasında PlantVillage veri setini kullanmış ve dört sınıf için yaklaşık %92.85 doğruluk hesaplamıştır. Meena ve dig.[13] çalışmasında PlantVillage veri setini kullanmış ve iki sınıf için %90 başarı sağlamıştır. Mohanty ve dig.[15] ve Mohameth ve dig.[16] çalışmalarında PlantVillage veri setini kullanmış ve yaklaşık 54000 görüntü için sırasıyla %99.35 ve %98.01 başarı hesaplamışlardır. Literatürde PlantVillage veri setini kullanan çalışmalar ile karşılaştırıldığında önerilen yöntemin başarılı sonuç verdiği görülmektedir.

#### 4. Sonuçlar ve Gelecek Çalışmalar

Bu çalışmada bitki yapraklarındaki hastalıkların tespit edilebilmesi için derin özellik çıkarımı ve makine öğrenmesi tabanlı bir yöntem geliştirilmiştir. Önerilen yöntemin test edilebilmesi için ceviz yapraklarından oluşan 726 görüntü ve iki sınıflı bir veri seti toplanmıştır. Görüntüler üzerinde DarkNet53 ve ResNet101 modelleri ile özellik çıkarımı yapılmıştır. Elde edilen özellikler birleştirilerek ReliefF algoritması ile en ağırlıklı özellikler seçilmiştir. Seçilen özellikler ise DVM algoritması ile sınıflandırılmıştır. Ceviz yaprağı veri seti için %99.58 doğruluk hesaplanmıştır. Önerilen yöntemin başarısını literatür ile karşılaştırmak için literatürde yaygın olarak kullanılan PlantVillage veri seti test edilmiştir. PlantVillage veri seti için önerilen yöntem %99.46 başarı sağlamıştır. Akıllı tarım uygulamalarında bitkilerdeki hastalığın tespit edilebilmesi için geliştirilen bu yöntemin başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. Gelecek çalışmalarda gömülü sistemler üzerinde gerçek zamanlı çalışabilecek bir model geliştirilmesi hedeflenmektedir. Gömülü sistem üzerinde çalıştırılacak model bir insansız ilaçlama araçlarına yerleştirilerek sadece hastalıklı yaprakların ilaçlanması ön görülmektedir. Böylece tarımsal alanlarda bilinçli ilaçlama yapılarak daha az ilaç kullanımı sağlanacak ve daha sağlıklı ürün üretimi yapılacaktır.

**Kaynaklar**

- [1] Aydemir, E., and Gulsecen, S. (2019) Arranging bus behaviour by finding the best prediction model with artificial neural networks. *Teh. Vjesn.*, 26 (4), 885–892.
- [2] Singh, V., and Misra, A.K. (2017) Detection of plant leaf diseases using image segmentation and soft computing techniques. *Inf. Process. Agric.*, 4 (1), 41–49.
- [3] Singh, D., Jain, N., Jain, P., Kayal, P., Kumawat, S., and Batra, N. (2020) PlantDoc: A dataset for visual plant disease detection. *ACM Int. Conf. Proceeding Ser.*, 249–253.
- [4] Rao, A., and Kulkarni, S.B. (2020) A Hybrid Approach for Plant Leaf Disease Detection and Classification Using Digital Image Processing Methods. *Int. J. Electr. Eng. Educ.*, 1–19.
- [5] Radovanovic, D., and Dukanovic, S. (2020) Image-Based Plant Disease Detection: A Comparison of Deep Learning and Classical Machine Learning Algorithms. *2020 24th Int. Conf. Inf. Technol. IT 2020*, (February), 1–4.
- [6] Dhakal, A., and Shakya, S. (2018) Image-Based Plant Disease Detection with Deep Learning. *Int. J. Comput. Trends Technol.*, 61 (1), 26–29.
- [7] Hammad Saleem, M., Khanchi, S., Potgieter, J., and Mahmood Arif, K. (2020) Image-based plant disease identification by deep learning meta-architectures. *Plants*, 9 (11), 1–23.
- [8] Ganatra, N., and Patel, A. (2020) A multiclass plant leaf disease detection using image processing and machine learning techniques. *Int. J. Emerg. Technol.*, 11 (2), 1082–1086.
- [9] Ahmad, I., Hamid, M., Yousaf, S., Shah, S.T., and Ahmad, M.O. (2020) Optimizing pretrained convolutional neural networks for tomato leaf disease detection. *Complexity*, 2020.
- [10] Sibiya, M., and Sumbwanyambe, M. (2019) A Computational Procedure for the Recognition and Classification of Maize Leaf Diseases Out of Healthy Leaves Using Convolutional Neural Networks. *AgriEngineering*, 1 (1), 119–131.
- [11] Wang, G., Sun, Y., and Wang, J. (2017) Automatic Image-Based Plant Disease Severity Estimation Using Deep Learning. *Comput. Intell. Neurosci.*, 2017.
- [12] Türkoğlu, M., and Hanbay, D. (2019) Plant disease and pest detection using deep learning-based features. *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, 27 (3), 1636–1651.
- [13] Meena Prakash, R., Saraswathy, G.P., Ramalakshmi, G., Mangaleswari, K.H., and Kaviya, T. (2018) Detection of leaf diseases and classification using digital image processing. *Proc. 2017 Int. Conf. Innov. Information, Embed. Commun. Syst. ICIECS 2017*, 2018-Janua, 1–4.
- [14] Durmus, H., Gunes, E.O., and Kirci, M. (2017) Disease detection on the leaves of the tomato plants by using deep learning. *2017 6th Int. Conf. Agro-Geoinformatics, Agro-Geoinformatics 2017*, 0–4.
- [15] Mohanty, S.P., Hughes, D.P., and Salathé, M. (2016) Using deep learning for image-based plant disease detection. *Front. Plant Sci.*, 7 (September), 1–10.
- [16] Mohameth, F., Bingcai, C., and Sada, K.A. (2020) Plant Disease Detection with Deep Learning and Feature Extraction Using Plant Village. *J. Comput. Commun.*, 08 (06), 10–22.
- [17] B. Rajesh, M. Vishnu Sai Vardhan, L.S. (2020) Leaf Disease Detection and Classification by Decision Tree. *Mach. Learn. Found.*, (ICOED), 705–708.
- [18] Das, D., Singh, M., Mohanty, S.S., and Chakravarty, S. (2020) Leaf Disease Detection using Support Vector Machine. *Proc. 2020 IEEE Int. Conf. Commun. Signal Process. ICCSP 2020*, 1036–1040.
- [19] Kshyanaprava Panda Panigrahi, Himansu Das, A.K.S., and Moharana, S.C. (2020) Maize Leaf Disease Detection and Classification Using Machine Learning Algorithms. *Prog. Comput. Anal. Networking*, Springer, Singapore, 659–669.
- [20] Tiwari, D., Ashish, M., Gangwar, N., Sharma, A., Patel, S., and Bhardwaj, S. (2020) Potato Leaf Diseases Detection Using Deep Learning. *Proc. Int. Conf. Intell. Comput. Control Syst. ICICCS 2020*, (Iciccs), 461–466.
- [21] Jiang, P., Chen, Y., Liu, B., He, D., and Liang, C. (2019) Real-Time Detection of Apple Leaf Diseases Using Deep Learning Approach Based on Improved Convolutional Neural Networks. *IEEE Access*, 7, 59069–59080.
- [22] Divakar, S., Bhattacharjee, A., and Priyadarshini, R. (2021) Smote-DL: A Deep Learning Based Plant Disease Detection Method. *2021 6th Int. Conf. Conver. Technol. I2CT 2021*, 4–9.
- [23] Dhaware, C.G., and Wanjale, K.H. (2017) A modern approach for plant leaf disease classification which depends on leaf image processing. *2017 Int. Conf. Comput. Commun. Informatics, ICCCI 2017*, 31–34.
- [24] Kumar, S., Prasad, K., Srilekha, A., Suman, T., Rao, B.P., and Vamshi Krishna, J.N. (2020) Leaf disease detection and classification based on machine learning. *Proc. Int. Conf. Smart Technol. Comput. Electr. Electron. ICSTCEE 2020*, 361–365.
- [25] Dharanika, T., Ruban Karthik, S., Sabhariesh Vel, S., Vyaas, S., and Yogeshwaran, S. (2021) Automatic Leaf Disease Identification and Fertilizer Agrobot. *2021 7th Int. Conf. Adv. Comput. Commun. Syst. ICACCS 2021*, 1341–1344.
- [26] Mattihalli, C., Gedefaye, E., Endalamaw, F., and Necho, A. (2018) Plant leaf diseases detection and auto-medicine. *Internet of Things*, 1–2, 67–73.
- [27] Nalawade, R., Nagap, A., Jindam, L., and Ugale, M. (2020) Agriculture Field Monitoring and Plant Leaf Disease Detection. *2020 3rd Int. Conf. Commun. Syst. Comput. IT Appl. CSCITA 2020 - Proc.*, 226–231.
- [28] Chouhan, S.S., Singh, U.P., and Jain, S. (2021) Automated Plant Leaf Disease Detection and Classification Using Fuzzy Based Function Network. *Wirel. Pers. Commun.*, (0123456789).
- [29] Ertam, F. (2019) An efficient hybrid deep learning approach for internet security. *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, 535, 122492.

- [30] Yaman, O., Tuncer, T., and Tasar, B. (2021) DES-Pat: A novel DES pattern-based propeller recognition method using underwater acoustical sounds. *Appl. Acoust.*, 175, 107859.
- [31] Baygin, M., Yaman, O., Tuncer, T., Dogan, S., Datta, P., and Acharya, R. (2021) Biomedical Signal Processing and Control Automated accurate schizophrenia detection system using Collatz pattern technique with EEG signals. *Biomed. Signal Process. Control*, 70 (June), 102936.
- [32] Tuncer, T., Dogan, S., and Ozyurt, F. (2020) An automated Residual Exemplar Local Binary Pattern and iterative ReliefF based COVID-19 detection method using chest X-ray image. *Chemom. Intell. Lab. Syst.*, (January).
- [33] Kira, K., and Rendell, L.A. (1992) Feature selection problem: traditional methods and a new algorithm. *Proc. Tenth Natl. Conf. Artif. Intell.*, 129–134.
- [34] Kononenko, I. (1994) Estimating attributes: Analysis and extensions of RELIEF. *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, 784 LNCS, 171–182.
- [35] Çelik, F., and Aydemir, E. (2021) Prediction of difficult tracheal intubation by artificial intelligence: a prospective observational study. *Duzce Med. J.*, 23 (1), 47–54.

## EEG Analizi için CCCII+ Tabanlı Bant Geçiren Filtre Tasarımı

Kübra TEKİN<sup>1\*</sup>, Hasan GÜLER<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Hakkâri Üniversitesi, Hakkâri, Türkiye

<sup>2</sup> Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

\*<sup>1</sup> kubrakaya@hakkari.edu.tr, <sup>2</sup> hasanguler@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 15/08/2021;

Kabul/Accepted: 09/12/2021)

**Öz:** Biyomedikal sinyaller, küçük genlikli ve spektrumu alçak frekanslar bölgesinde olan gürültülü işaretlerdir. Biyomedikal sinyallerin analizinde genellikle işlemsel kuvvetlendiriciler (OP-AMP) ile tasarlanan aktif filtreler kullanılmaktadır. Günümüzde OP-AMP'ların alternatifi olarak akım taşıyıcılar sunulmuş ve akım taşıyıcıların OP-AMP'lara göre birçok avantajı olduğu saptanmıştır. Bu çalışmada ise bir EEG sinyali için hem OP-AMP hem de ikinci nesil akım kontrollü akım taşıyıcı (CCCII+) kullanılarak iki farklı bant geçiren filtre tasarlanmıştır. Bant geçiren filtre devreleri için bant aralığı 0,5-30 Hz seçilmiştir. Bu devrelerin tasarımı için ORCAD Pspice programı kullanılmış olup benzetim sonuçları elde edilmiştir. Tasarlanan filtrelerin girişine Boon Üniversitesinden alınan epilepsi hastalarına ve sağlıklı kişilere ait ham EEG verileri uygulanmıştır. EEG sinyalinin tasarlanan iki filtreye uygulanması sonucunda sinyallere Fourier Analizi uygulanmış olup sinyallerdeki değişimler ve EEG dalgaları ( $\delta$ ,  $\theta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) incelenmiştir. Her iki sinyal için de OP-AMP devresine göre CCCII+ ile tasarlanan filtrede sönümlemenin daha iyi olduğu saptanmıştır. Bu tasarlanan iki filtre devresi, EEG ölçümlerinde kullanılması durumunda CCCII+ filtre devresinin epilepsi gibi hastalıkların tanısında daha iyi sonuçlar vereceği öngörülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** EEG, CCCII+, Bant Geçiren Filtre, OP-AMP.

### CCCII+ Based Band-Pass Filter Design for EEG Analysis

**Abstract:** Biomedical signals are noisy signals with a small amplitude and spectrum in the region of low frequencies. In the analysis of biomedical signals, active filters designed with operational amplifiers (OP-AMP) are usually used. At present, current conveyors have been presented as an alternative to OP-AMPs, and it has been found that current conveyors have many advantages over OP-AMPs. In this study, two different bandpass filters were designed for an EEG signal using both OP-AMP and a second-generation current-controlled current conveyor (CCCII+). The band gap 0.5-30 Hz has been chosen for bandpass filter circuits. ORCAD Pspice program was used for the design of these circuits and simulation results were obtained. Raw EEG data of epilepsy patients and healthy people taken from Boon University were applied to the input of the designed filters. As a result of applying the EEG signal to the two designed filters, Fourier Analysis was applied to the signals and the changes in the signals and the EEG waves ( $\delta$ ,  $\theta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) were examined. It has been found that damping is better in the filter designed with CCCII+ than in the OP-AMP circuit for both signals. It is predicted that CCCII+ filter circuit will give better results in the diagnosis of diseases such as epilepsy if these designed two filter circuits are used in EEG measurements.

**Key words:** EEG, CCCII+, Band-Pass Filter, OP-AMP.

#### 1. Giriş

EEG, beyin aktivitesi esnasında oluşan elektriksel potansiyelin titreşimlerini kafatasına yerleştirilen elektrotlar ile incelenmesidir [1]. Günümüzde beynin çeşitli nörolojik fonksiyonlarının araştırılması, aynı zamanda teşhis ve tedavi gibi birçok amaç için EEG sinyallerine sıklıkla başvurulmaktadır [2].

EEG sinyalleri, çok düşük genlikli ( tepeden tepeye 1-400  $\mu$ V) biyoelektrik sinyallerdir. EEG sinyalleri geniş bir frekans bant aralığına (0,5-100 Hz) sahip olmakla birlikte çalışmalar 0,5-30 Hz arasında yoğunlaşmıştır [3]. EEG sinyalleri genellikle ritmik aktivite ve geçici aktivite olarak iki bölümde incelenir. Ritmik aktiviteler frekans değerine göre alt bantlara bölünür. Bu frekans bantları, belirli biyolojik aktivitelerin göstergeleridir. EEG sinyalleri bu açıdan frekansına göre Delta ( $\delta$ ), Teta ( $\theta$ ), Alfa( $\alpha$ ), Beta ( $\beta$ ) ve Gamma ( $\gamma$ ) olmak üzere beş alt bantta incelenir [2-3]. Delta ( $\delta$ ) dalgaları frekansları 0,5-4 Hz aralığında, genlikleri 20-400  $\mu$ V aralığında, Teta ( $\theta$ ) dalgaları frekansları 4-8 Hz, genlikleri 5-100  $\mu$ V aralığında, Alfa( $\alpha$ ) dalgaları frekansları 8-14 Hz, genlikleri 2-10  $\mu$ V aralığında, Beta ( $\beta$ ) dalgaları frekansları 14-30 Hz, genlikleri 1-5  $\mu$ V aralığında, Gamma ( $\gamma$ ) dalgaları ise frekansları 30-100 Hz arasında değişmektedir. Bu dalga frekans aralıklarına bakarak tasarlanan bant geçiren filtrenin kesim frekans aralığının 0,5-30 Hz arasında olması öngörülmüştür.

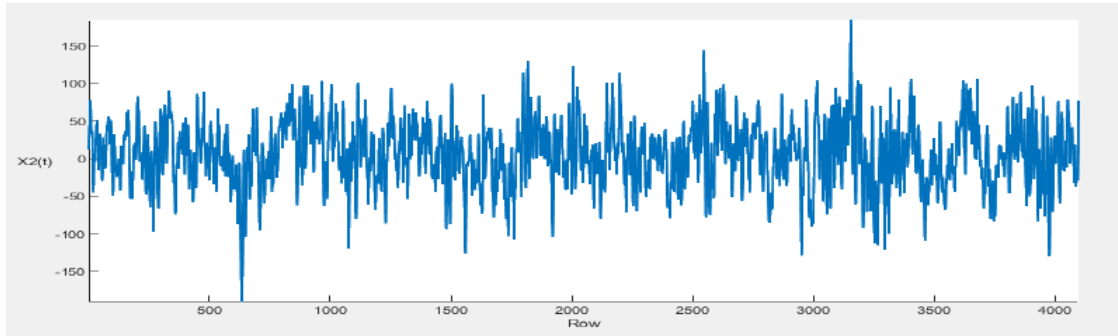
\* Sorumlu yazar: [kubrakaya@hakkari.edu.tr](mailto:kubrakaya@hakkari.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-6050-9760, <sup>2</sup> 0000-0002-9917-3619

EEG sinyalleri epilepsi, Alzheimer gibi hastalıkların tanısında önemli bir yere sahiptir. Günümüzde EEG ölçümleri ve EEG sinyallerinden gürültüleri arındırmak için tasarlanan pek çok devre vardır. Bu devreler; OP-AMP tabanlı [4], CMOS tabanlı [5], zaman frekans tabanlı [6], bilgisayar arayüzü tabanlı [7] gibi birçok çeşitte olduğu görülmüştür. Bu çalışmada ise, yeni bir akım kontrollü akım taşıyıcı (CCCII+) ile bant geçiren filtre ve OP-AMP ile bant geçiren filtre tasarlanmıştır. Bu iki filtreye Bonn Üniversitesinden alınan EEG ham veri seti uygulanmıştır [8]. Bu veri setinin A epilepsi nöbeti geçiren ve E gözleri açık sağlıklı kişinin veri setleri kullanılmıştır. Her bir veri setinden bir dosya yani bir kişiye ait veriler kullanılmıştır. Bu dosyaların her biri 23,6 saniyelik bir kaydı içerir ve 4097 veri noktasına karşılık gelir.

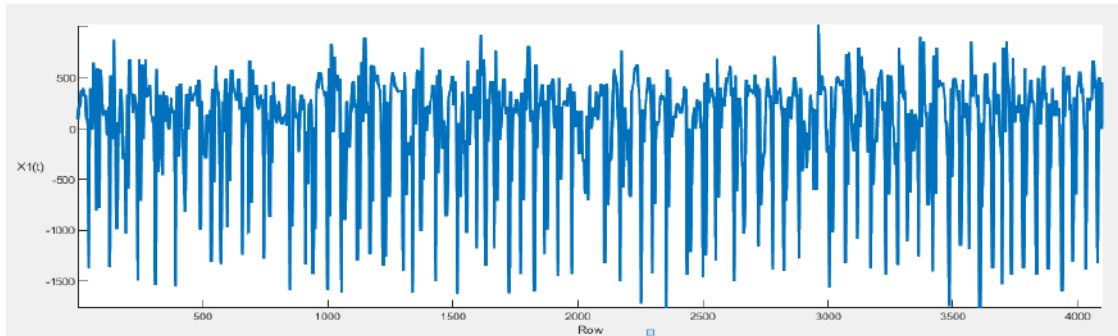
Günümüzde, biyomedikal sinyallerin gürültülerini filtrelemek için birçok çalışma literatürde bulunmaktadır. Akım taşıyıcı devreleri (CCCII+), OP-AMP'lı devrelerden daha fazla doğrusallığa, yüksek değişim oranına, giriş voltaj aralığına ve frekans performansına sahiptir [9]. Bu nedenle elektronik devrelerde sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmadaki amaç akım taşıyıcılı bir filtre tasarlamak ve bunların OP-AMP'lı filtrelere göre avantaj ve dezavantajlarını belirlemektir. CCCII+ ve OP-AMP ile 0,5-30 Hz bantları arasında iki ayrı bant geçiren filtre tasarlanmıştır. Her iki devrenin benzetimi için Pspice programı kullanılmış ve OP-AMP devresi için LM741 OP-AMP, akım taşıyıcı için Q2N3904 ve Q2N3905 BJT'ler tercih edilmiştir. Bu devreler için çeşitli sonuçlar elde edilmiştir.

## 2. EEG Verisi

Benzetimi yapılan devrelere Bonn Üniversitesinden alınan EEG ham veri seti uygulanmıştır [8]. Bu veri setinin A epilepsi nöbeti geçiren ve E gözleri açık sağlıklı kişinin veri setleri kullanılmıştır. Her bir veri setinden bir dosya yani bir kişiye ait veriler kullanılmıştır. Bu dosyaların her biri 23,6 saniyelik bir kaydı içerir ve 4097 veri noktasına karşılık gelmektedir. Bu EEG sinyalleri 128 kanallı amplifikatör sistemi ile kaydedilip, 12 bit A/D çözünürlüğü ile 173,61 Hz örnekleme hızı ile sayısallaştırılmıştır. Şekil 1'de Epileptik ve normal kişinin Matlab ortamında görüntüsü verilmiştir.



(a) Normal

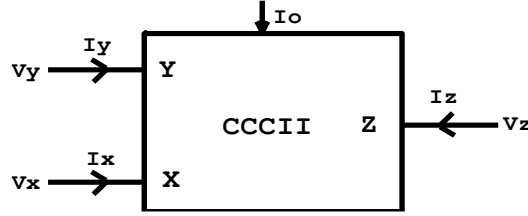


(b) Epilepsi nöbet

Şekil 1. EEG sinyalleri (a) normal; (b) epilepsi nöbet

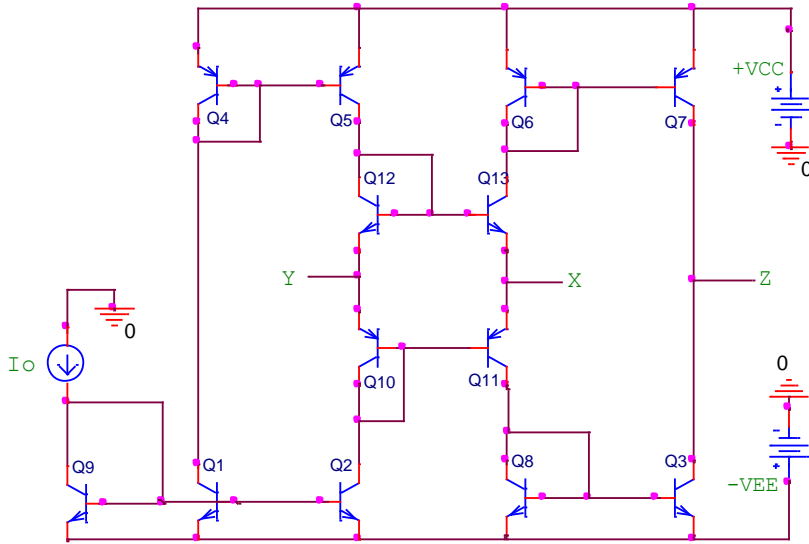
### 3. İkinci Nesil Akım Kontrollü Akım Taşıyıcılar (CCCII)

İkinci nesil akım kontrollü akım taşıyıcılar, ikinci nesil akım taşıyıcıdan (CCII) türetilen ve CCII devresinin X ucunda düşük kutuplama akımlarında ki seri parazitik direncinin ( $R_x$ ) akım ile kontrol edilmesiyle elde edilen bir devredir [10,11]. Akım kontrollü akım taşıyıcının blok şeması Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. CCCII'nin blok şeması

Blok şemasında da görüldüğü gibi CCCII devresi üç uçlu bir yapıya sahip ve  $I_0$  kutuplama akımı ile kontrol edilmektedir. CCCII'nin Z ucunda görülen akım devreye doğru ise pozitif tip ikinci nesil akım kontrollü akım taşıyıcı (CCCII+), akım devreden dışarı doğru ise negatif tip ikinci nesil akım kontrollü akım taşıyıcı (CCCII-) olarak adlandırılır. CCCII+'nin BJT ile devre yapısı Şekil 3’de gösterilmiştir.



Şekil 3. CCCII'nin BJT devre yapısı

Şekil 3’deki akım taşıyıcı devresine ait ideal tanım bağıntısı Denklem 1.a’da,  $I_X$  akımının kutuplama akımı ( $I_0$ ) ve Termal gerilimi ( $V_T$ ) arasındaki ilişki ise Denklem 1.b’de gösterilmiştir [12].

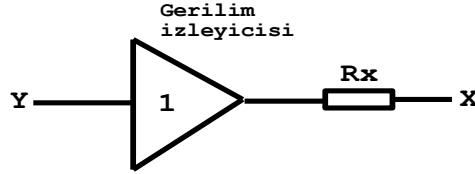
$$\begin{bmatrix} I_Y \\ V_X \\ I_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & R_x & 0 \\ 0 & \mp 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_Y \\ I_X \\ V_Z \end{bmatrix} \quad (1.a)$$

$$I_X = 2I_0 \cdot \sinh(V_X/V_T) \quad (1.b)$$

Denklem (1.b)’de  $V_X \ll V_T$  kabul edilirse parazitik direnç ifadesi Denklem 2’deki gibi ifade edilir.

$$R_X = \frac{V_T}{2I_0} \quad (2)$$

$V_T$  ısıl gerilimini göstermekte ve oda sıcaklığında değeri yaklaşık 25,85 mV kabul edilmektedir.  $I_0$  ise kutuplama akımını göstermektedir. Uygulamalarda bu  $R_x$  direncini mutlaka göz önünde bulundurmak gerekir aksi takdirde frekans cevaplarında yanlışlıklar meydana gelir. Bu  $R_x$  direncini ve devrenin  $R_x$ 'e bağlı diğer parametrelerini kutuplama akımını ( $I_0$ ) değiştirerek istediğimiz gibi ayarlayabiliriz. CCCII'nin X ve Y uçları arasındaki ilişki Şekil 4'deki devre ile gösterilebilir [11].

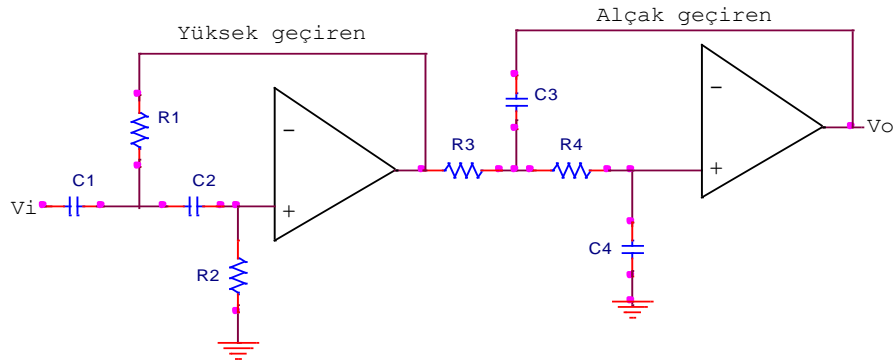


Şekil 4. CCCII'nin X ve Y uçları arasındaki eşdeğer devre yapısı

#### 4. Benzetim Devreleri

##### 4.1. 4.derece Butterworth tasarlanan bant geçiren filtre

Şekil 5'te görülen 4.dereceden Butterworth bant geçiren bir filtre devresidir [13].



Şekil 5. Butterworth bant geçiren filtre

Denklem 3 aktif bir filtrenin genel transfer fonksiyonuna ait bir denklemdir. Bu denklem kullanılarak hem yüksek geçiren filtrenin hem de alçak geçiren filtrenin transfer fonksiyonu bulunabilir [14].

$$T(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{Y_1 Y_2}{Y_1 Y_2 + Y_4 (Y_1 + Y_2 + Y_3)} \quad (3)$$

Denklem 3'de gerekli düzenlemeler yapıldığında alçak geçiren filtrenin transfer fonksiyonu ve doğal frekansı sırasıyla Denklem 4 ve Denklem 5'deki gibi elde edilir.

$$T(s) = \frac{s^2}{s^2 + s((C_1 + C_2)/R_2 C_1 C_2) + 1/R_1 R_2 C_1 C_2} \quad (4)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (5)$$

Denklem 3'de gerekli düzenlemeler yapıldığında yüksek geçiren filtrenin transfer fonksiyonu ve doğal frekansı sırasıyla Denklem 6 ve Denklem 7'deki gibi elde edilir.

$$T(s) = \frac{1/R_1 R_2 C_1 C_2}{s^2 + \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 C_1 C_2}\right) s + 1/R_1 R_2 C_1 C_2} \quad (6)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (7)$$

Bant geçiren filtre tasarımında merkez frekansı ( $f_c$ ), bant genişliği ( $BG$ ) ve kalite faktörü ( $Q$ ) bulunulmalıdır. Sırasıyla denklemleri aşağıda verildiği gibidir.

$$f_c = \sqrt{f_{c1} f_{c2}} \quad (8)$$

$$BG = f_{c2} - f_{c1} \quad (9)$$

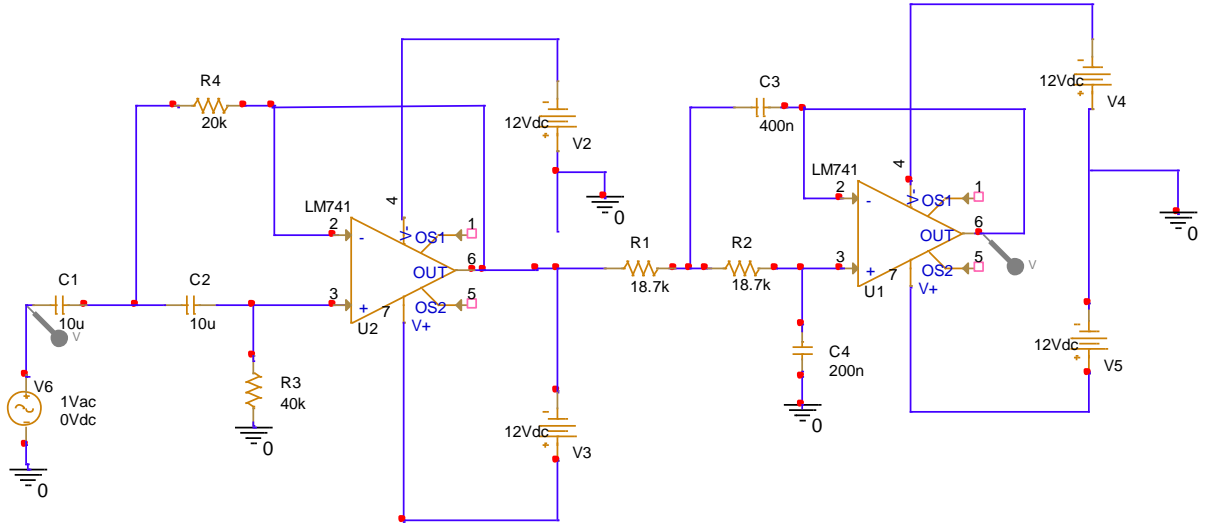
$$Q = \frac{f_c}{BG} \quad (10)$$

Tablo 1’de bant geçiren filtrenin yüksek geçiren ve alçak geçiren bölümleri için devre eleman değerleri verilmiştir.

**Tablo 1.** BGF'nin eleman değerleri

	$f_c$	$R_1$	$R_2$	$C_1$	$C_2$
<b>YGF</b>	0,5 Hz	20 k $\Omega$	40 k $\Omega$	10 $\mu$ F	10 $\mu$ F
<b>AGF</b>	30 Hz	18.7 k $\Omega$	18.7 k $\Omega$	400 nF	200 nF

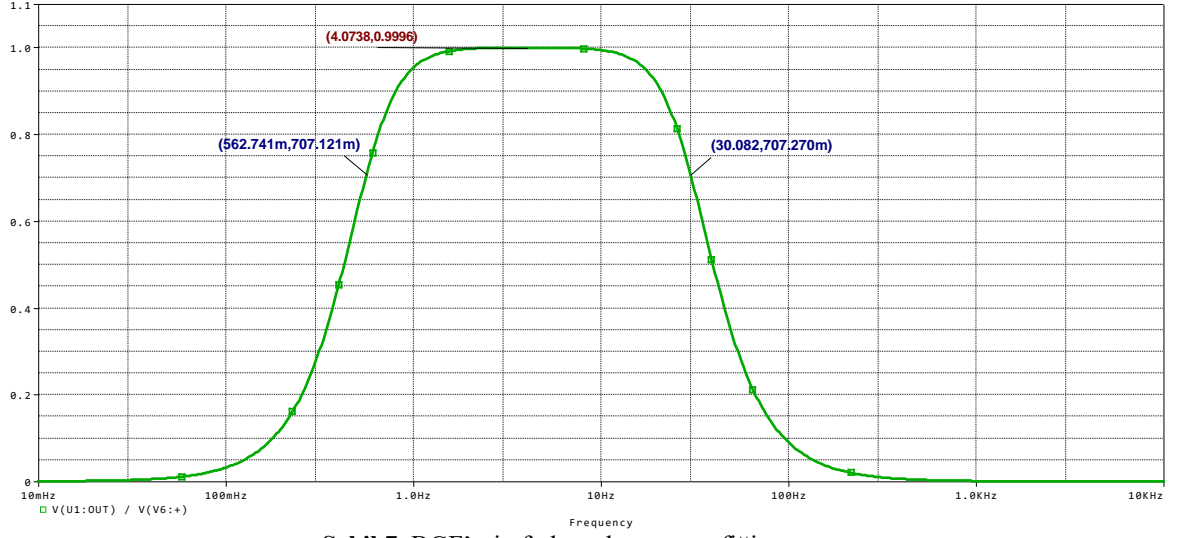
Şekil 6’da Butterworth bant geçiren filtrenin Pspice uygulamasında tasarlanan benzetim devresi verilmiştir.



**Şekil 6.** 4.derece Butterworth bant geçiren filtre

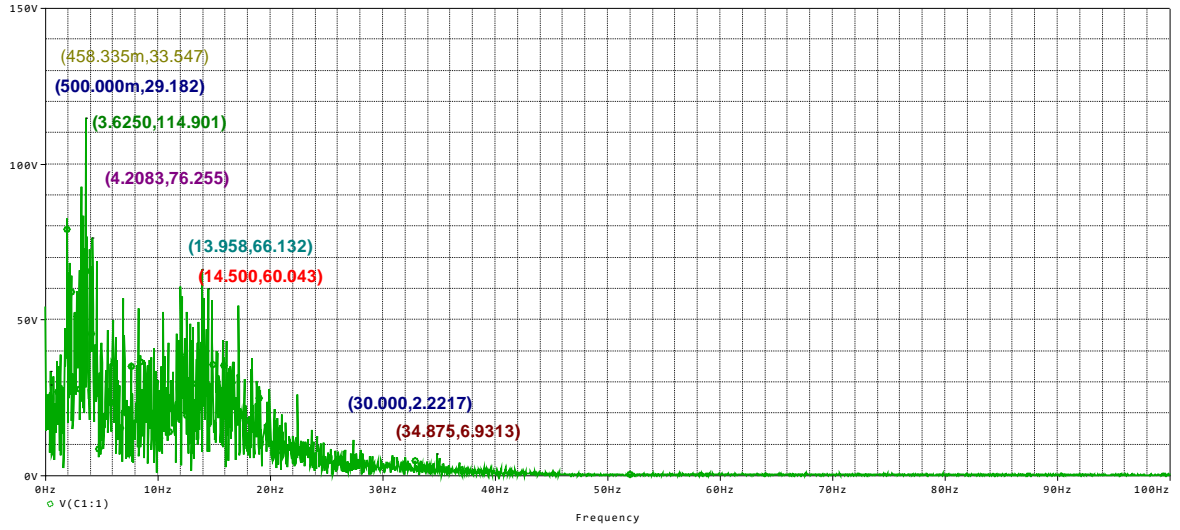
Butterworth bant geçiren filtrenin bant aralığı 0,5-30 Hz alınmıştır. Alt kesim frekansı 0,5 Hz, üst kesim frekansı 30 Hz’e göre:  $f_c = 3,873$  Hz,  $BG = 29,5$  Hz ve  $Q = 0,131$  ‘dir. Bant geçiren filtrenin frekans kazanç grafiği Şekil 7’de verilmiştir.



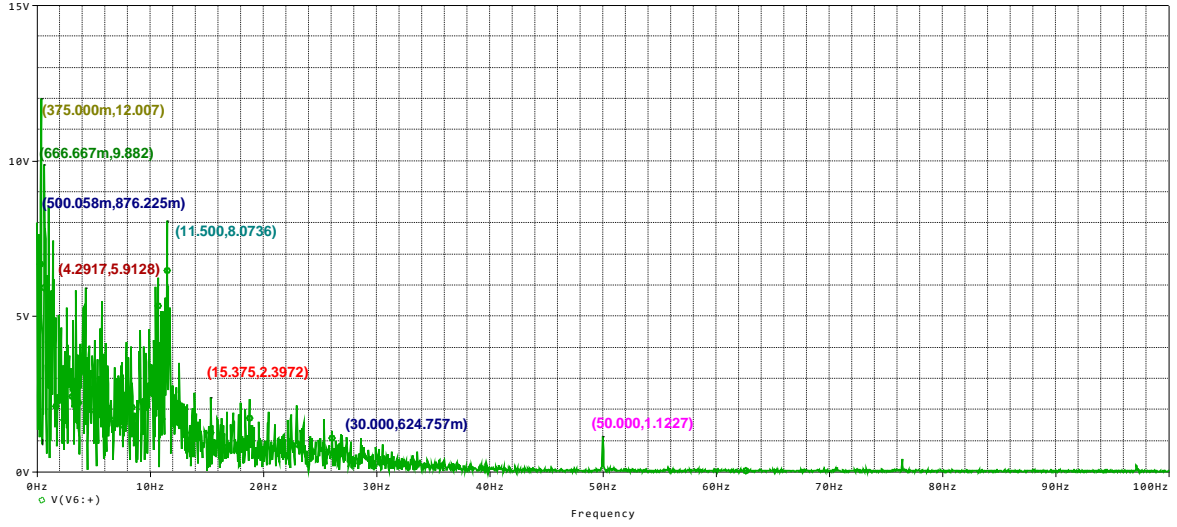


Şekil 7. BGF' nin frekans kazanç grafiği

Bu filtrenin maksimum kazanç değeri 1'dir. Grafiğe göre ölçülen alt kesim frekansı yaklaşık 0,56 Hz ve ölçülen üst kesim frekansı 30 Hz bulunmuştur. Benzetimi yapılan bant geçiren filtrenin Pspice uygulamasında girişine EEG sinyali verilmiş, elde edilen epilepsi hastasına ve sağlıklı kişiye ait giriş ve çıkış sinyalleri aşağıda verildiği gibidir.



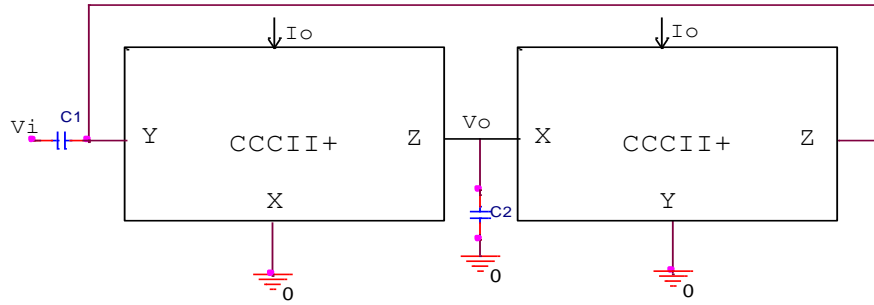
Şekil 8. Epilepsi giriş sinyali



Şekil 9. Sağlıklı giriş sinyali

#### 4.2.CCCII+ ile tasarlanan bant geçiren filtre

Şekil 10'da CCII'dan türetilmiş iki parazitik direnç ve iki kapasitöre sahip ikinci nesil akım kontrollü akım taşıyıcılı bant geçiren filtre devresi verilmiştir [15].



Şekil 10. CCCII tabanlı bant geçiren filtre devresi

Devre analiz edildiği zaman giriş ve çıkış gerilimine ait bağıntı sırasıyla Denklem 11 ve Denklem 12'deki gibi ifade edilebilir:

$$V_{Y1} - V_i = I_{Z2} \cdot \frac{1}{sC1} \quad (11)$$

$$V_o = (I_{Z1} + I_{X2}) \cdot \frac{1}{sC2} \quad (12)$$

Birinci akım taşıyıcının Z ucunda görülen akım bağıntısı ve ikinci akım taşıyıcının X ucunda görülen akım bağıntısı sırasıyla Denklem 13 ve Denklem 14'de ifade edildiği gibidir:

$$I_{Z1} = \frac{V_{Y1}}{R_{X1}} \quad (13)$$

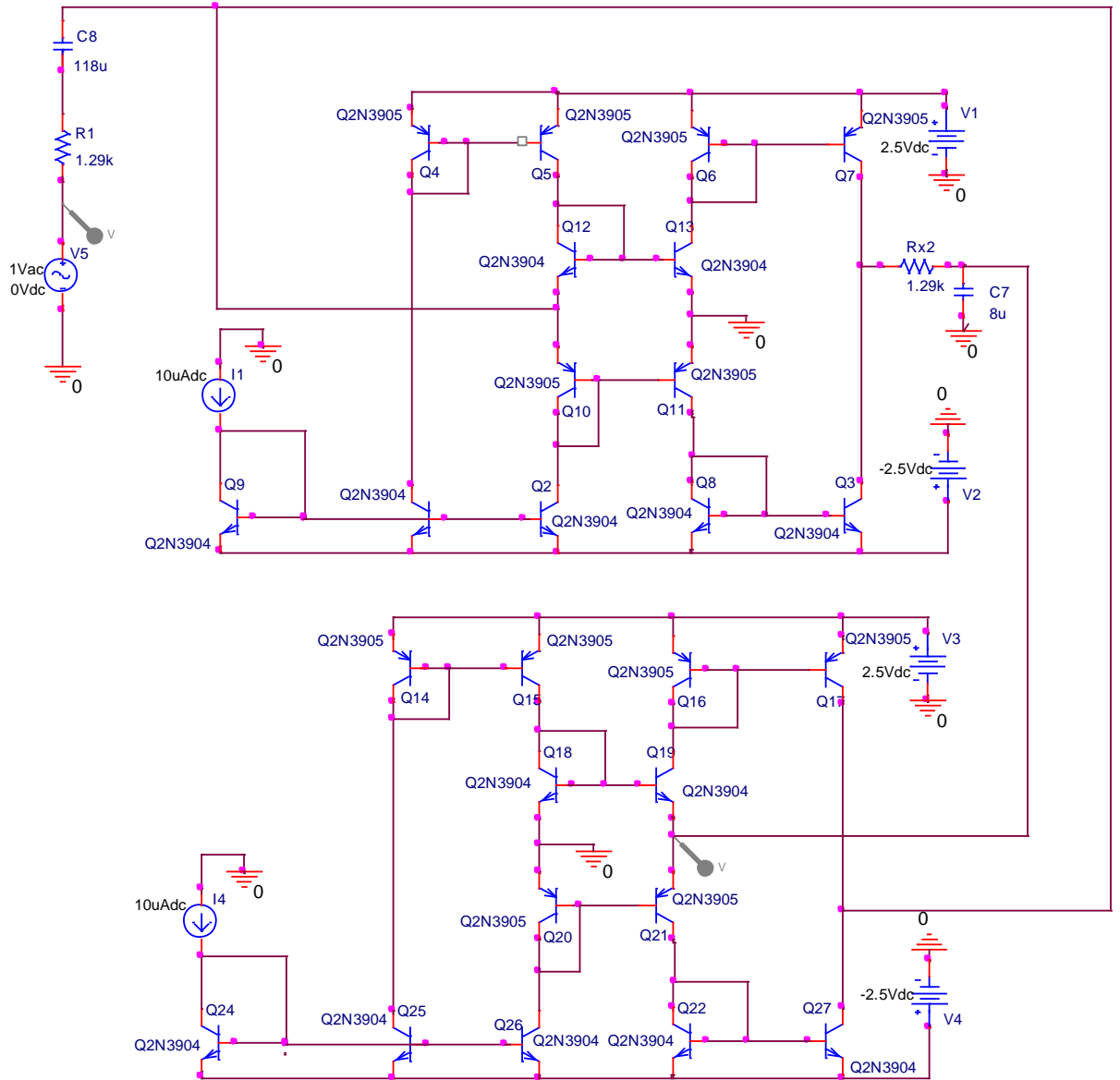
$$I_{X2} = -\frac{V_o}{R_{X2}} \quad (14)$$

Yukarıda verilen bağıntılardan gerekli düzenlemeler yapılırsa ve CCCII devresine aynı değerlerde kutuplama akımı verilirse bant geçiren filtrenin transfer fonksiyonu Denklem 15’de, açılma frekansı da Denklem 16’daki gibi ifade edilir:

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{sC_1 R_X}{1 + sC_1 R_X + s^2 C_1 C_2 R_X^2} \quad (15)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{R_X \sqrt{C_1 C_2}} \quad (16)$$

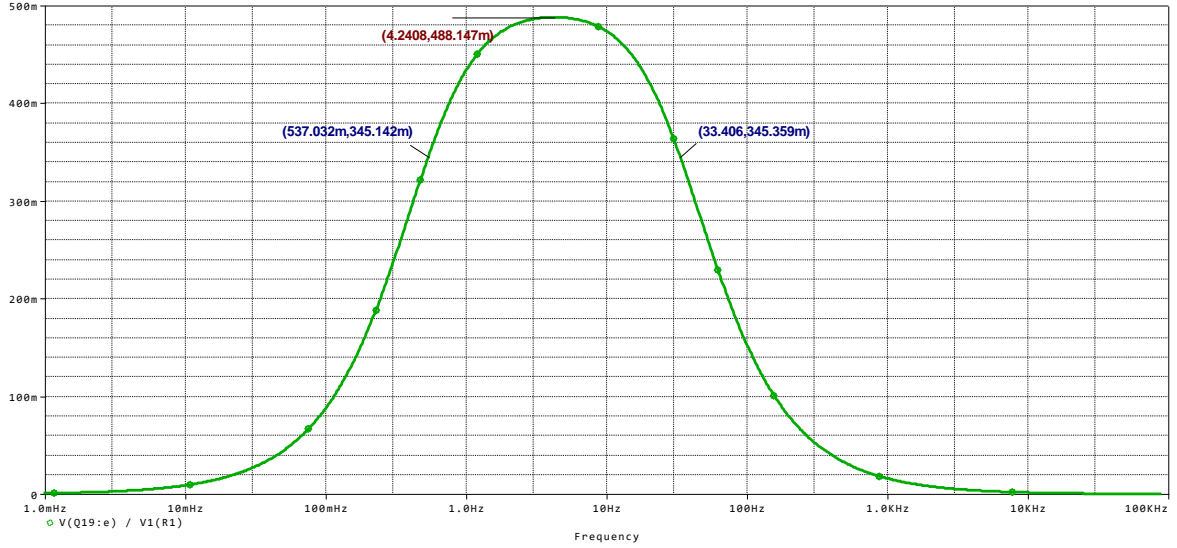
Şekil 11’de CCCII+ ile tasarlanan bant geçiren filtrenin Pspice uygulamasında gerçekleştirilen benzetim devresi verilmiştir.



Şekil 11. CCCII+ ile tasarlanan bant geçiren filtre devresinin benzetimi

Şekil 11'deki bant geçiren devrenin benzetimi için; BJT ile tasarlanmış 2 adet CCCII+ yapısı kullanılmış, kutuplama akımları eşit ve  $10 \mu\text{A}$  ve besleme gerilimleri  $2,5 \text{ V}$  seçilmiştir.  $C_1$  kondansatörü  $118 \mu\text{F}$ ,  $C_2$  kondansatörü ise  $8 \mu\text{F}$  seçilmiştir. Parazitik dirençler kutuplama akımından dolayı  $1,29 \text{ k}\Omega$  bulunmuştur.

Bant geçiren filtrenin bant aralığı  $0,5\text{-}30 \text{ Hz}$  seçilmiştir. Devrenin doğal frekansı yaklaşık  $f_c = 4 \text{ Hz}$  hesaplanmıştır. Devrenin alt kesim frekansı  $f_{c1} = 0,5 \text{ Hz}$ , üst kesim frekansı  $f_{c2} = 30 \text{ Hz}$  olarak hesaplanmıştır. CCCII+ bant geçiren filtrenin frekans kazanç grafiği Şekil 12'de verildiği gibidir:



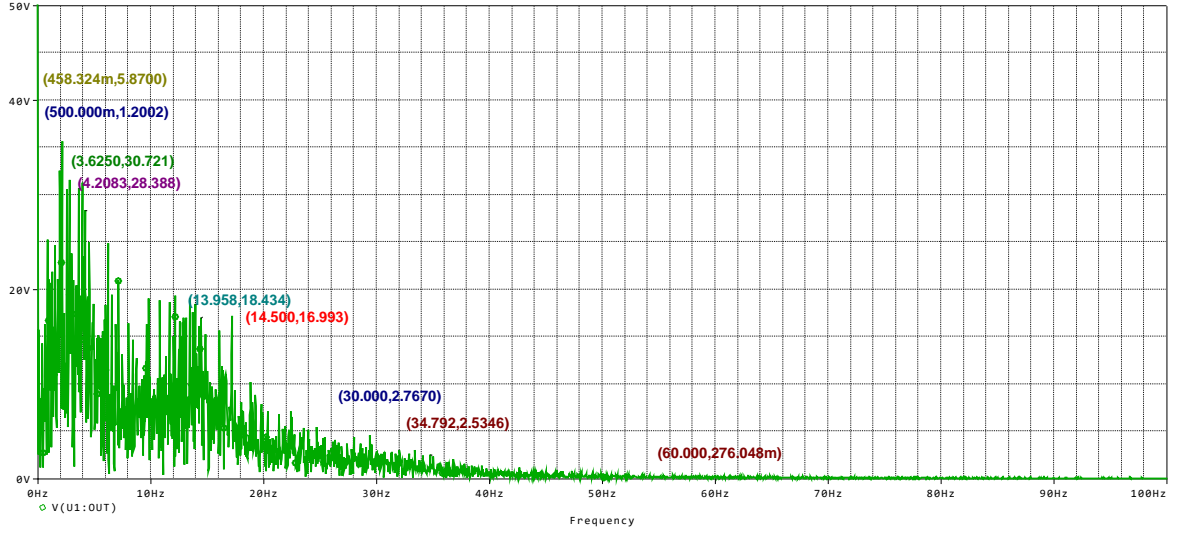
Şekil 12. CCCII+ ile tasarlanan bant geçiren filtrenin frekans kazanç grafiği

Şekil 12'de verilen grafiğin kazancı  $488 \text{ m}$  olarak ölçülmüştür. Alt kesim frekansı  $f_{c1} = 0,537 \text{ Hz}$ , üst kesim frekansı ise  $f_{c2} = 33,5 \text{ Hz}$  ölçülmüştür.

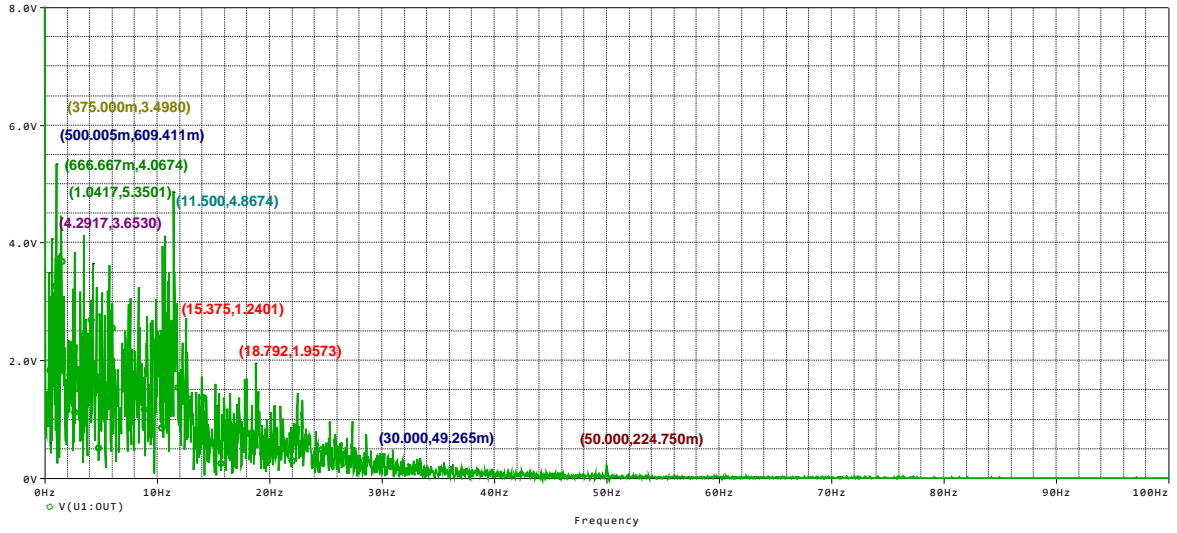
CCCII+ ile tasarlanan bant geçiren filtrenin Pspice uygulamasında girişine EEG sinyali uygulanmış, elde edilen epilepsi hastasına ve sağlıklı kişiye ait çıkış sinyalleri aşağıda verilmiştir. Sinyallerdeki her bir renk EEG sinyallerindeki her bir dalga aralığının ( $\delta$ ,  $\theta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) ve kesim frekanslarının maksimum değerini göstermektedir.

## 5. Sonuçlar ve Tartışma

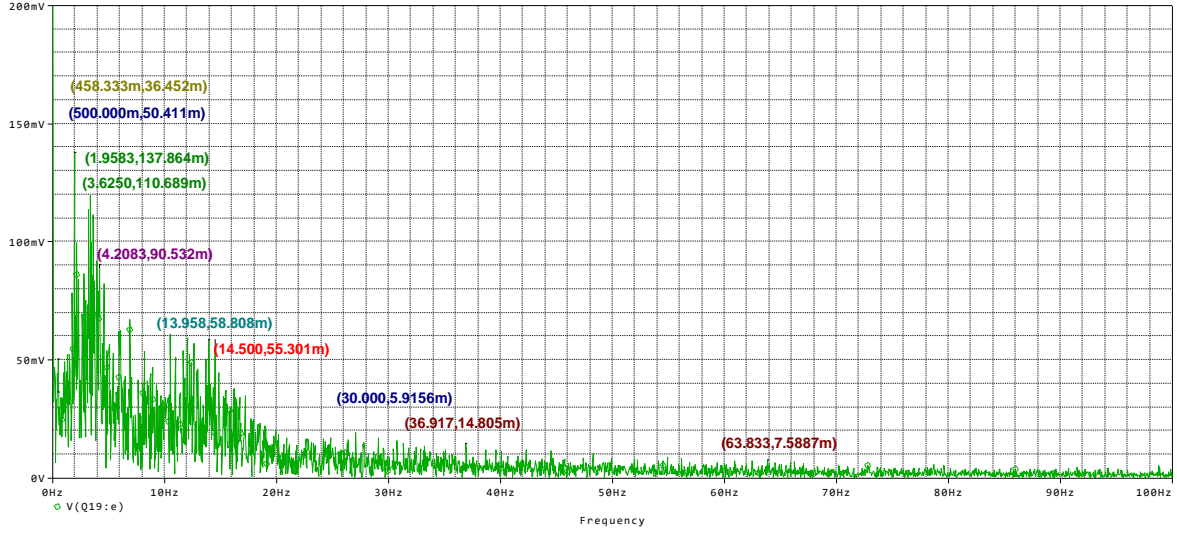
Bu çalışmada akım taşıyıcı (CCCII+) ve OP-AMP ile iki ayrı bant geçiren filtre devresi tasarlanarak EEG sinyalleri için akım taşıyıcı filtre devrelerinin üstünlüklerini göstermek amaçlanmaktadır. Önerilen bu iki devrenin benzetimi Pspice ortamında gerçekleştirilmiştir. Burada, bant geçiren filtrenin bant aralığı  $0,5\text{-}30 \text{ Hz}$  frekansa göre tasarlanmış ve EEG sinyalleri gibi her türlü düşük frekans uygulaması için uygundur. Bu çalışmada akım taşıyıcı ve OP-AMP ile tasarlanan filtre girişine EEG sinyali verilmiş ve ikisine ait sonuçlar Pspice ortamında incelenmiştir.



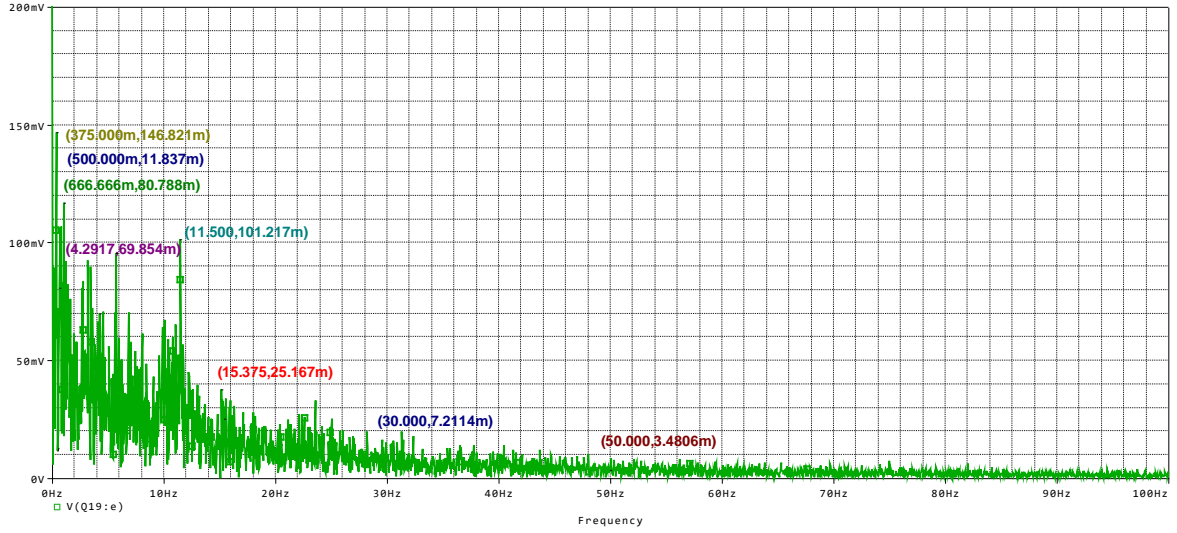
Şekil 13. Butterworth bant geçiren filtreye ait epilepsi çıkış sinyali



Şekil 14. Butterworth bant geçiren filtreye ait sağlıklı çıkış sinyali



Şekil 15. CCCII+ bant geçiren filtreye ait epilepsi çıkış sinyali



Şekil 16. CCCII+ bant geçiren filtreye ait sağlıklı çıkış sinyali

Bant geçiren filtrelerin uygulanması sonucu epilepsi hastasına ve sağlıklı kişiye ait elde edilen sinyallere Fourier Analizi uygulanmış ve EEG dalgalarında (Delta, Teta, Alfa, Beta, Gama) meydana gelen değişiklikler incelenmiştir. Akım taşıyıcı devreler, OP-AMP'lı devrelere göre daha doğrusal ve frekans performansına sahiptirler. OP-AMP'ların değişime tepki hızlarının (slew rate) düşük olması, girişteki değişikliklerin çıkışa yansımalarını azalttığından bu durum OP-AMP'ları dezavantajlı yapmaktadır. Ayrıca ortak modlu işaret bastırma oranı (CMRR)  $\mu\text{V}$ 'lar seviyesindeki fark modlu işaret gerilimlerinde kuvvetlendirme yapılırken, yüksek mertebelerde ortaya çıkan ortak modlu işareti bastırma işleminde önemlidir. Bu oran CCCII+ yapısında oldukça yüksek olduğundan bastırma işlemi CCCII+ devresinde kolay bir şekilde yapılabilmekteyken bu işlemi gerçekleştirmek işlemsel kuvvetlendiricilerle oldukça güçtür.

Epilepsi hastasının ve sağlıklı kişinin giriş sinyallerine bakıldığında epilepsi hastasının genlik değerlerinin sağlıklı kişiye göre daha yüksek olduğu görülmektedir. 0,5-30 Hz bant geçiren filtre uygulandığında 100 Hz'deki görüntüsü her bir dalga için incelendiğinde hem butterworth hem de CCCII+ bant geçiren filtrenin epilepsi sinyalini daha iyi filtrelediği görülmektedir. Her iki sinyal için OP-AMP devresine göre CCCII+ ile tasarlanan filtre de sönümlemenin daha iyi olduğu saptanmıştır. Bu tasarlanan iki filtre devresi için EEG ölçümlerinde kullanılacak olup CCCII+ filtre devresinin epilepsi gibi hastalıkların tanısında daha iyi sonuçlar vereceği öngörülmüştür.

## Teşekkür

Bu çalışma Kübra TEKİN' in yüksek lisans tez çalışmasının bir parçasıdır.

## Kaynaklar

- [1] Nunez P. L., Srinivasan R. *Electric Fields of the Brain - The Neurophysics of EEG*. New York: Oxford University Press, 2006.
- [2] Sanei S., Chambers J.A. *EEG signal processing*, John Wiley & Sons, London, ISBN: 978-0470025819; 2007.
- [3] Aydemir Ö., Kayıkçıoğlu T. EEG Tabanlı Beyin Bilgisayar Arayüzleri. Akademik Bilişim'09 - XI. Akademik Bilişim Konferansı Bildirileri; 2009; Harran Üniversitesi, Şanlıurfa, 7-13.
- [4] Dimalanta V.S.M., Hubilla B.C.R., Marquez J.C.J.S., Quiambao V.P.T., Tungala K.L., Prado S.V. Correlation of Emotion to Film Rating Classification Using EEG Signal Analysis. 5th. International Electrical Engineering Congress; 2017; Thailand. 1-4. doi: 10.1109/IEECON.2017.8075866.
- [5] Abdallah A., Diab M., Mahmoud S. 2017. A Micropower EEG Detection System Applicable for Paralyzed Hand Artificial Control. 40th International Conference on Telecommunications and Signal Processing; 2017; Spain. 411-414, doi: 10.1109/TSP.2017.8076017.
- [6] Lerga J., Saulig N., Lerga R., Stajduhar I. TFD Thresholding in Estimating The Number of EEG Components and The Dominant IF Using The Short-Term Renyi Entropy. International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis; 2017; Slovenia. 80-85, doi: 10.1109/ISPA.2017.8073573.
- [7] Aydemir Ö. Combining Sub-band Power Features Extracted from Different Time Segments of EEG Trials. 40th International Conference on Telecommunications and Signal Processing; 2017; Spain. 383-386, doi: 10.1109/TSP.2017.8076010.
- [8] Andrzejak RG, Lehnertz K, Rieke C, Mormann F, David P, Elger CE. Indications of nonlinear deterministic and finite dimensional structures in time series of brain electrical activity: Dependence on recording region and brain state, *Physical Review E*; 2001; 64(061907): 1-8.
- [9] Kitiş Ş, Apaydın H, Güntürkün R. Designed Filter with CCII+ and Analysis of EEG for Epilepsy and Alzheimer. *Acta Physica Polonica A*; 2017; 132(3): 423-426.
- [10] Fabre A., Saaid O., Wiest, F., Boucheron, C. Current controlled bandpass filter based on translinear conveyors. *Electronics Letters*; 1995; 31(20): 1727-1728.
- [11] Demirtaş M, Akım Taşyıcı Tabanlı Aktif Devre Elemanlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, 2014.
- [12] Fabre A., Alami M. Universal current mode biquad implemented from two second generation current conveyors. *IEEE Transactions on Circuits and Systems -I: Fundamental Theory and Applications*; 1995; 42 (7): 383-385.
- [13] Sadiq A.A., Othman N.B., Abdul Jamil M.M., Youseffi M., Denyer M. Wan Zakaria W.N., Md Tomari M.R. Fourth-Order Butterworth Active Bandpass Filter Design for Single-Sided Magnetic Particle Imaging Scanner. *Computers&Electrical Engineering*; 2018; 10(1-17): 17-21.
- [14] Kuo J.T., Shih E. Wideband bandpass filter design with three-line microstrip structures. In *Microwaves, Antennas, and Propagation*, IEE Proceedings; 2002; 149: 243-247.
- [15] Fabre A., Saaid O., Wiest F., Boucheron C. High frequency application based on a new current controlled conveyor. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications*; 1996; 43(2): 82-91.

## UHF Bandı Haberleşme Sistemleri İçin Çoklu Frekans Maruziyeti Etkilerinin İncelenmesi

Elgin ZORLU<sup>1\*</sup>, İzzet ALAGÖZ<sup>2</sup>, Bahadır ELMAS<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Elektrik Üretim Anonim Şirketi Genel Müdürlüğü, Bakım Yönetim Daire Başkanlığı, Ankara/ Türkiye

<sup>2</sup> Elektrik Üretim Anonim Şirketi Genel Müdürlüğü, Genel Müdürlük, Ankara/Türkiye

<sup>3</sup> Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, İstatistik Bölümü, İstanbul/ Türkiye

\*<sup>1</sup> elginzorlu@yandex.com.tr, <sup>2</sup> izzetalagoz@hotmail.com, <sup>3</sup> bahadir.elmas@msgsu.edu.tr

(Geliş/Received: 23/08/2022;

Kabul/Accepted: 18/12/2021)

**Öz:** Elektromanyetik radyasyon; evlerimizde, iş yerlerimizde, toplu taşıma araçlarında ve kalabalık sosyal etkinliklerde çevremizi bizimle paylaşan bir unsurdur. Bu durum baz istasyonlarından, mobil telefonlardan, kablosuz yerel alan ağ cihazlarından veya Radyo-Televizyon vericilerinden kaynaklanabilir. Elektromanyetik radyasyonun insan vücuduna olan etkilerini hesaplayabilmek için bu radyasyonun ne kadarının insan vücudu tarafından emildiğinin bilinmesi gereklidir. Bunun için de elektromanyetik radyasyon yayan kaynakların Özgül Emilim Oranı (ÖEO) olarak bilinen değerleri hesaplanmalıdır. Bu çalışmada, insanların günlük yaşamda vakitlerini geçirdiği ortamlarda, cep telefonlarından, kablosuz modemlerden, bilgisayarların üzerindeki kablosuz yerel alan ağ erişim kartlarından ve Bluetooth sistemlerden kaynaklanan elektromanyetik radyasyona maruz kalan insanlar üzerinde oluşan elektriksel alanlar, tek kullanıcı ve kalabalık ortamlar için benzetimler yapılarak senaryolaştırılmış ve bu senaryolar gereği insanlar üzerindeki toplam elektriksel alan değeri hesaplanarak, uluslararası standartlar ile belirlenmiş emniyetli maruziyet sınırları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen bu elektriksel alan değerleri kullanılarak da insan beyin sıvısındaki elektromanyetik radyasyon soğurulma miktarları ile maruziyet süresince beyin sıvısında meydana gelen sıcaklık artışları hesaplanmış ve sonuçlara ulaşılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Çoklu Frekans Maruziyeti, Halk Sağlığı, Mesleki Sağlık, Özgül Emilim Oranı ve Sıcaklık.

### Investigation of Multiple Frequency Exposure Effects for UHF Band Communication Systems

**Abstract:** Electromagnetic radiation; It is a factor that shares our environment with us in our homes, workplaces, public transportation vehicles and crowded social events. This can be caused by base stations, mobile phones, wireless local area network devices or Radio-Television transmitters. In order to calculate the effects of electromagnetic radiation on the human body, it is necessary to know how much of this radiation is absorbed by the human body. For this reason, the Specific Absorption Rate (SAR) of the sources that emit electromagnetic radiation should be calculated. In this study, in environments where people spent their time in everyday life, mobile phones, wireless modems from computers on the wireless local area network card and Bluetooth access that occurs on people who are exposed to electromagnetic radiation from electrical fields systems, single-user scenarios by simulations and crowded environments for scripted scenes and people that made the total electric field by calculating the value designated with the limits for safe exposure were compared with international standards. Using these electrical field values, the amount of electromagnetic radiation absorption in the human brain fluid and the temperature increases in the brain fluid during exposure were calculated and the results were reached.

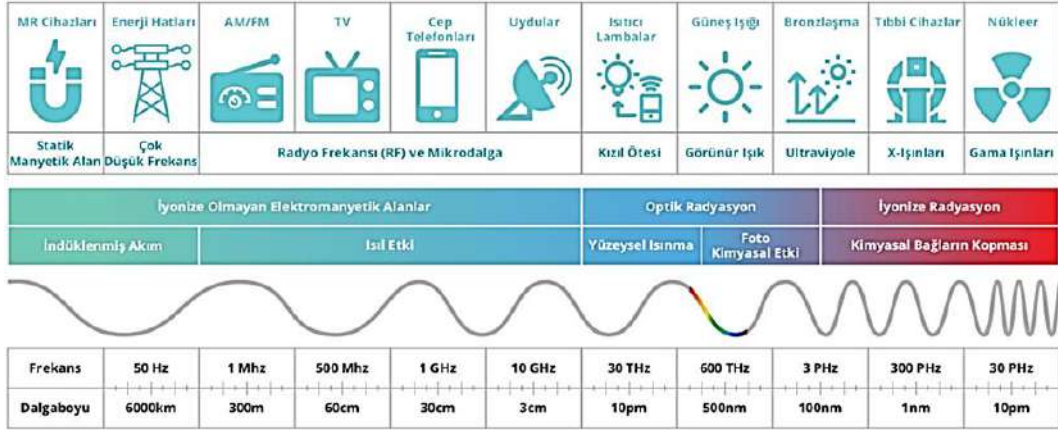
**Keywords:** Multiple Frequency Exposure, Public Health, Occupational Health, Specific Absorption Rate and Temperature.

### 1. Giriş

Cep telefonları günümüzde, klasik telefon konuşmasının yanı sıra internet erişimi, veri transferi, sosyal medya erişimi, görüntülü görüşme, kablosuz kulaklık ile müzik dinleme gibi amaçlarla da kullanılmaktadır. Tüm bu aktivitelerin gerçekleştirilmesi esnasında kullanıcılar elektromanyetik radyasyona (EMR) maruz kalmaktadır [1]. Bu çalışmada, haberleşme sistemlerinin yaydığı elektriksel alandan kaynaklanan elektromanyetik radyasyonun insan sağlığına olan etkisi incelenmiş olup, özellikle kalabalık ortamlarda kullanıcıların hem kendisine hem de diğer kullanıcılara ait haberleşme cihazlarından etkilendiği gösterilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla; iş yerleri, toplu taşıma araçları, sinema, tiyatro, konser gibi kalabalık ortamlardaki haberleşme cihazlarının etkisinde olan insanların toplamda ne miktarda elektromanyetik radyasyona maruz kaldığı ve bu maruziyet neticesinde beyin sıvısında ne kadarlık bir sıcaklık artışının meydana geldiği hesaplanmış ve bulunan değerler uluslararası kuruluşlarca kabul edilen güvenlik değerleri ile karşılaştırılmıştır [1-5].

\* Sorumlu yazar: [elginzorlu@yandex.com.tr](mailto:elginzorlu@yandex.com.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-5092-2140; <sup>2</sup> 0000-0002-7167-8340; <sup>3</sup> 0000-0002-8732-9997





Şekil 1. Elektromanyetik tayf [3]

Şekil-1’de Elektromanyetik tayf görülmektedir [3]. Ortamdaki atomlardan iyon koparacak kadar enerjiye sahip olmayan (10 eV’dan küçük) radyasyon iyonlaştırmayan, ortamdaki atomlardan iyon koparacak kadar enerjiye sahip olan (10 eV’dan büyük) radyasyon ise iyonlaştıran radyasyondur. İyonlaştırıcı radyasyonun sağlığı olumsuz etkilediği tıp otoritelerince kanıtlanmış durumdadır. Baz istasyonlarının, cep telefonlarının ve diğer kablosuz haberleşme cihazlarının yaydığı elektromanyetik radyasyonlar, spektrumun iyonlaştırmayan radyo frekansı ve mikrodalga bandında bulunmaktadır [4]. Kablosuz haberleşme cihazlarının gündelik hayatın önemli bir parçası olması, bu cihazların insan sağlığı üzerine olan olumsuz etkilerinin de sistematik olarak incelenmesini gerekli kılmıştır [5]. Bu tür cihazların insan sağlığını olumsuz etkilediği, özellikle sinir sistemi üzerine kötü etkilerinin olduğu [6-11], beyin hassas dokusundaki ve hücrelerdeki iyonik konsantrasyonu değiştirdiği [12-17], 1970’li yıllardan günümüze kadar yapılan birçok çalışmaya konu olmuştur. Bu çalışmada ise daha önce literatürde çalışılmayan özgün senaryolarla, en kötü benzetim durumları ve en uzun maruziyetler göz önünde bulundurulup hesaplamalar yapılarak sonuçlara ulaşılmış ve bu yönüyle literatüre bir katkı sağlanması öncelenmiştir.

Cep telefonu haberleşmesinde genel olarak; GSM 900 ve GSM 1800 taşıyıcı frekansları kullanılmaktadır. GSM 1800 sistemi daha fazla bant genişliği sağlar ancak daha az çıkış gücüne sahiptir [18]. Ortalama 2 W çıkış gücüne sahip 900 MHz’de çalışan bir mobil telefondan 2,2 cm ötedeki elektrik alan değeri 400 V/m şiddetinde iken bu değer 1800 MHz ve 1 W çıkış gücü ile 200 V/m’dir [1,2]. Cep telefonundan yayılan elektromanyetik radyasyon miktarı ilettiği sinyalin gücüne bağlıdır. Özellikle son yıllarda mobil telefonlar ile veri aktarımlarının yapılması, cep telefonlarının en yüksek çıkış gücünde çalışmasına neden olmaktadır. Açık olan bir cep telefonu görüşme yapılmıyorken bile belirli aralıklarla kapsama alanında olduğu baz istasyonuna sinyal gönderir. Bu yüzden cep telefonu kullanıcılarının elektromanyetik radyasyon etkileşimi ana istasyonun yakınında yaşayanlara göre daha yüksektir. Cep telefonunda aranan karşı taraf ile bağlantı aşamasında yayılan radyasyon değeri en üst seviyeye çıkar ve bağlantı sağlanınca azalır. Ayrıca hareket halinde cep telefonu kullanımlarında baz istasyonlarının kapsadığı alanlar arasında geçiş yapıldığından maruz kalınan radyasyon da artmaktadır [1,19].

Maruz kalınan elektrik alandan dolayı bir dokuda ya da tüm vücutta meydana gelen elektromanyetik radyasyon soğurulması özgül emilim oranı ile tanımlanmıştır [20]. Özgül emilim oranı değeri küp şeklindeki 1 gr (Amerika’da) veya 10 gr’lık (Avrupa’da) bir dokuya elektromanyetik radyasyon uygulanarak hesaplanır [21]. Elektromanyetik radyasyona maruz kalan dokularda, maruziyet süresine bağlı olarak dokuda meydana gelen sıcaklık artışı ile SAR (ÖEO) arasındaki matematiksel ilişki (1) denkleminde verilmiştir [1,2].

$$\text{ÖEO} = c \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (1)$$

ÖEO; özgül emilim oranını (W/kg),  $c$ ; dokunun özgül ısı kapasitesini (Joule/kg°C),  $\Delta T$ ; doku sıcaklığındaki değişimi (°C),  $\Delta t$  ise elektriksel alana maruz kalınan süreyi (s) ifade etmektedir. ÖEO ile dokunun maruz kaldığı elektriksel alanın büyüklüğü arasındaki matematiksel ilişki ise (2) denklemindeki gibidir [1,2].

$$\text{ÖEO} = \frac{\sigma}{2\rho} |E|^2 \quad (2)$$

$\sigma$ ; dokunun iletkenlik katsayısını ( $\text{Watt/m}^3$ ),  $\rho$ ; dokunun yoğunluk katsayısını ( $\text{kg/m}^3$ ),  $|E|$  ise nüfuz eden elektrik alanın rms değerini ( $\text{Volt/m}$ ) ifade eder. Dokunun iletkenliği ihtiva ettiği su oranına bağlı olarak artar. Dokunun iletkenlik katsayısı da (3) denklemindeki gibi yazılabilir [1,2].

$$\sigma = \omega \epsilon_0 \epsilon_r \quad (3)$$

$\omega$ ; elektromanyetik dalganın açısal frekansını ( $2\pi f$ ),  $\epsilon_0$ ; serbest uzayın yalıtkanlık sabitini ( $8,85 \times 10^{-12}$  Farad/m);  $\epsilon_r$  ise boyutsuz olup dokunun bağlı geçirgenlik sabitini ifade etmektedir [1,2]. Beyin sıvısı için elektriksel değerler de Tablo 1’de verilmiştir [2,20,22].

**Tablo 1.** İnsan beyin sıvısının elektriksel özellikleri

Doku Türü	Frekans (MHz)	$c$ (Joule/kg°C)	$\sigma$ (Watt/m <sup>3</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\epsilon_r$
Beyin Sıvısı	900	3650	2.3	1050	45.80
	1800		4.4		43.50
	2400		5.7		42.60

### 1.1. SAR (ÖEO) güvenlik değerleri

Uluslararası İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyondan Korunma Komitesince (ICNIRP) kabul edilen mesleki ve halka açık alanlarda frekansa bağlı ÖEO güvenlik değerleri Tablo 2’de belirtildiği gibidir [23].

**Tablo 2.** ÖEO güvenlik değerleri

Frekans Aralığı	Specific Absorption Rate – SAR (ÖEO) (W/kg)					
	Mesleki Alanlar			Halka Açık Alanlar		
	Tüm Vücut	Baş-Gövde	Kollar	Tüm Vücut	Baş-Gövde	Kollar
10 MHz - 10 GHz	0.4	10	20	<b>0.08</b>	2	4

4 W/kg’lık ÖEO değerine sahip bir radyasyona yarım saat maruz kalan dokunun sıcaklığı 1 °C artmaktadır [1,2,4,5]. Bu nedenle ÖEO temel sınırı 4 W/kg olarak kabul edilmiştir. Tüm vücut için 6 dakikalık etkilenme süresinde işyerleri için, 4 W/kg’ın 10 kat düşük (0,4 W/kg), halka açık yerler için ise 4 W/kg’ın 50 kat düşük (0,08 W/kg) güvenlik payları esas alınmıştır [23]. Mesleki etkilenme sınırları, çalışanların işimaya karşı korunur olmaları nedeniyle genel halk sağlığı sınırlarından daha yüksek tutulmuştur [20].

Güvenlik limitlerini ÖEO değerleriyle belirlemek pratik olmadığından, ÖEO değeri olarak verilen temel limitlerden türetilmiş limitlere geçilir. Bu limit değerler kolay ölçülebilir ve pratik olması nedeniyle, frekans aralığına ve büyüklüğüne bağlı olarak elektrik alan şiddeti olarak verilir. Türetilmiş limitler, matematiksel olarak veya belirli bir frekansta yapılan deney sonuçlarının uyarlaması ile elde edilmektedir. Uluslararası İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyondan Korunma Komitesince (ICNIRP) kabul edilen mesleki ve halka açık alanlarda frekansa bağlı elektriksel alan güvenlik değerleri Tablo 3’de, halka açık alanlarda 900, 1800 ve 2400 MHz frekanslarında ortam ve tek cihaz için elektriksel alan güvenlik değerleri ise Tablo 4’de verilmiştir [23].

**Tablo 3.** ICNIRP elektriksel alan güvenlik değerleri

Frekans Aralığı	Elektrik Alan (V/m)	
	Mesleki Alanlar	Halka Açık Alanlar
	400-2000 MHz	$3 f^{1/2}$
2-300 GHz	137	61

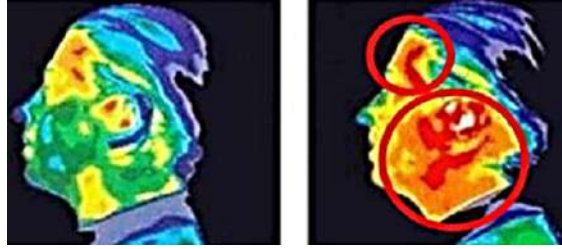
**Tablo 4.** ICNIRP kamusal alanlarda tek cihaz için elektriksel alan güvenlik değerleri

Frekans Aralığı	Elektrik Alan (V/m)			
	900 MHz	1800 MHz	2400	
	ICNIRP	Ortam	41.25	58.34
	Tek cihaz	<b>10.23</b>	14.47	15

## 1.2. Haberleşme sistemlerinin sağlık etkileri

Elektromanyetik radyasyonun insan vücudu üzerindeki etkisi, termal ve termal olmayan etki şeklinde meydana gelir. Elektromanyetik radyasyon vücut tarafından emildiğinde, biyolojik doku içerisindeki moleküllere bir kuvvet uygulayarak bu moleküllerin hareket etmesine neden olur. Moleküllerin doku içinde sürtünme ve diğer moleküllerle etkileşimi sonucu da ısı açığa çıkar. Bu ısı, insan vücudunda ısı düzenleyici sistem tarafından bertaraf edilir. Beyin sıvısı gibi su içeriği fazla olan dokularda, su içeriği az olan dokulara göre daha fazla sıcaklık artışı olur. Cep telefonundan yayılan elektromanyetik radyasyonun yaklaşık olarak yarısı kullanıcının başı (beyin sıvısı ve kafatası) ve telefonu tutan el (deri-kas sistemi) tarafından soğurulur. İnsan vücudu 1 °C'lik sıcaklık artışını tolere edemediğinden vücut sıcaklığını ortalama 1 °C arttıracak elektromanyetik radyasyon emilimi insan sağlığı için tehlike arz etmektedir [20,22,23,25]. Örneğin; Elektromanyetik Aşırı Duyarlılık (EHS-Electromagnetic Hyper Sensitivity); ilk defa 1950'lerde Sovyetler Birliği'nde "Radyo Dalgası Hastalığı" olarak literatüre geçmiş ve daha sonra kişilerin elektromanyetik radyasyona maruz kalmaları ile aşırı hassasiyet sonucu oluşan, dermatolojik, psikolojik ve nörolojik semptomlarla seyreden bir hastalık olarak tanımlanmıştır [4,5,20,22].

Doğada yaşayan bütün canlılar gibi insanlar da içinde yaşadığı doğal çevrede bulunan kaynaklardan yayılan farklı tür radyasyonlara belirli ölçülerde sürekli maruz kalmaktadır [26]. Yapılan araştırmalar, elektromanyetik radyasyonun küçük güçlerde bile, uzun ve kısa vadede çeşitli biyolojik etkilere neden olduğunu göstermiştir [1]. Cep telefonlarının kısa vadeli maruziyet (gün içinde) sonucu görülen zararlarını; görüş alanında daralma, kalp rahatsızlıkları, kalp pilinin bozulma riski, hafıza zayıflaması ve beyin tümörü riski, yoğun stres ve yorgunluk hissi, kalıcı ve geçici işitme bozuklukları, konsantrasyon ve dikkat bozulması, embriyo gelişiminin zarar görmesi, kulak çınlaması ve kulaklarda ısınma, kadınlarda düşük riskinin artması, kan hücrelerinin bozulması, bas ağrıları ve sersemleme, bağışıklık sisteminin bozulması şeklinde sayılabilir [24,25]. Uzun vadeli maruziyet (8-10 yıl içinde) sonucu görülen zararları ise; yüksek tansiyon, genetik yapının bozulması, sperm sayısının azalması, beyaz kan hücresi kanseri, cilt kanseri, kan beyin bariyerinin zedelenmesi olarak sıralanabilir [24,25]. Şekil 2'de cep telefonu ile on beş dakikalık konuşma sonucunda bir insanın baş kısmında meydana gelen sıcaklık değişimi görülmektedir [27].



Şekil 2. Baş kısmındaki 15 dakikada oluşan sıcaklık değişimi [27]

## 1.3. Haberleşme cihazlarının elektriksel alan değerleri

Cep telefonunun bekleme ve konuşma anındaki mesafeye bağlı ortalama elektriksel alan değerleri Tablo 5'deki gibidir [28].

Tablo 5. Cep telefonlarının mesafeye bağlı ortalama EA değerleri

Mesafe (m)	Elektrik Alan (V/m)	
	Bekleme (ortalama)	Konuşma (ortalama)
0 (temas hali)	0.41	4.35
0.1	0.15	1.65
0.3	0.10	1.10
0.5	0.08	0.88
1.0	0.02	0.22
1.5	0.01	0.11
2.0	0.00	0.00

Kablosuz ağlar, akıllı telefon kullanım oranlarındaki artışla dünya çapında popülerlik kazanmıştır. Bu nedenle, hücresel ağlar ve kablosuz yerel alan ağları üzerindeki veri trafiği de buna bağlı olarak sürekli artmaktadır [29].

Kablosuz modemlerin mesafe bağlı ortalama elektriksel alan değerleri Tablo 6'da verilmiştir [28].

**Tablo 6.** Kablosuz modemlerin mesafeye bağlı ortalama EA değerleri

Mesafe (m)	Elektrik Alan (V/m)
0.25	4.00
0.50	2.00
1.00	1.00
1.50	0.75
2.00	0.50
2.50	0.25
5.00	0.20

Kablosuz yerel alan ağı erişim kartının mesafeye bağlı ortalama elektriksel alan değerleri Tablo 7'de verilmiştir [28].

**Tablo 7.** Kablosuz yerel alan ağı erişim kartının mesafeye bağlı ortalama EA değerleri

Mesafe (m)	Elektrik Alan (V/m)
0.5	3.0
1.0	1.7
1.5	0.8
2.0	0.3
2.5	0.1

Bluetooth sisteminin mesafeye bağlı ortalama elektriksel alan değerleri Tablo 8'de verilmiştir [28].

**Tablo 8.** Bluetooth sisteminin mesafeye bağlı ortalama EA değerleri

Mesafe (m)	Elektrik Alan (V/m)
0.1	4.0
0.2	2.0
0.3	1.0
0.4	0.6
0.5	0.4
1.0	0.2

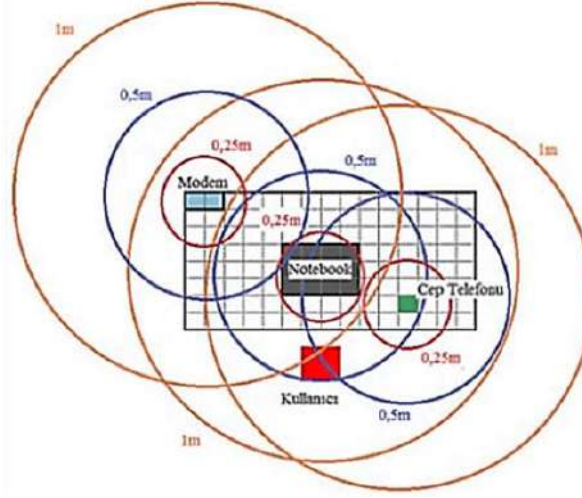
## 2. Yöntem

Elektromanyetik aşırı duyarlılıkta görülen semptomlar ile kısa ve uzun süreli maruziyetler neticesinde ortaya çıkan semptomlardan hangilerinin elektrik alandan veya hangilerinin ÖEO değerinden ve dokudaki sıcaklık artışından kaynaklandığı kesin çizgilerle birbirinden ayrıştırılamamaktadır [4,5,18]. Bu çalışmada herhangi bir laboratuvar çalışması yapılmamıştır. Literatürdeki çalışmalarda önceden ölçülen ve Haberleşme cihazlarının elektriksel alan değerleri başlığı altında verilen değerler kullanılarak benzetimi yapılan beş farklı özgün senaryoda, cihazların mesafeye bağlı ortalama elektrik alan değerlerine göre hesaplamalar yapılmış, toplam elektriksel alan, ÖEO ve beyin sıvısındaki sıcaklık artışlarındaki güvenlik limit değerleri aşan durumlar ayrı ayrı belirlenmiş ve bu aşan değerler tablolarda gösterilmiştir.

### 2.1. Senaryo-1 (kişisel çalışma masası)

Şekil 3'de, kişisel çalışma masasında oturan bir kişiye cep telefonu, kablosuz modem, WLAN erişim kartı ve Bluetooth'dan mesafelerine bağlı olarak etkiyen elektriksel alanlar gösterilmiştir. Tablo 9 ve Tablo 10'da ise cep telefonu ile konuşma/bekleme anlarındaki, kullanıcının diğer cihazlarla birlikte maruz kaldığı toplam elektriksel

alan değerleri hesaplanmış ve bu değerlerden hareketle toplam ÖEO değerleri bulunarak; 6 ve 30 dakika ile 1, 4 ve 8 saat için kişinin beyin sıvısında meydana gelen sıcaklık değişimleri hesaplanmıştır.



Şekil 3. Kişisel çalışma masası

Tablo 9. Kişisel çalışma masası için beyin sıvısı sıcaklık değişimi (konuşma)

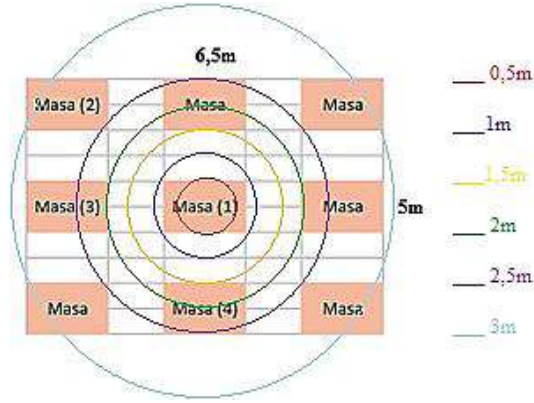
Cihaz	Mesafe (m)	Maruz Kalınan EA (V/m)	Toplam EA (V/m)	Frekans (MHz)	ÖEO (W/kg)	Maruz Kalınan Süre (Δt) Beyin Sıvısındaki Sıcaklık Artışı (ΔT) (°C)					
						6 dak.	30 dak.	1 saat	4 saat	8 saat	
Cep T.	0.0	4.35	8.75	4.35	900	0.021	0.002	0.010	0.020	0.081	0.163
				4.35	1800	0.040	0.004	0.019	0.039	0.155	0.309
Modem	1.0	1.00	8.75	4.40	2400	0.052	0.005	0.026	0.052	0.207	0.413
A.Kart	0.5	3.00									
BlueT.	0.5	0.40									
					900 ve 2400	0.073	0.007	0.036	0.072	0.288	0.576
					1800 ve 2400	<b>0.092</b>	0.009	0.045	0.091	0.362	0.722

Tablo 10. Kişisel çalışma masası için beyin sıvısı sıcaklık değişimi (bekleme)

Cihaz	Mesafe (m)	Maruz Kalınan EA (V/m)	Toplam EA (V/m)	Frekans (MHz)	ÖEO (W/kg)	Maruz Kalınan Süre (Δt) Beyin Sıvısındaki Sıcaklık Artışı (ΔT) (°C)					
						6 dak.	30 dak.	1 saat	4 saat	8 saat	
Cep T.	0.0	0.41	4.81	0.41	900	0.000012	0.000	0.0001	0.0002	0.0007	0.0014
				0.41	1800	0.000021	0.000	0.0002	0.0003	0.0014	0.0027
Modem	1.0	1.00	4.81	4.40	2400	0.052000	0.005	0.026	0.052	0.207	0.413
A.Kart	0.5	3.00									
BlueT.	0.5	0.40									
					900 ve 2400	0.052	0.005	0.026	0.052	0.207	0.415
					1800 ve 2400	0.052	0.005	0.026	0.052	0.208	0.416

## 2.2. Senaryo-2 (ofis ortamı)

Şekil 4'te, dokuz çalışanlı bir ofiste orta masada oturan ofis çalışanın, kendisine ve çalışma arkadaşlarına ait cihazlar ile ortak kullanımdaki modem mesafesine bağlı olarak etkileyen elektriksel alanlar gösterilmiştir. Tablo 11 ve Tablo 12'de ise cep telefonu ile konuşma/bekleme anlarında, ofis çalışanın diğer cihazlar ile birlikte maruz kaldığı toplam elektriksel alan değerleri hesaplanmış ve bu değerlerden hareketle toplam ÖEO değerleri bulunarak; 6 ve 30 dakika ile 1, 4 ve 8 saat için ofis çalışanın beyin sıvısında meydana gelen sıcaklık değişimleri hesaplanmıştır.



Şekil 4. Dokuz çalışması olan ofis ortamı

Tablo 11. Ofis çalışması için beyin sıvısı sıcaklık değişimi (konuşma)

MASA I		Maruz Kalınan EA (V/m)				Toplam EA (V/m)	Frekans (MHz)	ÖEO (W/kg)	Maruz Kalınan Süre ( $\Delta t$ ) Beyin Sıvısındaki Sıcaklık Artışı ( $\Delta T$ ) ( $^{\circ}C$ )					
Msf (m)	Kişi	900-1800 MHz Cep T.	Modem	2400 MHz A. Kart	BlueT.				6 dak.	30 dak.	1 saat	4 saat	8 saat	
0	1	4.35	2	3.0	0.4	11.35	4.35	900	0.021	0.002	0.010	0.020	0.081	0.163
2	4	0.00	0	4 x 0,3	0.0		7.00	1800	0.040	0.004	0.019	0.039	0.155	0.309
4	4	0.00	0	4 x 0,1	0.0			2400	0.133	0.013	0.066	0.131	0.523	1.046
								900 ve 2400	<b>0.154</b>	0.015	0.076	0.151	0.604	<b>1.209</b>
								1800 ve 2400	<b>0.173</b>	0.017	0.085	0.170	0.678	<b>1.355</b>

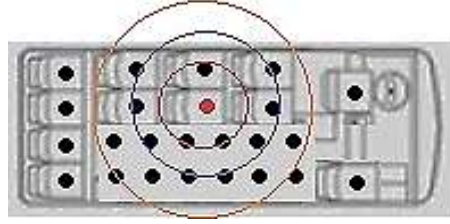
Tablo 12. Ofis çalışması için beyin sıvısı sıcaklık değişimi (bekleme)

MASA I		Maruz Kalınan EA (V/m)				Toplam EA (V/m)	Frekans (MHz)	ÖEO (W/kg)	Maruz Kalınan Süre ( $\Delta t$ ) Beyin Sıvısındaki Sıcaklık Artışı ( $\Delta T$ ) ( $^{\circ}C$ )					
Msf (m)	Kişi	900-1800 MHz Cep T.	Modem	2400 MHz A. Kart	BlueT.				6 dak.	30 dak.	1 saat	4 saat	8 saat	
0	1	0.41	2	3.0	0.4	7.41	0.41	900	$12 \cdot 10^{-6}$	0.000	0.0001	0.0002	0.0007	0.0014
2	4	0.00	0	4 x 0,3	0.0		7.00	1800	$21 \cdot 10^{-6}$	0.000	0.0002	0.0003	0.0014	0.0027
4	4	0.00	0	4 x 0,1	0.0			2400	0.133	0.013	0.066	0.131	0.523	1.046
								900 ve 2400	<b>0.133</b>	0.013	0.065	0.131	0.524	<b>1.047</b>
								1800 ve 2400	<b>0.133</b>	0.013	0.066	0.131	0.524	<b>1.049</b>

### 2.3. Senaryo-3 (toplu taşıma aracı)

#### 2.3.1. Yolcu

Şekil 5'de, günlük yaşamda sıkça kullanılan bir toplu taşıma aracındaki yolcuya, kendisinin ve diğer yolculara ait cep telefonlarının mesafelerine bağlı olarak etkileyen elektriksel alanlar gösterilmiştir. Tablo 13 ve Tablo 14'de ise cep telefonu ile konuşma/internet kullanma ve bekleme/internet kullanmama anlarındaki yolcunun maruz kaldığı toplam elektriksel alan değerleri hesaplanmış ve bu değerlerden hareketle toplam ÖEO değerleri bulunarak; 6 ve 30 dakika ile 1, 2 ve 3 saat için yolcunun beyin sıvısında meydana gelen sıcaklık değişimleri hesaplanmıştır.



Şekil 5. Toplu taşıma aracı - Yolcu

Tablo 13. Toplu taşıma aracındaki yolcu için beyin sıvısı sıcaklık değişimi (konuşma)

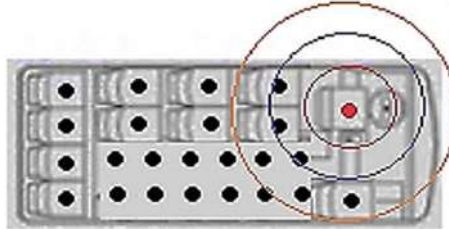
YOLCU		Maruz Kalınan EA (V/m)	Toplam EA (V/m)	Frekans (MHz)	ÖEO (W/kg)	Maruz Kalınan Süre ( $\Delta t$ ) Beyin Sıvısındaki Sıcaklık Artışı ( $\Delta T$ ) ( $^{\circ}C$ )					
Msf (m)	Kişi	900-1800 MHz Cep Telefonu				6 dk.	30 dk.	1 saat	2 saat	3 saat	
0.0	1	4.35	9.41	900	0.097	0.010	0.048	0.100	0.200	0.290	
0.5	3	0.88									2.64
1.0	8	0.22		1.76	1800	0.183	0.018	0.091	0.181	0.361	0.543
1.5	6	0.11		0.66							

Tablo 14. Toplu taşıma aracındaki yolcu için beyin sıvısı sıcaklık değişimi (bekleme)

YOLCU		Maruz Kalınan EA (V/m)	Toplam EA (V/m)	Frekan (MHz)	ÖEO (W/kg)	Maruz Kalınan Süre ( $\Delta t$ ) Beyin Sıvısındaki Sıcaklık Artışı ( $\Delta T$ ) ( $^{\circ}C$ )					
Msf (m)	Kişi	900-1800MHz Cep Telefonu				6 dk.	30 dk.	1 saat	2 saat	3 saat	
0.0	1	0.41	0.87	900	0.0008	0.0001	0.0004	0.0008	0.0016	0.0024	
0.5	3	0.08									0.24
1.0	8	0.02		0.16	1800	0.0016	0.0002	0.0008	0.0015	0.0031	0.0046
1.5	6	0.01		0.06							

### 2.3.2. Sürücü

Şekil 6'da, gün boyu yolculardan daha fazla elektriksel alana maruz kalan sürücüye, kendisinin ve diğer yolculara ait cep telefonlarının mesafelerine bağlı olarak etkiyen elektriksel alanlar gösterilmiştir. Tablo 15 ve Tablo 16'da ise cep telefonu ile konuşma/internet kullanma ve bekleme/internet kullanmama anlarındaki sürücünün maruz kaldığı toplam elektriksel alan değerleri hesaplanmış ve bu değerlerden hareketle toplam ÖEO değerleri bulunarak; 6 dakika ile 3, 5, 8 ve 12 saat için sürücünün beyin sıvısında meydana gelen sıcaklık değişimleri hesaplanmıştır. Görüldüğü üzere sürücünün konumu gereği diğer yolculardan uzak olması sürücüyü yolcuların cep telefonlarının oluşturduğu elektriksel alandan korumaktadır.



Şekil 6. Toplu taşıma aracı – Sürücü



**Tablo 15.** Toplu taşıma aracındaki sürücü için beyin sıvısı sıcaklık değişimi (konuşma)

SÜRÜCÜ		Maruz Kalınan EA (V/m)	Toplam EA (V/m)	Frekans (MHz)	ÖEO (W/kg)	Maruz Kalınan Süre ( $\Delta t$ ) Beyin Sıvısındaki Sıcaklık Artışı ( $\Delta T$ ) ( $^{\circ}C$ )					
Msf (m)	Kişi	900-1800 MHz				6 dk.	3 saat	5 saat	8 saat	12 saat	
0.0	1	4.35	4.35	5.45	900	0.032	0.003	0.096	0.160	0.256	0.383
0.5	0	0.00	0.00								
1.0	3	0.22	0.66		1800	0.062	0.006	0.182	0.303	0.486	0.728
1.5	4	0.11	0.44								

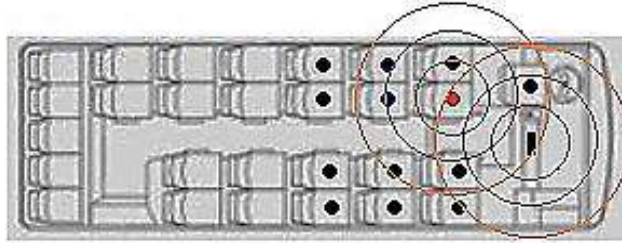
**Tablo 16.** Toplu taşıma aracındaki sürücü için beyin sıvısı sıcaklık değişimi (bekleme)

SÜRÜCÜ		Maruz Kalınan EA (V/m)	Toplam EA (V/m)	Frekans (MHz)	ÖEO (W/kg)	Maruz Kalınan Süre ( $\Delta t$ ) Beyin Sıvısındaki Sıcaklık Artışı ( $\Delta T$ ) ( $^{\circ}C$ )					
Msf (m)	Kişi	900-1800 MHz				6 dk.	3 saat	5 saat	8 saat	12 saat	
0.0	1	0.41	0.41	0.51	900	0.0003	0.0000	0.0008	0.0014	0.0022	0.0034
0.5	0	0.00	0.00								
1.0	3	0.02	0.06		1800	0.0005	0.0001	0.0016	0.0027	0.0043	0.0064
1.5	4	0.01	0.04								

## 2.4. Senaryo-4 (servis aracı)

### 2.4.1. Yolcu

Günümüz şehir yaşamında birçok insan iş yerine gidiş ve gelişlerinde servis araçları kullanmaktadır. Gün içinde servis araçlarında geçen zaman, trafik yoğunluğuna ve hava şartlarına bağlı olarak üç saate kadar çıkabilmektedir. Şekil 7’de ise servis araçlarında modemin de olduğu düşünülerek yolculardan herhangi birine, modem ile yolcunun kendisinin ve diğer yolcuların cep telefonlarının mesafeye bağlı olarak etkiyen elektriksel alanlar gösterilmiştir. Tablo 17 ve Tablo 18’de ise cep telefonu ile konuşma/bekleme anlarındaki, kullanıcının modemle birlikte maruz kaldığı toplam elektriksel alan değerleri hesaplanmış ve bu değerlerden hareketle toplam ÖEO değerleri bulunarak; 6 ve 30 dakika ile 1, 2 ve 3 saat için yolcunun beyin sıvısında meydana gelen sıcaklık değişimleri hesaplanmıştır.

**Şekil 7.** Servis aracı – Yolcu



**Tablo 17.** Servis aracındaki yolcu için beyin sıvısı sıcaklık değişimi (konuşma)

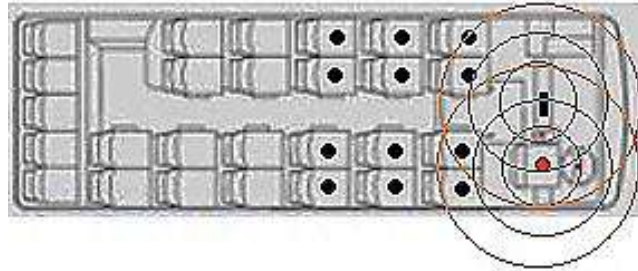
YOLCU		Maruz Kalınan EA (V/m)		Toplam EA (V/m)	Frekans (MHz)	ÖEO (W/kg)	Maruz Kalınan Süre ( $\Delta t$ ) Beyin Sıvısındaki Sıcaklık Artışı ( $\Delta T$ ) ( $^{\circ}C$ )					
Misf (m)	Kişi	900-1800 MHz Cep T.	2400 MHz Modem				6 dk.	30 dk.	1 saat	2 saat	3 saat	
0.0	1	4.35	0.75	6.97	6.22	900	0.042	0.0040	0.0210	0.0420	0.0830	0.1250
0.5	1	0.88			1800	0.080	0.0080	0.0400	0.0790	0.1580	0.2370	
1.0	3	0.22			0.75	2400	0.002	0.0002	0.0008	0.0015	0.0030	0.0045
1.5	3	0.11			900 ve 2400	0.044	0.0043	0.0216	0.0431	0.0862	0.1293	
						1800 ve 2400	<b>0.082</b>	0.0081	0.0403	0.0805	0.1611	0.2416

**Tablo 18.** Servis aracındaki yolcu için beyin sıvısı sıcaklık değişimi (bekleme)

YOLCU		Maruz Kalınan EA (V/m)		Toplam EA (V/m)	Frekans (MHz)	ÖEO (W/kg)	Maruz Kalınan Süre ( $\Delta t$ ) Beyin Sıvısındaki Sıcaklık Artışı ( $\Delta T$ ) ( $^{\circ}C$ )					
Misf (m)	Kişi	900-1800 MHz Cep T.	2400 MHz Modem				6 dk.	30 dk.	1 saat	2 saat	3 saat	
0.0	1	0.41	0.75	1.33	0.58	900	0.0003	0.0000	0.0001	0.0003	0.0006	0.0009
0.5	1	0.08			1800	0.0006	0.0001	0.0003	0.0006	0.0011	0.0017	
1.0	3	0.02			0.75	2400	0.0020	0.0002	0.0008	0.0015	0.0030	0.0045
1.5	3	0.01			900 ve 2400	0.0023	0.0002	0.0009	0.0018	0.0036	0.0054	
						1800 ve 2400	0.0026	0.0002	0.0010	0.0021	0.0041	0.0062

#### 2.4.2. Sürücü

Şekil 8’de, gün boyu yolculardan daha fazla elektriksel alana maruz kalan servis sürücüsüne, modem ile kendisinin ve diğer yolcuların cep telefonlarının mesafeye bağlı olarak etkiyen elektriksel alanlar gösterilmiştir. Tablo 19 ve Tablo 20’de ise cep telefonu ile konuşma/bekleme anlarındaki, sürücünün modemle birlikte maruz kaldığı toplam elektriksel alan değerleri hesaplanmış ve bu değerlerden hareketle toplam ÖEO değerleri bulunarak; 6 dakika ile 3, 5, 8 ve 12 saat için sürücünün beyin sıvısında meydana gelen sıcaklık değişimleri hesaplanmıştır. Toplu taşıma araçlarında olduğu gibi servislerde de sürücünün konumu gereği diğer yolculardan uzak olması sürücüyü yolcuların cep telefonlarının oluşturduğu elektriksel alandan korumaktadır.

**Şekil 8.** Servis aracı-Sürücü

**Tablo 19.** Servis aracındaki sürücü için beyin sıvısı sıcaklık değişimi (konuşma)

SÜRÜCÜ		Maruz Kalınan EA (V/m)		Toplam EA (V/m)	Frekans (MHz)	ÖEO (W/kg)	Maruz Kalınan Süre ( $\Delta t$ ) Beyin Sıvısındaki Sıcaklık Artışı ( $\Delta T$ ) ( $^{\circ}C$ )					
		900-1800 MHz	2400 MHz				6 dk.	3 saat	5 saat	8 saat	12 saat	
Msf (m)	Kişi	Cep T.	Modem									
0.0	1	4.35	1.00	5.90	4.90	900	0.026	0.0026	0.078	0.129	0.207	0.310
1.0	2	0.22			1.00	1800	0.050	0.0050	0.147	0.245	0.392	0.589
1.5	1	0.11			1.00	2400	0.003	0.0003	0.008	0.013	0.021	0.032
						900 ve 2400	0.029	0.0030	0.086	0.143	0.228	0.342
						1800 ve 2400	0.053	0.0050	0.155	0.259	0.414	0.620

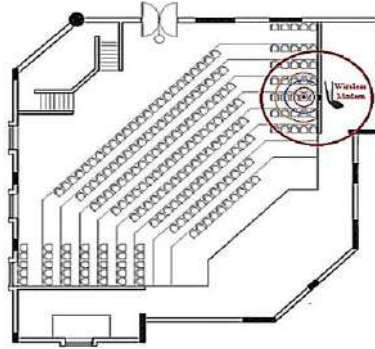
**Tablo 20.** Servis aracındaki sürücü için beyin sıvısı sıcaklık değişimi (bekleme)

SÜRÜCÜ		Maruz Kalınan EA (V/m)		Toplam EA (V/m)	Frekans (MHz)	ÖEO (W/kg)	Maruz Kalınan Süre ( $\Delta t$ ) Beyin Sıvısındaki Sıcaklık Artışı ( $\Delta T$ ) ( $^{\circ}C$ )					
		900-1800 MHz	2400 MHz				6 dk.	3 saat	5 saat	8 saat	12 saat	
Msf (m)	Kişi	Cep T.	Modem									
0.0	1	0.41	1.00	1.46	0.46	900	0.0002	0.0000	0.0007	0.0011	0.0018	0.0027
1.0	2	0.02			1.00	1800	0.0004	0.0000	0.0013	0.0022	0.0035	0.0052
1.5	1	0.01			1.00	2400	0.0030	0.0003	0.0080	0.0130	0.0210	0.0320
						900 ve 2400	0.0032	0.0003	0.0087	0.0145	0.0232	0.0347
						1800 ve 2400	0.0034	0.0003	0.0093	0.0155	0.0248	0.0372

## 2.5. Senaryo-5 (salonlar)

### 2.5.1. Modemli salon

Şekil 10'da görüldüğü gibi toplantı, sinema, kongre, konser ve spor karşılaşmaları gibi kalabalık etkinliklerde katılımcılar uzunca bir süre çok sayıda cep telefonunun yaydığı elektriksel alanın etkisi altında kalmaktadır.

**Şekil 10.** Modemli sinema - tiyatro-toplantı salonu

Ayrıca bu tür yerlerde etkinliğe katılanların yararlanması amacıyla kablosuz internet erişimi için ortamda bir veya daha fazla modemde bulunmaktadır. Şekil 10'da bir salonda modem olduğu düşünülerek izleyicilerden herhangi birine, modem ile izleyicinin kendisinin ve diğer izleyicilerin cep telefonunun mesafeye bağlı olarak etki eden elektriksel alanlar gösterilmiştir. Tablo 21 ve Tablo 22'de ise cep telefonları ile konuşma/bekleme anlarındaki, izleyicinin modemle birlikte maruz kaldığı toplam elektriksel alan değerleri hesaplanmış ve bu değerlerden hareketle toplam ÖEO değerleri bulunarak; 6 dakika ile 1, 2, 3 ve 4 saat için izleyicinin beyin sıvısında meydana gelen sıcaklık değişimleri hesaplanmıştır.

**Tablo 21.** Modemli salondaki seyirci için beyin sıvısı sıcaklık değişimi (konuşma)

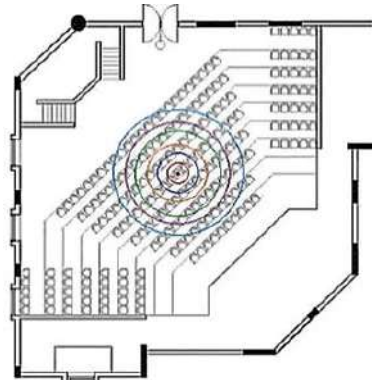
İZLEYİCİ		Maruz Kalınan EA (V/m)		Topla EA (V/m)	Frekans (MHz)	ÖEO (W/kg)	Maruz Kalınan Süre (Δt) Beyin Sıvısındaki Sıcaklık Artışı (ΔT) (°C)					
		900-1800 MHz	2400 MHz				6 dk.	1 saat	2 saat	3 saat	4 saat	
Msf (m)	Kişi	Cep T.	Modem									
0.0	1	4.35	2.00	10.20	8.20	900	0.073	0.0072	0.072	0.145	0.217	0.289
0.5	2	0.88			1800	0.139	0.0137	0.137	0.275	0.412	0.550	
1.0	7	0.22			2400	0.011	0.0011	0.011	0.021	0.032	0.043	
1.5	5	0.11			900 ve 2400	0.084	0.0083	0.083	0.166	0.249	0.332	
						1800 ve 2400	0.150	0.0148	0.148	0.296	0.444	0.592

**Tablo 22.** Modemli salondaki seyirci için beyin sıvısı sıcaklık değişimi (bekleme)

İZLEYİCİ		Maruz Kalınan EA (V/m)		Toplam EA (V/m)	Frekans (MHz)	ÖEO (W/kg)	Maruz Kalınan Süre (Δt) Beyin Sıvısındaki Sıcaklık Artışı (ΔT) (°C)					
		900-1800 MHz	2400 MHz				6 dk.	1 saat	2 saat	3 saat	4 saat	
Msf (m)	Kişi	Cep T.	Modem									
0.0	1	0.41	2.00	2.76	0.76	900	0.0006	0.0001	0.0006	0.0012	0.0018	0.0024
0.5	2	0.08			1800	0.0012	0.0001	0.0012	0.0024	0.0035	0.0047	
1.0	7	0.02			2400	0.0110	0.0010	0.0110	0.0210	0.0320	0.0430	
1.5	5	0.01			900 ve 2400	0.0116	0.0011	0.0113	0.0226	0.0339	0.0452	
						1800 ve 2400	0.0122	0.0012	0.0119	0.0237	0.0356	0.0474

### 2.5.2. Modemsiz salon

Şekil 11’de salonda modemin olmadığı düşünülerek izleyicilerden herhangi birine, izleyicinin kendisinin ve diğer izleyicilerin cep telefonlarının mesafeye bağlı olarak etkiyen elektriksel alanlar gösterilmiştir.



**Şekil 11.** Modemsiz sinema-tiyatro-toplantı salonu

Tablo 23 ve Tablo 24’de ise cep telefonları ile konuşma/bekleme anlarındaki, izleyicinin maruz kaldığı toplam elektriksel alan değerleri hesaplanmış ve bu değerlerden hareketle toplam ÖEO değerleri bulunarak; 6 dakika ile 1, 2, 3 ve 4 saat için izleyicinin beyin sıvısında meydana gelen sıcaklık değişimleri hesaplanmıştır.

**Tablo 23.** Modemsiz salondaki seyirci için beyin sıvısı sıcaklık değişimi (konuşma)

İZLEYİCİ		Maruz Kalınan EA (V/m)	Toplam EA (V/m)	Frekans (MHz)	ÖEO (W/kg)	Maruz Kalınan Süre ( $\Delta t$ ) Beyin Sıvısındaki Sıcaklık Artışı ( $\Delta T$ )( $^{\circ}$ C)					
Msf(m)	Kişi	900-1800 MHz				Cep T.	6 dk.	1 saat	2 saat	3 saat	4 saat
0.0	1	4.35	4.35	8.75	900	<b>0.082</b>	0.008	0.081	0.163	0.244	0.325
0.5	2	0.88	1.76								
1.0	8	0.22	1.76								
1.5	8	0.11	0.88		1800	<b>0.156</b>	0.015	0.154	0.309	0.463	0.617

**Tablo 24.** Modemsiz salondaki seyirci için beyin sıvısı sıcaklık değişimi (bekleme)

İZLEYİCİ		Maruz Kalınan EA (V/m)	Toplam EA (V/m)	Frekans (MHz)	ÖEO (W/kg)	Maruz Kalınan Süre ( $\Delta t$ ) Beyin Sıvısındaki Sıcaklık Artışı ( $\Delta T$ ) ( $^{\circ}$ C)					
Msf (m)	Kişi	900-1800 MHz				Cep T.	6 dk.	1 saat	2 saat	3 saat	4 saat
0.0	1	0.41	0.41	0.81	900	0.0007	0.0001	0.0007	0.0014	0.0021	0.0028
0.5	2	0.08	0.16								
1.0	8	0.02	0.16								
1.5	8	0.01	0.08		1800	0.0014	0.0001	0.0013	0.0027	0.0040	0.0054

### 3. Bulgular ve Tartışma

Tablo 25'deki senaryoların genel değerlendirmesinde görüleceği üzere; benzetimlerin bir kısmında maruz kalınan elektriksel alan değerleri, bazı durumlarda özgül emilim oranları ve bazen de beyin sıvısında meydana gelen sıcaklık artışları güvenlik limit değerlerini aşmaktadır.

**Tablo 25.** Genel değerlendirme

Benzetim Ortamları	Maruz Kalınan Toplam EA (Limit: 10 V/m)	Özgül Emilim Oranı (ÖEO) (Limit: 0,08 W/kg)		Maruz Kalınan En Uzun Süre, Beyin Sıvısındaki En Yüksek Sıcaklık Artışı (Limit: 1 $^{\circ}$ C)	
Çalışma Masası (Konuşma)	8.75 V/m	900 + 2400 MHz	1800 + 2400 MHz	8 saat	
		0.073 W/kg	<b>0.092 W/kg</b>	900 + 2400 MHz	1800 + 2400 MHz
Ofis Ortamı (Konuşma)	11.35 V/m	900 + 2400 MHz	1800 + 2400 MHz	8 saat	
		<b>0.154 W/kg</b>	<b>0.173 W/kg</b>	900 + 2400 MHz	1800 + 2400 MHz
Ofis Ortamı (Bekleme)	7.41 V/m	900 + 2400 MHz	1800 + 2400 MHz	8 saat	
		<b>0.133 W/kg</b>	<b>0.133 W/kg</b>	900 + 2400 MHz	1800 + 2400 MHz
Toplu T. (Yolcu / Konuşma)	9.41 V/m	900 MHz	1800 MHz	3 saat	
		<b>0.097 W/kg</b>	<b>0.183 W/kg</b>	900 MHz	1800 MHz
Servis (Yolcu/Konuşma)	6.97 V/m	900 + 2400 MHz	1800 + 2400 MHz	3 saat	
		0.044 W/kg	<b>0.082 W/kg</b>	900 + 2400 MHz	1800 + 2400 MHz
Salonlar (Modemli/Konuşma)	10.20 V/m	900 + 2400 MHz	1800 + 2400 MHz	4 saat	
		<b>0.084 W/kg</b>	<b>0.160 W/kg</b>	900 + 2400 MHz	1800 + 2400 MHz
Salonlar (Modemsiz/Konuşma)	8.75 V/m	900 MHz	1800 MHz	4 saat	
		<b>0.082 W/kg</b>	<b>0.156 W/kg</b>	900 MHz	1800 MHz

Özellikle ofis ortamı benzetimine bakıldığında; maruz kalınan elektriksel alanın, özgül emilim oranının ve beyin sıvısında meydana gelen sıcaklık artışının aynı anda limit değerleri aşması söz konusudur. Dolayısıyla bu durumun modüler ofis ortamlarında ve özellikle çağrı merkezlerinde çalışanların sağlığını olumsuz yönde etkileyeceği bulgusuna ulaşılmıştır.

#### 4. Sonuçlar

Günlük yaşamda insanlar kendi kullandıkları haberleşme cihazlarının yanı sıra çevresinde bulunan cihazların yaydığı elektromanyetik radyasyona da maruz kalmaktadır. Bu maruziyet dokunun ihtiva ettiği su oranına bağlı olarak arttığından; beyin sıvısı gibi su oranı yüksek olan organlar ile vücuttaki su oranları yetişkinlere nazaran daha fazla olan çocuklar ve hamile bayanlar bu elektromanyetik radyasyondan daha çok etkilenmekte ve zarar görmektedir. Literatürde elektromanyetik radyasyonun sağlık yönünden zararları hususunda fikir ihtilafları da bulunmaktadır. Lakin bu çalışmada; insanların günlük hayatlarını idame ederken, ev ve ofislerindeki çalışma masalarında, toplu taşıma ve servis araçlarında, sinema, tiyatro, toplantı salonu gibi kalabalık yaşam alanlarında elektromanyetik radyasyon yayan birçok cihazın etkisi altında kaldığı düşünülerek, söz konusu bu ortamların benzetimleri yapılmış ve bu benzetimlerden elde edilen elektriksel alan değerlerinden hareketle de maruz kalınan özgül emilim oranları ve beyin sıvısındaki sıcaklık artışları hesaplanarak sıkışık modüler ofis ortamlarındaki maruziyet değerlerinin insan sağlığına zarar verecek güvenlik limit değerlerinin üzerinde olduğu görülmüştür. Elektromanyetik radyasyon yayan haberleşme cihazlarının, teknoloji ile iç içe geçtiği günümüz hayatının vazgeçilmez bir parçası olduğu aşikârdır. Önemli olan bu cihazların yaydığı elektriksel alandan mümkün mertebe en az etkilenecek şekilde tedbirler almaktır. Bu hususta; elektromanyetik radyasyon kaynağı cihazdan mümkün olduğunca uzak durulması, kaynak ile kullanıcı arasına koruyucu engel teşkil edilmesi (koruyucu giysiler, elektromanyetik ekranlama özelliğine sahip iletken boyalar ve duvar kâğıtları vb.) veya maruziyet süresinin olabildiğinde kısa tutulması kullanıcı tarafında alınabilecek önlemler olabildiği gibi, üretici tarafında da; daha düşük güçte cihazların üretilmesi, ÖEO değeri ve yaydığı elektrik alanı düşük cihazların tasarlanması gibi çalışmalar bu konuda yapılabilecekler arasında sayılabilir.

#### Kaynaklar

- [1] Zorlu E, Haberleşme Sistemlerinin Yaydığı Elektriksel Alandan Kaynaklanan Elektromanyetik Radyasyon ve İnsan Sağlığı. Yüksek Lisans Tezi, Türk Hava Kurumu Üniversitesi, Ankara, 2015.
- [2] Akbal A, Elektromanyetik Dalgaların Mitotik Kromozomlar, Bakteri Gelişimi, Enzim Aktivitesi ve DNA Üzerine Etkileri. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2008.
- [3] T.C. Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. Radyolojik Tehditler. <http://cdn2.beun.edu.tr/imid/egitim/kbrn-radyolojik-sunum-son.pdf>, Erişim tarihi: 02.03.2020.
- [4] Sabuncu H. Elektromanyetik Radyasyon ve İnsan Sağlığına Etkileri. İstanbul Üniversitesi Tıp Fakültesi Halk Sağlığı Anabilim Dalı'na Bağlı İş Sağlığı Bilim Dalı, 2001/1.
- [5] Şeker S, Çerezci O. Çevremizdeki Radyasyon ve Korunma Yöntemleri. Boğaziçi Üniversitesi, 1997.
- [6] Bawin SM, Kaczmarek LK, Adey WR. Effects of Modulated VMF Fields on Central Nervous System. Annals of the N.Y. Academy of Sciences 1975; 247: 74-81.
- [7] Blackman CF, Benane SG, Elder JA, House DE, Joines WT. Induction of Calcium-Ion Efflux from Brain Tissue by Radiofrequency Radiation: Effect of Sample Number and Modulation Frequency Density Window. Bioelectromagnetics NY 1980; 1(1): 35-43.
- [8] Dutta SK, Subramaniam A, Ghosh B, Parshad R. Microwave Radiationinduced Calcium Ion Efflux from Human Neuroblastoma Cells in Culture. Bioelectromagnetics 1984; 5(1):71-8.
- [9] Rogacheva SM, Kuznetsov PE, Malinina UA, Popyhova EB, Denisova SA, Somov AU. Combined Effect of Electromagnetic Radiation of Extremely High Frequencies and Chemical Compounds on Biological Objects. Toxicology Letters 2006; 164:123-123(1).
- [10] Gilles S, Olivier C, Stéphane L, Grégory B, Steve O, Jean-Philippe P, Sergo P, Patrick J. Realistic Numerical Modelling of Human Head Tissue Exposure to Electromagnetic Waves from Cellular Phones. Comptes Rendus Physique 2006.
- [11] Ian AC. Biological Stres Responses to Radio Frequency Electromagnetic Radiation: are Mobil Phone Realy so (Heat) Shocking. Archives of Biochemistry and Biophysics 2005; 435-1: 227-240.
- [12] Laura ZM, Mario P, Valantina M, Michela B, Roberto B. Individual Responsiveness to Induction of Micronuclei in Human Lymphocytes After Exposure in Vitro 1800 MHz Microwave Radiation. Pupmed 2006; 782: 42-52.
- [13] Hans WP, Uwe S, Siegfried E, Walter W. Can Electromagnetic Fields Emitted by Mobil Phones Stimulate the Vestibular Organs. Rostock and Berlin 2006.
- [14] Türkkan A, Pala K. Çok Düşük Frekanslı Elektromanyetik Radyasyon ve Sağlık Etkileri. Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi 2009; 14(2): 11-22.

- [15] Dimitris JP, Evangelia DC, Ioannis PN, Lukas HM. Cell Death Induced by GSM 900 MHz and DCS 1800 MHz Mobile Telephony Radiation. *Genetic Toxicology an Environmetal Mutagenesis* 2007; 26: 69-78.
- [16] Santini R, Santini P, Le Ruz P, Danze JM, Seigne M. Survey Study of Living in the Vicinity of Cellular Phone Base Station. *Electromagnetic Biology and Medicine* 2003; 22(1): 41-49.
- [17] Santini R, Santini P, Danze JM, Le Ruz P, Seigne M. Symptoms Experienced by People in Vicinity of Base Stations: Incidences of Distance and Sex. *Pathologie Biologie* 2002; 50(6): 369-73.
- [18] Yalçınkaya F, Özer A. Cep Telefonu SAR Değerinin İnsan Kulak ve Etrafında Sebep Olduğu Sıcaklık Artışının Termal Görüntüleme Tekniği ve Bulanık C-Ortalama Algoritması ile Analizi. *Eleco 2014 Elektrik-Elektronik-Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu*; 2014; Bursa.
- [19] Ahlbom A, Gren A, Kheifets L, Savitz D, Swerdlow A. Epidemiology of Health Effects of Radio Frequency Exposure. *ICNIRP Standing Committee on Epidemiology, Environmental Health Perspectives* 2004; 112(17): 1741-1754.
- [20] Şeker S, Çerezci O. Elektromanyetik Alanların Biyolojik Etkileri Güvenlik Standartları ve Korunma Yöntemleri. *Boğaziçi Üniversitesi*, 1991.
- [21] Durney CH. Electromagnetic Dosimetry for Models of Humans and Animals: A Review of Theoretical and Numerical Techniques. *Proceedings of IEEE* 1980; 68(1), 33-40.
- [22] Sevgi L. Elektromanyetik Uyumluluk. *TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, Yapım Matbaa, İstanbul*, 2000.
- [23] ICNIRP, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz), *Health Physics* 118(5): 483-524; 2020.
- [24] TÜBİTAK-Bilten. Elektromanyetik Dalgalar ve İnsan Sağlığı Sıkça Sorulan Sorular ve Yanıtları. <https://docplayer.biz.tr/198643-Elektromanyetik-dalgalar-ve-insan-sagligi-sikca-sorulan-sorular-ve-yanitlari-tubitak-bilten.html> Erişim tarihi: 01.10.2015.
- [25] Ocaktan ME, Akdur R. Cep Telefonu Teknolojisi ve Sağlık. *Türkiye Klinikleri Tıp Bilimleri Dergisi* 2008; 28(1): 58-65.
- [26] Sarı S, Dizman S. Ovit Dağbaşı Gölü Çevresinden Alınan Toprak Örneklerinde Radyoaktivite ve Radyolojik Etkilerin Araştırılması. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi* 2020; 7(3): 1122-1130.
- [27] Çalışan M, Türkoğlu İ. Termal Kameralar ve Uygulamaları. *Elektrik-Elektronik Bilgisayar Sempozyumu (FEEB)*; 2011; Elazığ. 46-50.
- [28] Firengiz A, Kavas A. Cep Telefonlarından Yayınlanan Elektromanyetik Radyasyon Ölçümleri ve Maruz Kalma Standartlarının Değerlendirilmesi. *TMMOB II. İletişim Teknolojileri Ulusal Sempozyumu (İTUSEM)*; 2005; Adana.
- [29] Ersoy M, Yigit T, Yuksel AS. A Decision Support Tool for Indoor WLAN Modeling Using Optimization Techniques. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering* 2020; 7(3): 1231-1244.



## Farklı Su/Bağlayıcı ve Kimyasal Katkı Oranlarına Sahip Yüksek Dayanımlı Betonların İşlenebilirlik ve Dayanım Özellikleri

Tuba DEMİR<sup>1\*</sup>, Bahar DEMİREL<sup>1</sup>, Ali DEMİRBİLEK<sup>1</sup>

<sup>1</sup> İnşaat Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye  
<sup>\*1</sup> t.demir@firat.edu.tr, <sup>1</sup> bdemirel@firat.edu.tr, <sup>1</sup> alidemirbilek062@gmail.com

(Geliş/Received: 02/09/2021;

Kabul/Accepted: 13/02/2022)

**Öz:** Bu çalışmanın amacı, farklı su/bağlayıcı ve kimyasal katkı oranına sahip yüksek dayanımlı betonların dayanım ve işlenebilirlik özelliklerini incelemektir. Bu kapsamda çimento dozajı 400 ve 600 kg/m<sup>3</sup>, su/bağlayıcı (S/B) oranları 0.20 ve 0.30 olarak seçilmiştir. Bu beton karışımlarında mineral katkı olarak puzolanik aktivitesi yüksek olan silis dumanı kullanılmıştır. Silis dumanı %5 ve %20 oranlarında çimento ile hacimce yer değiştirilerek kullanılmıştır. Kimyasal katkı ise çimentonun ağırlıkça %2 ve %3'ü oranında kullanılmıştır. Bu şekilde 16 seri beton karışımı hazırlanmıştır. Bu karışım oranları ile hazırlanan, yüksek dayanım elde edilmiş serilerin taze ve sertleşmiş beton (mekanik) özellikleri araştırılmıştır. Bu araştırma sonucunda serilerin çökme ve Ve-be değerleri ile  $f_{c-7}$ ,  $f_{c-28}$  ve  $f_{c-90}$  günlük sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda yüksek dayanımlı betonlarda (YDB) kimyasal katkı kullanımının işlenebilirlik üzerinde önemli faktör olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte düşük S/B oranında, yeterli miktarda kimyasal katkı ve uygun oranda silis dumanı miktarı ile yüksek dayanıma sahip betonların elde edilebildiği görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Su/Bağlayıcı Oranı, Dayanım, Kimyasal Katkı, Silis Dumanı, Yüksek Dayanımlı Beton.

### Workability and Strength Properties of High Strength Concrete with Different Water/Binder and Chemical Additives Ratios

**Abstract:** The aim of this study is to examine the strength and workability properties of high-strength concretes with different water-to-binder and chemical additive ratios. In this context, 16 series of concrete mixtures with cement dosage of 400 and 600 kg/m<sup>3</sup>, water/binder (W/B) ratios of 0.20 and 0.30 were prepared. Silica fume, which has high pozzolanic activity, was used as a mineral additive in these concrete mixtures by replacing 5% and 20% cement by volume. Chemical additives were added at the rate of 2% and 3% by weight of the cement. The fresh and hardened concrete properties of the series, which were prepared with these mixing ratios and obtained high strength, were investigated. As a result of this research, the Ve-be and slump values of the series and the results of  $f_{c-7}$ ,  $f_{c-28}$  and  $f_{c-90}$  days were compared with each other. As a result of this comparison, it has been determined that the use of chemical additives in high strength concrete (HSC) is an important factor on workability. However, it has been observed that concrete with high strength can be obtained with low W/B ratio, sufficient amount of chemical additives and silica fume content.

**Key words:** Water/Binder Ratio, Strength, Chemical Admixture, Silica Fume, High Strength Concrete.

#### 1. Giriş

İnşaat sektöründe, malzeme teknolojisinin gelişimi ile birlikte beton endüstrisinde gelişmeler yaşanmaktadır. Malzeme teknolojisindeki gelişme ile özel beton türlerinin üretimi popülerlik kazanmıştır. Yüksek dayanımlı betonlar (YDB)'ler de özel tasarımla üretilen beton türlerindedir [1, 2]. YDB'lerde basınç dayanım değeri bölgeden bölgeye farklılık göstermektedir. Bu değer ACI standardında 55 MPa ve üzeridir. Ancak bu standardın ilk versiyonunda bu değer 41 MPa ve üzeri tanımlanmaktadır [3]. YDB'nin üretiminde endüstriyel atıklar (silis dumanı, uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu vb.) kullanılarak, çimento miktarında azaltma yoluna gidilmektedir [4]. Ayrıca yüksek dayanımı sağlamak için su/çimento oranı düşük seviyelerde tutulmaktadır. Bu oranın düşük olması ile ortaya çıkan işlenebilirlik sorununun çözümü için de kimyasal katkı kullanılmaktadır [5, 6].

Günümüzde hazır beton sektöründe kimyasal katkı olarak süperakışkanlaştırıcı katkıları (SAK) kullanılmaktadır. Bu akışkanlaştırıcılar betonun taze ve sertleşmiş durumdaki özelliklerini geliştirmek ya da istenilen amaca uygun şekilde değiştirmek için kullanılmaktadır. TS EN 934-2 standardı, katkıları özelliklerine ve kullanım yerlerine göre gruplara ayırmaktadır. Ayrıca ilgili standartta kimyasal katkıların çimentonun ağırlıkça %5'ini geçmemek suretiyle kullanımı belirtilmiştir [7]. Farklı özelliklere sahip olan SAK'ların, taze betonun

\* Sorumlu yazar: [t.demir@firat.edu.tr](mailto:t.demir@firat.edu.tr). <sup>1</sup> 0000-0003-2092-1029, <sup>1</sup> 0000-0001-7483-2668, <sup>1</sup> 0000-0003-0327-8924



karılma ve yerleştirme işleminde uygun işlenebilirlik sağlaması, betonun yerleşiminin düzgün yapılmasıyla geçirimsizliği ve kompasitesi yüksek beton elde edilmesi gibi avantajları bulunmaktadır [7, 8].

Bu çalışmada, yüksek dayanımlı betonlarda farklı oranda SAK kullanımının, betonun taze ve sertleşmiş özelliklerine olan etkisi incelenmiştir. Bunun için çimento dozajı 400 ve 600 kg/m<sup>3</sup>, su/bağlayıcı (S/B) oranları 0.20 ve 0.30 olan 16 seri beton karışımı hazırlanmıştır. Bu beton karışımlarında mineral katkı olarak puzolanik aktivitesi yüksek olan silis dumanı kullanılmıştır. Silis dumanı %5 ve %20 oranlarında çimento ile hacimce yer değiştirilerek kullanılmıştır. SAK ise çimentonun ağırlıkça %2 ve %3'ü oranında kullanılmıştır. Bu karışım oranları ile hazırlanıp yüksek dayanım elde edilmiş serilerin taze ve sertleşmiş beton özellikleri araştırılmıştır. Bu araştırma sonucunda serilerin Ve-be ve çökme değerleri ile  $f_c-7$ ,  $f_c-28$  ve  $f_c-90$  günlük sonuçları birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda yüksek dayanımlı betonlarda (YDB) SAK kullanımının işlenebilirlik üzerinde önemli faktör olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte düşük S/B oranında, yeterli miktarda SAK ve uygun oranda silis dumanı miktarı ile yüksek dayanıma sahip betonların elde edildiği görülmüştür.

## 2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada TS EN 197-1 standardına uygun CEM I 42.5 R - Portland çimentosu kullanılmıştır [10]. Mineral katkı malzemesi olarak Dost Kimya Endüstrisinden temin edilen silis dumanı kullanılmıştır. Çalışmaya ait akış şeması Şekil 1'de özetlenmiştir. Çalışmada kullanılan malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri ise Tablo 1'de verilmiştir.

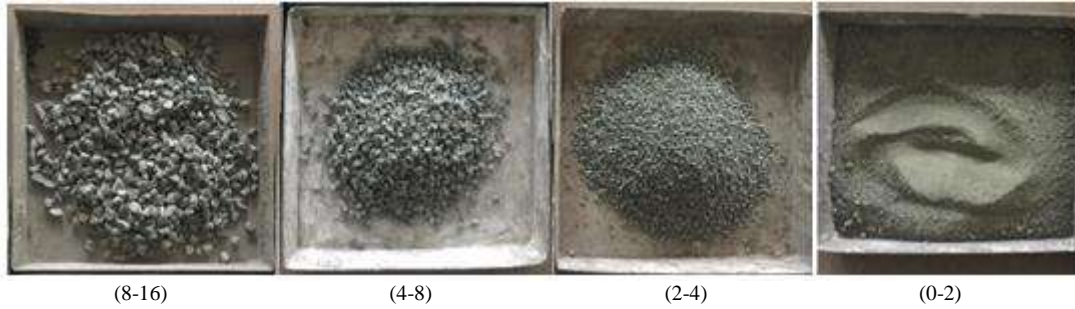


Şekil 1. Çalışmayı özetleyen akış şeması

**Tablo 1.** Deneysel malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri (%)

Kimyasal Özellikler	Çimento	Silis Dumanı
CaO	63.19	0.42
SiO <sub>2</sub>	19.07	92.10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.72	1.50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.82	0.90
SiO <sub>3</sub>	2.94	93.10
Na <sub>2</sub> O	0.39	0.40
K <sub>2</sub> O	0.62	0.90
MgO	1.83	0.10
Cl	0.0101	-
Çözünmeyen kalıntı	0.56	-
Kızdırma kaybı	3.43	-
Fiziksel Özellikler		
Özgül yüzey (Blaine) (cm <sup>2</sup> /gr)	3838	
Özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	3.13	2.20
Priz başlangıcı (dk)	135	-
Priz sonu (dk)	215	-
Hacim sabitliği (mm)	1	-

YDB'lerde bazalt, kuvars, andezit vb. gibi dayanımı yüksek agregalar kullanılmaktadır [11]. Bu çalışmada yüksek dayanıma sahip agrega türlerinden andezit agregası kullanılmıştır. Bu agrega türü, koyu renkli, emici olmayan, dağılmayan ve yüksek kompaktitesi nedeniyle yüksek dayanımlı betonlar için uygundur. Aynı zamanda andezit agregası % 52-63 oranında kuvars içermektedir [10, 11]. Deneysel çalışmalarda kullanılan maksimum agrega tane çapı (D<sub>max</sub>) 16 mm'dir. Agregalar 0-2, 2-4, 4-8, 8-16 mm olarak 4 farklı gruba ayrılmıştır. Elek sınıflarına göre ayrılmış agregalar Şekil 2'de verilmiştir.

**Şekil 2.** Çalışmada kullanılan agregaların elek sınıfları (mm)

Beton karışımlarında kullanılan agregaların tane yoğunlukları Tablo 2'de verilmiştir. Ayrıca bu karışımlarda ilk aşamada deneme karışımlarında çimentonun ağırlıkça %1, %1.5, %2, %2.5 ve %3 oranlarında kimyasal katkı olarak Master Glenium ACE 450 SAK kullanılmıştır. Deneme karışımlarından sonra alınan sonuçlar paralelinde referans karışımlarda uygun değer olarak çimentonun ağırlıkça %2 ve %3'ü oranında kimyasal katkı kullanılmıştır.

**Tablo 2.** Agregalara ait özgül ağırlıklar ve karışımda kullanım oranları

Agrega Sınıfı	Özgül Ağırlık (DKY) (gr/cm <sup>3</sup> )	Karışım Oranı (%)
0-2 mm	2.74	30
2-4 mm	2.71	20
4-8 mm	2.69	20
8-16 mm	2.69	30

## 2.1. Numunelerin Hazırlanması

Beton karışım oranları, işlenebilirlik ve dayanım esas alınarak belirlenmiştir. Deneylerde 16 seri beton karışımı hazırlanmıştır. Bu serilerin hazırlanması iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Öncelikle agregalar, daha sonra bağlayıcılar karıştırıcı içerisine eklenmiştir. Karıştırıcı 3 dakika çalıştırdıktan sonra durdurularak kuru karışıma dikkatli bir şekilde karma suyu ve SAK eklenmiştir. Bu aşamadan sonra karıştırıcı 5 dakika daha çalıştırılarak beton karışımı elde edilmiş ve taze beton deneyleri zaman kaybetmeden yapılmıştır. Beton karışım miktarlarına ait veriler Tablo 3'te verilmiştir [13].

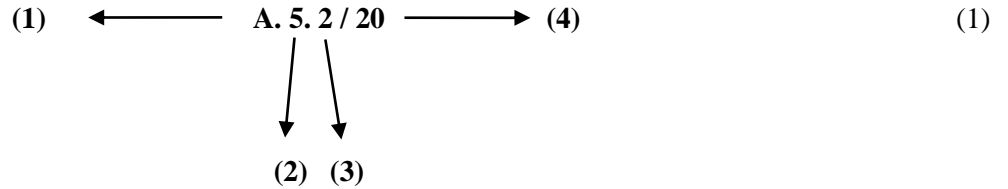
**Tablo 3.** Beton karışım miktarları (kg/m<sup>3</sup>)

Seri Adı	Çimento	Su	Silis Dumani	(0-2 mm) Agrega	(2-4mm) Agrega	(4-8mm) Agrega	(8-16mm) Agrega	SAK
A.5.2/20	380	80	14.1	550	360	360	540	8
A.5.3/20	380	80	14.1	550	360	360	540	12
A.5.2/30	380	140	14.1	550	360	360	540	8
A.5.3/30	380	140	14.1	550	360	360	540	12
A.20.2/20	320	80	56.2	550	360	360	540	8
A.20.3/20	320	80	56.2	550	360	360	540	12
A.20.2/30	320	140	56.2	550	360	360	540	8
A.20.3/30	320	140	56.2	550	360	360	540	12
B.5.2/20	570	120	21.3	550	360	360	540	12
B.5.3/20	570	120	21.3	550	360	360	540	18
B.5.2/30	570	210	21.3	550	360	360	540	12
B.5.3/30	570	210	21.3	550	360	360	540	18
B.20.2/20	480	120	84.3	550	360	360	540	12
B.20.3/20	480	120	84.3	550	360	360	540	18
B.20.2/30	480	210	84.3	550	360	360	540	12
B.20.3/30	480	210	84.3	550	360	360	540	18

Taze beton deneylerinden sonra sarsma tablası kullanılarak numunelerin 100x100x100 mm'lik kalıplara yerleşimi sağlanmıştır. 24 saat laboratuvar ortamında bekletilerek prizini almış olan numuneler kalıplardan çıkarılarak kür havuzuna bırakılmıştır. Sertleşmiş beton özelliklerini tespit etmek amacıyla numuneler 7., 28. ve 90. günlerde kür havuzundan çıkarılarak standart basınç dayanımı testine tabi tutulmuş ve basınç dayanımları tespit edilmiştir.

## 2.2. Numunelerin Kodlanması

Bu deneysel çalışmada 16 farklı karışım bulunmaktadır. Bu karışımların 8 tanesi 400 dozlu [A], geri kalan 8 tanesi ise 600 dozlu [B] kodu ile belirtilmiştir. Beton karışımına eklenen silis dumani, SAK miktarı ve S/B oranı için Bağlantı 1'de gösterilen kodlama yapılmıştır.



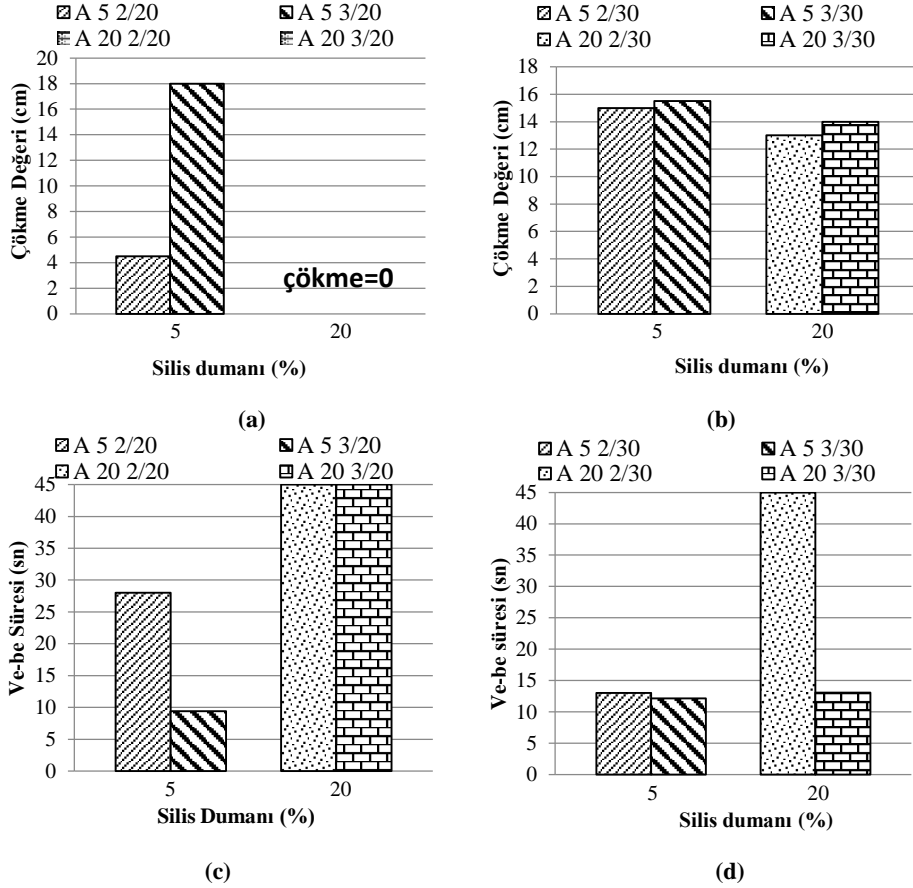
Burada;

- (1) : Beton karışımındaki dozaj miktarının gösterimi
- (2): Beton karışımındaki silis dumani miktarı (%)
- (3): Beton karışımındaki SAK miktarı (%)
- (4): Beton karışımının S/B oranı

### 3. Sonuçlar ve Tartışma

#### 3.1. Taze beton özellikleri

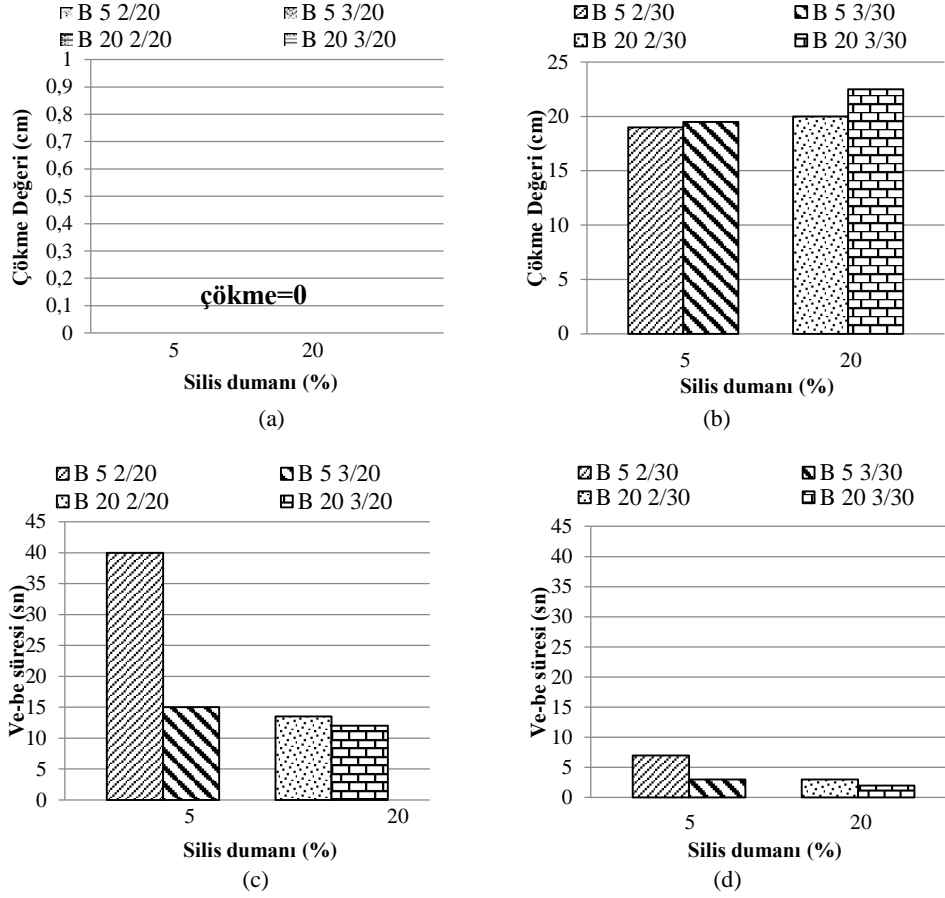
DeneySEL çalışmada üretilen 16 seri karışımın çökme değerleri ve Ve-be süreleri belirlenmiştir. A ve B dozlu numune gruplarının sayısal sonuçları grafikler halinde gösterilerek kıyaslanmıştır. Şekil 3'te 400 dozlu seri grubuna ait çökme değerleri ve Ve-be sürelerine ait grafik verilmiştir.



Şekil 3. 400 dozlu numunelere ait a) S/B oranı %20 olan serilerin çökme değeri, b) S/B oranı %30 olan serilerin çökme değeri, c) S/B oranı %20 olan serilerin Ve-be süreleri, d) S/B oranı %30 olan serilerin Ve-be süreleri

Şekil 3'teki grafik çökme değerleri açısından incelendiğinde; Şekil 3.(a)'da silis dumanının %20 ve S/B oranının %20 sabit olması durumunda SAK miktarındaki artışın numunelerin çökme değeri üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı gözlenmiştir. Bu durumun karışımın kıvamının düşük olması sebebiyle, karışımında kullanılan malzemelerin homojen olarak karıştırılamayıp kalıplara iyi yerleştirilememesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 3.(b)'de S/B oranının %30 olması durumunda ise SAK miktarındaki artışla çökme değeri bir miktar artmaktadır. Örneğin; A20.2/30 ile A20.3/30 numuneleri kıyaslandığında çökme değeri 13 cm'den 14 cm'ye yükselmiştir.

Şekil 3. Ve-be süreleri açısından incelendiğinde; Şekil 3.(c).de A5.2/20 ile A5.3/20 numuneleri kıyaslandığında Ve-be süresi 28 sn'den 9 sn'ye azalmış olup karışımın akışkanlığı artmıştır. Yine aynı grafikte; A20.2/20 ile A20.3/20 kıyaslandığında, çökme görülmeyen bu numunelerde Ve-be süreleri 45 sn üstü (>45) çıktığı için değerlendirmeye tabii tutulmamıştır. Şekil 3.(d).de S/B oranının %30 sabit olması durumunda SAK miktarındaki artış A5.2/30 ile A5.3/30 numunelerinde Ve-be süresini 13 sn'den 12 sn'ye; A20.2/30 ile A20.3/30 numunelerinde ise bu süre >45 sn'den 13 sn'ye düşmüş olup karışımın akışkanlığı artmıştır. SAK miktarındaki artış ile literatüre uygun olarak, betonun akıcılığının arttığı gözlenmiştir.



**Şekil 4.** 600 dozlu numunelere ait a) S/B oranı %20 olan serilerin çökme değeri, b) S/B oranı %30 olan serilerin çökme değeri, c) S/B oranı %20 olan serilerin Ve-be süreleri, d) S/B oranı %30 olan serilerin Ve-be süreleri

Şekil 4'te ise 600 dozlu seri grubunun çökme değerleri ve Ve-be sürelerine ait grafikler toplu olarak verilmiştir. Şekil 4.(b) de, silis dumanının %5 ve S/B oranının %30 olması halinde B5.2/30 ile B5.3/30 numuneleri karşılaştırıldığında SAK miktarındaki artış çökme değerini 19 cm'den 19,5 cm'ye yükseltmiştir. Aynı grafikte silis dumanının %20 ve S/B oranının %30 olması halinde B20.2/30 ile B20.3/30 numuneleri karşılaştırıldığında çökme değeri 20 cm'den 22,5 cm'ye yükselmiştir. SAK katkıları, çimento ile diğer puzolanik mineral parçacıklarının su içerisinde topraklanmasını önler ve fazla miktarda su ile elde edilebilecek olan işlenebilirliği sağlarlar [14]. SAK miktarındaki artış ile literatüre uygun olarak, betonun akıcılığının arttığı gözlenmiştir.

Şekil 4.(c)'de B5.2/20 ile B5.3/20 numuneleri kıyaslandığında Ve-be süresi 40 sn'den 15 sn'ye; B20.2/20 ile B20.3/20 numunelerinde ise 14 sn'den 12 sn'ye azalmıştır. Şekil 4.(d)'de ise SAK miktarındaki artışın bir sonucu olarak B5.2/30 ile B5.3/30 numunelerinde Ve-be süresi 7 sn'den 3 sn'ye; B20.2/30 ile B20.3/30 numunelerinde ise 3 sn'den 2 sn'ye düşmüş olup karışımın akışkanlığı artmıştır.

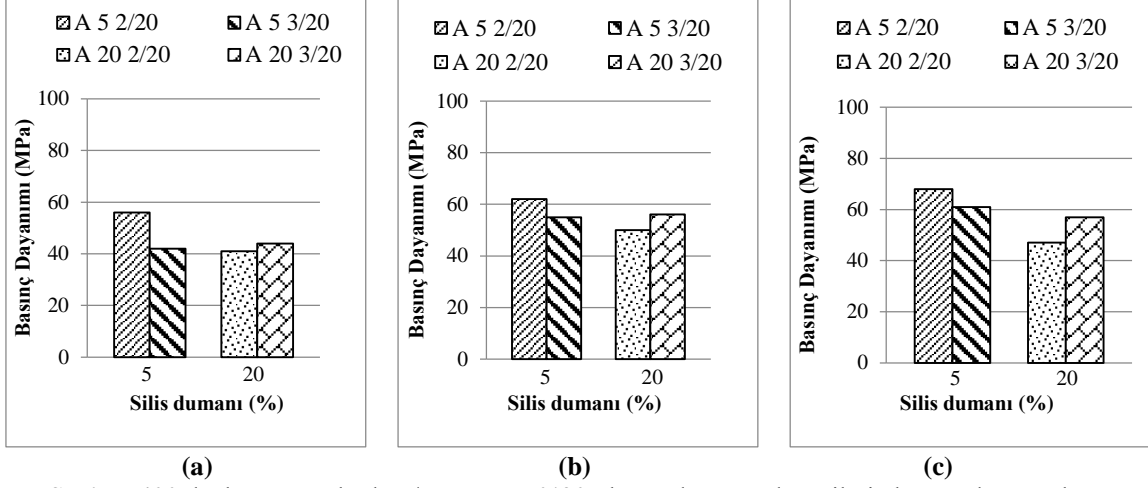
A ve B dozlu numuneler üzerinde S/B oranının çökme değeri üzerindeki etkisi incelendiğinde ise; karışımın S/B oranı artması ile; Şekil 3.(a)'daki A5.3/20 ile Şekil 3.(b)'deki A5.3/30 numuneleri karşılaştırıldığında çökme değerinde azalma meydana gelirken, diğer A ve B dozlu numunelerde ise literatüre uygun olarak çökme değerinde artış olduğu gözlenmiştir. Bu kıvam azalmasına; A5.3/30 numunesinin karışımında kullanılan malzemelerinin, homojen olarak karıştırılmamasının neden olduğu düşünülmektedir.

## 3.2. Sertleşmiş Beton Özellikleri

### 3.2.1. Basınç Dayanımı

Betonun kalitesini belirlemek için en etkin yöntem, standart basınç dayanımını belirlemektir [12, 14]. Bu bölümde S/B oranı, SAK miktarı ve silis dumanının, beton basınç dayanımına etkisi incelenmiştir. A ve B dozlu

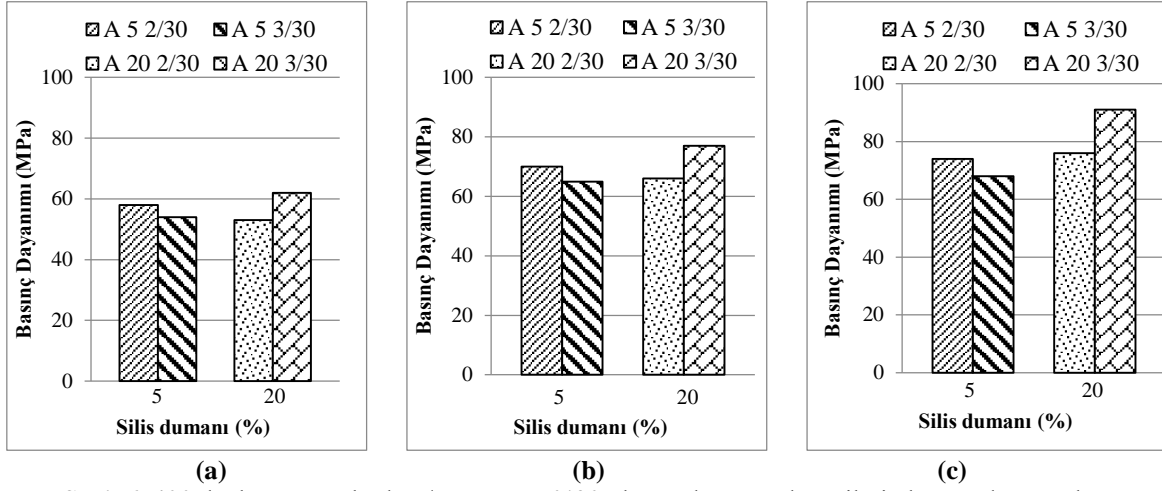
numune grubunun 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı sonuçlarının kendi aralarında kıyaslanması için sayısal sonuçlar grafikler halinde gösterilmiştir. A dozlu numunelerin basınç dayanımlarına ait grafikler, S/B oranlarının %20 olması durumu için Şekil 5 'te, S/B oranlarının %30 olması durumu için Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 5. 400 dozlu numunelerde S/B oranının %20 olması durumunda serilerin basınç dayanımları  
a) 7 günlük, b) 28 günlük, c) 90 günlük

Şekil 5.(a) incelendiğinde, silis dumanının %5 ve S/B oranının %20 sabit olması durumunda SAK miktarındaki artışla A5.2/20 ve A5.3/20 numuneleri karşılaştırıldığında; 7 günlük basınç dayanımları 56 MPa'dan 42 MPa'ya, 28 günlük basınç dayanımları 62 MPa'dan 55 MPa'ya (Şekil 5.(b)) ve 90 günlük basınç dayanımları ise 68 MPa'dan 61 MPa'ya düşmüştür (Şekil 5.(c)). Literatürde de olduğu gibi karışımda mineral katkı miktarının SAK miktarından daha az olması durumunda, çimento taneciklerinin yüzeyi tamamen mineral katkı ile sarılacağından bir miktar SAK açıkta kalacaktır [14, 15]. Artan bu akışkanlaştırıcının olumlu bir etkisi olmayacağı gibi, betonun kıvamını yükselterek basınç dayanımında azalmaya sebep olduğu düşünülmektedir.

Silis dumanının %20 ve S/B oranının %20 sabit olması durumunda SAK miktarındaki artış ile A20.2/20 ve A20.3/20 numunelerini karşılaştırıldığında; 7 günlük basınç dayanımları 41 MPa'dan 44 MPa'ya (Şekil 5.(a)), 28 günlük basınç dayanımları 50 MPa'dan 56 MPa'ya (Şekil 5.(b)) ve 90 günlük basınç dayanımları ise 47 MPa'dan 57 MPa'ya yükselmiştir (Şekil 5.(c)). Katkı maddesinin, karışımda optimum miktarda kullanılmasıyla, literatüre uygun olarak beton basınç dayanımında artış sağlandığı görülmüştür [19].

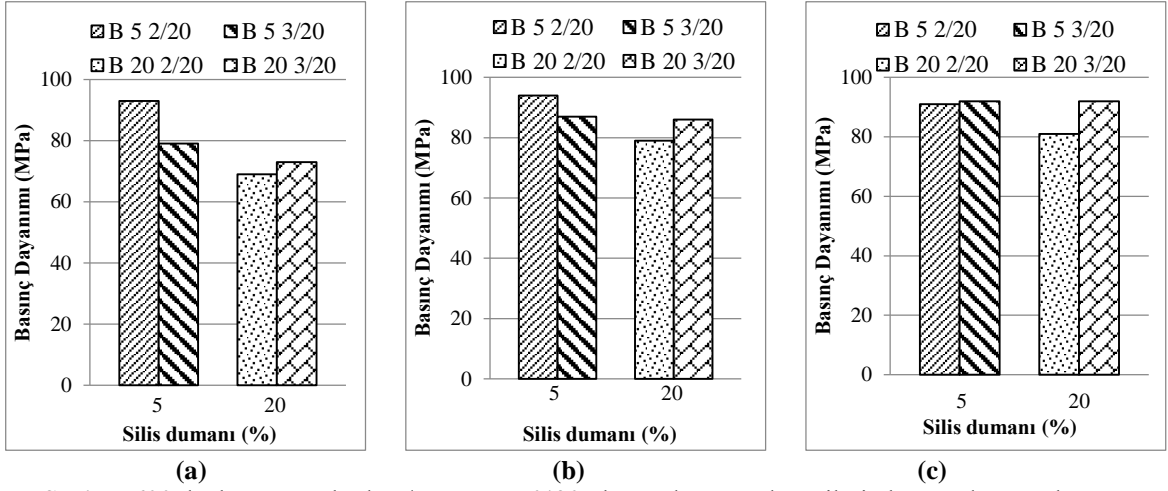


Şekil 6. 400 dozlu numunelerde S/B oranının %30 olması durumunda serilerin basınç dayanımları  
a) 7 günlük, b) 28 günlük, c) 90 günlük

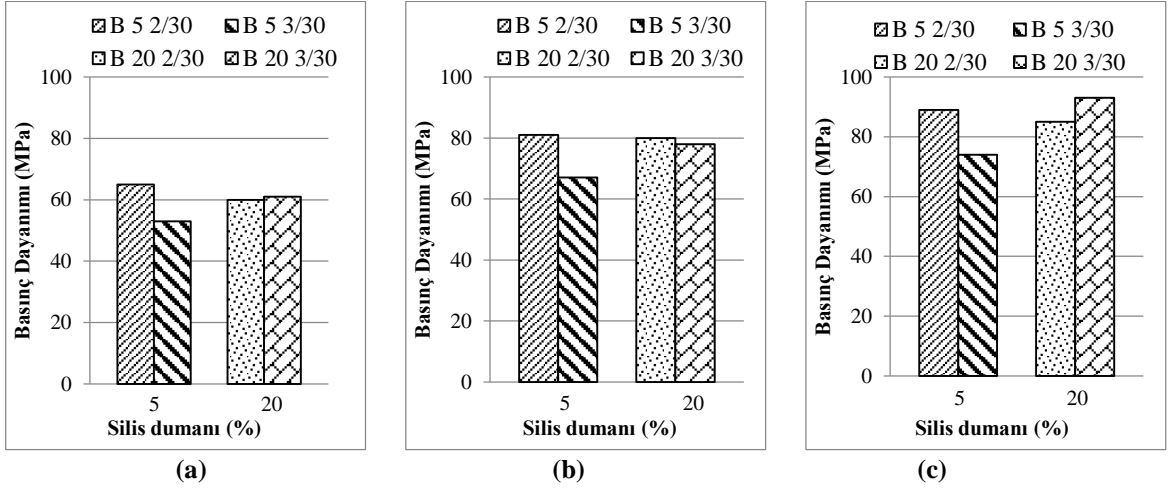
Şekil 6'da 400 dozlu (A) numunelerde S/B oranının %30 sabit olması durumunda; karışımın silis dumanı ve SAK miktarındaki değişimin, basınç dayanımı üzerine etkisi incelenmiş ve grafiklerde gösterilmiştir. Silis dumanının %5 ve S/B oranının %30 sabit olması durumunda SAK miktarındaki artış ile A5.2/30 ve A5.3/30 numunelerini karşılaştırıldığında; 7 günlük basınç dayanımları 58 MPa'dan 54 MPa'ya (Şekil 6.(a)), 28 günlük basınç dayanımları 70 MPa'dan 65 MPa'ya (Şekil 6.(b)) ve 90 günlük basınç dayanımları ise 74 MPa'dan 68 MPa'ya düşmüştür (Şekil 6.(c)). S/B oranının artması, yukarıda bahsedilen fazla SAK miktarının meydana getirdiği dayanım düşmesi kanaatini değiştirmemiştir. Silis dumanının %20 ve S/B oranının %30 sabit olması durumunda SAK miktarındaki artış ile A20.2/30 ve A20.3/30 numunelerini karşılaştırıldığında; 7 günlük basınç dayanımları 53 MPa'dan 62 MPa'ya (Şekil 6.(a)), 28 günlük basınç dayanımları 66 MPa'dan 77 MPa'ya (Şekil 6.(b)) ve 90 günlük basınç dayanımları ise 76 MPa'dan 91 MPa'ya yükselmiştir (Şekil 6.(c)). Katkı maddesinin, karışımında optimum miktarda kullanılmasıyla, literatüre uygun olarak beton basınç dayanımında artış sağlandığı görülmüştür.

Şekil 5 ve Şekil 6 karşılaştırıldığı zaman; SAK ve silis dumanı miktarının sabit olması durumunda, S/B oranının %20' den %30' a yükselmesi ile A numunelerinin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarında artış gözlenmiştir. Bu grafikler incelendiğinde; literatüre göre, su/bağlayıcı oranının yükselmesiyle, dayanımın düşmesi gerekirken, %20 S/B oranına sahip karışımların dayanımının literatüre göre ters bir şekilde daha düşüktür. literatüre ters olan bu durumun, %20 su/bağlayıcı oranlı karışımların kıvamının düşük olması sebebiyle, karışımında kullanılan malzemelerin, homojen olarak karıştırılmayıp topaklanarak, kalıplara iyi yerleştirilememesinden kaynaklandığı düşünülmektedir [18].

600 dozlu (B) numunelerin basınç dayanımlarına ait grafikler, S/B oranlarının %20 olması durumu için Şekil 7'de, S/B oranlarının %30 olması durumu için Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 7. 600 dozlu numunelerde S/B oranının %20 olması durumunda serilerin basınç dayanımları  
a) 7 günlük, b) 28 günlük, c) 90 günlük



Şekil 8. 600 dozlu numunelerde S/B oranının %30 olması durumunda serilerin basınç dayanımları  
a) 7 günlük, b) 28 günlük, c) 90 günlük

Şekil 7 ve Şekil 8'deki grafik sonuçları değerlendirildiğinde, 400 dozlu (A) serilerinden elde edilen sonuçlar ile 600 dozlu (B) serilerinden elde edilen sonuçların aynı seyri izlediği görülmüştür. Çalışmanın geneli itibarıyla, S/B oranının artmasıyla, dayanımın düşmesi gerekirken, %20 S/B oranına sahip karışımların dayanım değerlerinin literatüre göre ters bir şekilde düşük çıktığı görülmüştür. Literatüre ters olan bu durumun, %20 S/B oranlı karışımların kıvamının düşük olması sebebiyle, karışımda kullanılan malzemelerin, homojen olarak karıştırılmayıp topaklanarak, kalıplara iyi yerleştirilememesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada; farklı oranlarda S/B, silis dumanı ve SAK kullanılarak, yüksek dayanımlı betonların dayanım değişimleri deneysel olarak incelenmiştir. Numuneler hazırlanırken  $400 \text{ kg/m}^3$  ve  $600 \text{ kg/m}^3$  olmak üzere 2 farklı dozaj değerleri kullanılmıştır. Bu incelemeler için belirlenen deneysel çalışma planına uygun olarak, 16 grupta toplam 96 adet  $100 \times 100 \times 100$  mm boyutlarında küp numune üretilmiştir. Üretilen beton serileri: çökme deneyi, Ve-be deneyi ve basınç dayanımı testi deneyine tabi tutularak birbiriyle mukayese edilmişlerdir. Bu deneylerden aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:



- Düşük işlenebilirliğe sahip bir betonu, SAK ile akıcı hale getirmek mümkündür.
- %5 silis dumanı katkılı serilerde akışkanlaştırıcının fazla kullanımı işlenebilirliği olumsuz etkilediğinden dayanımı da olumsuz etkilemiştir.
- Silis dumanının, betonun karışım suyu ihtiyacını arttırdığı ve betonda kullanılan miktarının iyi ayarlanması halinde beton basınç dayanımını olumlu yönde etkilediği görülmüştür.
- S/B oranının artmasıyla, literatüre uygun şekilde betonun kıvamında artış sağlanmıştır.
- S/B oranının artışı; 400 dozlu (A) numunelerde literatüre ters şekilde basınç dayanımında artışa, 600 dozlu (B) numunelerde ise literatüre uygun olarak basınç dayanımında azalmaya sebep olmuştur.
- 400 dozlu (A) ve 600 dozlu (B) numunelerde en yüksek dayanıma; silis dumanı miktarı %20, SAK miktarı %3 ve S/B oranı %30 olduğu seride ulaşılmıştır. 90 günlük basınç dayanımları 400 dozlu (A) numunede 91 MPa, 600 dozlu (B) numunede ise 93 MPa'ya kadar yükselmiştir.

### Teşekkür

Yazarlardan, B.D., fikir sahibi, T.D. ve A.D. deneyleri gerçekleştirdi. B.D, T.D. ve A.D. sonuçları yorumladı, T.D., makaleyi yazdı.

### Kaynaklar

- [1] T. Erdogan, Beton. Ankara: METU Press, 2003.
- [2] F. Kocataşkın, "Yüksek Dayanımlı Betonun Bileşimi, 2," Ulus. Bet. Kongresi, Yüksek Dayanımlı Beton, Kardeşler Matbaası,(TMMOB) İnşaat Mühendisleri Odası, pp. 211–226, 1991.
- [3] A. C. I. C. 363, Report on High-Strength Concrete (ACI 363R-10). ACI, 2010.
- [4] B. S. Thomas and R. C. Gupta, "Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber," J. Clean. Prod., vol. 113, pp. 86–92, 2016.
- [5] H. T. N. Le, L. H. Poh, S. Wang, and M.-H. Zhang, "Critical parameters for the compressive strength of high-strength concrete," Cem. Concr. Compos., vol. 82, pp. 202–216, 2017.
- [6] H.-O. Shin, D.-Y. Yoo, J.-H. Lee, S.-H. Lee, and Y.-S. Yoon, "Optimized mix design for 180 MPa ultra-high-strength concrete," J. Mater. Res. Technol., 2019.
- [7] T. S. EN, "934-2+ A1," Kimyasal katkılar-Beton, harç ve şerbet için-Bölüm, vol. 2, 2013.
- [8] B. Y. Pekmezci and H. N. Atahan, "Kimyasal ve nano katkılar: betonda kullanımı ve beton performansına etkileri," Hazır Bet. Dergisi, Mayıs-Haziran, pp. 69–82, 2014.
- [9] N. M. Azmee and N. Shafiq, "Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications," Case Stud. Constr. Mater., vol. 9, 2018.
- [10] P. and C. C. Cement - Part 1: General Cements, Composition, "TS EN 197-1," Turkey, 2012.
- [11] O. Soykan, Ö. Cengiz, and Ö. Cenk, "Investigation of the Usability of Slate and Andesite as Concrete Aggregate," J. Suleyman Demirel Univ. Grad. Sch. Nat. Appl. Sci., vol. 19, no. 1, 2015.
- [12] M. Sümer And B. Söyler, "Yüksek Dayanımlı Beton Üretiminde Çimento Ve Superakışkanlaştırıcı Beton Katkı Maddelerinin Etkinliği," Sak. Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg., vol. 6, no. 3, pp. 3–15, 2002.
- [13] A. Demirbilek, "Yüksek Dayanımlı Betonda Su/Bağlayıcı Oranı Ve Kimyasal Katkı Oranı İlişkisinin Dayanım ve İşlenebilirlik Üzerine Etkisi," Fırat university, 2019.
- [14] H. Paiva, A. S. Silva, A. Velosa, P. Cachim, and V. M. Ferreira, "Microstructure and hardened state properties on pozzolan-containing concrete," Constr. Build. Mater., vol. 140, 2017.
- [15] A. V. Özden, "Betonun basınç ve çekme dayanımı ile elastisite modülü arasındaki ilişkiler üzerine bir araştırma." Namık Kemal Üniversitesi, 2010.
- [16] Türk Standardları Enstitüsü, Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinin Basınç Dayanımının Tayini, "TS EN 12390-3," Turkey, 2019.
- [17] R. Palla, S. R. Karade, G. Mishra, U. Sharma, and L. P. Singh, "High strength sustainable concrete using silica nanoparticles," Constr. Build. Mater., vol. 138, pp. 285–295, 2017.
- [18] B. Demirel ve S. Yazıcıoğlu, "Silis Dumanının Karbon Fiber Takviyeli Hafif Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi," Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg., vol. 11, no. 1, pp. 103–109, 2007.
- [19] Y. Shi, G. Long, C. Ma, Y. Xie, and J. He, "Design and preparation of ultra-high performance concrete with low environmental impact," J. Clean. Prod., vol. 214, 2019.

## Elektrikli Bir Formula Student Yarış Aracının Süspansiyon Sisteminin Dinamik Simülasyonu Ve Taşıyıcı Parçasının Mukavemetinin Analiz Edilmesi

Rıdvan ÖZGÜL<sup>1\*</sup>, Burak TANYERİ<sup>2</sup>, Zekai ÖZDEMİR<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Uçak Bakım Ve Onarım Bölümü, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>3</sup> Otomotiv Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

\*<sup>1</sup> ridvan.ozgul@hotmail.com, <sup>2</sup> btanyeri@firat.edu.tr, <sup>3</sup> zekaiozdemir.2525@gmail.com

(Geliş/Received: 15/09/2021;

Kabul/Accepted: 09/03/2022)

**Öz:** Otomotiv Mühendisleri Derneği (SAE) tarafından organize edilen Formula Student yarışmaları dünyadaki en prestijli öğrenci yarışması olarak her sene çeşitli ülkelerde düzenlenmektedir. Bu çalışmada Türkiye’de ilk defa Fırat Üniversitesi’nde Fırat Racing Formula Student Takımı tarafından üretilen elektrikli, 4 tekerden tahrikli ve 4 çekiş sistemine sahip bir Formula Student yarış aracının süspansiyon sistemine ait dinamik simülasyonu MSC Adams Car yazılımında yapılmış ardından araç tekerlek sistemine ait taşıyıcı parçasına zeminden gelen kuvvet doğrultusunda Sonlu Elemanlar Analizi uygulanmıştır. Dinamik simülasyon için önce Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) ortamında tasarlanan süspansiyon sistemine ait bağlantı noktaları, parçalar ve mafsal bilgileri Adams Car yazılımında Hardpoint adı verilen bağlantı noktalarına ait koordinatlar kullanılarak modellenmiş sonrasında ise tekerlek sisteminin simülasyonu yapılarak tekerlek merkezine zeminden kuvvet 2960.9 N olarak bulunmuştur. Bulunan bu kuvvet değeri ANSYS Mechanical Academic yazılımında Sonlu Elemanlar Analizi yöntemi kullanılarak alüminyum 7075 T6 malzemesine sahip taşıyıcı parçasının dayanımı analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre parçada maksimum 0.01432 mm toplam deformasyon oluşmakta ve 12.661 MPa değerinde eşdeğer gerilme görülmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Elektrikli araçlar, Formula Student, taşıt dinamiği, süspansiyon, Sonlu Elemanlar Analizi.

### Dynamic Simulation of an Electric Formula Student Racing Vehicle Suspension System and Analyzing Strength of Upright Component

**Abstract:** Formula Student competitions, organized by the Society of Automotive Engineers (SAE), are held each year in various countries as the most prestigious student competition across the world. In this study, the dynamic simulation of the suspension system of four-wheel-drive electric Formula Student racing vehicle was carried out in MSC Adams Car software, and then Finite Element Analysis to the carrier part of the vehicle wheel system was applied in the direction of the force coming from the ground which is produced by Fırat Racing Formula Student Team at Fırat University for the first time in Turkey, for dynamic simulation, firstly the connection points, parts, and joint information of the suspension system designed in the Computer-Aided Design (CAD) environment were modeled by using the coordinates of the attachment points called Hardpoint in Adams Car software, and then the wheel system was simulated and the force from the ground to the wheel center was found to be 2960.9 N. This force value and the strength of the upright part with aluminum 7075 T6 alloy material were analyzed by using the Finite Element Analysis method in Ansys Mechanical Academic software.

**Key words:** Electric vehicles, Formula Student, vehicle dynamics, suspension, Finite Element Analysis

#### 1. Giriş

Formula Student yarışmaları 1981’den beri ABD, İtalya, Almanya, İngiltere, İspanya gibi birçok ülkede düzenlenmektedir. Yarışma kapsamında üniversite öğrencileri bir yarış aracı tasarlayıp üretmekte ve yarışmalarda teknik ve organizasyon kurallarına göre hakemler tarafından değerlendirilmektedir. Öğrenci takımlarına üniversiteler, çeşitli şirketler ve kurumlar finansal ve teknik olarak destek olmaktadır. Ayrıca mühendislikte kullanılan yazılımlar modelleme ve analiz yazılımları için de şirketler takımlara sponsorluk kapsamında destek vermektedirler [1].

Taşıt dinamiği kapsamında bir aracın hem durağan halde hem de seyir halindeyken yoldan ve çevreden maruz kaldığı etkileri tespit edebilmek ve bu etkileri karşılayabilecek şekilde ürünler tasarlayabilmek taşıt mühendisliğinin temel konularıdır. Üretilen parçanın maruz kaldığı yüklere karşı malzemenin dayanıklı olması ve toplam araç ağırlığını arttırmayacak seviyede de hafif olması gerekmektedir [1].

\* Sorumlu yazar: [ridvan.ozgul@hotmail.com](mailto:ridvan.ozgul@hotmail.com). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-6304-1753, <sup>2</sup> 0000-0002-3517-9755, <sup>3</sup> 0000-0002-0453-2157

Taşıt dinamiği tasarımcıları ve mühendisler parça ve sistem tasarımı yaparken genellikle alüminyum ve çelik malzemelerini sıkça kullanmaktadır. Alüminyum çelik malzemelere kıyasla ağırlıkça hafif olup, alaşımları çok daha fazla mukavemet özelliklerine sahiptir [2]. Otomotiv sektöründe maliyet, işlenebilirlik, korozyon direnci ve geri dönüşüm gibi avantajları sayesinde alüminyum alaşımları oldukça tercih edilmektedir [3].

Mueller, yaptığı yüksek lisans tezinde bir Formula Student aracının dinamik simülasyonunu Adams Car programında gerçekleştirmiştir. Simülasyonları doğrulayabilmek için araca sensörler yerleştirip bir veri toplayıcı ile araç hareketi sırasında aracın çeşitli parçalarına binen yükü ve momentleri tespit etmiştir. Analizler tamamlandığında Adams Car yazılımından çıkan sonuçlar ile veri toplayıcıdan gelen ölçüm sonuçlarını karşılaştırmıştır. Hem yazılımdan hem de veri toplayıcıdan elde edilen sonuçların birbirlerini doğruladığını belirtmiştir [4].

Theander, araçlarındaki süspansiyon sistemine ait dinamik analizler için MATLAB ve Adams Car yazılımlarını kullanmıştır. Çalışmasında çeşitli parametrelerin farklı değerlerdeki sonuçlarını karşılaştırmak için MATLAB yazılımında grafikler oluşturmuş ve ideal parametreleri kullanarak geometrik düzenlemeler yapmıştır. İdeal geometri ile oluşturulan süspansiyon geometrisi kullanılarak Adams Car programında dinamik simülasyonlar çalıştırılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Aracın viraj esnasında lastiğe yanal olarak etki eden yükü; araç iz açıklığı 1250 mm olduğunda 275 N, 1350 mm olduğunda 254 N olarak bulmuştur. Sonuçta hem ideal iz açıklığını hem de daha az lastik yüklenmesini görebilmek için 1350 mm iz açıklığını tercih etmişlerdir [5].

Asarar, hazırladığı proje raporunda bir Formula Student aracının süspansiyon ve direksiyon sistemlerinin dinamik analizleri için Adams Car yazılımını kullanmıştır. Aracın tam modelini hazırladıktan sonra ivmelenme ve frenleme senaryoları için süspansiyon ve direksiyon sistemlerine etki eden kuvvetleri tespit etmiştir. Parçaların dayanımlarını sonlu elemanlar yöntemi ile ölçmek için Adams View yazılımını kullanmıştır. Analiz sonuçlarına göre alt ve üst salıncıkların maruz kaldığı von-Mises gerilmelerini maksimum 200 MPa, minimum 30 MPa olarak bulmuştur [6].

Nybacka, bir Formula Student aracının süspansiyon sistemine ait dinamik analizlerini hem Adams Car programında hem de gerçek aracın üzerinde sensörler aracılığıyla veri toplayarak gerçekleştirmiştir. Sonuçları MATLAB programında yazdıkları kodlar ile karşılaştırarak hem ölçüm sonuçlarının hem de simülasyon sonuçlarının farklarını kıyaslamıştır. Tasarladıkları yeni süspansiyon sisteminin eski sisteme göre %29 daha iyi sönümleme sunduğunu belirtmiştir [7].

Svendsen, bir Formula Student yarış aracının süspansiyon geometrisine Adams Car programında dinamik analizler uygulamış ve bir tekerleğe etki eden kuvveti 3000 N olarak bulmuştur. Analizler sonucunda ön süspansiyon üzerine binen yükü %30 oranında azalttığını belirtmiştir [8].

Gürgeç vd. elektrikli bir aracın yol tutuş ve konfor analizlerini yapmışlardır. Çalışmalarında bode diyagramlarını kullanarak taşıt için en uygun yay sertliğini tespit etmişlerdir. Çalışma sonucunda yay frekansı ve sürüş konforu arasındaki bağlantı için sönüm oranındaki artışın yüksek frekanslarda konforu azalttığını ve düşük frekanslarda ise iyileştirdiğini belirtmişlerdir [9].

Formula Student takımları da bu mühendislik kriterlerine göre çalışmalar yapmışlardır. Yapılan çalışmalarda taşıyıcı parçasının tasarım olarak iyileştirilmesi sonucu parçanın maruz kaldığı gerilme değerleri %30 daha azaltılabilir [10]. Bir diğer çalışma olarak süspansiyon sistemine ait tüm parçaların etkilendiği kuvvetleri ve gerilmeleri bulmak için Excel yazılımında matrisler ile analitik çözüm yapılabilir. Bu yöntem ile çözülen matrisler sonucunda alt ve üst salıncak kollarına, mafsal noktalarına ve taşıyıcı parçasına gelen kuvvetler ve gerilmeler tespit edilebilir [11]. Sun vd. yaptıkları çalışmada Adams programında sistemin dinamik analizlerini gerçekleştirdikten sonra çelik rocker parçasına ve Al 2024 malzemesinden üretilmiş taşıyıcı parçasına sonlu elemanlar analizi uygulamışlardır. Analiz sonucunda maksimum deformasyon sonuçlarında ön taşıyıcı için 5,8 mm, arka taşıyıcı için 3,7 mm olarak bulmuşlardır. Saputro vd. tasarladıkları taşıyıcıya sonlu elemanlar analizi uygulamışlardır. Analiz sonuçlarına göre toplam deformasyon ve eşdeğer gerilme değerleri için minimum emniyet katsayısını 3 olarak belirlemişler ve sonuçları incelediklerinde minimum emniyet katsayısının 5,24 olduğunu belirtmişlerdir [12]. Gorane ve Jain, yaptıkları sonlu elemanlar analizinde taşıyıcı parçasının 108.9 MPa değerinde gerilmeye ve 0,02609 mm değerinde de toplam deformasyona maruz kaldığını tespit etmişlerdir [13]. Vijaya vd. Al 6061-T6 malzemesinden yapılmış taşıyıcı parçasının toplam kütleini azaltabilmek için sonlu elemanlar analizi yapmışlardır. Analiz sonuçlarında toplam kütle 2 kg iken 1,17 kg'a düşmüştür. Sonuçların 2 kat emniyetli olduğunu belirtmişlerdir [14].

Tasarım çalışmalarında parça ve sistemlerin ağırlıklarını azaltmak, fazla malzeme kullanımından kaçınmak için topoloji optimizasyonu yöntemi kullanılmaktadır [1]. Prajwal da Hypermesh programı ile taşıyıcı parçasına sonlu elemanlar analizi uygulamış ve sonucunda da 659 gr olan taşıyıcı kütleini 616 gr'a düşürerek yaklaşık %6 oranında ağırlık kazancı sağlamıştır [15]. Kim vd. de taşıyıcıya topoloji optimizasyonu uygulayarak yaklaşık %40 oranında daha az gerilme ve deformasyon sonucuna ulaşmışlardır [16].

Formula Student yarışmalarında da takımlar tasarım, mühendislik ve üretim kabiliyetlerini sunarak çeşitli etaplarda puanlandırılmaktadır. Araçların hafif, uygun maliyetli, yüksek performanslı, İdeal yakıt tüketimine sahip olması gibi parametreler değerlendirilmektedir. Yapılan çalışmalarda araçların elektrik ve mekanik bileşenlerinin tasarlanması, analizlerinin yapılması ve üretilmesi süreçlerinde temel mühendislik bilgileri kullanılmakta tasarlanan parçalar ve aracın tam montajı Bilgisayar Destekli Mühendislik (CAE) yazılımlarında analiz edilmektedir. Analiz sonuçlarına göre parçalarda ve sistemlerde gerekli düzenlemeler yapılarak üretim gerçekleştirilmektedir.

Bu çalışmada Türkiye’de ilk defa üretilen elektrikli ve dört tekerden tahrikli Formula Student aracının süspansiyon-tekerlek sistemine ait taşıyıcı parçasının dayanımını tespit edebilmek için öncelikle Çoklu Cisimler Dinamiği yazılımı olan MSC Adams Car aracılığı ile kuvvetler tespit edilmiştir. Ardından sonlu elemanlar analizi yazılımı Ansys Mechanical kullanılarak parça üzerine etki eden bu kuvvetler tanımlanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Proje kapsamında üretilecek araç tekerlek içi motor sistemine sahip olduğu için planet dişli sistemi, motor, motor soğutma ceketleri gibi kritik aktarma organı ve yardımcı sistemlere ait bileşenler taşıyıcı parçası üzerine monte edilmiştir. Bu bakımdan taşıyıcı parçasının dayanımı taşıt dinamiği açısından oldukça önemli bir konudur.

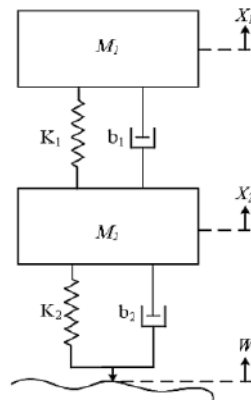
## 2. Materyal ve Yöntem

Çalışma kapsamında aracın süspansiyon geometrisi Solidworks yazılımında modellenerek sistemin kinematik diyagramı hazırlanmıştır. Hazırlanan kinematik diyagram Adams Car programında süspansiyon şablonu haline getirilerek sistemdeki mafsallar ve parçaların dinamik özellikleri yazılıma tanımlanmıştır. Hazırlanan süspansiyon şablonu alt sisteme dönüştürüldü ve gerekli süspansiyon ve tekerlek geometrik özellikleri tanımlanarak simülasyon aşamasına geçilmiştir.

### 2.1. Süspansiyon Sistemleri

Tüm taşıtlarda aracın ve yolcuların güvenlik ve konforlarını arttırabilmek için süspansiyon sistemleri geliştirilmiştir. Süspansiyon sistemleri, araçlar düz yolda, virajda, yokuş inip çıkarken ve hem araç durağanken hem de seyir halindeyken yoldan gelen etkileri sönmüleyerek aracı ve yolcuları olabildiğince az etkilemek amacıyla tasarlanırlar. Süspansiyon sistemlerinin en önemli bir diğer görevi ise lastikler ile yol arasındaki temasın sürekliliğini sağlamaktır [17].

Süspansiyon sistemlerini hem sayısal hem de deneysel analizlerinde çeyrek taşıt modelinden faydalanılır. Şekil 1’de çeyrek taşıt modelinin fiziksel modeli gösterilmiştir. Bu modelde  $M_1$  tüm araç ağırlığının dörtte birine eşittir.  $M_2$  ise tekerlek ve buna bağlı olan aks grubunun ağırlığıdır.  $K$  ve  $b$  katsayıları sırasıyla yaylanma ve sönmüleme katsayılarıdır.  $X_1$  ve  $X_2$  ise  $W$  yol girişinin etkisiyle oluşan düşey doğrultulu yer değiştirmelerdir [17].



Şekil 1. Çeyrek taşıt modeli

Çeyrek taşıt modeline göre bir aracın süspansiyon sistemine ait konum, hız ve ivme hesapları yapılabilir. Bu hesaplarda kullanılacak bağıntılar Denklem 1 ve Denklem 2’de verilmiştir [9].

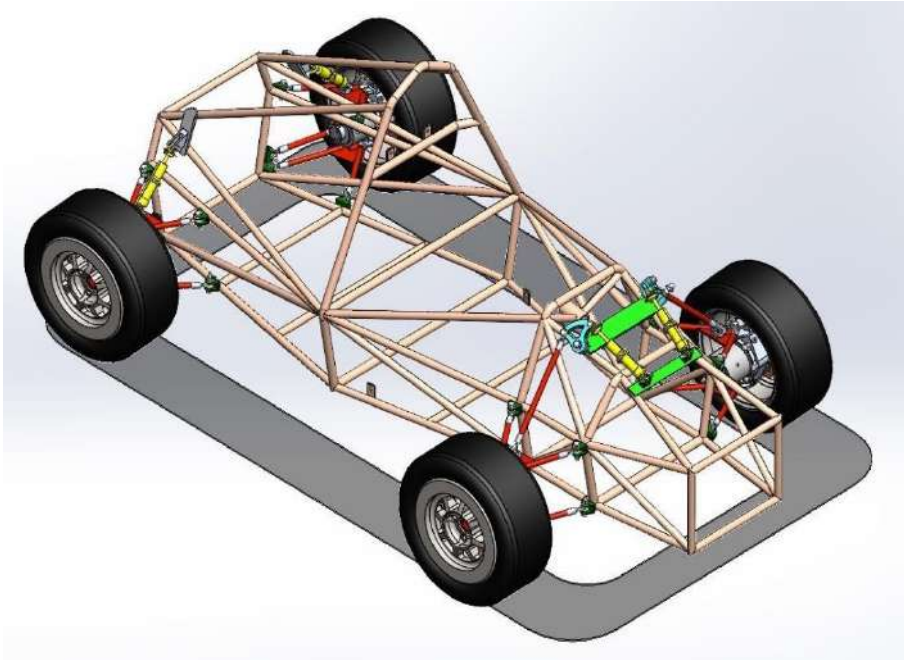
$$M_1 \ddot{X}_1 + b_1 (\dot{X}_1 - \dot{X}_2) + K_1 (X_1 - X_2) = 0 \quad (1)$$

$$M_2\ddot{X}_2 + b_1(\dot{X}_2 - \dot{X}_1) + b_2(\dot{X}_2 - W) + K_1(X_2 - X_1) + K_2(X_2 - X_3) = 0 \quad (2)$$

Süspansiyon sistemlerinin tasarım ve analiz süreçlerinde sisteme ait tüm parçaların yoldan gelen kuvvetlere karşı dayanıklı olmasını sağlamak amaçlanmaktadır. Bu amaca göre dinamik analiz yazılımlarında sistemler modellenmekte ve yol şartları yazılımlara tanımlanmaktadır. Bu tanımlamalar yapılırken sistemlerin gerçek sistemlerle olan benzerliği dikkate alınmalı bileşenlerin geometrisi, kuvvetler ve mafsal kriterleri doğru tanımlanmalıdır. Doğru tanımlanan modeller ile iyi seçilmiş analiz parametreleri sonucunda parçalara ve sistemlere etki eden yükler gerçeğe yakın olarak tespit edilebilmektedir. Tespit edilen bu değerler ile parçaları dayanımlarını tespit edebilmek için sonlu elemanlar yazılımları kullanılmakta ve sonuçlar değerlendirilerek parçalarda hem geometrik hem de malzeme açısından herhangi bir değişiklik yapılmasının gerekliliği incelenmektedir.

## 2.2. Sistemin Genel Tasarımı

Fırat Racing Formula Student Takımı bünyesinde üretilen elektrikli yarış aracının süspansiyon tekerlek geometrisi Şekil 2’de görülmektedir. Sistem tasarlanırken şasinin, diğer mekanik ve elektrik sistemlerinin özellikleri göz önünde bulundurularak farklı montaj seçenekleri arasından tasarım ve üretim açısından uygun sistem tercih edilmiştir. Şasi seçilirken öncelikle Formula Student resmi kuralları, boru profillerin tedarik edilebilme imkânları, işlenebilirlik ve maliyet kriterleri göz önünde bulundurulmuştur. Süspansiyon geometrisi için çift salıncaklı model ve çelik A kolları kullanılmıştır.



Şekil 2. Aracın genel süspansiyon tekerlek geometrisi

## 2.3. Taşıyıcı Parçasının Tasarımı

Aracın taşıyıcı parçasına ait 3B model görüntüsü Şekil 3’te görülmektedir. Taşıyıcı parça yapısı gereği jantın içinde konularak tekerlek içindeki elektrik motoru, motor soğutma sistemi, planet dişli sistemi, fren sistemi parçalarına yataklık yapmaktadır. Ayrıca tekerlek sistemi ile araç arasındaki bağlantıyı sağlamak ve direksiyon bağlantısı için de bağlantı kulakçıkları içermektedir.

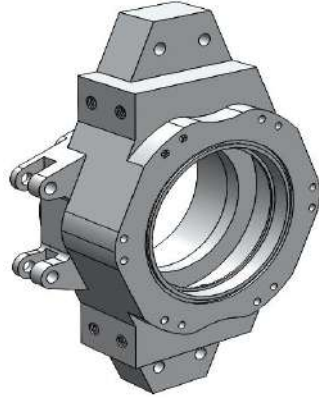
Taşıyıcı parçasının görevi göz önüne alındığında hem statik, dinamik ve titreşim yüklerine karşı yeterli dayanıklılığa sahip olmalı hem de olabildiğince hafif olmalıdır. Bunlar dikkate alındığında parça için alüminyum 7075 T6 alaşım malzemesi tercih edilmiştir. Seçilen 7075 T6 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi Tablo 1’de, mekanik özellikleri ise Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Alüminyum 7075 T6 alaşımının kimyasal bileşimi [18]

Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Diğer	Al
0,5	0,4	1,2-2,0	0,3	2,1-2,9	5,1-6,1	0,18-0,28	0,20	0,15	Kalan

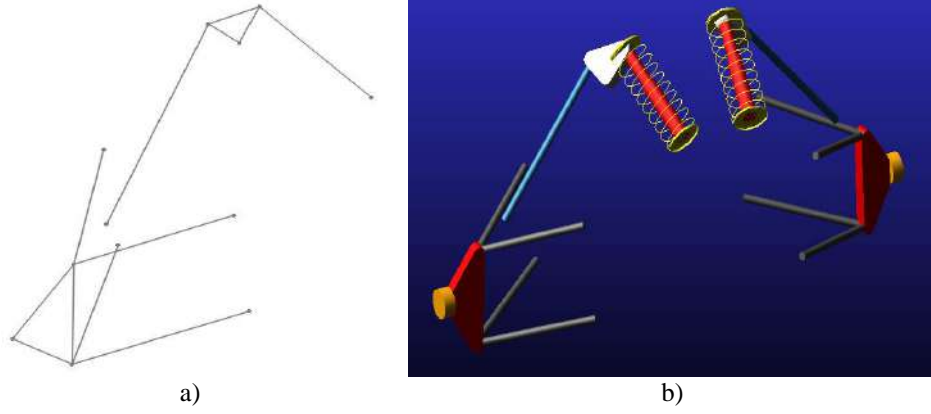
**Tablo 2.** Alüminyum 7075 T6 alaşımının mekanik özellikleri [18]

Özellik	Değer
Akma Mukavemeti (MPa)	460 – 505
Çekme Mukavemeti (MPa)	530 – 570
Uzama (%50)	10
Sertlik (Brinell)	140 – 160

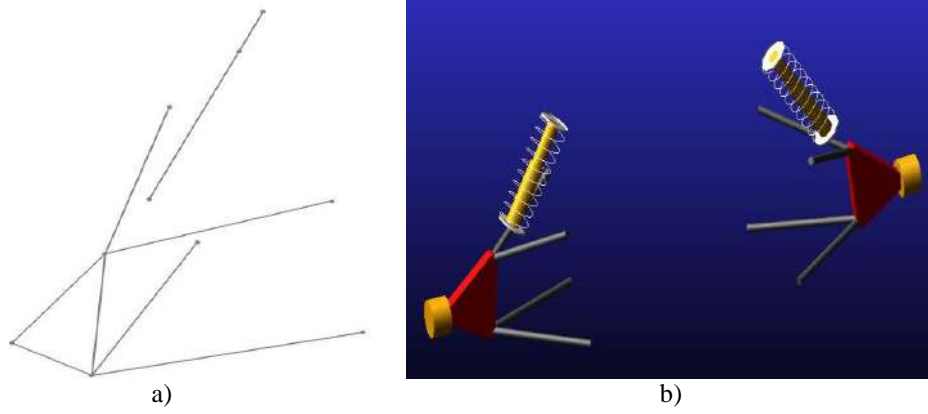
**Şekil 3.** Taşıyıcı parçasının 3B modeli

### 3. Sonuçlar ve Tartışma

Taşıt mekaniği açısından bir süspansiyon sisteminin dinamik analizlerini hazırlamak için öncelikle sistemin kinematik diyagramı ve tüm parçaları ve mafsalları içeren kinematik modeli hazırlamıştır. Ön sistem için hazırlanan kinematik diyagram ve model Şekil 4'te, arka sistem için hazırlanan diyagram ve model Şekil 5'te detaylı bir şekilde gösterilmiştir.

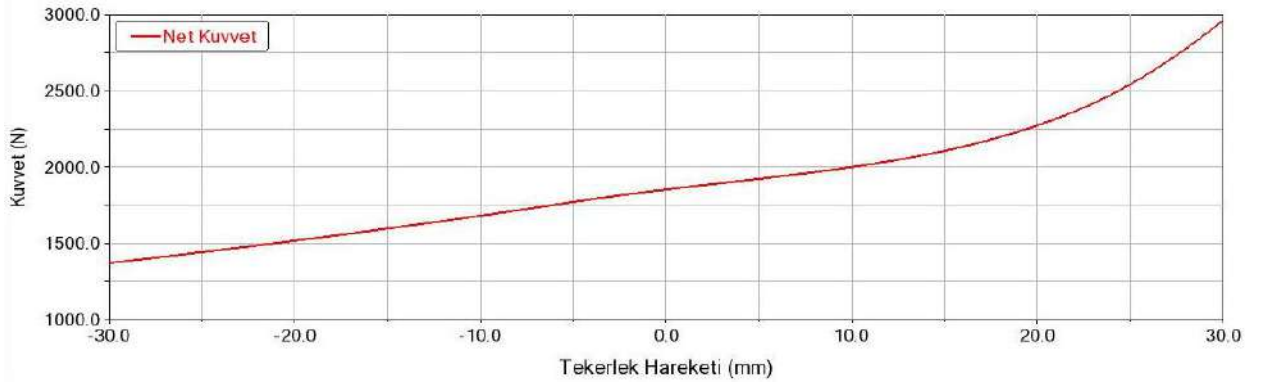


Şekil 4. Ön süspansiyon geometrisi için a) kinematik diyagram b) kinematik model



Şekil 5. Arka süspansiyon geometrisi için a) kinematik diyagram b) kinematik model

Hazırlanan kinematik modeller ile oluşturulan süspansiyon şablonları süspansiyon alt montajına dönüştürülerek simülasyon için hazır hale getirilmiştir. Simülasyon kapsamında 30 mm tekerlek hareketine bağlı olarak tekerlek merkezindeki taşıyıcı parçasının maruz kaldığı net kuvvet Şekil 6'da verilmiştir. Taşıyıcı parçasına etkiyen kuvvetin maksimum kuvvet 2960.9 N olarak görülmektedir. Bulunan bu kuvvet değeri literatürle kıyaslandığında Svendsen'in [8] sonuçlarında ulaştığı 3000 N net tepki kuvveti ile doğrulandığı görülmektedir.



Şekil 6. Taşıyıcı parçasına etkiyen net kuvvet

Adams Car programından elde edilen kuvvet değeri ANSYS Mechanical yazılımında taşıyıcı parçasına yüklenerek parçanın mukavemet değerleri test edilmiştir. Analize başlamadan önce parçanın geometri temizleme ve düzenleme işlemleri yapılarak daha düzenli ve verimli ağ yapısının oluşturulması sağlanmıştır. Taşıyıcı parça için oluşturulan ağ yapısı Şekil 7’de verilmiştir.

Sonlu elemanlar analizinde uygun ağ tanımlaması yapıldıktan sonra parça üzerinde sabitleme ve sınır şartları belirtilmektedir. Parçanın gerçek sistemde çalışacağı konum ve fiziksel şartları ve parça üzerine etki eden yüklerin benzetimi yapılarak analiz süreci tamamlanmaktadır.



Şekil 7. Taşıyıcı parçasına ait ağ yapısı

Sonlu Elemanlar Analizi için oluşturulan ağ yapısının belirli kriterlere göre kaliteli ve ideal olup olmadığı Tablo 3’teki değerlerden anlaşılmaktadır.

Tablo 3. Oluşturulan ağ yapısının kalite değerleri

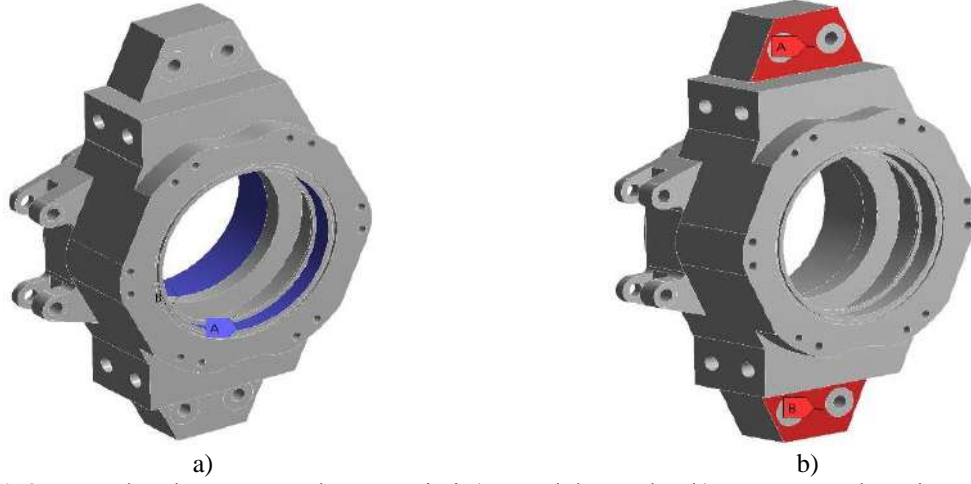
Kriter	Minimum	Ortalama	Maksimum
Skewness	0,0013641	0,42308	0,99995
Orthogonal Quality	0,000054551	0,5744	0,99517

Oluşturulan ağ yapısının kalitesi ve uygunluğu için dikkate alınan iki kriterden biri olan Skewness değeri minimum ve ortalama olarak 0’a yakınlığı avantaj sunmaktadır. Diğer kriter olarak da Orthogonal Quality değerinde ise maksimum ve ortalama olarak 1’e yakın olması durumunda avantajlı ve verimli olmaktadır [19].

Ağ tanımlaması yapıldıktan sonraki aşama parçaya etki eden yüklerin yerini ve şiddetini programa tanıtmaktır. Adams Car programından elde edilen 2960.9 N’luk kuvvet 1.2 emniyet katsayısı dikkate alınarak sonlu elemanlar analizinde 3500 N olarak kullanılmıştır.

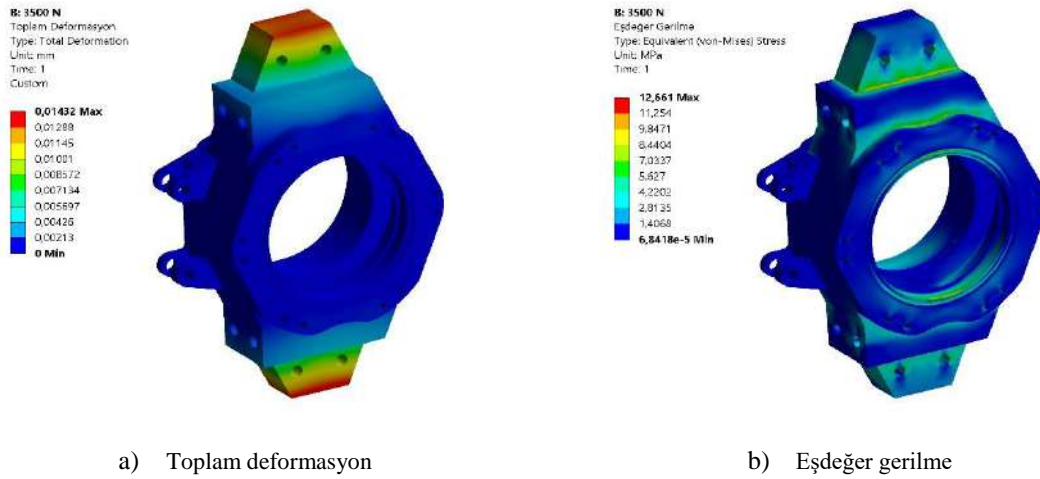
Ayrıca parçanın sabitlemesi için merkezinde bulunan silindirik yüzeyler kullanılmıştır [14]. Parça Şekil 8a’da görülen merkezdeki silindirik yüzeylerden sabitlendikten sonra alt ve üst salıncak mafsalları üzerinden kuvvet iletimi doğrultusunda Şekil 8b’deki gibi kuvvet tanımlaması yapılmıştır.





Şekil 8. Parça destek ve sınır şartları gösterimi a) Destek konumları b) Kuvvet uygulama konumları

Oluşturulan ağ yapısının ardından parça üzerine etki eden yükler ve parçanın sabitleme noktaları yazılıma tanımlanmıştır. Analiz sonuçlarına göre elde edilen toplam deformasyon ve eşdeğer gerilme konturları sırasıyla Şekil 9a ve Şekil 9b’de verilmiştir.



Sonuçlar incelendiğinde taşıyıcı parçaya etki eden yüke karşılık Şekil 9a’da görüldüğü gibi maksimum 0.01432 mm toplam deformasyon oluştuğu görülebilmektedir. Şekil 9b’de ise parçaya 12.661 MPa değerinde eşdeğer gerilme etki ettiği görülmektedir.

Tablo 2’de verilen alüminyum 7075 T6 alaşımının özelliklerine göre analiz sonuçlarında görülen eşdeğer gerilme değerinin malzemenin akma mukavemetinin altında olduğu ve bu sonuçlara göre statik analiz kapsamında parçanın emniyetli olduğu görülmektedir. Analiz sonuçları literatür ile kıyaslandığında elde edilen 0.01432 mm değerindeki toplam deformasyon ve 12.661 MPa değerindeki eşdeğer gerilme sonuçları diğer çalışmalardaki sonuçlara paralel bir şekilde ortaya çıkmıştır [12, 13, 14, 16].

Bu sonuçlara ve karşılaştırmaya göre tasarlanan taşıyıcı parçasının sonlu elemanlar analizi kapsamında maruz kaldığı kuvvetlere karşı statik olarak dayanıklı olduğu görülebilmektedir.

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada elektrikli bir Formula Student aracının süspansiyon sisteminin dinamik analizi ve elde edilen sonuçlara göre taşıyıcı parçasının mukavemetinin sonlu elemanlar yöntemi ile değerlendirilmesi çalışılmıştır. Aracın süspansiyon geometrileri MSC Adams Car yazılımında analiz edilmiş ve normal seyir esnasında tekerleklere 2960.9 N net kuvvet geldiği tespit edilmiştir. Ardından araç tekerlek sisteminin en önemli

parçalarından olan taşıyıcı parçasına elde edilen bu kuvvet emniyet faktörü de dikkate alınarak 3500 N olarak sonlu elemanlar yöntemi ile uygulanmıştır. Analiz sonuçlarına göre 0.01432 mm toplam deformasyon ve 12.661 MPa eşdeğer gerilme sonuçları elde edilmiş ve parçanın mukavemetinin bu şartlar altında yeterli düzeyde olduğu görülmüştür.

## Teşekkür

Bu çalışma Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından MF.20.29 proje numarasıyla desteklenmiştir. Ayrıca proje ana sponsoru ELSE Enerji AŞ, yazılım ve teknik sponsorlarımızdan Dassault Systemes (SolidWorks), MSC Software ve BİAS Mühendislik şirketlerine teşekkür ederiz. Ayrıca bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde uluslararası literatür tarama ve tercüme destekleri için Sayın Arif COŞKUN'a teşekkür ederiz.

## Kaynaklar

- [1] Albak E İ, Solmaz E, Kaya N, Öztürk F. Lightweight Foam Impact Attenuator Design for Formula Sae Car. Turkish Journal of Engineering 2018; 2(1): 17–21.
- [2] Sekmen M, Günay M, Şeker U. Alüminyum Alaşımlarının İşlenmesinde Kesme Hızı ve Talaş Açısının Yüzey Pürüzlülüğü, Yığıntı Talaş ve Yığıntı Katmanı Oluşumu Üzerine Etkisi. Politeknik Dergisi 2015; 18(3): 141–148.
- [3] Pul M. 7075, 6061 Ve 2024 Alüminyum Alaşımlarının Tornalanmasında Yüzey Pürüzlülüğü ve Takım Aşınmasının Karşılaştırılması, Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi 2017; 9(2): 65-75.
- [4] Mueller R L. Full Vehicle Dynamics Model of a Formula Sae Racecar Using Adams / Car. Master Tezi, Texas A&M University, ABD, 2005.
- [5] Theander A. Design of a Suspension for a Formula Student Race Car. Master Tezi, KTH Royal Teknoloji Enstitüsü, İsveç, 2004.
- [6] Asarar K. Analysis of Link Forces on a Formula Student Suspension System. 2016.
- [7] Nybacka M. Validation of ADAMS/Car simulations and dynamic performance in multi-link suspensions. Master Tezi, Luleå University of Technology, 2005.
- [8] Svendsen, N. Dynamic analysis of damping system in FS car using ADAMS Multidynamics Simulations. Master Tezi, University of Stavanger, 2014.
- [9] Gürgeç T, Tanyeri B, Öner C. Tekerlek İçi Anahtarlamalı Relüktans Motoruyla Tahrik Edilen Elektrikli Aracın Yol Tutuş ve Konfor Analizi. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2016; 28(1): 79–85.
- [10] Zaidie M N A, Hashim M S M, Tasyrif M, Basha, M H, Ibrahim I, Kamaruddin N S, Shahrman A B. Analysis of a front suspension system for UniART FSAE car using FEA. Journal of Physics:Conference Series 2017, 908(1), 0–6.
- [11] Dhakar A, Ranjan R. Force Calculation In Upright Of A FSAE Race Car. International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET) 2016. 7(2): 168–176.
- [12] Saputro B A, Sabino U, Torino D. A, Pratama D R, Cahyono S I, Imaduddin F. Static load simulation of steering knuckle for a formula student race car. AIP Conference Proceedings, Şubat 2018.
- [13] Gorane P S, Jain P. Topological Optimization of Steering Knuckle By Using Additive Manufacturing Process. International Journal of Advance Research in Science and Engineering 2018; 7(3): 1310–1316
- [14] Kumar B V, Ruchitha B, Edighi N G, Kumar H. Design and Analysis of Upright for Formula Vehicle. International Journal of Trend in Scientific Research and Development 2019; 3(3): 1184–1189.
- [15] Prajwal P B. Design Optimization of Formula One Student Sports Car Upright Using Hypermesh. International Journal of Mechanical and Industrial Engineering 2013; 2(3): 166–171.
- [16] Kim G, Park Y, Park K. Topology Optimization And Additive Manufacturing Of Automotive Component By Coupling Kinetic And Structural Analyses. International Journal of Automotive Technology 2020; 21(6): 1455–1463.
- [17] Okuturlar H, Tınkır M. Araç Süspansiyon Sisteminin Nümerik Ve Deneysel Dinamik Analizi, Konya Journal of Engineering Sciences 2021; 9(1): 85–105.
- [18] <https://www.seykoc.com.tr/icerik/7075?dil=tr> Erişim : 01.05.2021
- [19] ANSYS Fluent Theory Guide.



## Nesne Tabanlı Ölçütlerle Yazılım Hata Kestirimi : Örnek Bir Olay İncelemesi

Begüm ERKAL<sup>1\*</sup>, Tülin ERÇELEBİ AYYILDIZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Başkent Üniversitesi, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup> Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Başkent Üniversitesi, Ankara, Türkiye

\*<sup>1</sup> begume@baskent.edu.tr, <sup>2</sup> ercelebi@baskent.edu.tr

(Geliş/Received: 20/09/2021;

Kabul/Accepted: 03/02/2022)

**Öz:** Yazılım projelerinin kalitesini ölçme işlemi sorunların erken safhada bulunmasına olanak sağlayan bir işlem olmasına rağmen çoğunlukla ihmal edilen, zaman ve bütçe ayrılmayan bir işlemdir. Yazılım kalitesini ölçebiliyor ve bunu rakamlarla ifade edebiliyor olmak bakım yapılabirlik, yeniden kullanılabilirlik, test edilebilirlik, verimlilik, taşınabilirlik, işlevsellik ve anlaşılabilirlik gibi kalite özellikleri hakkında fikir sahibi olmamızı sağlar. Yazılımın kalitesini etkileyen önemli unsurlardan biri de kaynak koddaki hataların sayısıdır. Bu nedenle, geliştiriminin erken safhasında kaynak koddaki hataları belirlemek çok önemlidir. Çalışmada, 50 açık kaynak kodlu eğitim projesindeki yazılım hata kestirim doğruluğu analiz edilmiştir. Yazılım kalite ölçütleri "Understand" adı verilen statik kod analiz aracı kullanılarak ölçülmüş ve hata sayıları ise "SpotBugs" adı verilen araç ile belirlenmiştir. Birisi dışarıda çapraz doğrulama (LOOCV) kullanılarak sonuçların doğruluğu belirlenirken yazılım kalitesi ve hatalar arasında ilişkiyi elde etmek için adımsal (stepwise) doğrusal regresyon analizi uygulanmıştır. Sonuçlara bakıldığında kestirim doğruluğunun literatürde de geçen değerler tarafından desteklendiği görülmüştür. RFC ölçütünün hata kestiriminde hiç bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Çalışma, yazılım hatalarının sayısının kestirimi için yazılım kalite ölçütlerinin kullanılmasının mümkün olduğunu göstermektedir.

**Anahtar kelimeler:** Yazılım Hata Kestirimi, Nesne Tabanlı Ölçütler, Yazılım Kalite Ölçütleri, Kestirim Doğruluğu.

### Software Bug Prediction with Object-Oriented Metrics : A Case Study

**Abstract:** Although the process of measuring quality of software projects is a process that allows problems to be found at an early stage, it is a process that is mostly neglected and does not allocate time and budget. Being able to measure software quality and quantify it allows us to gain insight into quality features such as maintainability, reusability, testability, efficiency, portability, functionality and understandability. One of the important factors affecting the quality of software is number of bugs in source-code. Therefore, it is very important to identify bugs in the source-data early in development. In study, software bug prediction accuracy in 50 open-source education projects was analyzed. Software quality metrics were measured using static code analysis tool called "Understand", number of bugs was determined with tool called "SpotBugs". Stepwise linear-regression analysis was applied to obtain the relationship between software quality and bugs while one was determining accuracy of results determined using leave-one-out cross validation (LOOCV). Results were supported by the values of estimation accuracy, which are also mentioned in literature. It has been observed that RFC metric has no effect on bug prediction. Study shows that it is possible to use software quality metrics to estimate number of software bugs.

**Key words:** Software Bug Prediction, Object-Oriented Metrics, Software Quality Metrics, Prediction Accuracy.

#### 1. Giriş

Yazılım geliştirme teknolojilerindeki önemli ilerlemelere rağmen, yazılımlardaki hatalar üretilen yazılımların kalitesini ve güvenilirliğini büyük ölçüde etkilemektedir [1]. Bu hataların yazılım geliştirilirken erken aşamalarda tespit edilmesi önemlidir. Hatalar artık çoğu yazılım kalitesi özelliği arasında fiili endüstri standardı haline gelmiştir [2]. Bu nedenle, yazılım hatalarının kestirimi, yazılım mühendisliğinde 30 yıldan fazla bir süredir ilgi çeken konu olmuştur [3]. Test araçları, genellikle yazılım ürününün uygunluğunu doğrularken hataları tespit etmek için kullanılır. Bununla birlikte, bu tür araçlar genellikle tüm olası hataları tanımlamak için yeterli değildir, bu nedenle geliştirme sürecinde olabildiğinde çok yazılım hatasını tanımak için alternatif yöntemler gereklidir [4].

Yapılan çalışmada yazılım kalitesi ve geliştirilen eğitim yazılım projelerindeki hataların sayısı arasındaki ilişki belirlenip, hata kestirimi önerisinin sunulması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda bu çalışmada, 50 açık

\* Sorumlu yazar: [begume@baskent.edu.tr](mailto:begume@baskent.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-2170-2162, <sup>2</sup> 0000-0002-7372-0223

kaynak kodlu, nesne yönelimli ve orta ölçekli eğitim projesi olmak üzere belirli bir alandaki yazılım projeleri kullanılarak yazılım hata kestiriminin doğruluğu yapılmıştır. Çalışmada oluşturulan araştırma sorusu (AS) aşağıda verilmektedir. Araştırma sorusunun yanıtlanması için söz edilmiş olan 50 adet açık kaynak kodlu eğitim projesinin yazılım kalite ölçütleriyle hata kestirim doğruluğunun istatistiksel analizi yapılmıştır.

- (AS) Yazılım hata sayısının kestirimi için yazılım kalite ölçütlerinin kullanılması mümkün mü?

Geliştirilen yazılımların teslim edilmesinden sonra içerisinde hataların bulunması, bu hataların düzeltilmesi genelde uzun bir zaman almaktadır. Bu sebeple, teslim edilmesinden önce hata kestiriminin yapılması hem projelerin başarılı olmalarına hem de kalite, maliyet ve zaman açısından önemli derecede katkı sağlamasında yararlı olmaktadır. Yapılan çalışma katkı olarak bu noktada da fayda sağlamaktadır.

### 1.1. Ölçüt Tabanlı Yazılımlarda Hata Kestirim Görüşleri

Yazılım ölçütleri, geliştirilen koddaki bir hata noktasını tespit etmek için kullanılabilen, yazılım süreçlerinin [5] sonuçlarına göre bazı özellikleri veya ölçütleri temsil eden hesaplanabilir değerlerdir. Böylece, yazılım kalitesini iyileştirmek için kodun hangi bölümlerinin gözden geçirilmesi veya yeniden yazılması gerektiği hakkında bilgi sağlanabilir. Literatürde hata kestirimini belirlemek için çeşitli yazılım ölçütleri ve birkaç hata kestirimi görüşü bulunmaktadır. Süreç ölçütleri [6]; yazılım değişikliklerinin hatalara neden olduğunu, Önceki hata ölçütleri [7]; önceki hataların gelecekteki hataları tahmin ettiğini, Kaynak kod ölçütleri [8] ve Değişikliklerin entropisi [9]; karmaşık değişikliklerin hatalara neden olduğunu, Kod çalkantısı ölçütleri; kaynak kod ölçütlerinin kod çalkantısıyla ilişkisinin çıkarılmasına yardımcı olduğunu, Entropi ölçütleri ise; değişikliklerin entropisinin kaynak kod ölçütleri tarafından daha iyi tanımlandığını belirtir.

Tipik kaynak kodu ölçütleri arasında Chidamber ve Kemerer (CK) ölçütleri, kod satırı ölçütleri (LOC), Halstead ölçütleri ve McCabe karmaşıklık ölçütü [10] bulunmaktadır. CK ölçütleri [11], WMC (Weighted Methods Per Class - Sınıfın Ağırlıklı Metot Sayısı), DIT (Depth of Inheritance Tree - Kalıtım Ağacı Derinliği), NOC (Number of Children - Alt Sınıf Sayısı), RFC (Response for a Class - Sınıf Tarafından Tetiklenen Metot Sayısı), CBO (Coupling Between Objects - Sınıflar Arası Bağımlılık) ve LCOM (Lack of Cohesion of Methods - Uyum Eksikliği)'dir. LOC, ilk olarak 1960'larda tanıtilen ve kalite araştırmalarında yaygın olarak kullanılan en eski ölçütlerden biridir. LOC yöntemiyle, yazılmış olan kaynak kodunun satır sayısı üzerinden yazılımın büyüklüğüyle ilgili ölçümlerin yapılması mümkündür. Kullanımı kolaydır fakat, geliştirimi yapan kişilerin farklı kodlama yöntemlerini kullanması ya da tercih edilen programlama dillerinin farklılık göstermesi dezavantajları arasında yer almaktadır [12]. LOC, daha gelişmiş tasarımları ve gereksinimleri karşılayamamıştır, bu nedenle yazılım hata kestiriminde yararlı değildir [13]. Halstead ölçütleri [14], çeşitli programlarda meydana gelen operatörlerin ve işlenenlerin sayısına göre gerçek zamanlı anahtarlama sistemleri tanımlanır. McCabe karmaşıklık ölçütü [15], 1974'te Thomas McCabe tarafından önerilmiştir.

### 1.2. Yazılım Hata Kestirimi Konusunda İlgili Çalışmalar

Yazılım hata kestirimi alanında, birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalar aşağıda açıklanmaktadır:

Sarı ve Kalıpsız [16], önerdikleri modeli lojistik regresyon ile analiz etmek için Marco D'Ambros tarafından hazırlanan bir hata kestirim veri tabanını kullanmıştır. Ayrıca, modellerini bir organizasyon içinde geliştirilen yazılım kodları üzerinde test etmişler ve modelin hata kestiriminde belirli bir başarı seviyesine nasıl ulaştığı ile ilgili sonuçlarını yorumlamışlardır.

D'Ambros vd. [17], yazılım hatası kestirimi yapmak için sınıf düzeyinde veri setlerini tasarlamışlardır. Veri kümeleri, hatalar, değişiklikler ve beş yazılım sistemi için sürüm bilgilerinden oluşmaktadır. Verileri çevrimiçi olarak yayınlamışlardır ve tekrarlanabilirliğini sağlamışlardır. Dahil edilen sürümler için, her iki haftada bir ölçüt değerleri elde etmişlerdir ve her yazılım sınıfı için hata sayılarını güncellemişlerdir. Bu da hata raporlarının bir kestirim aracı olarak iyi bir yaklaşım olduğu iddiasına da yol açmıştır.

Gyimothy vd. [18], yazılım hatalarını belirlemek için daha önce Chidamber ve Kemerer (CK) tarafından sunulan nesne yönelimli ölçütler arasındaki ilişkileri incelemiştir. BUGZILLA hata izleme sistemini kullanarak yazılımdaki hataların miktarını elde ettikten sonra, C++ ile yazılmış açık kaynaklı projeler için hata eğilimi ile ölçütler arasında bir ilişkinin varlığını göstermişlerdir. Hata kestirimi için en etkili olabilecek ölçütleri araştırmışlar ve CBO ölçütünün daha üstün olduğunu, DIT ve NOC ölçütünün ise güvenilir olmadığını gözlemlemişlerdir.

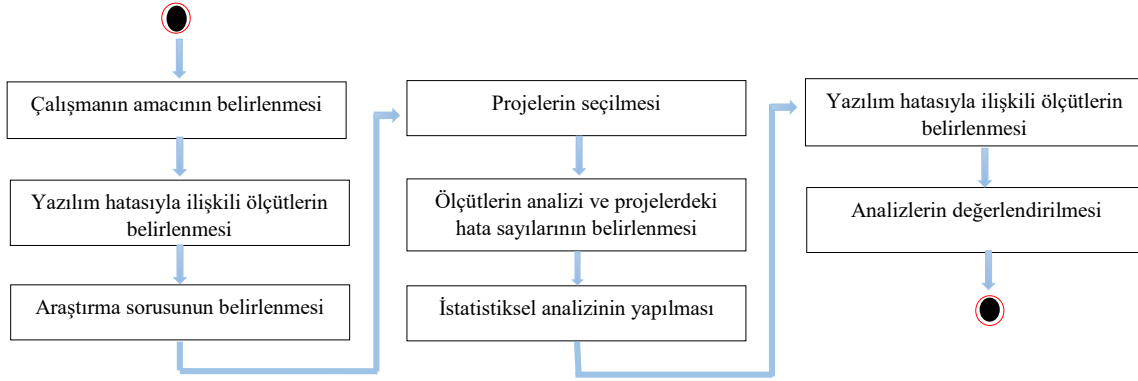
Okutan ve Yıldız [19], yazılımın ölçütleri ile hatalara yakınlığı arasındaki ilişkileri belirlemek için Bayes ağlarını kullanmışlardır. Veri seti olarak ise 9 açık kaynak Promise deposunu dahil etmişlerdir ve RFC, LOC ve

LOCQ ölçütlerinin en etkili olduğunu gösteren modellerle sonuçlanmıştır. Diğer yandan, CBO, LCOM ve WMC ölçütlerinin daha az etkili olduğunu ve NOC ve DIT ölçütünün en güvenilir olduğunu belirtmişlerdir.

Lamba vd. [20], hata kestirimi için yazılım modülleri kullanarak CK ve nesne yönelimli ölçütleri üzerinde çalışma yapmışlardır. Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkilerin çıkarımında regresyon analizi kullanmışlardır. Aynı zamanda  $R^2$  değerinin karşılaştırılması için rastgele orman modelini kullanmışlardır. Sonuçların doğrulanmasında RStudio aracından faydalanmışlar ve elde edilen sonuçlarda basit doğrusal regresyon modelinin hata kestiriminde rastgele orman modelinden daha iyi olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

## 2. Teorik Metot

Bu çalışmada yazılım hata kestirimi konusunda daha önce yapılan çalışmalar incelenmiş, daha önce yapılan çalışmadan ilham alınarak [21] proje sayılarının artırılması hedeflenmiş ve farklı alanda geliştirilmiş Java programlama dilinde yazılmış 50 orta ölçekli açık kaynak kodlu eğitim projesi analiz edilip, veri setinin hata kestirim doğruluğu analizinin yapılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, Java programlama dilince yazılmış 50 orta ölçekli açık kaynak kodlu eğitim projesi veri seti olarak tercih edilmiştir. Java ile yazılmış yazılımların seçilmesinin nedenleri arasında güvenilirliği, platform bağımsızlığı ve hızlı proje geliştirme imkanı sağlaması sayılabilmektedir. Veri setinde eğitim projelerinin seçilmesinin nedeni, uzaktan eğitimin son zamanlarda ön planda olması olup bu nedenle de bu yazılım platformlarının daha kullanışlı hale getirilmesi için önemli bir katkı sağlayabileceğinin düşünülmesidir. Daha önce yapılmış olan çalışmadan farklı olarak proje alanı değiştirilmiştir hem de proje sayısı artırılmıştır. Seçilen projeler farklı alanlardan tercih edilmesinden dolayı birbirinden tamamen farklıdır. Eski çalışmada oyun projeleri üzerine çalışılırken yapılan bu çalışmada eğitim projeleri üzerinde çalışılmıştır. Analiz sonuçlarına diğer çalışmadan farklı olarak birisi dışarıda çapraz doğrulama (LOOCV) yöntemi uygulanmıştır ve kestirim doğruluğu ölçütleri olan ortalama karesel hata (MSE), kök ortalama kare hata (RMSE) ve ortalama mutlak hata (MAE) değerleri hesaplanmıştır. Çalışmanın adımları Şekil 1'de verilmektedir. Yazılım hatasıyla ilişkili ölçütlerin belirlenmesinde literatür çalışmaları incelendiğinde CK ölçütleri ve yazılım hatasıyla ilgili çok çalışma yapıldığı ve CK ölçütlerinin hatayı arttırdığına dair sonuçlar elde ettikleri görülmüştür. Ölçütler belirlenirken bu referanslardan yola çıkılmıştır ve ilerleyen paragraflarda bu referansların detaylı anlatımı yer almaktadır.



Şekil 1. Çalışmanın adımları.

Çalışmada, birçok yazılım geliştiricisinin kullandığı SourceForge sitesinden açık kaynak kodlu projeler indirilmiştir. Açık kaynak kodlu yazılımlar, hazır yazılımlarla karşılaştırıldığında en temel özelliklerinden birisi, kaynak kodların kullanıcılara açık olması ve bu kaynak kodlarını ölçebilmek için birçok ölçütün literatürde yer almasıdır [22]. SourceForge sitesi hızlı, güvenli ve aynı proje üzerinde aynı anda birden çok kişinin çalıştığı kapsamlı raporlar içermektedir [23]. Yazılımların geliştirilmesindeki yaşam döngüsü sürecinde önemli aşamalardan birisinin kodlama sırasında kaynak kodlarının statik kod analizleri araçlarıyla incelenmesi olduğu ve bu incelemelerin yazılımlardaki güvenliği artıran yöntemlerden biri olduğu söylenmektedir [24]. Statik kodu incelemek ve seçilen ölçütlerin değerlerini elde etmek için "Understand" kod analiz aracı kullanılmıştır. Bu kod analiz aracı, ayrıntılı ölçüt raporları, bağımlılık analizleri, diyagramlar ve diğer grafiksel bilgiler dahil olmak üzere birden çok yazılım dilini destekleyen kaynak kodu hakkında bilgi üretmektedir [25].

Yazılımın kalitesinin değerlendirilmesi, kodların değerlendirilmesinde önceden tanımlanan kurallara bağlı

olarak bir bakış açısı sağlayabilmek için belirlenen ölçütlerin elde edilmesini gerektirir [26]. 6 adet CK ölçütünün hatayı arttırdığıyla ilişkili referanslar incelendiğinde bu altı ölçütün analizlerde yer alması tercih edilmiştir. WMC ölçütünün değerinin yüksek olmasının hataları arttırdığı ve hata kestirim modellerinin üzerinde önemli etkisinin olduğu [27], DIT ölçütünün yüksek olmasının hataları arttırdığı [28], RFC ölçütünün birçok metodun çağrılmasının sınıfın test edilmesini ve hataların ayıklanmasını zorlaştırdığı, CBO ölçütünün sınıflar arasındaki bağımlılık artarsa hatalarında arttığı, LCOM ölçütünün uyumun düşüklüğünün karmaşıklığı arttırdığı, bu sebeple hataların yapılması olasılığının yükseldiği söylenmektedir [29]. Seçilen bu 6 CK ölçütlerine ek olarak; FANIN ölçütü, McCabe'in karmaşıklık ölçütü VG, özel metotların sayısı (NPRM) ve genel metotların sayısı (NPM) olmak üzere hatalarla ilgili dört ölçüt daha dahil edilmiştir. "SpotBugs" programı, Eclipse geliştirme platformu için bir eklenti olarak kurulabilmekte, bir kullanıcı arayüzü içermektedir. Hataların sayısını bulmak amacıyla çalışmada kullanılmıştır. "SpotBugs" ile yalnızca Java ile yazılmış mantıksal hatalar tespit edilebilmektedir [30]. Seçilen projeler Eclipse platformuna yüklendikten sonra 50 projede bulunan mantıksal hatalar "SpotBugs" analiz aracı ile tespit edilmiştir. Koddaki sözdizimi (syntax) hataları bu analizin bir parçası olarak değerlendirilmemiştir.

Analiz aracı incelendiğinde tespit ettiği hataların mantıksal hata olduğu görülmüştür ve analiz aracını test etmek için mantıksal hata içeren basit bir modül geliştirilmiştir. Test sırasında sonsuz bir döngü yazıldığında, programın bu hatayı tespit ettiği ve türünü belirttiği görülmüştür. Her eğitim projesi için kod satır sayısı ve "SpotBugs" analiz aracı ile elde edilen hata sayısı Tablo 1'de listelenmiştir.

**Tablo 1.** Proje numarası, kod satır sayısı ve eğitim projelerinde tespit edilen hata sayıları.

Proje Numarası	KLOC	Hata Sayısı	Proje Numarası	KLOC	Hata Sayısı
1	11K	26	26	23K	34
2	11K	6	27	15K	28
3	11K	32	28	43K	76
4	12K	30	29	11K	30
5	13K	23	30	23K	44
6	13K	15	31	12K	28
7	14K	87	32	26K	37
8	16K	37	33	33K	48
9	17K	23	34	25K	35
10	18K	18	35	22K	63
11	23K	50	36	18K	55
12	24K	11	37	13K	68
13	25K	47	38	20K	39
14	25K	13	39	16K	52
15	30K	26	40	45K	59
16	31K	8	41	84K	12
17	36K	7	42	63K	25
18	39K	6	43	90K	57
19	46K	23	44	50K	33
20	49K	17	45	13K	64
21	60K	25	46	15K	16
22	75K	12	47	12K	40
23	76K	57	48	70K	67
24	61K	23	49	22K	95
25	76K	21	50	12K	46

### 3. Deneysel Çalışmalar

Araştırma sorusunun (AS) cevabını bulabilmek için 50 proje üzerinde hata kestirimiyle ilişkili ölçütlerin analizi yapılarak sonuçları incelenmiştir. Birisi dışarıda çapraz doğrulama (LOOCV) yöntemiyle, n parçaya ayrılan veri setinden her tekrarlama birisi çıkarılır ve geriye kalanlarla eğitime aşaması yapılır [31]. Bu aşamalar tüm parçalar için tekrar edilir. LOOCV gerçekleştirilirken önce ilk proje kaldırılmıştır ve kalan 49 proje için Adımsal (Stepwise) Doğrusal Regresyon analizi uygulanmıştır. Analiz sonucu çıkarılan denklem ilk proje için yerine konulduğunda kestirilen hata sayısının hesaplanması yapılmıştır. Bu işlem 50. projeye kadar aynı olarak devam ettirilmiştir ve bağıl hata (MRE) hesaplanmıştır. MRE hesaplamaları yapılırken Pred(0,25) ve Pred(0,30) değerlerinin sonucu elde edilmiştir. Uygulanmış olan regresyon sonucu çıkan denklemin ilk projede yerine konulmasıyla LOOCV'la kestirilmiş olan hata sayısı hesaplanması yapılmıştır. İlk projenin çıkarılmasıyla oluşan denklem Denklem 1'de verilmektedir. İlk proje çıkarıldığında hesaplanan analiz ise Tablo 2'de verilmektedir.

Hata Sayısı

$$= (NOC * 3,200 + VG * 52,300 + NPM * -21,300 + WMC * 10,260 + NPRM * -10,450 + CBO * -9,170 + LCOM * 0,458 + DIT * 10,700 + FANIN * 12,800) - 42,839 \quad (1)$$

Projelerdeki hata sayısı ile ortalama ölçüt değerleri arasındaki ilişki Minitab istatistiksel yazılımı ile hesaplanmıştır. Ölçütler ile toplam hata sayısı arasındaki ilişki, iki değişken arasındaki ilişkiyi ve önemini inceleyen Pearson Korelasyonu kullanılarak hesaplanmıştır [32]. Hata sayısı ile her proje için ölçütler arasında bir model oluşturmak için Adımsal (Stepwise) Doğrusal Regresyon analizi uygulanmıştır. Yaygın olarak kullanılan bir değişken seçim tekniği olan Adımsal (Stepwise) Doğrusal Regresyon, her adımda değişkenler ekleyerek veya çıkararak tekrarlı bir regresyon modeli dizisi oluşturmaktadır [33]. Bir değişken ekleme veya çıkarma kriteri tipik olarak kısmi F testi ile ifade edilmektedir [32]. Doğrusal regresyon denklemlerinde, R<sup>2</sup> değeri tahmin edilen değişkenin varyansını açıklayarak değişkenleri tahmin etme oranını sağlamaktadır [34]. Yüksek R<sup>2</sup> değeri, bağımsız değişkenlerden oluşan doğrusal denklemin bağımlı değişkeni iyi tahmin edebileceğini göstermektedir. Bu sebeple yüksek R<sup>2</sup> değerinin olduğu adımlar seçilerek LOOCV işlemi gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 2.** İlk eğitim projesinin çıkarılması ve LOOCV kullanılarak elde edilen adımsal doğrusal regresyonun sonucu.

Adım	7	8	9
Sabit	-9,039	-26,046	<b>-42,839</b>
NOC	3,230	3,200	<b>3,200</b>
VG	51,200	52,000	<b>52,300</b>
NPM	-21,000	-21,200	<b>-21,300</b>
WMC	9,690	10,010	<b>10,260</b>
NPRM	-11,370	-10,420	<b>-10,450</b>
CBO	-8,530	-8,450	<b>-9,170</b>
LCOM	0,585	0,546	<b>0,458</b>
DIT		8,800	<b>10,700</b>
FANIN			<b>12,800</b>
S	6,900	6,270	<b>5,38</b>
R-Rq	91,400	93,060	<b>95,020</b>
R-Rq(adj)	<b>89,940</b>	<b>91,680</b>	<b>93,870</b>

Tablo 3'te verilen her proje için ortalama ölçüt değerleri, toplam ölçüt değerlerinin yazılım sınıfı sayısına bölünmesiyle hesaplanmıştır.



**Tablo 3.** Eğitim projelerinde kullanılan ölçütlerin hesaplanmış ortalama değerleri.

Proje Numarası	WMC	DIT	RFC	NOC	CBO	LCOM	FANIN	VG	NPRM	NPM
1	3,640	1,610	0,230	4,670	2,780	21,180	1,100	1,160	0,430	<b>2,620</b>
2	5,310	1,620	0,020	5,350	2,300	24,420	1,070	1,190	0,640	<b>4,490</b>
3	6,910	1,690	0,010	6,910	2,850	41,980	1,210	1,400	1,170	<b>5,020</b>
4	3,240	1,940	0,030	3,500	1,790	12,960	1,160	1,050	1,140	<b>2,090</b>
5	4,960	1,830	0,350	8,390	4,320	39,000	1,190	1,340	0,570	<b>4,080</b>
6	3,810	1,700	0,390	6,150	3,020	13,020	1,160	1,160	0,360	<b>3,410</b>
7	11,700	2,000	0,240	29,690	2,880	41,360	1,170	1,320	0,340	<b>8,810</b>
8	3,600	1,930	0,310	9,290	2,480	25,750	1,180	1,110	0,270	<b>3,260</b>
9	4,970	1,790	0,160	6,390	2,520	22,960	1,190	1,170	0,880	<b>3,630</b>
10	10,540	1,880	0,280	14,440	1,500	34,160	1,140	1,240	0,830	<b>8,810</b>
11	7,300	2,170	0,530	29,390	6,600	41,580	1,120	1,340	0,570	<b>6,480</b>
12	4,910	1,530	0,100	7,260	3,350	20,510	1,310	1,280	0,480	<b>4,240</b>
13	5,560	2,050	0,250	11,470	4,380	29,260	1,180	1,220	1,190	<b>3,590</b>
14	9,460	1,690	0,290	14,810	4,230	55,520	1,270	1,380	1,060	<b>7,830</b>
15	4,930	1,630	0,100	5,760	3,170	30,020	1,230	1,450	0,790	<b>3,950</b>
16	5,950	2,310	0,560	9,040	3,500	31,510	1,390	1,080	0,820	<b>4,960</b>
17	10,200	1,940	0,370	15,900	2,210	45,510	1,240	1,170	0,740	<b>8,850</b>
18	9,790	1,130	0,010	9,790	3,020	53,600	1,290	1,100	3,520	<b>6,200</b>
19	4,900	1,620	0,040	4,940	1,980	25,380	1,340	1,460	0,170	<b>4,670</b>
20	8,390	1,680	0,160	10,310	3,440	43,460	1,160	1,560	1,260	<b>6,780</b>
21	6,450	1,430	0,410	19,870	3,780	45,670	1,670	1,480	3,670	<b>5,670</b>
22	10,540	1,650	0,220	20,670	4,450	27,840	1,340	1,140	0,450	<b>8,540</b>
23	9,210	2,560	0,300	6,430	3,180	53,320	1,200	1,850	2,180	<b>6,210</b>
24	6,930	1,450	0,200	7,880	2,340	50,210	1,400	1,980	2,450	<b>5,670</b>
25	5,540	1,340	0,340	5,430	2,540	48,760	1,340	1,750	2,430	<b>4,780</b>
26	4,450	1,430	0,230	9,340	3,450	50,340	1,980	1,490	2,650	<b>4,440</b>
27	10,320	1,250	0,450	4,330	3,670	55,320	1,130	1,780	2,540	<b>6,450</b>
28	11,320	1,340	0,820	13,120	4,330	64,210	1,090	1,200	1,450	<b>5,330</b>
29	3,450	1,370	0,300	14,220	4,760	34,500	1,900	1,430	0,560	<b>4,200</b>
30	12,330	1,760	0,440	13,400	3,560	47,300	1,540	1,320	0,780	<b>8,400</b>
31	10,300	1,540	0,320	11,430	4,760	48,330	1,670	1,430	0,300	<b>7,410</b>
32	5,320	1,750	0,730	16,480	2,660	59,300	1,540	1,780	0,340	<b>7,320</b>
33	9,340	1,650	0,320	5,370	4,560	44,220	1,650	1,870	0,320	<b>6,450</b>
34	6,430	2,500	0,220	5,300	2,670	65,940	1,340	1,820	0,430	<b>6,700</b>
35	7,300	1,820	0,460	10,200	3,550	40,210	1,890	1,300	0,210	<b>4,540</b>
36	5,880	1,960	0,320	6,540	2,980	57,320	1,400	1,930	0,340	<b>5,540</b>
37	11,210	1,080	0,360	14,330	3,510	56,300	1,430	1,780	2,390	<b>6,400</b>
38	9,300	1,870	0,840	6,320	5,620	46,760	1,820	1,320	2,600	<b>4,210</b>
39	4,530	1,640	0,470	13,250	4,760	61,320	1,540	1,740	2,480	<b>3,560</b>
40	10,440	1,560	0,980	9,310	3,670	43,200	1,430	1,830	0,210	<b>7,230</b>
41	9,700	1,230	0,010	7,250	3,090	52,110	1,760	1,400	3,510	<b>6,320</b>
42	11,750	1,160	0,810	11,330	4,350	44,560	1,300	1,100	0,650	<b>6,880</b>
43	9,220	1,090	0,230	11,260	4,600	35,420	1,790	1,040	0,430	<b>4,200</b>
44	10,270	1,550	0,540	15,320	3,450	38,380	1,800	1,340	2,540	<b>6,890</b>
45	10,430	1,670	0,340	12,420	2,970	65,600	1,930	1,450	0,320	<b>7,350</b>
46	5,110	1,570	0,040	5,350	2,360	24,300	1,090	1,240	0,640	<b>4,210</b>
47	6,430	2,430	0,960	12,340	2,550	60,530	1,830	1,430	0,490	<b>6,880</b>
48	5,640	1,780	0,300	25,380	2,500	58,650	1,410	1,760	0,500	<b>7,460</b>
49	10,320	1,900	0,460	17,700	4,590	36,590	1,500	1,420	2,400	<b>3,560</b>
50	<b>6,300</b>	<b>1,340</b>	<b>0,320</b>	<b>19,350</b>	<b>2,520</b>	<b>39,200</b>	<b>1,630</b>	<b>1,800</b>	<b>0,510</b>	<b>7,400</b>

Analizlerde projelerin çıkarılmasıyla elde edilen denklemler incelendiğinde RFC ölçütünün ilk projeden başlanarak 50. projede dahil çıkarılması aşamasında hiç bir denklem içinde yer almadığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç aslında RFC ölçütünün hata kestiriminde hiç bir etkisinin olmadığını bize göstermektedir. Onun aksine diğer 9 ölçütün incelenen tüm denklemlerde yer aldığı görülmüştür. Tablo 3'teki bu ortalama değerler listesi ile 50 proje için LOOCV uygulanarak MRE değerleri, Pred(0,25) ve Pred(0,30) değerleri hesaplanmıştır. MRE, kestirim modellerini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan bir ölçüdür. Pred(x) tahmin seviyesi, literatürde belirli bir doğruluk seviyesi için yapılan gözlemlerin oranı olarak sıklıkla kullanılmaktadır [35]. MRE ve Pred(x) denklemleri sırasıyla Denklem 2 ve Denklem 3'te verilmektedir.

$$MRE = \frac{|Egerçek - Etahmin|}{Egerçek} \quad (2)$$

$$Pred(x) = \frac{k}{N} \quad (3)$$

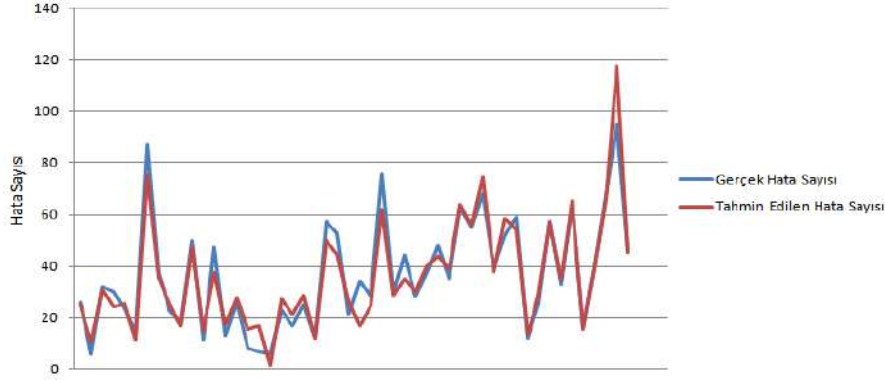
Burada k, MRE değeri 1'den küçük olan projelerin sayısını belirtmektedir. N, veri kümesindeki toplam proje sayısını temsil etmektedir. Kestirim modelleri oluştururken en sık kullanılan 0,25 [35] ve 0,30 Pred [36] değerleri dikkate alınmıştır. LOOCV ile bu hesaplamaların sonuçları, 0,25'ten küçük MRE değerlerinin koyu olarak vurgulandığı Tablo 4'te verilmektedir. Verilen Tablo 4'te LOOCV ile 50 eğitim projesinin yer aldığı görülmektedir.

**Tablo 4.** LOOCV ile 50 eğitim projesi için gerçek hata sayısı, kestirilen hata sayısı ve MRE değerleri.

Proje Numarası	Hata Sayısı	LOOCV ile Hata Sayısı	MRE	Proje Numarası	Hata Sayısı	LOOCV ile Hata Sayısı	MRE
1	26	25,17	<b>0,03</b>	26	34	16,74	<b>0,51</b>
2	6	10,31	0,72	27	28	24,82	<b>0,11</b>
3	32	30,89	<b>0,03</b>	28	76	62,13	<b>0,18</b>
4	30	24,19	<b>0,19</b>	29	30	28,51	<b>0,05</b>
5	23	25,55	<b>0,11</b>	30	44	35,16	<b>0,20</b>
6	15	11,25	0,26	31	28	29,96	<b>0,07</b>
7	87	75,30	<b>0,13</b>	32	37	39,70	<b>0,07</b>
8	37	35,36	<b>0,04</b>	33	48	43,66	<b>0,09</b>
9	23	25,42	<b>0,11</b>	34	35	38,96	<b>0,11</b>
10	18	16,70	<b>0,07</b>	35	63	63,54	<b>0,01</b>
11	50	47,09	<b>0,06</b>	36	55	56,03	<b>0,02</b>
12	11	14,55	0,32	37	68	74,74	<b>0,10</b>
13	47	37,68	<b>0,20</b>	38	39	37,62	<b>0,04</b>
14	13	17,09	0,31	39	52	58,60	<b>0,13</b>
15	26	27,66	<b>0,06</b>	40	59	53,98	<b>0,09</b>
16	8	15,50	0,94	41	12	13,43	<b>0,12</b>
17	7	16,82	1,40	42	25	28,57	<b>0,14</b>
18	6	1,54	0,74	43	57	56,59	<b>0,01</b>
19	23	27,08	<b>0,18</b>	44	33	34,58	<b>0,05</b>
20	17	21,09	<b>0,24</b>	45	64	65,62	<b>0,03</b>
21	25	28,38	<b>0,14</b>	46	16	15,35	<b>0,04</b>
22	12	11,99	<b>0,00</b>	47	40	39,21	<b>0,02</b>
23	57	49,80	<b>0,13</b>	48	67	65,26	<b>0,03</b>
24	23	44,45	<b>0,16</b>	49	95	117,53	<b>0,24</b>
25	21	26,42	0,26	50	46	44,97	<b>0,02</b>

LOOCV ile Eğitim Projelerinin Kestirim Doğruluğunun Değerleri  
 Pred (0,25) = 0,82    Pred (0,30) = 0,86

Eğitim projelerinde Pred(0,25) hesaplamak için, 0,25'ten küçük olan MRE sayısının toplam proje sayısına bölünmesiyle 0,82 elde edilmiştir. Pred(0,30) hesaplanırken ise 0,30'dan küçük olan MRE sayısının toplam proje sayısına bölünmesiyle 0,86 değeri elde edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan kestirim denklemi 50 proje ile sınırlıdır. Gelecekte veri setine daha fazla yazılım projesi ekleyerek, karşılaştırılan modelin kestirim doğruluğunun artırılması hedeflenmektedir. Şekil 2'de gerçek hata sayıları ve kestirilen hata sayılarının grafikselleştirildiği görsel bulunmaktadır. Bakıldığında gerçek hata sayıları ile kestirilen hata sayılarının birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 2. Gerçek hata ve kestirilen hata sayılarının çizelgesi.

Bu çalışmada, 50 adet açık kaynak kodlu, nesne tabanlı eğitim projesi üzerinde çalışma yapılmıştır. Kestirim denklemi, literatürdeki önceki değerler tarafından kabul edilebilir bir doğruluk eşiği olarak desteklenen [35] Pred(0,25)=0,82 ve Pred(0,30)=0,86 oranında doğru tahminler sağlamıştır [36]. İlgili çalışmalarda kullanılan hazır veri setleri incelendiğinde; hata kestirimi ile ilgili olabilecek ölçütlerin bazılarının bu veri setlerinin içinde olmamasından dolayı açık kaynak kodlu projeler üzerinden gidilerek proje analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ayrıca kestirim doğruluğu için sıklıkla kullanılan ölçütler arasında yer alan Ortalama Karesel Hata (Mean Squared Error - MSE), Kök Ortalama Kare Hata (Root Mean Squared Error - RMSE) ve Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error - MAE) değerlerinin sonuçları da incelenmiştir. MSE kestirim doğruluklarında en sık tercih edilen ölçütlerden biridir ve MSE değeri ne kadar düşükse hata miktarının da o kadar az olduğu söylenmektedir. Ortalama RMSE değerinin istatistiksel olarak hata diye de değerlendirildiği ve bu değerın sifıra yakın olmasının, kestirilen değerin gerçeğe olan yakınlığını gösterdiği söylenmektedir [37]. MAE değeri, 0 ile sonsuz arasında değişebilmektedir, negatif yönelimler yani düşük değere sahip MAE değerinin daha iyi söylenmektedir. Bakıldığında MSE, RMSE ve MAE değerlerinin düşük olmasının doğruluğu daha iyi gösterdiği söylenmektedir. Bu kestirim doğruluğu ölçütlerinin denklem formülleri Tablo 5'te verilmektedir.

Tablo 5. Kestirim doğruluğu ölçütleri ve denklemleri.

Kestirim Doğruluğu Ölçütleri	Denklem
Ortalama Karesel Hata (MSE)	$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_{tahmin} - E_{gerçek})^2$
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_{tahmin} - E_{gerçek})^2}{n}}$
Ortalama Mutlak Hata (MAE)	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  E_{tahmin} - E_{gerçek} $

Tablo 5'te verilen denklemler üzerinden gerekli hesaplamalar 50 proje için yapıldığında, elde edilen sonuçlar ise Tablo 6'da verilmektedir.

**Tablo 6.** LOOCV ile 50 eğitim projesi için MSE, RMSE ve MAE değerleri.

Proje Numarası	MSE (Etahmin-Egerçek) <sup>2</sup>	RMSE (Etahmin-Egerçek) <sup>2</sup> /50	MAE ( Etahmin- Egerçek  )
1	0,68	0,01	0,83
2	18,58	0,37	4,31
3	1,23	0,02	1,11
4	33,74	0,67	5,81
5	6,49	0,13	2,55
6	14,07	0,28	3,75
7	137,00	2,74	11,70
8	2,70	0,05	1,64
9	5,85	0,12	2,42
10	1,69	0,03	1,30
11	8,48	0,17	2,91
12	12,63	0,25	3,55
13	86,96	1,74	9,33
14	16,71	0,33	4,09
15	2,75	0,06	1,66
16	56,24	1,12	7,50
17	96,52	1,93	9,82
18	19,88	0,40	4,46
19	16,67	0,33	4,08
20	16,70	0,33	4,09
21	11,43	0,23	3,38
22	0,00	0,00	0,01
23	51,82	1,04	7,20
24	73,11	1,46	8,55
25	29,42	0,59	5,42
26	298,01	5,96	17,26
27	10,11	0,20	3,18
28	192,25	3,85	13,87
29	2,23	0,04	1,49
30	78,15	1,56	8,84
31	3,85	0,08	1,96
32	7,30	0,15	2,70
33	18,80	0,38	4,34
34	15,68	0,31	3,96
35	0,29	0,01	0,54
36	1,05	0,02	1,03
37	45,39	0,91	6,74
38	1,91	0,04	1,38
39	43,58	0,87	6,60
40	25,17	0,50	5,02
41	2,03	0,04	1,43
42	12,76	0,26	3,57
43	0,17	0,00	0,41
44	2,49	0,05	1,58
45	2,62	0,05	1,62
46	0,43	0,01	0,65
47	0,63	0,01	0,79
48	3,02	0,06	1,74
49	507,75	10,15	22,54
50	1,07	0,02	1,03
	<b>MSE = 39,95</b>	<b>RMSE = 6,32</b>	<b>MAE = 4,51</b>

Değerler hesaplanırken Tablo 5'te verilen denklemlerden yararlanılmıştır. MSE hesaplanırken Tablo 6'da verilen (Etahmin-Egerçek)<sup>2</sup> değerlerinin toplamı proje sayısı olan 50'ye bölüldüğünde 39,95 değeri, RMSE hesaplanırken (Etahmin-Egerçek)<sup>2</sup>/50 değerlerinin toplamının karekökü alındığında 6,32 değeri ve MAE hesaplanırken |Etahmin-Egerçek| değerleri toplamı proje sayısı 50'ye bölüldüğünde 4,51 değeri bulunmuştur.

#### 4. Sonuçlar ve Tartışmalar

Yapılan çalışmada yazılım projelerinde olan hata sayıları ve yazılım ölçütleri arasındaki ilişkinin belirlenip, proje setine birisi dışarıda çapraz doğrulama (LOOCV) yapılarak kestirim doğruluğu değeri sonucunun elde edilmesi amaçlanmıştır. İncelenen projelerde yazılım ölçütlerinin analizi yapılırken "Understand" kod analizi aracı ve yazılımlardaki hataların tespit edilmesindeyse "SpotBugs" kod analizi aracı kullanılmıştır. 50 eğitim projesi üzerinde birisi dışarıda çapraz doğrulama (LOOCV) yöntemi kullanılarak MRE değerinin hesaplanması yapılmıştır. Hesaplamanın yapılmasından sonra Pred(0,25) ve Pred(0,30) için sonuç değerleri sırayla 0,82 ve 0,86 olarak çıkmıştır. Daha önceden yapılan oyun projesi üzerindeki çalışmada [21] Pred(0,25) ve Pred(0,30) için sonuç değerlerinin ise sırayla 0,75 ve 0,80 olarak çıktığı bilinmektedir. Bu çalışmada ek olarak LOOCV yapılmış ve farklı alanda projeler seçilerek proje sayısı arttırılmıştır. Eğitim projelerinde Pred(0,30) değerinin az farkla yüksek olduğu görülmüştür. Kestirim denkleminin, literatürde yer alan önceki değerler tarafından kabul edilebilir bir doğruluk eşik değerini sağladığı görülmüştür.

Vashisht vd. [38] yaptıkları çalışmanın amacı, yazılım geliştirme projelerindeki hataları kestirebilmek için bir model geliştirilmesidir. Veri seti olarak bir yazılım firmasından alınan 50 gerçek projeyi kullanmışlardır. 40 projeyi modelin eğitilmesinde kalan 10 proje ise sinir ağı modelin doğruluğunun onaylanmasında kullanmışlardır. Modellerinin performansını değerlendirmek için araştırmacılar tarafından sıklıkla kullanılan ölçütler olan MSE, RMSE ve MAE ölçütlerini kullanmışlardır. Sinir ağı modellerinin kestirimiyle gerçek hataların karşılaştırmasını yaptıklarında MSE, RMSE ve MAE değerlerinin, kestirim sonuçlarının gerçek sonuçlarla uyumlu olduğunu göstermektedir şeklinde yorumlamaları yer almaktadır. Test aşamasındaki sonuçlarda MSE=57,82, RMSE=7,60, MAE=2,93 değerlerini almışlardır. Vashisht vd. yaptıkları çalışmanın sonuç değerleriyle kıyaslandığında MSE ve RMSE değerlerinin yaptığımız çalışmada daha düşük sonuçlar verdiği, MAE değerinin ise çok az bir farkla yüksek olduğu görülmüştür. MSE, RMSE ve MAE değerlerinin, kestirim sonuçlarının gerçek sonuçlarla uyumlu olduğunu gösterdiği şeklinde yorumlamalarına bakıldığında ve bu değerlerin düşük olmasının doğruluğu daha iyi gösterdiği bilgisine bakıldığında elde ettiğimiz değerlerin MSE ve RMSE değerleri için daha düşük çıktığı yorumu yapılabilmektedir. Bu da kestirim sonuçlarının gerçek sonuçlarla uyumlu olduğunu göstermektedir.

Sharaf vd. [39] yaptığı çalışmada hisse senedi fiyatının kestirimi için uzun kısa süreli bellek, evrişimsel sinir ağı, destek vektör makinesi, doğrusal regresyon, lojistik regresyon gibi öğrenme modelleri kullanılarak tahmin yapabilmek için bir çerçeve önermesi yapılmaktadır. İlk bölümde destek vektör regresyonu, doğrusal regresyon, lojistik regresyon, rastgele orman ve k en yakın komşu gibi sinir ağlarından bağımsız normal makine öğrenimi modellerini kullanarak hisse senedi fiyat tahmin sürecinin tartışıldığı bölüm yer almaktadır. Gerçek ve kestirilen hatalar arasındaki karşılaştırmaları yapmışlardır. 30 günlük bir kestirim için sonuçları vermişlerdir, makine öğrenmesi modelleri kullanarak, tartışılan değerlendirme ölçütlerinin eğitilmesini ve test edilmesi aşamalarını gerçekleştirmişlerdir. Gün sayılarını 100 ve 1000 içinde tekrar ederek tablo olarak vermişlerdir. Sonuçlara bakıldığında öğrenme algoritmalarından k en yakın komşu makine öğrenimi modelinin RMSE değerinin 26,38, MSE değerinin 695,75, MAE değerinin ise 14,9 ile en iyi sonuç olarak geldiği görülmüştür. Aynı süreci sinir ağları modelleri için denediklerinde ise evrişimsel sinir ağı modelinin RMSE, MSE ve MAE için en iyi sonuçları ürettiğini gözlemlenmişlerdir. Sharaf vd. yaptıkları çalışmanın sonuç değerleriyle yine kıyaslandığında üç ölçüt değerinin yaptığımız çalışmada daha düşük sonuçlar verdiği görülmüştür.

Gyimothy vd. [18], CBO ve LCOM ölçütlerinin hata kestirimi için en iyi olduğunu, NOC ölçütünün ise güvenilir olduğunu iddia etmişlerdir. Bu çalışmada elde edilen bulgular için, CK ölçütlerinden olan RFC ölçütü dışındaki diğer tüm CK ölçütlerinin hata kestirimi ile ilişkisi olduğu gözlemlenmiştir. Kullanılan ek dört ölçütün de (FANIN, VG, NPRM ve NPM ölçütlerinin) hata kestiriminde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Gyimothy vd. NOC ölçütünün hataların kestirimi ile ilişkisinin güvenilir olmadığını belirtirken, bu çalışmada NOC ölçütünün hata kestiriminde önemli olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmada Gyimothy vd. yaptığı çalışmadan farklı bulgular gözlemlenmesinin nedeninin seçilmiş olan programlama dilleri farklılığından ve kullanılan hata takip sistemlerinin farklılığından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

Analizler incelendiğinde RFC ölçütünün ilk projeden başlanarak 50. projede dahil çıkarılması aşamasında hiç bir denklem içinde yer almadığı gözlemlenmiştir ve bu sonuç RFC ölçütünün hata kestiriminde hiç bir etkisinin olmadığını bize göstermiştir. Çalışmada ayrıca kestirim doğruluğu için sıklıkla kullanılan ölçütler arasında yer alan Ortalama Kare Hata (Mean Squared Error - MSE), Kök Ortalama Kare Hata (Root Mean Squared Error - RMSE) ve Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error - MAE) değerlerinin sonuçları da incelenmiştir. Vashisht vd. [38] yaptıkları çalışmayla kıyaslandığında MSE ve RMSE değerlerinin yaptığımız çalışmada daha düşük sonuçlar verdiği bu değerlerin düşük olmasının doğruluğu daha iyi gösterdiği bilgisinden yola çıkılarak kestirim sonuçlarının gerçek sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür. Sharaf vd. [39] yaptığı çalışmada ise üç ölçütün yaptığımız çalışmada daha düşük sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Yazılımların erken safhada hata kestirimlerinin yapılması projelerin daha başarılı olmasını, yazılımın kalitesini, maliyetini ve projelerin daha kısa sürede teslim edilmesini sağlamaktadır. Çalışma aynı zamanda yazılımlardaki hata sayılarının kestirebilmesi için yazılım kalite ölçütlerinden faydalanmanın da önemini bir kez daha göstermiştir.

### Kaynaklar

- [1] Raees M. Study of software quality improvement through reliability metrics models and root cause analysis program. *International Journal of Computer Engineering and Information Technology* 2020; 12(6): 42-47.
- [2] Jones C. *Quantifying Software: Global and Industry Perspectives*. CRC Press, 2017.
- [3] Fenton N, Neil M. A critique of software defect prediction models. *IEEE Transactions on Software Engineering* 1999; 25(5), 675-689.
- [4] Delsing J. *IoT Automation-Arrowhead Framework*. CRC Press: Taylor & Francis Group, 2017.
- [5] D'Ambros M, Lanza M, Robbes R. Evaluating defect prediction approaches: A benchmark and an extensive comparison. *Empirical Software Engineering* 2012; 17: 531-577.
- [6] Moser R, Pedrycz W, Succi G. A comparative analysis of the efficiency of change metrics and static code attributes for defect prediction. In: *ICSE '08: Proceedings of the 30th international Conference on Software Engineering*; 10-18 May, 2008; Leipzig-Germany. 181-190.
- [7] Kim S, Zimmermann T, Whiteas E, Zeller A. Predicting faulties from cached history. *Proceedings of 29th International Conference on Software Engineering (ICSE'07)*; 20-26 May, 2007; Minneapolis, MN, USA. 489-498.
- [8] Basili V.R, Briand L.C, Melo W.R. Validation of object-oriented design metric as quality indicators. *IEEE Transactions on Software Engineering* 1996; 22(10), 751- 761.
- [9] Hassan A.E. Predicting faults using the complexity of code changes. *International Conference on Software Engineering IEEE Computer Society*; 16-24 May, 2009; Vancouver, BC, Canada. 78- 88.
- [10] Nuñez-Varela A.S, Pérez-Gonzalez H.G, Martínez-Perez F.E, Soubervielle-Montalvo C. Source code metrics: a systematic mapping study. *Journal of Systems and Software* 2017; 128: 164-197.
- [11] Chidamber S, Kemerer C. A metrics suite for object-oriented design. *IEEE Transactions on Software Engineering* 1994; 20(6): 476-493.
- [12] Erçelebi Ayyıldız T, Koçyiğit A. Correlations between problem and solution domain measures of open source software. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 2017; 32(3): 887– 900.
- [13] Catolino G, Palomba F, De Lucia A, Ferrucci F, Zaidman A. Enhancing change prediction models using developer-related factors. *Journal of Systems and Software* 2018; 143: 14-28.
- [14] Bailey C.T, Dingee W.L. A software study using halstead metrics. *ACM Sigmetrics (1981 ACM Workshop/Symp. Measurement and Evaluation of Software Quality* 1981; 10: 189-197.
- [15] McCabe T. A complexity measure. *IEEE Transactions on Software Engineering* 1976; 2(4): 308-32.
- [16] Sarı Ö, Kalıpsız O. Using Data Analysis Methods for Software Bug Prediction. *UYMS*, <https://pdfs.semanticscholar.org/f6f5/23ec28440cfe66096b4d4d1d62ca8f018db9.pdf>. Yayın Tarihi 2014. Erişim Tarihi Temmuz 29, 2021.
- [17] D'Ambros M, Lanza M, Robbes R. On the relationship between change coupling and software defects. *16th Working Conference on Reverse Engineering*. 13-16 October 2009; Lille-France. 135–144.
- [18] Gyimóthy T, Ferenc R, Siket I. Empirical validation of object-oriented metrics on open source software for fault prediction. *IEEE Transactions on Software Engineering* 2005; 31(10): 897-910.
- [19] Okutan A, Yıldız O.T. Software defect prediction using bayesian networks. *Empirical Software Engineering* 2014. 19(1): 154-181.
- [20] Lamba T, Kumar D, Mishra A.K. Comparative study of bug prediction techniques on software metrics, *International Conference on Computing for Sustainable Global Development*; 01-03 March, 2017; New Delhi-(INDIA). 207-211.
- [21] Erçelebi Ayyıldız T, Erkal B. The effect of object-oriented metrics on software bug prediction. *Journal of Information Systems and Management Research* 2019; 1(1): 1-8.
- [22] Yılmaz N, Tarhan A. A two-dimensional method for evaluating maintainability and reliability of open source software. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 2019; 34(4): 1807-1829.
- [23] Perez-Riverol Y., Gatto L., Wang R., Sachsenberg T., Uszkoreit J., Veiga Leprevost F. Leprevost, Fufezan C., Ternent T, et al. Ten simple rules for taking advantage of git and github. *PLoS Computational Biology* 2016; 12(7).

- [24] Durmuş G, Soğukpınar İ. A novel approach for analyzing buffer overflow vulnerabilities in binary executables by using machine learning techniques. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 2019; 34(4): 1695-1704.
- [25] Understand SCI Tool, <https://www.scitools.com/features>. Erişim Tarihi: Temmuz 25, 2021.
- [26] Gezici B, Tarhan A, Chouseinoglou O. Complexity, size and internal quality in the evolution of mobile applications: An exploratory study. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 2019; 34(3): 1483-1500.
- [27] Choudhary G.R, Kumar S., Kumar K, Mishra A, Catal C. Empirical analysis of change metrics for software fault prediction. *Computers & Electrical Engineering* 2018; 67: 15-24.
- [28] Breesam K.M. Metrics for object-oriented design focusing on class inheritance metrics. 2nd International Conference on Dependability of Computer Systems (DepCoS-RELCOMEX '07). 14-16 June, 2007; Szklarska-Poland.
- [29] Subramanyam R, Krishnan M.S. Empirical analysis of ck metrics for object-oriented design complexity: Implications for software defects. *IEEE Transactions on software engineering* 2003; 29(4): 297-310.
- [30] Spotbugs. <http://spotbugs.github.io>. Erişim Tarihi Temmuz 26, 2021.
- [31] Wong T. Performance evaluation of classification algorithms by k-fold and leave-one-out cross validation. *Pattern Recognition* 2015; 48(9): 2839-2846.
- [32] Montgomery D.C, Runger G.C. *Applied Statistics and Probability for Engineers*. 6th Edition. John Willey & Sons, 2014.
- [33] Silhavy R, Silhavy P, Prokopova Z. Analysis and selection of a regression model for the use case points method using a stepwise approach. *Journal of Systems and Software* 2017; 125: 1-14.
- [34] Tabachnick B.G, Fidell L.S. *Using Multivariate Statistics*. 2nd Edition. HarperCollins, New York, 1989.
- [35] Conte S, Dunsmore H.E, Shen V.Y. *Software Engineering Metrics and Models*. Benjamin/Cummings, Menlo Park, 1986.
- [36] Tate G, Verner J. *Software Costing in Practice, The Economics of Information Systems and Software*. Oxford, Butterworth-Heinemann, 1991.
- [37] Willmott C.J. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletion of the American Meteorological Society* 1982; 63(11): 1309–1313.
- [38] Vashisht V, Lal M, Sureshchandar G.S. Defect prediction framework using neural networks for software enhancement projects. *Journal of Advances in Mathematics and Computer Science* 2016; 16(5): 1-12.
- [39] Sharaf M, Hemdan E.E.D, El-Sayed A, El-Bahnasawy N.A. StockPred: A framework for stock price prediction. *Multimedia Tools and Applications* 2021; 1-32.

## Ftalimit Sübstitüe Ag(I) NHC Komplekslerinin Sentez ve Karakterizasyonu

Mitat AKKOÇ<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Mülkiyeti Koruma ve Güvenlik Bölümü, Hekimhan Mehmet Emin Sungur Meslek Yüksekokulu, Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Malatya, Türkiye  
<sup>\*1</sup> mitat.akkoc@ozal.edu.tr

(Geliş/Received: 24/09/2021;

Kabul/Accepted: 11/02/2022)

**Öz:** *N*-Heterosiklik karbenler (NHC'ler) organometalik kimyanın en önemli ligantlarından. Arduengo ve arkadaşları ilk kararlı karbeni 1991 yılında izole ederek organometalik kimyaya önemli bir ligant kazandırdılar. NHC'lerin 1 ve 3 konumundaki sübstituentlerin değiştirilebilmesi yapının tasarlanmasında önemli avantajlar sağlamakla birlikte karbenlerin hem sterik hem de elektronik kararlılığı organometalik kimyada kullanılan diğer ligantlardan daha fazla dikkat çekmesine yol açmıştır. Karbenler periyodik tablodaki iç geçiş elementlerinin çoğu ile kompleks oluşturabilmektedir. Bu oluşturduğu kompleksleri katalizör, ilaç, iyonik sıvı, MOF, iletken materyal ve lüminesans madde olarak kullanıldığı birçok uygulama alanında görmekteyiz. *Cis*-platinin bir antikanser ajanı olarak kullanılmasından sonra metal tabanlı bileşiklerin bu alanda araştırılmasının önü açılmıştır. Son yirmi yıldır, Ag-NHC bileşiklerinin antikanserojen ve antimikrobiyal ajan olarak yoğun bir şekilde çalışılmaktadır. Ag-NHC bağının kuvvetinden dolayı oluşan yapısal kararlılık sayesinde hücre içerisinde daha geç bozunmaktadır. Hücre içerisinde antikanser ajanı olarak kullanıldığında hem daha az miktarlarda kullanılmasına hem de etkisini yitirmeden daha uzun süreler hücre içerisinde kalarak toksisiteyi düşürebilmektedir. Bu çalışmamızda biyolojik olarak aktif bir yapı olan ftalimit gruplarını içeren bir seri gümüş komplekslerinin sentez ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Ftalimit, Gümüş, Karben, NHC, Sentez.

### Synthesis and Characterization of Phthalimide Substituted Silver(I) NHC Complexes

**Abstract:** *N*-Heterocyclic carbenes (NHCs) are among the most important ligands in organometallic chemistry. Arduengo et al. isolated the first stable carbene in 1991, bringing an important ligand to organometallic chemistry. Although the ability to change substituents at the 1 and 3 positions of NHCs provides significant advantages in designing the structure, both the steric and electronic stability of carbenes has attracted more attention than other ligands used in organometallic chemistry. Carbenes can form complexes with most of the transition elements in the periodic table. We see many application areas where these complexes are used as catalyst, drug, ionic liquid, MOF (Metal Organic Framework), conductive material and luminescent material. After the use of *cis*-platinum as an anticancer agent, the way to research metal-based compounds in this field was opened. For the last two decades, Ag-NHC compounds have been extensively studied as anticarcinogenic and antimicrobial agents. Due to the structural stability and the strength of the Ag-NHC bond, it degrades later in the cell. When used as an anticancer agent in the cell, it can be used in lesser amounts and can reduce toxicity by staying in the cell for longer periods without losing its effect. In this study, the synthesis and characterization of a series of silver complexes containing phthalimide groups, a biologically active structure, was carried out.

**Key words:** Phthalimide, Silver, Carbene, NHC, Synthesis.

### 1. Giriş

*N*-Heterosiklik karbenler (NHC'ler) organometalik kimyanın en önemli ligantlarından. Arduengo ve arkadaşları, ilk kararlı karbeni 1991 yılında izole ederek organometalik kimyaya önemli bir ligant kazandırdı [1]. Güçlü bir lewis asidi ve güçlü bir nükleofil olan karbenler kuvvetli  $\sigma$ -bağı oluştururken, zayıf  $\pi$ -bağı ile metale bağlanarak kararlı kompleksler oluştururlar. Bu kararlılık katalizde yüksek sıcaklıklarda katalizörün bozunmadan görevini sürdürebilmesine olanak sağlamaktadır. Bu kararlılığın fosfin ligantları ile karşılaştırıldığında, üstünlüğünü daha iyi görebilmekteyiz [2]. NHC'lerin 1 ve 3 konumundaki sübstituentlerin değiştirilebilmesi de yapının tasarlanmasında önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu tasarım yapıya istenilen yönde kararlılık ve seçicilik kazandırabilmektedir. Bu konumlara eklenen ligantlar yapıya çözünürlük kazandırabilmesinin yanısıra sterik etki oluşturabilmesine de olanak sağlamaktadır. Karbenler periyodik tablodaki iç geçiş elementlerinin çoğu ile kompleks oluşturabilmektedir [3-9]. Literatüre baktığımızda Ag, Au, Cu, Co, Fe, Ir, Pd, Pt, Ru, Rh karben komplekslerinin hala yoğun bir şekilde çalışılmakta olduğunu görmekteyiz. Bu kompleksler endüstride ve akademide geniş yelpazede uygulama alanına sahiptirler. Katalizör, ilaç, iyonik sıvı, MOF, iletken materyal ve lüminesans madde olarak kullanıldığı birçok uygulama alanı görmekteyiz.

\* Sorumlu yazar: [mitat.akkoc@ozal.edu.tr](mailto:mitat.akkoc@ozal.edu.tr). Yazarın ORCID numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-8641-8958



Biyolojik özellikleri detaylı incelendiğinde, *cis*-platinin bir antikanser ajanı olarak kullanılmasından sonra metal tabanlı bileşiklerin bu alanda araştırılmasına sebep olmuştur [10-11]. *Cis*-platin kompleksleri hala antikanserojen ajan olarak kullanılsa da nörotoksisite, nefrotoksisite, mide bulantısı, kemik iliği rahatsızlıkları ve sınırlı seçiciliği gibi bazı dezavantajlara sahip olması yeni nesil antikanserojen ajanların arayışına yol açmıştır. Son yirmi yıla bakıldığında, antikanser ve antimikrobiyal ajan olarak yoğun bir şekilde çalışılan Ag-NHC kompleksleri yeni nesil ajanlardır [12]. Ag-karben bağının kuvvetinden dolayı oluşan yapısal kararlılık hücre içerisinde daha geç bozunmasına sebep olmaktadır. Hücre içerisinde Ag<sup>+</sup> iyonları daha geç oluşacağından sitotoksisiteyi düşürmektedir. Böylelikle, hem daha az miktarda antikanserojen ajan kullanılmakta hem de daha uzun süre etkisini yitirmeden ortamda var olabilmektedir. Bunlara ek olarak, gümüş karbenlerin yapısına lipofilik gruplar eklenerek vücut içerisinde hücre duvarından daha kolay geçmesine de olanak sağlayabilmektedir.

Literatürü incelediğimizde ftalimit türevlerinin biyolojik etkileri üzerine yoğun bir şekilde çalışmalar mevcuttur [13, 14]. Ftalimitin moleküler yapısına baktığımızda imid halkasına bağlı olan CO-N(R)-CO fonksiyonlarının, yapıyı biyolojik olarak aktif hale getirdiği kanıtlanmıştır [15, 16]. Ftalimit hidrofobik karakteri sayesinde membran etkileşimlerini mümkün kılarak biyolojik etkinliğin artmasına neden olmakta ve farmasötik kimyada başlangıç materyali olarak kullanılmaktadır [15]. Ftalimit türevlerinin anti-inflamatuar, antiviral ve antikanser özelliklere sahiptirler [17].

Bu çalışmamızda biyolojik aktiviteye sahip olabileceği düşünülen ftalimit grubunu içeren üç benzimidazolium tuzu ve onların gümüş karben komplekslerinin sentez ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir.

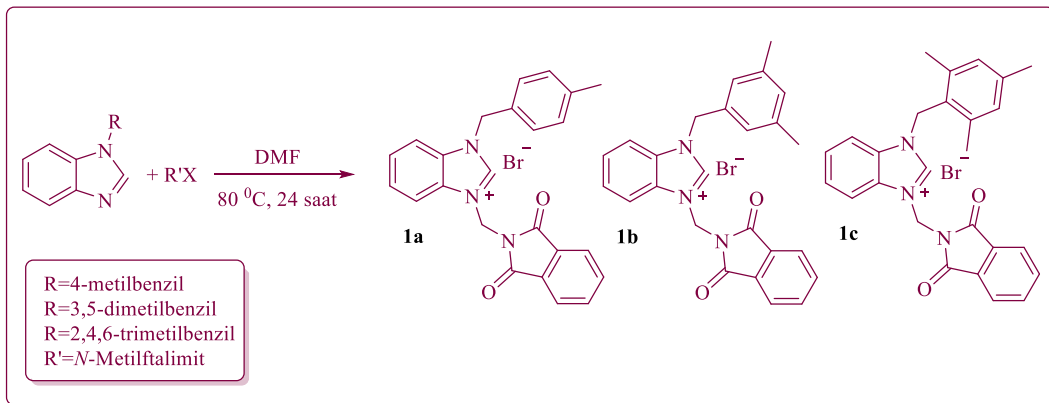
## 2. DENEYSEL

### 2.1. Genel Değerlendirmeler

Tüm deneyler, standart Schlenk teknikleri kullanılarak havası alınmış oksijensiz bir atmosfer (Argon, Ar) altında kuru çözücüler içinde gerçekleştirildi. Tüm Ag(I)-NHC komplekslerinin sentezi karanlık ortamda gerçekleştirildi. Bu çalışmada kullanılan Ag<sub>2</sub>O ve çözücüler Sigma-Aldrich'ten satın alındı. Komplekslerin ve NHC öncüllerinin erime noktaları, Stuart otomatik erime noktası aparatı (SMP-40) kullanılarak belirlendi. <sup>1</sup>H ve <sup>13</sup>C NMR spektrumları, Bruker Avance III HD 300 ve 400 ve 600 MHz NMR spektrometresinde, CDCl<sub>3</sub>, DMSO-d<sub>6</sub> çözücülerde gerçekleştirildi. Sinyaller, dahili bir standart olarak TMS (tetrametilsilandan) (δ 0.00) aşağı alan olarak milyonda bir olarak alıntılanmıştır. Eşleşme sabitleri (*J* değerleri) hertz cinsinden verilmiştir. NMR pikleri şu şekilde kısaltılmıştır: s = singlet, d = dublet, t = triplet, m = multipllet, bs = broad singlet sinyal. FT-IR spektrumları Perkin Elmer Spektrum 100 spektrometresinde 400-4000 cm<sup>-1</sup> aralığında alındı.

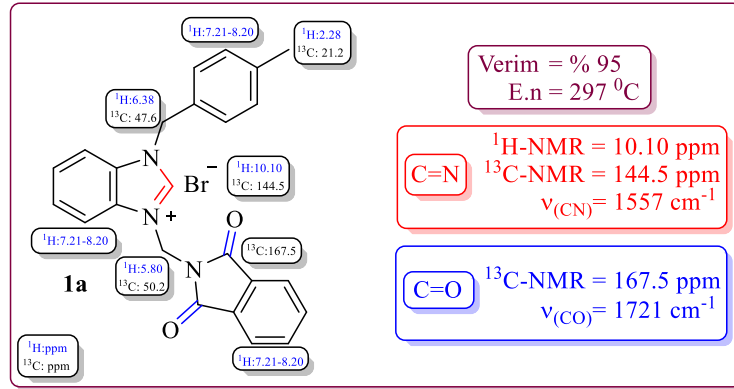
### 2.2. Benzimidazolium Tuz Sentezi ve Karakterizasyonu

Benzimidazol bazlı NHC'ler için genel temsili sentezi **1a-c** (Şekil 1.) literatüre göre hazırlandı [18].



Şekil 1. Benzimidazolium tuzlarının sentezi

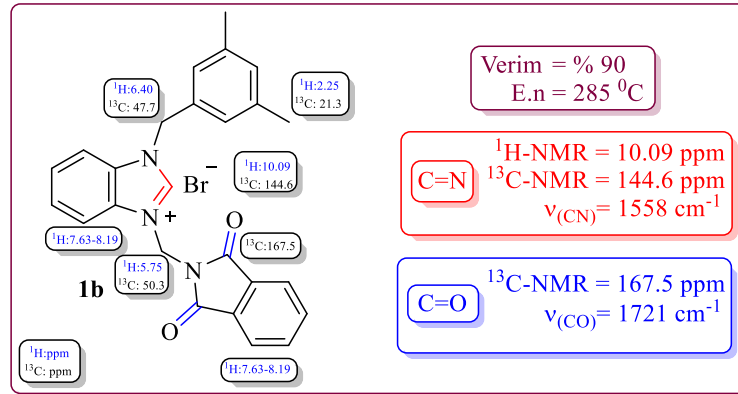
### 2.2.1. 1-(4-metilbenzil)-3-(metilftalimit)benzimidazolyum-2-iliden bromür, 1a.



Şekil 2. 1-(4-metilbenzil)-3-(metilftalimit)benzimidazolyum-2-iliden bromür

1-(4-metilbenzil)benzimidazol (10 mmol) ve bromometilftalimit'in (11 mmol) DMF içinde 80 °C'de aerobik koşullar altında 24 saat tepkimesiyle yüksek verimle **1a** (Şekil 2.) elde edildi. Reaksiyon oda sıcaklığına ulaştıktan sonra çözeltiliye Et<sub>2</sub>O eklendi. Çökelti süzüldü. Et<sub>2</sub>O (2x10 mL) ile beyaz katı elde etmek için yıkandı ve güçlü vakum altında kurutuldu. Beyaz katı, beyaz kristaller halinde bileşik **1a**'yı verecek şekilde etanol/eter (1:1) içinde yeniden kristallendirildi. Verim: 4.39g; %95. E.n: 297 °C.  $\nu_{(\text{C=N})} = 1557 \text{ cm}^{-1}$ .  $^1\text{H NMR}$  (400 MHz, DMSO-d<sub>6</sub>)  $\delta = 10.10$  (s, 1H, NCH=N), 8.20-7.21 (m, 12H, CH<sub>2</sub>C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>4</sub> ve CH<sub>2</sub>N(CO)<sub>2</sub>C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>), 6.38 (s, 2H, CH<sub>2</sub>C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>(CH<sub>3</sub>)-4), 5.80 (s, 2H, CH<sub>2</sub>N(CO)<sub>2</sub>C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>), 2.28 (s, 3H, C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>(CH<sub>3</sub>)-4).  $^{13}\text{C NMR}$  (75 MHz, DMSO-d<sub>6</sub>)  $\delta = 167.5, 144.5, 138.6, 135.5, 131.9, 131.4, 131.3, 131.0, 129.9, 128.8, 127.4, 127.1, 124.2, 114.5, 114.4, 50.2, 47.6$  ve 21.2 ppm. % Element Analizi C<sub>24</sub>H<sub>20</sub>BrN<sub>3</sub>O<sub>2</sub>: Hesaplanan C: 62.35, H: 4.36, N: 9.09; bulunan C: 62.33, H: 4.39, N: 9.03.

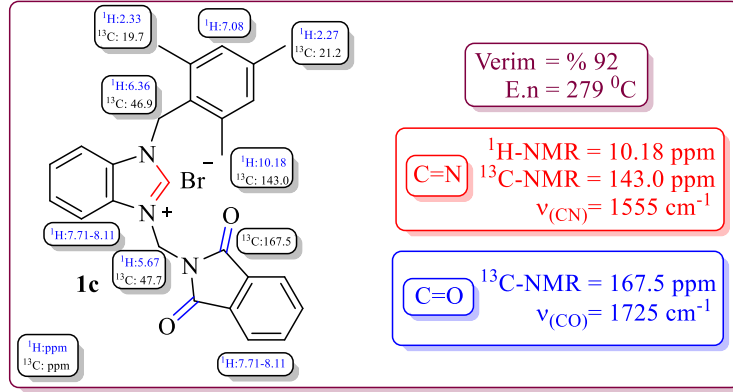
### 2.2.2. 1-(3,5-dimetilbenzil)-3-(metilftalimit)benzimidazolyum-2-iliden bromür, 1b



Şekil 3. 1-(3,5-dimetilbenzil)-3-(metilftalimit)benzimidazolyum-2-iliden bromür

1-(3,5-dimetilbenzil)benzimidazol (10 mmol) ve bromometilftalimit'in (11 mmol) DMF içinde 80 °C'de aerobik koşullar altında 24 saat tepkimesiyle yüksek verimle **1b** (Şekil 3.) elde edildi. Reaksiyon oda sıcaklığına ulaştıktan sonra çözeltiliye Et<sub>2</sub>O eklendi. Çökelti süzüldü. Et<sub>2</sub>O (2x10 mL) ile beyaz katı elde etmek için yıkandı ve güçlü vakum altında kurutuldu. Beyaz katı, beyaz kristaller halinde bileşik **1b**'yi verecek şekilde etanol/eter (1:1) içinde yeniden kristallendirildi. Verim: 4.27g; %90. E.n: 285 °C.  $\nu_{(\text{C=N})} = 1558 \text{ cm}^{-1}$ .  $^1\text{H NMR}$  (400 MHz, DMSO-d<sub>6</sub>)  $\delta = 10.09$  (s, 1H, NCH=N), 8.19-7.63 (m, 8H, C<sub>6</sub>H<sub>4</sub> ve CH<sub>2</sub>N(CO)<sub>2</sub>C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>), 7.14 (s, 2H, CH<sub>2</sub>C<sub>6</sub>H<sub>3</sub>(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>-3,5), 7.00 (s, 1H, CH<sub>2</sub>C<sub>6</sub>H<sub>3</sub>(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>-3,5), 6.40 (s, 2H, CH<sub>2</sub>C<sub>6</sub>H<sub>3</sub>(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>-3,5), 5.75 (s, 2H, CH<sub>2</sub>N(CO)<sub>2</sub>C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>), 2.25 (s, 6H, C<sub>6</sub>H<sub>3</sub>(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>-3,5).  $^{13}\text{C NMR}$  (75 MHz, DMSO-d<sub>6</sub>)  $\delta = 167.5, 144.6, 138.5, 135.5, 134.1, 131.9, 131.4, 131.1, 130.6, 127.4, 127.2, 126.4, 124.2, 114.5, 114.4, 50.3, 47.7$  ve 21.3 ppm. % Element Analizi C<sub>25</sub>H<sub>22</sub>BrN<sub>3</sub>O<sub>2</sub>: Hesaplanan C: 63.03, H: 4.66, N: 8.82; bulunan C: 63.08, H: 4.64, N: 8.86.

## 2.2.3. 1-(2,4,6-trimetilbenzil)-3-(metilftalimit)benzimidazolyum-2-iliden bromür, 1c.

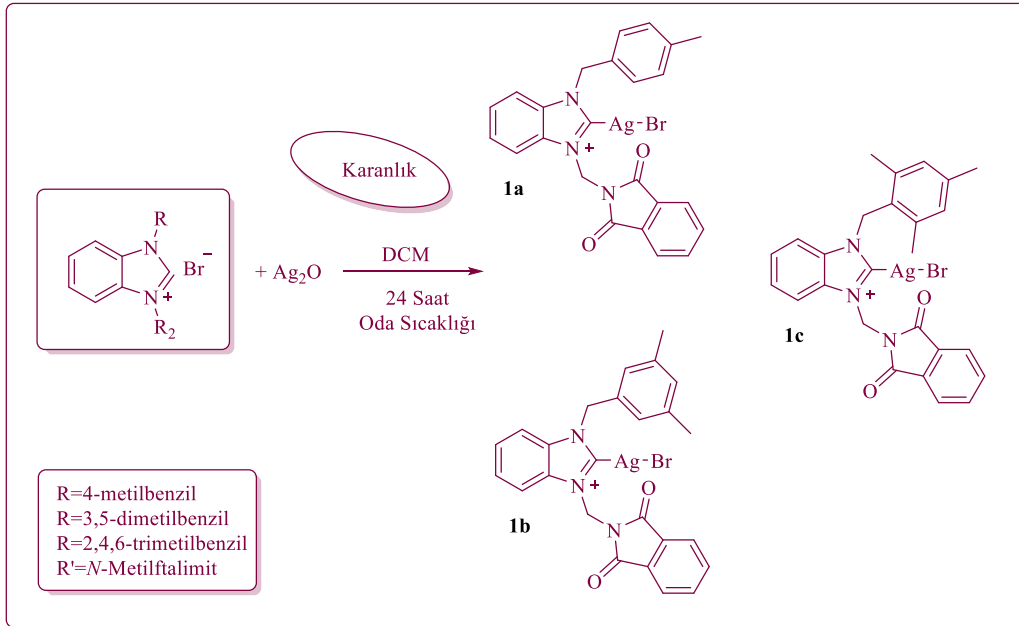


Şekil 4. 1-(2,4,6-trimetilbenzil)-3-(metilftalimit)benzimidazolyum-2-iliden bromür

1-(2,4,6-trimetilbenzil)benzimidazol (10 mmol) ve bromometilftalimit'in (11 mmol) DMF içinde 80 °C'de aerobik koşullar altında 24 saat tepkimesiyle yüksek verimle **1c** (Şekil 4.) elde edildi. Reaksiyon oda sıcaklığına ulaştıktan sonra çözeltiyeye Et<sub>2</sub>O eklendi. Çökelti süzüldü. Et<sub>2</sub>O (2x10 mL) ile beyaz katı elde etmek için yıkandı ve güçlü vakum altında kurutuldu. Beyaz katı, beyaz kristaller halinde bileşik **1c**'yi verecek şekilde etanol/eter (1:1) içinde yeniden kristallendirildi. Verim: 4.51g; %92. E.n: 279 °C.  $\nu_{(C=N)} = 1555\text{ cm}^{-1}$ .  $^1H$  NMR (400 MHz, DMSO-d<sub>6</sub>)  $\delta = 10.18$  (s, 1H, NCH=N), 8.11-7.71 (m, 8H, C<sub>6</sub>H<sub>4</sub> ve CH<sub>2</sub>N(CO)<sub>2</sub>C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>), 7.08 (s, 2H CH<sub>2</sub>C<sub>6</sub>H<sub>2</sub>)-(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>-2,4,6), 6.36 (s, 2H, CH<sub>2</sub>C<sub>6</sub>H<sub>2</sub>(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>-2,4,6), 5.67 (s, 2H, CH<sub>2</sub>N(CO)<sub>2</sub>C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>), 2.33 (s, 3H, C<sub>6</sub>H<sub>3</sub>(CH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>) ve 2.27 (s, 6H, C<sub>6</sub>H<sub>3</sub>(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>-2,6).  $^{13}C$  NMR (75 MHz, DMSO-d<sub>6</sub>)  $\delta = 167.5, 143.0, 139.5, 139.1, 135.5, 131.8, 131.4, 130.0, 127.6, 127.2, 125.5, 124.2, 114.4, 114.3, 47.7, 46.9, 21.2$  ve 19.7 ppm. % Element Analizi C<sub>26</sub>H<sub>24</sub>BrN<sub>3</sub>O<sub>2</sub>: Hesaplanan C: 63.68, H: 4.93, N: 8.57; bulunan C: 63.70, H: 4.96, N: 8.55.

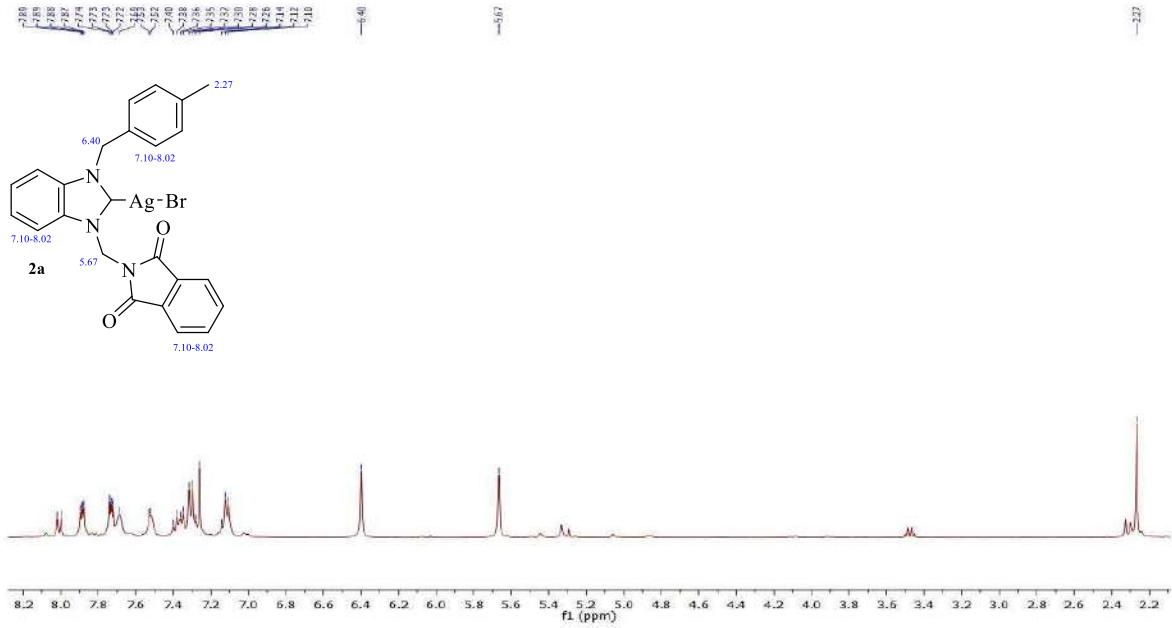
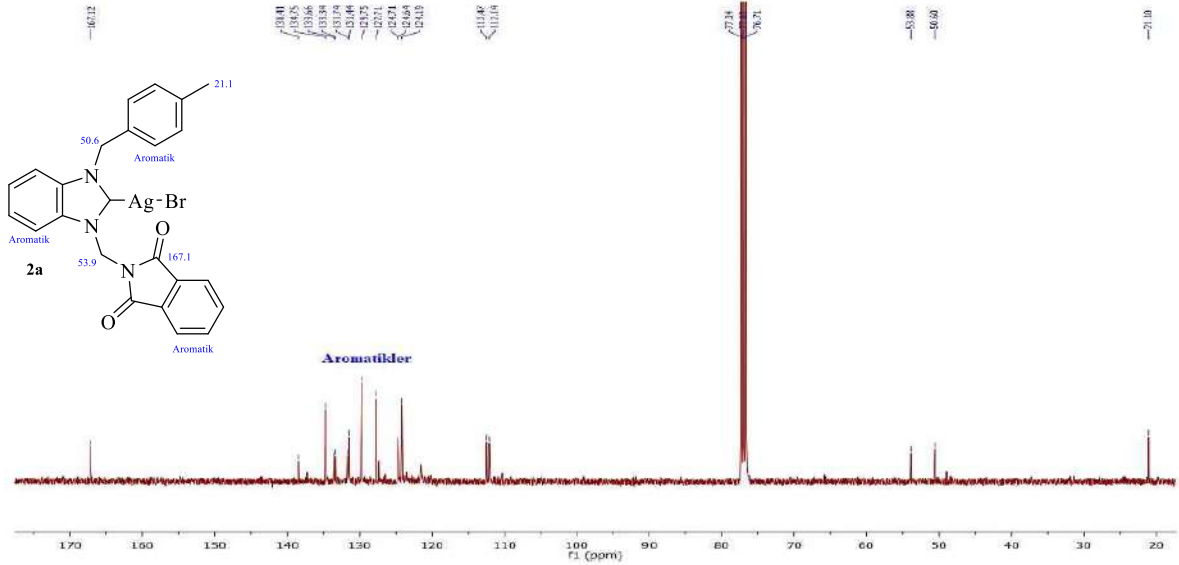
## 2.3. Gümüş (NHC) Komplekslerinin Sentez ve Karakterizasyonu

Benzimidazol bazlı NHC'ler için genel sentez aşaması **1a-c** (Şekil 1.) ve benzimidazolyum tuzlarından çıkarak hazırlanan gümüş (NHC) komplekslerinin sentez prosedürü **2a-c** (Şekil 5.) literatüre göre hazırlandı [19].

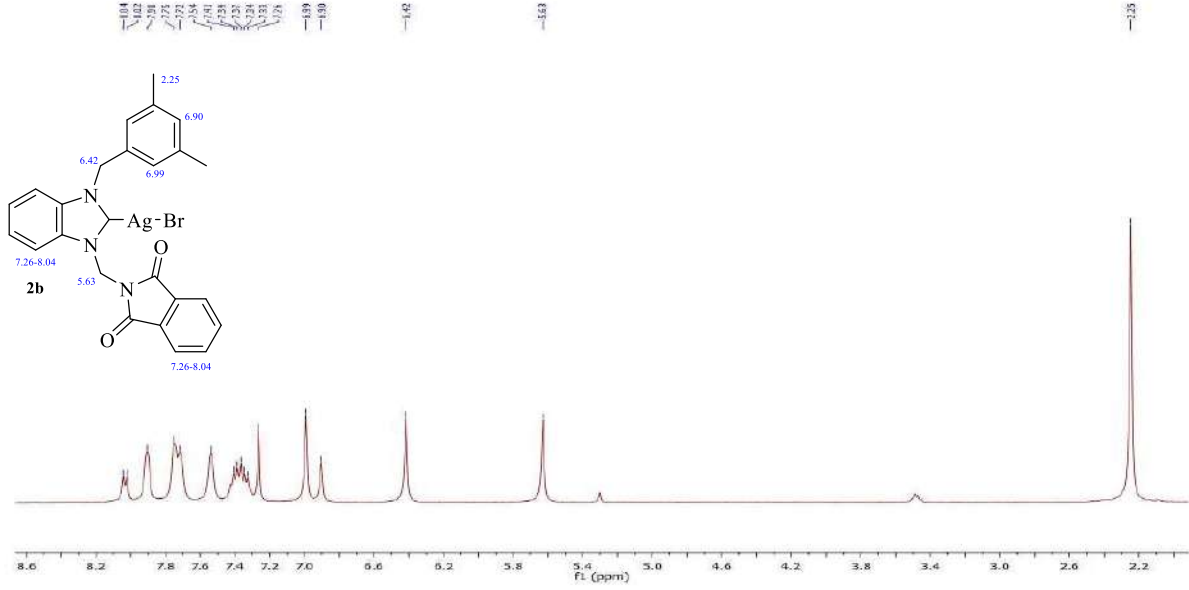
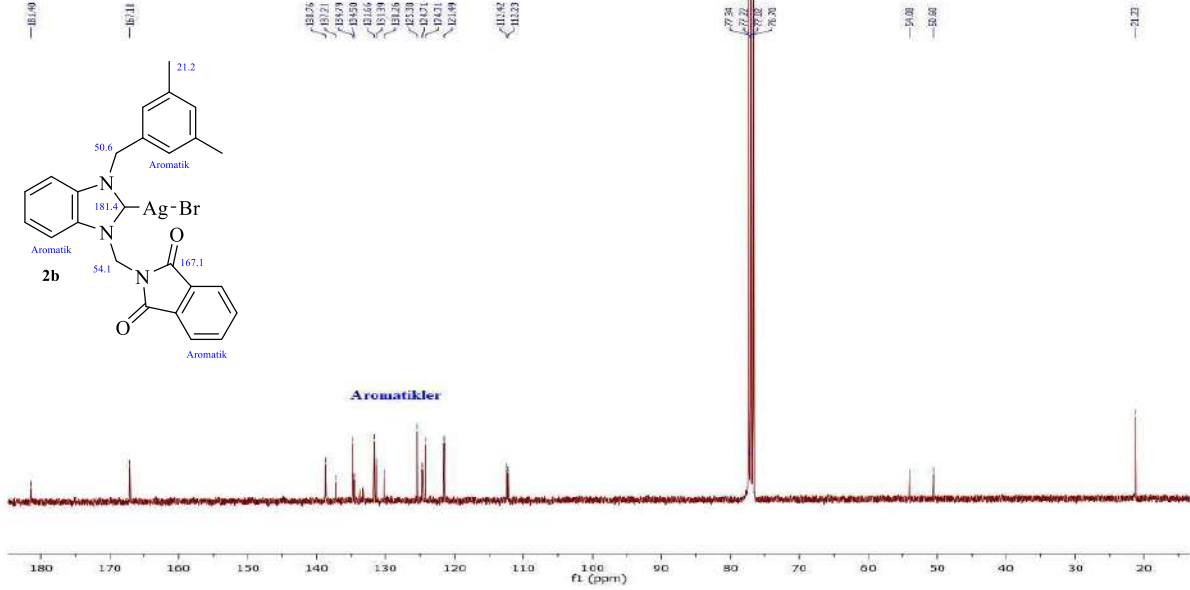


Şekil 5. Ftalimit süstitüe Ag-NHC'lerin sentezi

## 2.3.1. [1-(4-metilbenzil)-3-(metilftalimit)benzimidazol-2-iliden]gümüş(I) bromür, 2a.

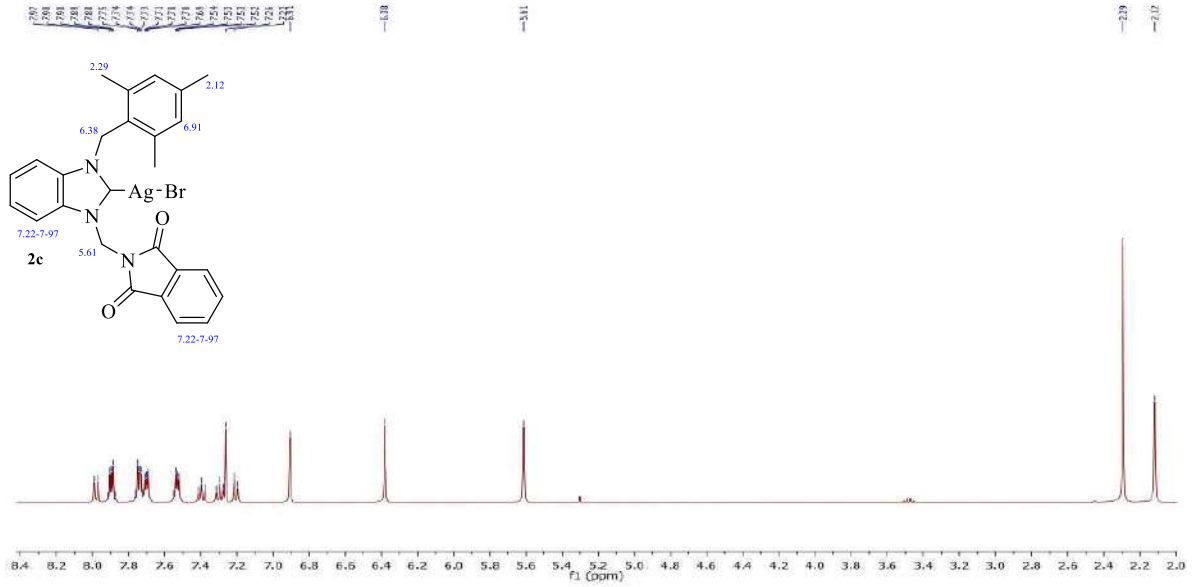
Şekil 6. [1-(4-metilbenzil)-3-(metilftalimit)benzimidazol-2-iliden]gümüş(I) bromür <sup>1</sup>H NMR grafiğiŞekil 7. [1-(4-metilbenzil)-3-(metilftalimit)benzimidazol-2-iliden]gümüş(I) bromür <sup>13</sup>C NMR grafiği

**1a** (1 mmol) ve Ag<sub>2</sub>O (1 mmol) 10 ml DCM içinde oda sıcaklığında 24 saat reaksiyona sokulmasıyla istenilen gümüş (I)-NHC kompleksi **2a** iyi verimle elde edildi. Reaksiyondan sonra çözelti, selit ile süzülde ve çözücü uzaklaştırıldı, tortu, diethyl eter ile yıkandı ve beyaz toz halindeki bileşik yüksek vakum altında kurutuldu. Beyaz katı, beyaz kristaller halinde bileşik **2a**'yı verecek şekilde etanol/eter (1:1) içinde yeniden kristalleştirildi. Verim: 0.46g; %80. E.n: 196 °C.  $\nu_{(C-N)} = 1298 \text{ cm}^{-1}$ . <sup>1</sup>H NMR (400 MHz, CDCl<sub>3</sub>) (Şekil 6.)  $\delta = 8.04-6.90$  (m, 12H, CH<sub>2</sub>C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>(CH<sub>3</sub>)-4, C<sub>6</sub>H<sub>4</sub> ve CH<sub>2</sub>N(CO)<sub>2</sub>C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>), 6.42 (s, 2H, CH<sub>2</sub>C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>(CH<sub>3</sub>)-4), 5.63 (s, 2H, CH<sub>2</sub>N(CO)<sub>2</sub>C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>), 2.25 (s, 3H, CH<sub>2</sub>C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>(CH<sub>3</sub>)-4). <sup>13</sup>C NMR (75 MHz, CDCl<sub>3</sub>) (Şekil 7.)  $\delta = 167.1, 138.4, 134.8, 133.7, 133.3, 131.7, 131.4, 129.8, 127.7, 127.3, 124.7, 124.6, 124.2, 112.5, 112.1, 53.9, 50.6$  ve 21.1 ppm. % Element Analizi C<sub>24</sub>H<sub>20</sub>AgBrN<sub>3</sub>O<sub>2</sub>: Hesaplanan C: 50.64, H: 3.36, N: 7.38; bulunan C: 50.71, H: 3.41, N: 7.36.

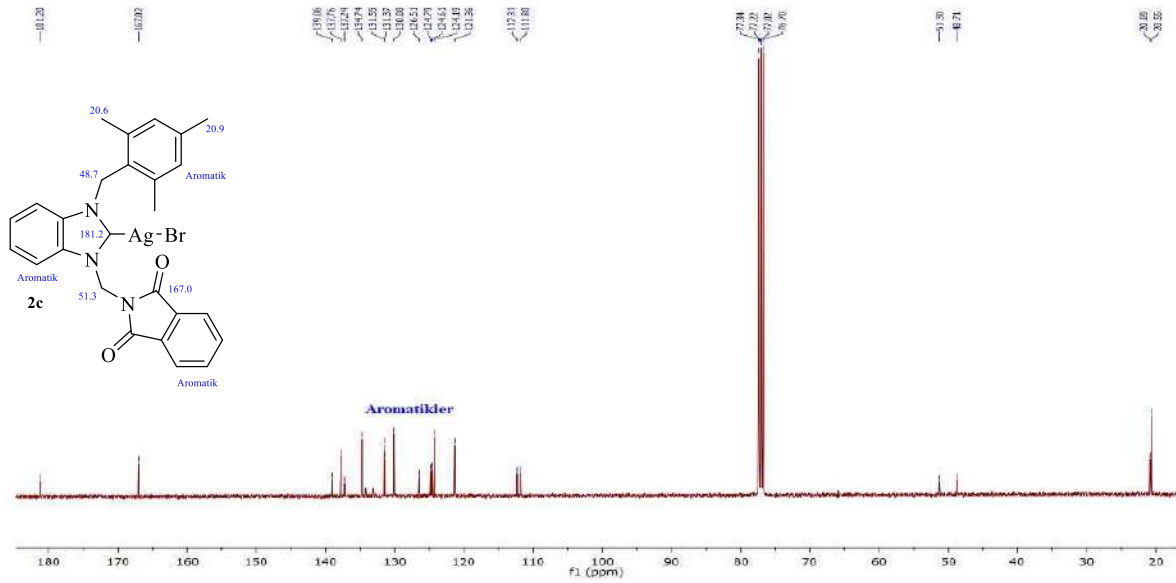
2.3.2. [1-(3,5-dimetilbenzil)-3-(metilftalimit)benzimidazol-2-iliden]gümüş(I) bromür, **2b**.Şekil 8. [1-(3,5-dimetilbenzil)-3-(metilftalimit)benzimidazol-2-iliden]gümüş(I) bromür <sup>1</sup>H NMR grafiği.Şekil 9. [1-(3,5-dimetilbenzil)-3-(metilftalimit)benzimidazol-2-iliden]gümüş(I) bromür <sup>13</sup>C NMR grafiği.

**1b** (1 mmol) ve Ag<sub>2</sub>O (1 mmol) 10 ml DCM içinde oda sıcaklığında 24 saat reaksiyona sokulmasıyla istenen gümüş (I)-NHC kompleksi **2b** yüksek verimle elde edildi. Reaksiyondan sonra çözelti, selit ile süzüldü ve çözücü uzaklaştırıldı, tortu, dietil eter ile yıkandı ve beyaz toz halindeki bileşik yüksek vakum altında kurutuldu. Beyaz katı, beyaz kristaller halinde bileşik **2b**'yi verecek şekilde etanol/eter (1:1) içinde yeniden kristalleştirildi. Verim: 0.53g; %90. E.n: 285 °C.  $\nu_{(C-N)} = 1296 \text{ cm}^{-1}$ . <sup>1</sup>H NMR (400 MHz, CDCl<sub>3</sub>), (Şekil 8.)  $\delta = 10.09$  (s, 1H, NCHN), 8.19-7.63 (m, 8H, C<sub>6</sub>H<sub>4</sub> ve CH<sub>2</sub>N(CO)<sub>2</sub>C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>), 7.14 (s, 2H CH<sub>2</sub>C<sub>6</sub>H<sub>3</sub>)-(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>-3,5), 7.00 (s, 1H, CH<sub>2</sub>C<sub>6</sub>H<sub>3</sub>)-(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>-3,5), 6.40 (s, 2H, CH<sub>2</sub>C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>-3,5), 5.75 (s, 2H, CH<sub>2</sub>N(CO)<sub>2</sub>C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>), 2.25 (s, 6H, C<sub>6</sub>H<sub>3</sub>(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>-3,5). <sup>13</sup>C NMR (75 MHz, CDCl<sub>3</sub>), (Şekil 9.)  $\delta = 181.4, 167.1, 137.2, 134.8, 134.5, 133.3, 131.7, 131.4, 130.3, 125.4, 124.7, 124.2, 121.5, 112.4, 112.2, 54.1, 50.6$  ve 21.2 ppm. % Element Analizi C<sub>25</sub>H<sub>22</sub>AgBrN<sub>3</sub>O<sub>2</sub>: Hesaplanan C: 51.48, H: 3.63, N: 7.20; bulunan C: 51.54, H: 3.59, N: 7.26.

### 2.3.3. [1-(2,4,6-trimetilbenzil)-3-(metilftalimit)benzimidazol-2-iliden]gümüş(I) bromür, 2c.



Şekil 10. [1-(2,4,6-trimetilbenzil)-3-(metilftalimit)benzimidazol-2-iliden]gümüş(I) bromür <sup>1</sup>H NMR grafiği.



Şekil 11. [1-(2,4,6-trimetilbenzil)-3-(metilftalimit)benzimidazol-2-iliden]gümüş(I) bromür <sup>13</sup>C NMR grafiği.

**1c** (1 mmol) ve Ag<sub>2</sub>O (1 mmol) 10 ml DCM içinde oda sıcaklığında 24 saat reaksiyona sokulması ve istenen gümüş (I)-NHC kompleksi **2c** yüksek verimle elde edildi. Reaksiyondan sonra çözelti, selit ile süzüldü ve çözücü uzaklaştırıldı, tortu, dietil eter ile yıkandı ve beyaz toz halindeki bileşik yüksek vakum altında kurutuldu. Beyaz katı, beyaz kristaller halinde bileşik **2c**'yi verecek şekilde etanol/eter (1:1) içinde yeniden kristalleştirildi. Verim: 0.54g; %90. E.n: 226 °C.  $\nu_{(C-N)} = 1299 \text{ cm}^{-1}$ . <sup>1</sup>H NMR (400 MHz, CDCl<sub>3</sub>), (Şekil 10.)  $\delta = 7.99-7.20$  (m, 8H, C<sub>6</sub>H<sub>4</sub> ve CH<sub>2</sub>N(CO)<sub>2</sub>C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>), 6.91 (s, 2H, CH<sub>2</sub>C<sub>6</sub>H<sub>2</sub>(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>-2,4,6), 6.38 (s, 2H, CH<sub>2</sub>C<sub>6</sub>H<sub>2</sub>(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>-2,4,6), 5.61 (s, 2H, CH<sub>2</sub>N(CO)<sub>2</sub>C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>), 2.29 (s, 6H, CH<sub>2</sub>C<sub>6</sub>H<sub>2</sub>(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>-2,6) ve 2.12 (s, 3H, CH<sub>2</sub>C<sub>6</sub>H<sub>2</sub>(CH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>). <sup>13</sup>C NMR (75 MHz, CDCl<sub>3</sub>), (Şekil 11.)  $\delta = 181.2, 167.0, 139.1, 137.8, 137.2, 134.7, 131.6, 131.4, 130.1, 126.5, 124.8, 124.6, 124.2, 121.4, 112.3, 111.8, 51.3, 48.7, 20.9$  ve 20.6 ppm. % Element Analizi C<sub>26</sub>H<sub>24</sub>AgBrN<sub>3</sub>O<sub>2</sub>: Hesaplanan C: 52.29, H: 3.88, N: 7.04; bulunan C: 52.33, H: 3.85, N: 7.12.

### 3. SONUÇ VE TARTIŞMALAR

**1a**, **1b** ve **1c** benzimidazolyum tuzları **2a**, **2b** ve **2c** gümüş (NHC) kompleksleri literatüre uygun şekilde sentez ve karakterizasyonları gerçekleştirildi. Havaya kararlı benzimidazolyum tuzları sırası ile %95, %90 ve %92 verimle sentezlenmiştir. Benzimidazolyumun 2-konumundaki karakteristik hidrojen, <sup>1</sup>H-NMR spektrumunda sırası ile (**1a**, **1b** ve **1c**) 10.10, 10.09 ve 10.18 ppm'de, <sup>13</sup>C pikleri 144.5, 144.6 ve 143.0 ppm'de rezonansları gözlemlendi. Ftalimit grubundaki karbonil pikleri <sup>13</sup>C NMR'ında 167.5 ppm'de gözlemlendi. Karbenin C-N bağı titreşim frekansları IR spektrumlarında, sırası ile 1557, 1558 ve 1555 cm<sup>-1</sup>'de gözlemlendi. Ftalimit grubunun üzerindeki karbonillerin C=O titreşim frekansları sırası ile 1721, 1721 ve 1725 cm<sup>-1</sup>'de gözlemlendi. **2a**, **2b** ve **2c** Gümüş komplekslerine baktığımızda sırası ile %80, %90 ve %90 yüksek verimler ile havaya kararlı kompleksler sentezlenmiştir. Gümüş karbenlerin C-N bağı titreşim frekansları sırası ile 1296, 1298 ve 1299 cm<sup>-1</sup>'de gözlemlendi. Benzimidazolyum tuzlarının karakteristik <sup>1</sup>H-NMR piklerinin gümüş komplekslerinde olmaması yapının yeni bir forma dönüştüğü ve böylelikle gümüş komplekslerinin olduğunu göstermektedir. **2a** kompleksinde <sup>13</sup>C NMR spektrumunda karben piki gözlemlenemez iken **2b** ve **2c** komplekslerinde sırası ile 181.4 ve 181.1 ppm'de gözlemlendi. Gümüş karben komplekslerinde Ag-C(karben) bağının değişken (fluxional) davranışından dolayı bazı komplekslerde gümüş-karben piki görülmeyebilir [19]. Bu özellik, <sup>13</sup>C-NMR ölçümlerinde çözeltisindeki gümüş kompleksinin dinamik davranışına ve kuaterner karbonun zayıf durulmasından (relaxation) kaynaklanmaktadır. Ftalimit grubunun yapısındaki karbonillerinin (**2a-c**) <sup>13</sup>C-NMR pikleri ise sırası ile 167.1, 167.1 ve 167.0 ppm'de gözlemlendi. Bulunan sonuçlar literatürle uyumlu olup oluşan yapıları doğrulamaktadır [20].

### 4. GENEL DEĞERLENDİRME ve SONUÇLAR

NHC ligantlarının oluşturduğu komplekslerin kataliz alanında göstermiş olduğu yüksek aktivite ile organometalik kimyada en önemli ligantlardan biri olmuştur. *Cis*-platin sayesinde metal komplekslerinin biyoaktif olması nedeni ile NHC'lerin metal kompleksleri de bu alanda olumlu sonuçlar vermiştir.

Bu çalışmamızda biyolojik olarak aktif olduğu bilinen fталimit yapılarını benzimidazolyum tuzlarına süstitüent olarak bağlanılmasıyla fталimit süstitüent benzimidazolyum tuzları (**1a-c**) sentezlendi. Bu sentezlenen benzimidazolyum tuzlarından fталimit süstitüent gümüş-(NHC) kompleksleri (**2a-c**) sentezlendi ve yapıları spektroskopik yöntemlerle aydınlatıldı.

Sentezlenen bu fталimit süstitüent gümüş-(NHC) komplekslerinin biyoaktiviteleri daha sonraki çalışmalarda araştırılacaktır. Sentezlenen bu komplekslerden yaralanarak transmetalasyon yöntemi ile gümüş metale bağlı karben ligantları Au, Pd, Pt, Ru ve Rh metallerine transfer edilerek bu metallerin yeni kompleksleri hazırlanacaktır. Daha sonra da yeni sentezlenecek Au, Pd, Pt, Ru ve Rh komplekslerinin hem katalitik aktiviteleri hem de biyolojik aktiviteleri araştırılacaktır.

#### Kaynaklar

- [1] Arduengo AJ, Harlow RL, Kline M. A stable crystalline carbene. *Journal of the American Chemical Society* 1991; 113: 361-363.
- [2] Hopkinson MN, Richter C, Schedler M, Glorius F. An overview of N-heterocyclic carbenes. *Nature* 2014; 510: 485-496.
- [3] Akkoc M, Bugday N, Altın S, Ozdemir I, Yasar S. Highly Active Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ SBA-15@ NHC-Pd Catalyst for Suzuki-Miyaura Cross-Coupling Reaction. *Catalysis Letters* 2021.
- [4] Li X, Zhao J, Shi W-J, Bai S, Han Y-F. Synthesis, Characterization and Structural Transformation of Picolyl-Functionalized Polynuclear Silver(I)-and Gold(I)-N-Heterocyclic Carbene Complexes. *Organometallics* 2021; 40: 1474-1481.
- [5] Akkoc M, Bugday N, Altın S, Yasar S. Magnetite@MCM-41 nanoparticles as support material for Pd-N-heterocyclic carbene complex: A magnetically separable catalyst for Suzuki-Miyaura reaction. *Applied Organometallic Chemistry* 2021; 35: e6233.
- [6] Akkoc M, Gurbuz N, Cetinkaya E, Ozdemir I. Palladium N-Heterocyclic Carbene Catalysts for Synthesis of Diaryl Ethers. *Synlett* 2008; 12: 1781-1784.
- [7] Karaca EO, Akkoc M, Tahir N, Arıcı M, Imik F, Gurbuz N, Yasar S, Ozdemir I. A novel ditopic ring-expanded N-heterocyclic carbene ligand-assisted Suzuki-Miyaura coupling reaction in aqueous media. *Tetrahedron Letters* 2017; 58: 3529-3532.
- [8] Karaca EO, Akkoc M, Yasar S, Ozdemir I. Pd-N-Heterocyclic carbene catalysed Suzuki-Miyaura coupling reactions in aqueous medium. *Arkivoc* 2018; 5: 230-239.
- [9] Yasar S, Akkoc M, Ozdemir N, Ozdemir I. Synthesis and catalytic activity of ionic palladium N-heterocyclic carbenecomplexes. *Turkish Journal of Chemistry* 2019; 43: 1622-1633.

- [10] Rosenberg B, Camp LV, Krigas T. Inhibition of Cell Division in *Escherichia coli* by Electrolysis Products from a Platinum Electrode. *Nature* 1965; 205:698-699.
- [11] Rosenberg B, Camp LV, Trosko JE, Mansour VH. Platinum compounds: a new class of potent antitumour agents. *Nature* 1969; 222: 385-286.
- [12] Bölükbaşı SS, Kılıçkaya PC, Kılıçkaya O. Silver(I)-N-heterocyclic carbene complexes challenge cancer; evaluation of their anticancer properties and in silico studies. *Drug Development Research* 2021; 82: 907-926.
- [13] Okada-Junior CY, Monteiro GC, Aguiar ACC. Phthalimide derivatives with bioactivity against *plasmodium falciparum*: synthesis, evaluation, and computational studies involving bc 1 cytochrome inhibition. *ACS Omega* 2018; 3: 9424-9430.
- [14] Tanak H, Yakan H, Kutuk H, Karakullukcu NT, Dege N. Crystal and Molecular Structure of N-(Phenylthio)phthalimide. *Crystallography Reports* 2018; 63: 379-381.
- [15] Junior JGS, Holanda VN, Rodrigues DS, Gamboa DSR, Monte TVS, Araujo HDA, Junior JAAN, Araujo VFS, Callôu MAM, Assis SPO, Lima VLM. Therapeutic potential of phthalimide derivatives: a review. *Biomedical Science & Research* 2019; 3: 378-384.
- [16] Lamie PF, Philoppes JN, El-Gendy AO, Rarova L, Gruz J. Design, synthesis and evaluation of novel phthalimide derivatives as in vitro anti-microbial, anti-oxidant and anti-inflammatory agents. *Molecules* 2015; 20: 16620-16642.
- [17] Kushwaha N, Kaushik D. Recent advances and future prospects of phthalimide derivatives. *Journal of Applied Pharmaceutical Science* 2016; 6: 159-171.
- [18] a) Yasar S, Karaca EO, Sahin C, Ozdemir I, Sahin O, Buyukgungor O. Palladium Complexes with Tetrahydropyrimidin-2-ylidene Ligands: Catalytic Activity for the Direct Arylation of Furan, Thiophene, and Thiazole Derivatives. *Journal of Organometallic Chemistry* 2015; 1: 289-290. b) Yasar S, Cekirdek S, Ozdemir I. Synthesis, characterization, and transfer hydrogenation of Ru(II)-N-heterocyclic carbene complexes. *Journal of Coordination Chemistry* 2014; 67: 1236. c) Syska H, Herrmann WA, Kühn FE. Water-soluble carbene complexes as catalysts for the hydrogenation of acetophenone under hydrogen pressure. *Journal of Organometallic Chemistry* 2012; 703: 56-62.
- [19] Garrison JC, Youngs WJ. Ag(I) N-heterocyclic carbene complexes: synthesis, structure, and application. *Chemical Reviews* 2005; 105: 3978-4008.
- [20] Bölükbaşı SS, Sahin N, Tahir MN, Arıcı C, Cevik E, Gurbuz N, Ozdemir I, Cummings BS. Novel N-heterocyclic carbene silver(I) complexes: Synthesis, structural characterization, and anticancer activity *Inorganica Chimica Acta* 2019; 486:711-718.





## Otonom Taşıyıcı Araçlardaki Hataların Teşhisi için Evrişimli Sinir Ağları Tabanlı Çoklu Heterojen Sensörlerin Füzyon Yöntemi

Sergen AŞIK<sup>1</sup>, Emine DENİZ<sup>2</sup>, Eyüp ÇİNAR<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> Yazılım Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye

<sup>2</sup> Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye

<sup>3</sup> Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye

<sup>1</sup> sergen.asik@ogu.edu.tr, <sup>2</sup> denzemine@gmail.com <sup>3</sup> eyup.cinar@ogu.edu.tr

(Geliş/Received: 01/10/2021;

Kabul/Accepted: 07/12/2021)

**Öz:** Siber fiziksel sistemler, akıllı fabrikalardaki üretim süreçlerini izlemek için kullanılmaktadır. Üretimdeki lojistiğe katkı sağlayacak en önemli teknolojilerden birisi otonom taşıyıcı araçlardır. Otonom taşıyıcı araçların görevlerini gerçekleştirmesi esnasında beklenmeyen bir problem veya aksama durumu yaşanmasının veriler üzerinden tespiti önemlidir. Bu çalışma, çok sensörlü veri füzyonu ve darboğaz katmanı ile optimize edilmiş evrişimli sinir ağı tabanlı otonom taşıyıcı araçlar için yeni bir hata tespit yöntemi sunmaktadır. Daha zengin öznitelikler elde etmek için tek sensörden gelen sinyal verileri yerine çoklu heterojen sensörlerden gelen sinyal verilerini görüntülere dönüştüren bir dönüştürme yönteminden yararlanılmıştır. Önerilen evrişimli sinir ağı mimarisi, akım ve titreşim sensörlerinden alınan verilerin dönüşümü ile elde edilen görüntüleri girdi verisi olarak kullanmaktadır. Önerilen yaklaşımın etkinliğini doğrulamak için otonom taşıyıcı araç kullanılarak sensörlerden veriler toplanmış ve gerçek bir fiziksel ortamda çeşitli hata senaryoları oluşturulmuştur. Tek sensör kullanılarak ortalama %85 ve çoklu heterojen sensörler kullanılarak ortalama %93 hata tespit doğruluğu önerilen yöntemde elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Hata teşhisi, evrişimli sinir ağları, çoklu sensör veri füzyonu, otonom taşıyıcı araç

### Fusion Method of Multiple Heterogeneous Sensors Based on Convolutional Neural Networks for Fault Diagnosis in Autonomous Transport Vehicles

**Abstract:** Cyber-physical systems are used to monitor production processes in smart factories. One of the most important technologies that will contribute to logistics in production is autonomous transport vehicles. It is important to detect an unexpected problem or malfunction during the task of autonomous transportation vehicles through data. This paper proposes a novel fault detection method for autonomous transport vehicles based on multi-sensor data fusion and bottleneck layer optimized convolutional neural network. In order to obtain enhanced features, a transformation method is utilized that converts data from multiple heterogeneous sensors into images. The proposed convolutional neural network architecture uses images obtained by transforming data from current and vibration sensors as input data. A use-case is implemented to verify the effectiveness of the proposed approach. The datasets are created from sensors available on an autonomous transport vehicle in a real physical environment during various operational fault scenarios. An average of 85% fault detection accuracy using a single sensor and an average of 93% using multiple heterogeneous sensors was obtained in the proposed method.

**Keywords:** Fault diagnosis, convolutional neural networks, multi-sensor data fusion, autonomous transport vehicle

## 1. GİRİŞ

Akıllı fabrikada fiziksel süreçleri izlemek için siber fiziksel sistemler gibi bazı son teknolojiler kullanılmaktadır. Günümüzde bu teknolojilerin kullanımı ile üretim otomasyonu daha verimli hale getirilebilmektedir. Siber fiziksel sistem teknolojisini kullanan üretim cihazları, üretim faaliyetinden gelen ilgili tüm bilgileri izlemektedir. Akıllı fabrikada üretim sahasındaki bulunan malzemelerin verimli bir şekilde teslim edilmesini sağlayan lojistik otomasyon üretim sürecini hızlandırmaktadır [1]. Akıllı fabrikalarda lojistik otomasyon, insan müdahalesi olmadan malzemeleri hareket ettirebilen otonom taşıyıcı araç (OTA) ile gerçekleştirilebilmektedir [2].

OTA'lar, akıllı fabrikalardaki malzemeleri taşımak için yaygın olarak kullanılan mobil robotlardır [3, 4]. Endüstriyel operasyonu otomatikleştirmek ve maliyetini düşürmek için üretim sahasında OTA'lar konuşlandırılır. İnsanlar tarafından yapılması zor ve tehlikeli olan lojistik görev için OTA uygundur [5]. OTA'ların fabrika ortamındaki görevlerini gerçekleştirmesi esnasında beklenmeyen bir problem veya aksama durumu yaşanmasının insan müdahalesi olmadan gelen veriler üzerinden tespit edilmesi ise işletmeler adına oldukça önem arz edebilmektedir [6]. OTA üzerinde bulunan sensörlerden gelen veriler ile OTA'nın mekanik ve elektronik aksamındaki hata tespiti veya OTA'ya zarar verebilecek operasyonel anomalilerin tespiti yapılabilir.

\* Sorumlu yazar: [eyup.cinar@ogu.edu.tr](mailto:eyup.cinar@ogu.edu.tr). ORCID Numaraları: <sup>1</sup> 0000-0002-3388-4047, <sup>2</sup> 0000-0003-1617-2483, <sup>3</sup> 0000-0003-3189-7247

Akıllı hata tespiti, günümüzdeki modern üretim sistemlerinde sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Edinilen hatalı tespitler, üretim cihazının güvenilirliğini ve kullanım ömrünü önemli ölçüde arttırmak ile beraber işletmelere bakım maliyetleri açısından da avantajlar sağlamaktadır [7]. Hata tespiti, model tabanlı ve veri odaklı olmak üzere temelde iki farklı yaklaşım kullanılarak gerçekleştirilir. Model tabanlı yaklaşım, izlenen sistemin karmaşık fiziksel modellemesine dayanır ve sistem hakkında ileri seviye uzmanlık bilgisi gerektirir. Son zamanlarda gittikçe yaygınlaşan veri odaklı yaklaşım, makine öğrenmesi algoritmalarını kullanır ve hata tespiti modelinin veriden yararlanarak geliştirilmesine olanak sağlar. Makine öğrenmesi algoritmaları arasında derin öğrenme algoritmaları, geleneksel makine öğrenimi algoritmalarına kıyasla herhangi bir sistem uzmanlığı gerektirmeden gelen verilerdeki öznitelikleri tam olarak keşfedebilmektedir [8]. Bazı çalışmalarda derin öğrenme, araca takılmış kameralardaki görüntülerden hataları tespit etmek ve tanımlamak için kullanılmıştır [9, 10]. Son zamanlardaki bir araştırmada aracın ilgili ekipmanlarına sensörler eklenerek hata tespiti üzerine çalışılmıştır [11]. Akıllı hata tespitindeki zorluklar arasında geliştirilmiş modelin sağlamlığı (robustness) ile birden fazla hatanın gerçek zamanlı olarak belirlenmesi yer almaktadır. Hata tespitinde sağlamlık birden fazla ve farklı sensörlerden gelen bilgilerin birleştirilmesi ile artırılabilir.

OTA'lar, genelde kendisi ve çevresi hakkında bilgi toplamak için birden fazla farklı sensör ile donatılmış bir şekilde üretilirler. Üzerindeki sensörler çevreyi algılama, performans ve durum izleme gibi işlevleri etkinleştirir. Bu sensörlerden toplanan veriler aynı zamanda nesnelere interneti ve siber fiziksel sistem teknolojilerini kullanarak bir üretim tesisinde uzaktan izlenip gerçek zamanlı olarak bir veri tabanında kayıt altına alınabilir. Sensörlerden toplanan bu ham veriler, çeşitli sinyal işleme yöntemleri ile işlenerek hata veya anomali tespiti için değerli bilgiler elde edilebilir. Genel anlamda zaman serisi verileri olarak da adlandırılan sensör verileri zaman alanında, frekans alanında veya zaman-frekans alanında analiz edilmektedir. Ham olarak elde edilmiş zaman alanında bulunan verilerdeki özniteliklerinin çıkarılması frekans alanında yer alan verilerdeki özniteliklerinin çıkarılmasının aksine daha az işlem kapasitesi ile gerçekleştirilir [12, 13].

Birbirinden farklı sensörlerin, ekipmandaki hataları tespit etmek için kendilerine göre avantajları bulunur. Titreşim sensörü ekipmandaki mekanik hataları tespit etmekte iyi iken akım sensörü ise ekipmandaki elektronik hataları tespit etmekte daha iyidir. Aynı zamanda sensörler farklı çevresel çalışma koşullarına göre de duyarlılık göstermektedir. Heterojen sensörleri birleştirmek ve analiz etmek, karmaşık sistemlerin hatalarını tespit etmek için uygun bir yaklaşım olabilir. Bu yaklaşıma çoklu sensör füzyonu denir. Tek sensörlü hata tespit yaklaşımlarına kıyasla daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde edilebilmektedir [14-16].

Bu makalede OTA'lar için çoklu heterojen sensör verilerinin füzyonuna dayalı Evrişimli Sinir Ağı (ESA) tabanlı yeni bir hata tespit yöntemi önerilmiştir. Bu makalenin başlıca katkıları şunlardır:

- OTA için üç tip yol anomali endüstriyel bir ortam perspektifinden belirlenmiştir.
- Homojen sensör verileri, görüntülere dönüştürülerek füzyonunun gerçekleştirilmesini sağlayan bir metot kullanılmıştır. Bu çalışma, heterojen sensör verilerine de uygulanabileceğini göstermiştir.
- Füzyon edilmiş çoklu heterojen sensör verilerinin özniteliklerini çıkarabilmek için darboğaz katmanı ile geliştirilmiş bir ESA modeli sunulmuştur.

Bu makalenin geri kalanı şu şekilde organize edilmiştir: Bölüm 2'nin altında ilgili çalışmalar hakkındaki literatürler gözden geçirilmiştir; Bölüm 3'te çoklu heterojen sensör verileri, görüntülere dönüştürülerek yapılan füzyon yöntemi ve darboğaz katmanı ile geliştirilmiş ESA modelinin mimarisi sunulmuştur; Verilerin toplanma ortamı ve veri setinin oluşturulma süreci Bölüm 4'te anlatılmıştır; Tek sensör ve çoklu heterojen sensörlerin birleşiminin sonuçlara olan etkisi Bölüm 5'in altında gösterilmiştir; Bölüm 6'da yöntemden elde edilmiş sonuçlar değerlendirilmiş ve gelecek çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

OTA'lar, robotik ve otomotiv teknolojisi üzerine yapılan son araştırmalarda artan bir ilgi görmektedir. İlerleyen teknolojik gelişmeler ile birlikte lojistik otomasyonda kullanılan OTA'lar üzerindeki donanımlar ve yararlanılan yapay zeka algoritmalarıyla daha akıllı hale gelmektedir. Aynı zamanda bu araçlar için kullanılan elektronik ve mekanik parçaların yapı ve işlevselliğindeki karmaşıklık, yoğun kullanımları vb. operasyonel nedenlerle de zamanla hataların oluşması kaçınılmazdır. Hatalar, sistemlerin yanlış bir şekilde çalışmasına veya beklenen verimliliği sağlayamamasına neden olabilmektedir. Bu nedenle hataların, sistemi kötü etkileyecek sonuçlara sebep olmasını önlemek için erkenden tespiti yapılabilir. Bu tür bir erken tespit, ilgili parçanın ömrünün uzatılması ve bakım maliyetinin düşürülmesi açısından önemlidir.

V. Chandola ve arkadaşları, hata tespiti için olağan dışındaki verilerden örüntüler bulmaya odaklanan kapsamlı bir genel bakış sunmuşlardır [17]. Otonom araçlar için hata tespitinde bazı araştırmacılar, çoklu sensör füzyonu perspektifini uygulamışlardır. M. Realpe ve arkadaşları, KITTI veri setindeki sensör hatalarını bulmak için bir sensör füzyon mimarisini Destek Vektör Makinesi (DVM) modeline uygulamışlardır. Bu mimari, veriler

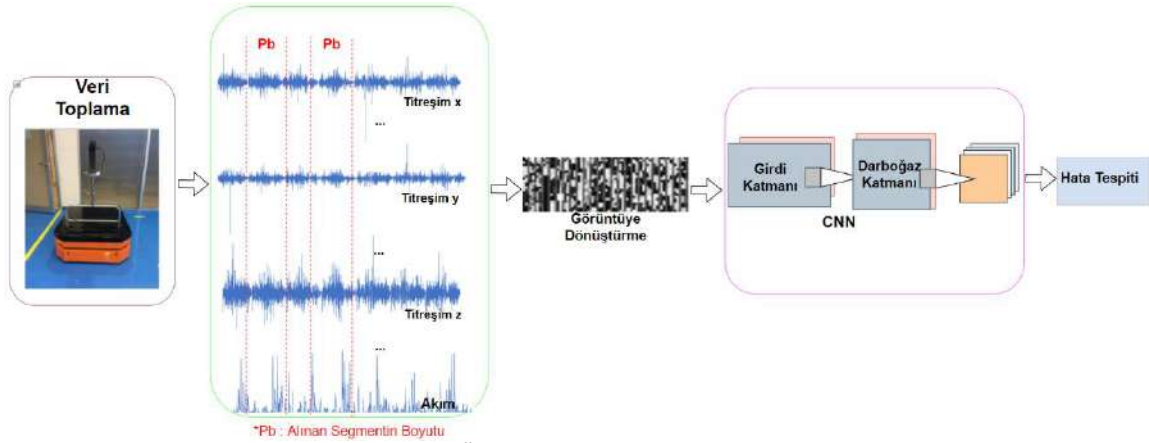
tüm sisteme entegre edilmeden önce hatalı sensörleri izole etmektedir [18]. N. D. Gingras Pous ve D. Gruyer, çoklu sensör verilerini işlemeye yönelik analitik artıklık ve doğrusal olmayan bir dönüşüm ölçümünü kullanan arıza tespit mimarisini önermişlerdir [19]. Fang ve arkadaşları, otonom aracın durum hatalarını tespit etmek için güvenli alanı ve güvenli olmayan alanı ayıran sınır eğrisini bulmaya yönelik DVM yöntemini sunmuşlardır [20]. D. Kwon ve arkadaşları, günümüzde derin öğrenmeye artan ilginin nedeniyle hata tespitinde kullanılan derin öğrenme tekniklerini araştırmışlardır. Yapılan çalışma, geleneksel makine öğrenimi algoritmalarına kıyasla derin öğrenme modellerinin anomalileri tespit etmekteki etkinliğini göstermiştir [21]. Derin öğrenme, verileri bir sinir ağının katmanları içinde iç içe geçmiş kavramlar hiyerarşisi olarak temsil edilmeyi öğrenerek iyi performans ve esneklikler sağlamaktadır [22]. Çoklu doğrusal olmayan dönüşüm katmanlarıyla öğrenmeyi ifade eden derin öğrenme [23], farklı uygulamalar için hata tespiti sorunlarını çözmek için de uygulanabilmiştir. Derin öğrenme modelinin karmaşıklığının dengelenmesi ve genelleme yeteneğinin geliştirilmesi için büyük miktarda veriye ihtiyaç vardır [24]. Çeşitli araştırmalardaki hata tespiti uygulamalarında Otomatik Kodlayıcı (OK), Derin Boltzmann Makinaları (DBM) ve Tekrarlayan Sinir Ağları (TSA) gibi derin öğrenme algoritmalarının başarıları gösterilmiştir [25-27]. G.Baldini ve arkadaşları, bir araca monte edilmiş ataletsel ölçüm biriminden toplanan verileri özellikle de ivmeölçerler ve jiroskopların bileşenleri tarafından oluşturulan verileri kullanarak yoldaki anomaliliklerin tespitini ve tanımlanmasını değerlendirmişlerdir. Zaman-frekans alanındaki gösteriminin orijinal zaman alanındaki verinin yerine ESA'ya girdi olarak kullanıldığı bir yaklaşım önerilmiştir. Z. Chen ve W. Li, çoklu sensör verilerinin özneliklerini birleştirmek için Seyrek Otomatik Kodlayıcıları (SOK) ve Derin İnanç Ağları (DIA) tercih etmişlerdir [28]. Zaman alanı ve frekans alanındaki öznelikleri farklı sensörden gelen verilerden çıkarmışlardır. Pan ve arkadaşları, rulmandaki hata çeşitlerini sınıflandırmak için ESA'nın çıktısını Uzun Kısa Vadeli Hafıza Ağları (UKVHA) girdi olarak kullanmıştır [29].

ESA, derin öğrenmede temsili bir grafik tanıma ağıdır. İnce ve arkadaşları, motor arıza tespitinin öznelik çıkarma ve sınıflandırma aşamalarını tek bir öğrenme gövdesinde birleştirmek için içsel bir uyarlamalı tasarıma sahip tek boyutlu ESA kullanmışlardır. Hızlı ve doğru bir motor durumu izleme ile erken arıza tespit sistemi gerçekleştirilmiştir [30]. C. Liu ve arkadaşları, dişliler için değişken mod ayrıştırmasını ESA tabanlı hata teşhis yönteminde öznelik çıkarmak için kullanmışlardır [31]. Ding ve arkadaşları dalgacık paket enerji görüntülerini ESA kullanarak iş mili yataklarının enerji dalgalanması için çok ölçekli bir öznelik madenciliği yöntemi önermişlerdir [32]. O. Janssens ve arkadaşları, ESA'yı öznelik öğrenme için kullanmışlardır. Yöntem, verilerin kendisinden hata tespiti için öznelikleri bağımsız olarak öğrenmektir. İncelenen birçok çalışmada zaman eksenindeki ham titreşim verileri iki boyutlu görüntülere dönüştürülür. Görüntüler, ESA'ya girdi olarak kullanılmıştır [33, 34]. Bununla birlikte, yukarıdaki makalelerin tümü, özellikleri oluşturmak için uzman deneyimine dayanır ve bazıları tek tip bir sensörden gelen verileri analiz etmek ile sınırlıdır.

Bu makale literatürdeki diğer makalelere göre farklı olarak heterojen sensör verilerini zaman alanında ele alarak bir füzyon yöntemi önermekte ve yeni bir kullanım senaryosu olarak OTA sistemleri üzerinde sonuçlar sunmaktadır.

### 3. YÖNTEM

Bu bölümde, OTA'nın üzerinde bulunan heterojen sensörlerin füzyonu ve darboğaz katmanı ile geliştirilmiş ESA tabanlı hata teşhis yöntemi açıklanmıştır. Çoklu heterojen sensör verilerinin görüntülere dönüştürülme metodu bölüm 3A'da anlatılmıştır. Füzyon edilmiş verilere uygulanan darboğaz katmanı ile geliştirilmiş ESA modelinin mimarisi bölüm 3B'nin altında sunulmuştur. Önerilen yöntemin akış şeması Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Önerilen yöntemin akış şeması

### A. Çoklu Heterojen Sensör Verilerinin Görüntüleme Dönüştürülmesi (Veri Füzyonu)

Veri ön işleme makine öğrenmesi ve derin öğrenme algoritmaları için temel adımlardan biridir. Veri kümesine henüz model uygulanmadan önce veri kalitesinin artırılması, ham verideki gürültünün azaltılması ve dolayısıyla algoritmanın daha verimli çalışması hedeflenir. Normalleştirme (normalization) ile veri dönüşümü, kayıp verilerin tamamlanması (imputation) ve aykırı verilerin temizlenmesi en bilindik veri ön işleme yöntemleridir. Wang ve arkadaşları, homojen titreşim sensöründen gelen üç eksenli verileri görüntüleme dönüştürerek transformasyonu ve füzyonu bir veri ön işleme metodu olarak önermişlerdir [35]. Sunulan çalışmadaki bu transformasyonun etkili yönü; kullanıcılar için birden fazla ham sensör verisinin kolay ve hızlı bir şekilde, uzman deneyimi ve aynı zamanda çeşitli parametre ayarları gerektirmeyen bir öznetelik haritası oluşturma kabiliyetinin kazandırılabilmesidir. Referans alınan bu metot bizim çalışmamızda farklı olarak, titreşim ve akım sensörleri gibi heterojen kaynaklardan gelen verilerin ön işlenmesi için uyarlanmıştır. Çoklu heterojen sensör verilerinin uzman deneyimi gerektirmeyen bir şekilde füzyonun sağlanabilmesi için yararlanılan griölçek görüntü dönüşüm yöntemi aynı zamanda ileriki çalışmamızda robot üzerinde bir uç birim donanımında gerçek zamanlı gömülü olarak çalıştırılması planlanan algoritmamızın limitli hesaplama ve hafıza kaynaklarına sahip bileşenleri için de bir avantaj olabileceği öngörülmektedir. Bu bağlamda literatürde gerek girdi verilerinde gerekse derin öğrenme modelindeki ağırlıkların tam sayı aritmetiği kullanarak, modelin de sınıflandırma performansını etkilemeden, elde edilen gerçek zamanlı performans kazanımlarının avantajlarını inceleyen çalışmalar da mevcuttur [36].

Üç eksenli titreşim ve akım verilerinin görüntüleme dönüştürme yöntemi Şekil 2’de gösterilmiştir. Çoklu heterojen sensör verilerinin birlikte kullanımının anlamlı olabilmesi, her sensör sinyalinin zaman eksenindeki örneklerinin eş zamanlı olmasını gerektirir. Üç eksenli titreşim sinyali ve akım sinyali için toplamda 4 kanal kullanılmıştır.  $4M \times N$  boyutlu öznetelik haritasını elde etmek için; ham sinyaller  $s(k, i)$  şeklinde segmentlere ayrılmıştır. Burada ‘k’ kanal sayısını ve ‘i’ de kullanılmak istenen segment boyutunu temsil eder. Üç eksenli titreşim ve akım sinyallerinden  $M \times N$  uzunluğundaki boyutlarda segmentler alınmıştır. M ve N parametreleri elde edilmek istenilen görüntünün boyutuna göre ayarlanmaktadır. Örneğin, 4 sinyal verisinin (3 eksenli titreşim ve akım) her birinden 576 boyutunda segmentler alınarak  $96 \times 24$  boyutunda görüntüler elde edilmektedir. Denklem 1 ile sinyaller, segmentlere ayrılmıştır.

$$S(k, i) = s(k, i) \quad (1)$$

$$k = 1, 2, 3, 4; i = 1, 2, 3, \dots, M \times N$$

uint8, görüntünün piksel değerini 8 bitlik işaretli tam sayı değerine dönüştürmek için görüntü işleme yaygın olarak kullanılır. Denklem 2’deki veri ön işleme yöntemi, görüntü verilerinin piksel değeri aralığını gri tonlamalı olan  $[0, 255]$  içinde sınırlar. Bu veri seviyesindeki füzyon yönteminin avantajı, farklı karakteristik özelliklere sahip verilerin birlikte kullanılmasını sağlamasıdır.

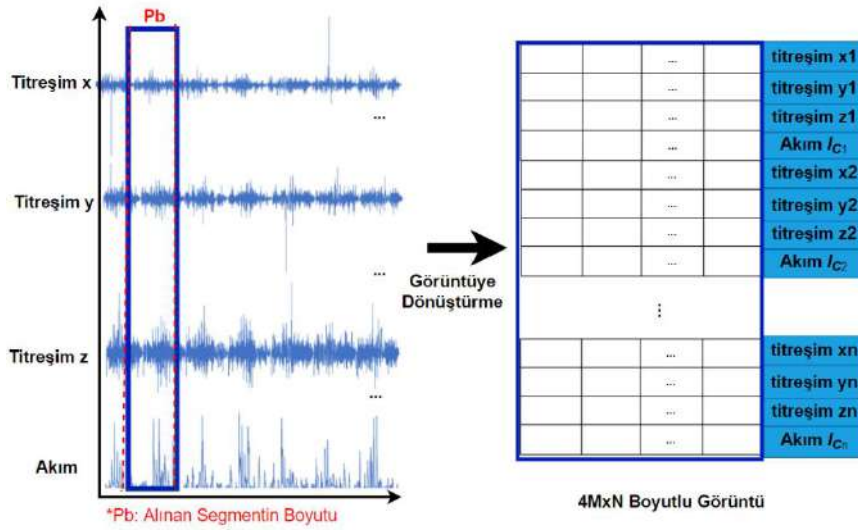
$$F(m, n) = \text{uint8} \left( 255 \times \frac{S\{k, (m-k) \times N / 4 + n\}}{\text{Max}S\{k\}} \right)$$

$$m = 1, 2, \dots, 4M; n = 1, 2, \dots, N$$

(2)

$$k(m) = \begin{cases} 1, & m = 1, 5, 9, \dots, 4M - 3 \\ 2, & m = 2, 6, 10, \dots, 4M - 2 \\ 3, & m = 3, 7, 11, \dots, 4M - 1 \\ 4, & m = 4, 8, 12, \dots, 4M \end{cases}$$

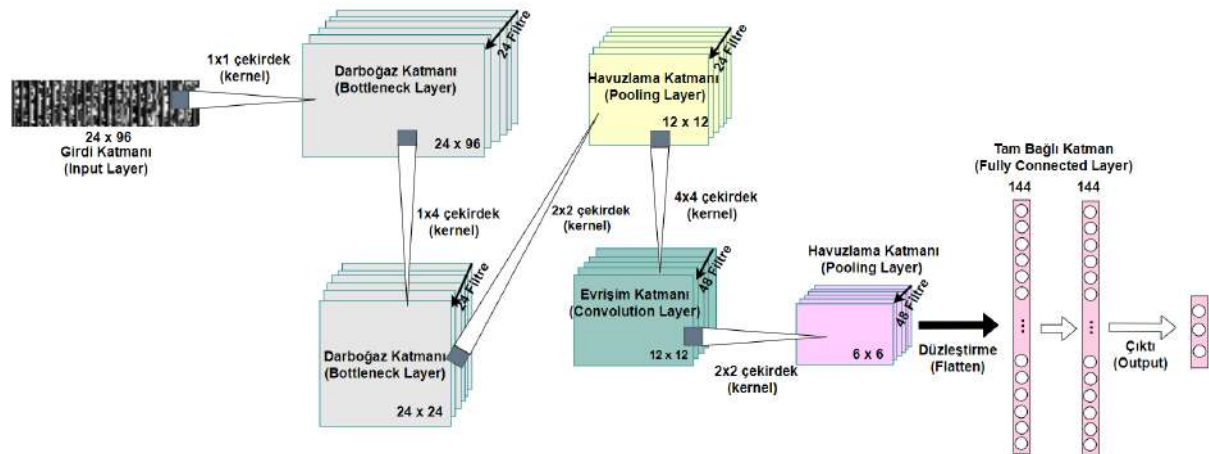
Bu çalışmada Şekil 2’de gösterildiği gibi Pb boyutunda 3 eksenli titreşim ve akım sinyallerinden segmentler alınarak görüntülere dönüştürülmüştür. Segmentler, kontrollü veri toplanırken OTA’nın başlama ve durma zamanları dışındaki hareketlerini içermektedir.



Şekil 2. Üç eksenli titreşim sensörü ve akım sensörü verilerinin görüntülere dönüştürülmesi (veri füzyonu)

## B. Hata Tespitinde Kullanılan Darboğaz Katmanı ile Geliştirilmiş ESA Modeli

Hata tespiti için önerilen ESA modelinin yapısında girdi katmanı (input layer), darboğaz katmanı (bottleneck layer), evrişim katmanı (convolution layer), havuzlama katmanı (pooling layer) ve tam bağlı katman (fully connected layer) olarak adlandırılan beş tür katman bulunmaktadır. Önerilen ESA modelinin mimarisi Şekil 3’te gösterilmiştir.



Şekil 3. Önerilen ESA modeli

Girdi katmanına bölüm 3.A'da sinyallerden dönüştürülmüş görüntülerin transpozesi (parametre  $M = N = 24$ ) girer. Darboğaz katmanı,  $1 \times 1$  ve  $1 \times 4$  boyutlarındaki evrişimli çekirdeklerin (convolution kernel) evrişim işlemi görüntülere uygulayarak özneliklerini çıkarmaktadır. Bu yöntemde kullanılan darboğaz katmanı veri füzyonunda elde edilmiş görüntülerdeki öznelikleri çıkarmak için kullanılmıştır.

Darboğaz katmanının çıktısı, dört kanallı veri füzyonu için kullanılmıştır. Evrişimli çekirdeğin boyutu  $1 \times k$  ve adım boyutu (stride)  $1 \times k$ 'dir. Veri füzyonu için kullanılan sinyal sayısını 'k' ( $k = 4$ ) temsil eder. Darboğaz katmanı sayesinde birbirinden farklı sinyallerin füzyon işlemi gerçekleşmektedir. Derin öğrenmede algoritmaların optimizasyonu yakınsama oranını etkilemektedir. Bu çalışmada "Adam" optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Adam optimizasyonun hiper parametreleri sırasıyla: Öğrenme oranı ( $\alpha$ ) 0.001, aynı anda alınan girdi sayısı (batch size) 8 ve iterasyon (epochs) 120 olarak ele alınmıştır. ESA modelinde, evrişimli katman ya da havuzlama katmanından sonraki çıktı boyutunun sabit kalmasını sağlamak için marjinal sıfır doldurma (zero padding) yöntemi kullanılmıştır. Kullanılan ESA modelinin ayrıntıları Tablo 1'de açıklanmıştır.

**Tablo 1.** ESA modelinin ayrıntıları

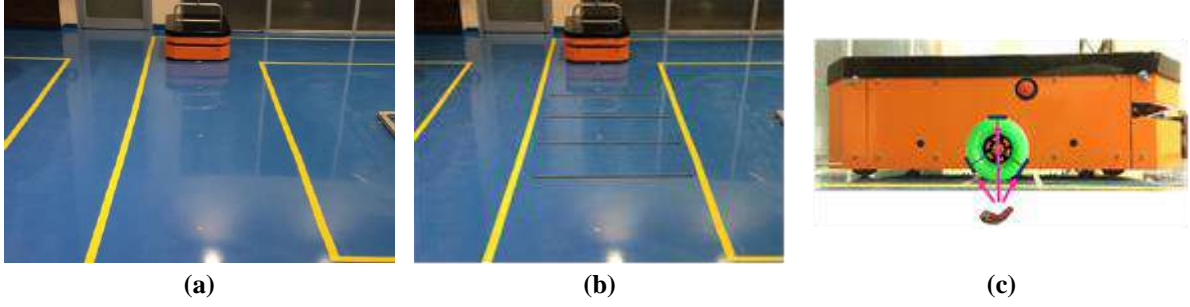
Katman	Filtre Boyutu (Filter Size)	Çekirdek Boyutu (Kernel Size)	Adım Sayısı (Stride Size)	Çıktı Boyutu
Girdi (Input)	-	-	-	-
Darboğaz (Bottleneck)	24	(1, 1)	(1, 1)	(24, 96, 24)
Darboğaz (Bottleneck)	24	(1, 4)	(1, 4)	(24, 24, 24)
Havuzlama 1 (Pooling 1)	-	(2, 2)	(2, 2)	(12, 12, 24)
Seyreltme 1 (Dropout 1)	-	-	-	(12, 12, 24)
Evrişim 1 (Conv. 1)	48	(4, 4)	(1, 1)	(12, 12, 48)
Havuzlama 2 (Pooling 2)	48	(2, 2)	(2, 2)	(6, 6, 48)
Seyreltme 2 (Dropout 2)	-	-	-	(6, 6, 48)
Düzleştirme (Flatten)	-	-	-	(1728)
Seyreltme 3 (Dropout 3)	-	-	-	(1728)
Tam Bağlı 1 (Fully Connected 1)	-	-	-	(144)
Seyreltme 4 (Dropout 4)	-	-	-	(144)
Tam Bağlı 2 (Fully Connected 2)	-	-	-	(144)
Seyreltme 5 (Dropout 5)	-	-	-	(144)
Çıktı (Output)	-	-	-	(3)

#### 4. VERİ SETİ

Önerilen yöntemin hata tespitindeki başarısı OTA üzerinde doğrulanmıştır. OTA test ortamı; stres testleri için bir test yatağı, bir test laboratuvar ortamı, veri toplamak için sensör sistemi, kontrol ve görselleştirme test yazılımını sağlamaktadır.

Normal, engel ve parça gibi üç farklı çalışma koşulu belirlenmiş ve bu koşullar altında OTA belirlenen bir görevi yerine getirirken veriler toplanmıştır. Üç çalışma koşulunun her biri için OTA, aynı test ortamında 3.5 metre düz hareket ederek görev altında tekrar tekrar çalışırken sensör verileri toplanmıştır. Öncelikle herhangi bir engel

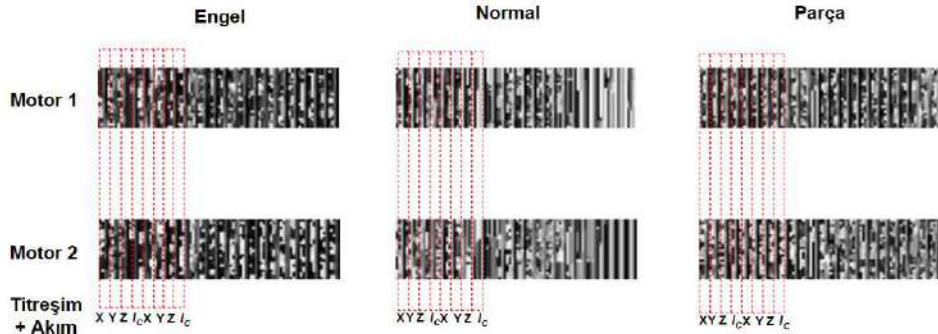
veya müdahalenin olmadığı ortamda 80 adet ölçüm kaydedilmiştir. İkinci koşulda dört adet özdeş metal engel 40 cm aralıklarla yere sabitlenmiş ve OTA aynı görev altında çalışırken 80 adet ölçüm daha alınmıştır. Son olarak her iki ana tekerleğe de 120 derecelik açı ile üçer adet 4 mm bakır kablo bantlanarak 80 adet daha ölçüm kaydedilmiştir. Sonuçta üç farklı çalışma koşulu sınıfı oluşturulmuş ve etiketlenmiştir. Simüle edilmiş test ortamı ve operasyonel hata sınıfları Şekil 4'te gösterilmiştir. Her görevin sonunda sensörlerden toplanan veriler ayrı csv dosyalarında saklanmıştır. Titreşim sensörü üç eksende 1.2 kHz örnekleme yaparken akım sensörü 100 Hz örnekleme yapmaktadır. Üç eksenli titreşim ve akım verilerini füzyon edebilmek için 1 akım verisine karşılık gelen 12 adet titreşim verisinin ortalaması alınmıştır.



Şekil 4. Deneysel test ortamı ve görev koşulları; a) Normal, b) Engel ve c) Parça

## 5. DENEYSEL ANALİZ VE SONUÇLARI

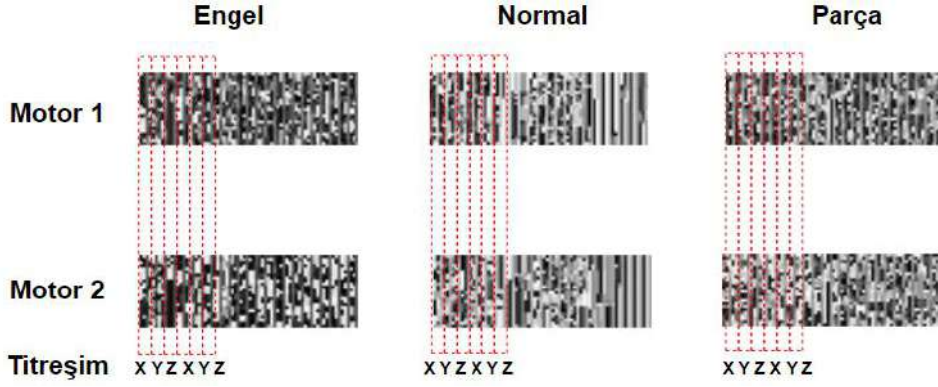
Bu deneyde OTA üzerinde bulunan titreşim ve akım sensörlerinden kaydedilen veriler kullanılmıştır. Üç eksenli titreşim ve akım verilerinden eş zamanlara denk gelen 596 boyutunda segmentler alınarak Bölüm 3A'daki metot ile 24 x 96 boyutunda görüntüler oluşturulmuştur. OTA'nın 3 farklı çalışma koşulu için birbirinden bağımsız 2 farklı motora ait üç eksenli titreşim ve akım verileri kullanılarak oluşturulmuş görüntüler Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Üç eksenli titreşim ve akım verilerinden elde edilen görüntüler

OTA üzerindeki akım sensörüne ait veriler eklemeyen homojen sensör üzerindeki sonuçları göstermek için üç eksenli titreşim sensörü verilerinden 24 x 72 boyutundaki görüntüler Bölüm 3A'daki yöntem ile oluşturulmuştur. Şekil 6'da OTA'nın 3 farklı çalışma koşulu için birbirinden bağımsız 2 farklı motora ait üç eksenli titreşim verileri kullanılarak oluşturulmuş görüntüler gösterilmiştir.





Şekil 6. Üç eksenli titreşim verilerinden elde edilen görüntüler

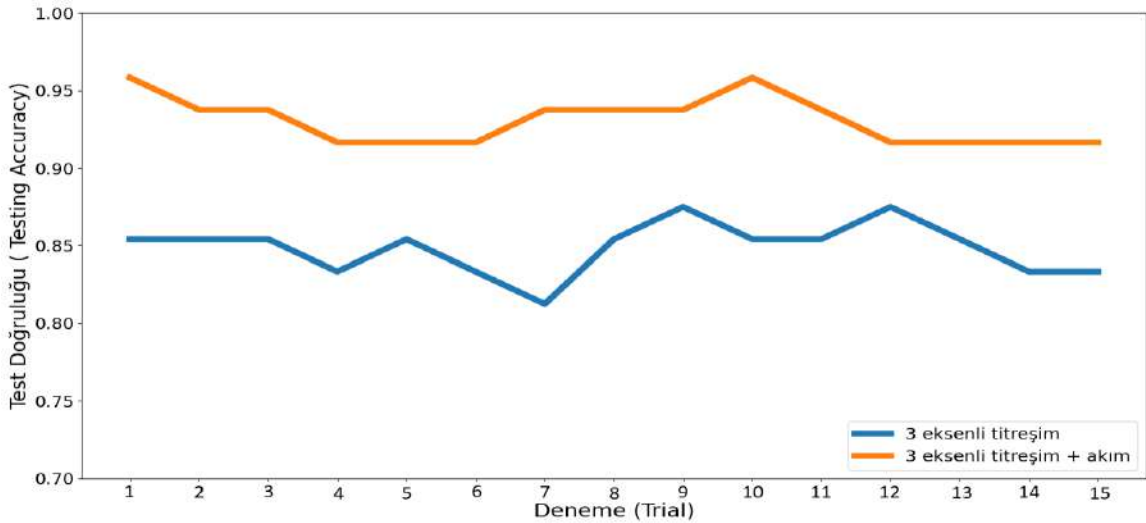
Bölüm 3B’de önerilen ESA modeli ile elde edilen görüntüler eğitilmiştir. Üç eksenli titreşim verilerinden elde edilen görüntüler ve üç eksenli titreşim ve akım verilerinin füzyonu ile elde edilen görüntüler önerilen model kullanılarak oluşturulan rassal veri kümeleri ile tekrar tekrar toplamda 15 kez çalıştırılarak deney sonuçlanmıştır. 3 farklı durum için toplam 240 adet görüntü elde edilmiştir. 240 adet görüntü içerisinde %60 eğitim (train), %20 test, ve %20 doğrulama (validation) olacak şekilde her seferinde rastgele ayrılmıştır.

Üç eksenli titreşim sensör verilerinin füzyonu için ortalama doğruluk %85’tir. Üç eksenli titreşim sensörü ve akım sensör verilerinin füzyonu için ortalama doğruluk ise %93’tür. Elde edilen sonuçlara göre önerilen yöntemin çoklu heterojen sensör verilerdeki füzyon başarısı, tek sensör verisinin başarısından daha yüksek doğruluğa sahip olduğu gözlemlenmiş ve Tablo 2’de detaylandırılmıştır.

Tablo 2. Önerilen yöntemin 15 kez çalıştırılmasından elde edilen sonuçlar

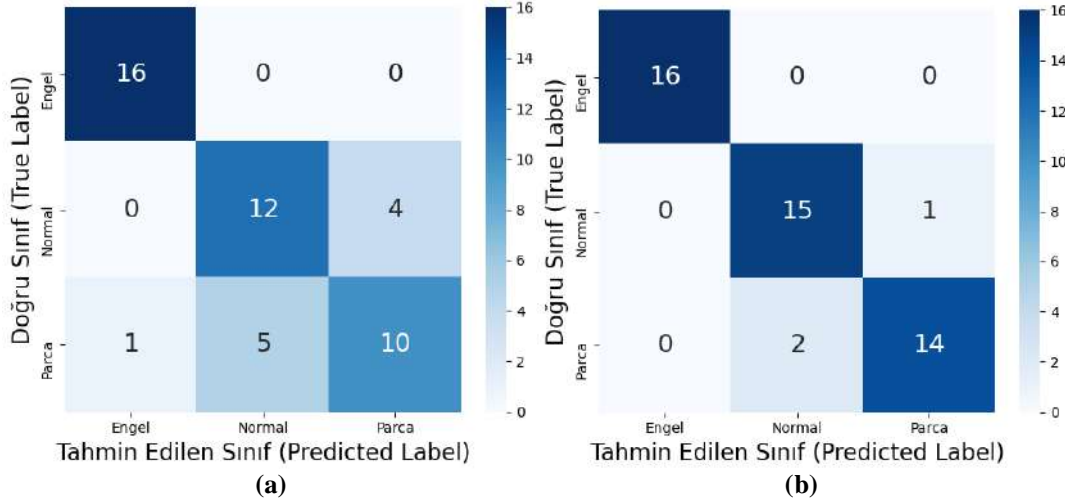
	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma
3 eksenli titreşim verisi	%81	%87	%85	%1.7
3 eksenli titreşim ve akım verileri	%92	%96	%93	%1.3

Tablo 2’de bulunan minimum, maksimum ve ortalama değerleri, modelin 15 kez çalıştırılma sonucunda elde edilmiş istatistiksel verilerdir. Modelin 15 kez çalıştırılması sonucunda elde edilen başarı doğrulama grafiği Şekil 7’de gösterilmiştir.



Şekil 7. Önerilen yöntemin 15 kez çalıştırılmasından elde edilen başarı doğruluk grafiği

Karmaşıklık matrisi, makine öğrenimi sınıflandırması için bir performans ölçümüdür. Doğru sınıf ile tahmin edilen sınıf arasındaki benzerliğin görselleştirilmesine izin verir [37]. Üç eksenli titreşim verilerinin füzyonu sonucunda elde edilen karmaşıklık matrisi Şekil 8a'da gösterilmiştir. Şekil 8b'de üç eksenli titreşim ve akım verilerinin füzyonu sonucunda elde edilen karmaşıklık matrisi gösterilmiştir.



Şekil 8. Karmaşıklık matrisi; (a) Üç eksenli titreşim sinyali, (b) Üç eksenli titreşim ve akım sinyalleri

Üç eksenli titreşim ve akım verileri ile üç eksenli titreşim verisinin, önerilen yöntemdeki başarı doğruluk sonuçları verilmiştir. Elde edilmiş sonuçlara göre heterojen sensör verilerinin füzyonu, homojen sensör verilerinin füzyonuna göre daha yüksek başarı doğruluğuna sahiptir. Belirlenmiş üç farklı çalışma koşulu için OTA görevlerini yerine getirirken sensörlerden gelen veriler, sistem üzeri bir ekipmanda oluşan anomali durumunun sadece mekanik aksam veya elektronik aksama değil her iki aksama da yansiyabildiğini göstermektedir. Şekil 8'deki karmaşıklık matrislerine göre heterojen sensör verileri, üç farklı çalışma koşulu için sınıflandırmada homojen sensör verilerinden daha yüksek başarı doğruluğuna sahiptir. Ayrıca Tablo 2'deki standart sapma değerlerinde gösterildiği gibi heterojen sensör verilerinin kullanımı ile eğitilmiş modelin dayanıklılığı, homojen olana göre daha yüksektir. Sonuç olarak çoklu ve heterojen sensör verileri ile füzyon yönteminin kullanılması, sistem üzerindeki hem mekanik hem de elektronik aksamındaki hataları daha yüksek bir başarı doğruluğunda tespit etmek ile beraber daha dayanıklı bir modele de katkı sağladığı gözlemlenmektedir.

## 6. SONUÇLAR

Heterojen sensörlerdeki verilerin füzyonu ve darboğaz katmanı ile geliştirilmiş yeni ESA tabanlı hata tespit yöntemi ve özgün bir kullanım senaryosu bu çalışmada sunulmuştur. ESA'daki darboğaz katmanı, füzyon edilmiş verilerin özneliklerini başarıyla çıkarabilmektedir. Bu diğer makine öğrenmesi yöntemlerine nazaran öznelik mühendisliği için kullanıcıya avantajlar sağlayabilir. Önerilen metod laboratuvar ortamındaki bir OTA üzerinde test edilmiştir. Elde edilen test sonuçlarına göre çoklu heterojen sensör verilerinin füzyonuna dayalı yöntemi, tek bir sensör verisinin kullanımına göre hata tespitinde daha yüksek başarı doğruluğu verdiği gözlemlenmiştir. Yöntem, veri setinden rassal olarak seçilen veri kümeleri ile toplamda 15 kez çalıştırılmış olup model başarısının her seferinde minimum, maksimum ve ortalama değerleri kayıt altına alınmıştır. Deneysel sonuçlar incelendiğinde çoklu heterojen sensör verileri kullanıldığında hata tespiti modelinin sınıflandırma performansında artış olduğu gözlemlenmiştir.

Gelecekteki çalışmalarda, kullanılan sensör tipleri ve hata sınıfları çeşitlendirilerek yöntemin ve modelin performansı farklı senaryolarda test edilecektir. Ayrıca bu çalışmada kullanılan OTA üzerinde NVIDIA Jetson TX2 GPU modülü bulunmaktadır. Modül, gerçek zamanlı olarak verilerin işlenmesi ve hataların tespiti için derin öğrenme modellerinin OTA üzerinde çalıştırılabilmesine olanak sağlamaktadır. İlerleyen çalışmalarda bu makalede önerilen modelin OTA üzerine transfer edilerek gerçek zamanlı hata tespitinin bir gömülü sistem olarak gerçekleştirilmesi üzerine de çalışılacaktır.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK) 118C252 numaralı 2232 Uluslararası Lider Araştırmacılar Programı projesi tarafından desteklenmiştir.

## Kaynaklar

- [1] Lu, S., et al., A RFID-enabled positioning system in automated guided vehicle for smart factories. *Journal of Manufacturing Systems*, 2017. 44: p. 179-190.
- [2] De Ryck, M., M. Versteheyhe, and F. Debrouwere, Automated guided vehicle systems, state-of-the-art control algorithms and techniques. *Journal of Manufacturing Systems*, 2020. 54: p. 152-173.
- [3] Stetter, R., M. Witczak, and M. Pazera, Virtual diagnostic sensors design for an automated guided vehicle. *Applied Sciences*, 2018. 8(5): p. 702.
- [4] Sabattini, L., et al., *Advanced Automated Guided Vehicle Systems for Industrial Logistics*. 2017.
- [5] Dares, M., et al. Development of AGV as Test Bed for Fault Detection. in *2020 6th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)*. 2020. IEEE.
- [6] ÖRNEK, Ö., E. GÜLBANDILAR, and A. YAZICI, AKILLI FABRİKALARDAKİ OTONOM TAŞIYICILAR İÇİN BULANIK MANTIK TABANLI ANOMALİ TESPİTİ. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 28(1): p. 53-61.
- [7] Zhang, X., et al., Multi-model ensemble deep learning method for intelligent fault diagnosis with high-dimensional samples. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2021: p. 1-13.
- [8] Hoang, D.-T. and H.-J. Kang, A survey on deep learning based bearing fault diagnosis. *Neurocomputing*, 2019. 335: p. 327-335.
- [9] Maeda, H., et al., Road damage detection and classification using deep neural networks with smartphone images. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2018. 33(12): p. 1127-1141.
- [10] Yang, X., et al., Automatic pixel-level crack detection and measurement using fully convolutional network. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2018. 33(12): p. 1090-1109.
- [11] Baldini, G., R. Giuliani, and F. Geib, On the Application of Time Frequency Convolutional Neural Networks to Road Anomalies' Identification with Accelerometers and Gyroscopes. *Sensors*, 2020. 20(22): p. 6425.
- [12] Yoo, Y.-J., Fault detection of induction motor using fast fourier transform with feature selection via principal component analysis. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2019. 20(9): p. 1543-1552.
- [13] Hendrickx, K., et al., A general anomaly detection framework for fleet-based condition monitoring of machines. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020. 139: p. 106585.
- [14] Wang, X., D. Mao, and X. Li, Bearing fault diagnosis based on vibro-acoustic data fusion and 1D-CNN network. *Measurement*, 2021. 173: p. 108518.
- [15] Gong, W., et al., A novel deep learning method for intelligent fault diagnosis of rotating machinery based on improved CNN-SVM and multichannel data fusion. *Sensors*, 2019. 19(7): p. 1693.
- [16] Jing, L., et al., An adaptive multi-sensor data fusion method based on deep convolutional neural networks for fault diagnosis of planetary gearbox. *Sensors*, 2017. 17(2): p. 414.
- [17] Chandola, V., A. Banerjee, and V. Kumar, Anomaly detection: A survey. *ACM computing surveys (CSUR)*, 2009. 41(3): p. 1-58.
- [18] Realpe, M., B. Vintimilla, and L. Vlacic. Sensor fault detection and diagnosis for autonomous vehicles. in *MATEC Web of Conferences*. 2015. EDP Sciences.
- [19] Pous, N., D. Gingras, and D. Gruyer, Intelligent vehicle embedded sensors fault detection and isolation using analytical redundancy and nonlinear transformations. *Journal of Control Science and Engineering*, 2017. 2017.
- [20] Fang, Y., et al., A Fault Detection and Diagnosis System for Autonomous Vehicles Based on Hybrid Approaches. *IEEE Sensors Journal*, 2020. 20(16): p. 9359-9371.
- [21] Kwon, D., et al., A survey of deep learning-based network anomaly detection. *Cluster Computing*, 2019. 22(1): p. 949-961.
- [22] Chalapathy, R. and S. Chawla, Deep learning for anomaly detection: A survey. *arXiv preprint arXiv:1901.03407*, 2019.
- [23] LeCun, Y., Y. Bengio, and G. Hinton, Deep learning. *nature*, 2015. 521(7553): p. 436-444.
- [24] Zhao, R., et al., Deep learning and its applications to machine health monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019. 115: p. 213-237.
- [25] Tang, G., Y. Zhang, and H. Wang, Multivariable LS-SVM with moving window over time slices for the prediction of bearing performance degradation. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2018. 34(6): p. 3747-3757.
- [26] Yuan, M., Y. Wu, and L. Lin. Fault diagnosis and remaining useful life estimation of aero engine using LSTM neural network. in *2016 IEEE international conference on aircraft utility systems (AUS)*. 2016. IEEE.
- [27] Shao, H., et al., Rolling bearing fault detection using continuous deep belief network with locally linear embedding. *Computers in Industry*, 2018. 96: p. 27-39.
- [28] Chen, Z. and W. Li, Multisensor feature fusion for bearing fault diagnosis using sparse autoencoder and deep belief network. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2017. 66(7): p. 1693-1702.

- [29] Pan, H., et al., An Improved Bearing Fault Diagnosis Method using One-Dimensional CNN and LSTM. *Strojnicki Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, 2018. 64.
- [30] Ince, T., et al., Real-time motor fault detection by 1-D convolutional neural networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016. 63(11): p. 7067-7075.
- [31] Liu, C., et al., Planetary gears feature extraction and fault diagnosis method based on VMD and CNN. *Sensors*, 2018. 18(5): p. 1523.
- [32] Ding, X. and Q. He, Energy-fluctuated multiscale feature learning with deep convnet for intelligent spindle bearing fault diagnosis. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2017. 66(8): p. 1926-1935.
- [33] Lu, C., Z. Wang, and B. Zhou, Intelligent fault diagnosis of rolling bearing using hierarchical convolutional network based health state classification. *Advanced Engineering Informatics*, 2017. 32: p. 139-151.
- [34] Janssens, O., et al., Convolutional neural network based fault detection for rotating machinery. *Journal of Sound and Vibration*, 2016. 377: p. 331-345.
- [35] Wang, H., et al., A novel convolutional neural network based fault recognition method via image fusion of multi-vibration-signals. *Computers in Industry*, 2019. 105: p. 182-190.
- [36] Zhao, R., et al. Accelerating binarized convolutional neural networks with software-programmable fpgas. in *Proceedings of the 2017 ACM/SIGDA International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays*. 2017.
- [37] Elmrabit, N., et al. Evaluation of machine learning algorithms for anomaly detection. in *2020 International Conference on Cyber Security and Protection of Digital Services (Cyber Security)*. 2020. IEEE.



## Evrişimsel Sinir Ağı Temelli Yüz Tanıma Yöntemleri ile Robot Resim Oluşturma Uygulaması

Faruk AYATA<sup>1\*</sup>, Hayati ÇAVUŞ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Başkale Meslek Yüksekokulu, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van, Türkiye

<sup>2</sup> BÖTE, Eğitim Fakültesi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van, Türkiye

\*<sup>1</sup> farukayata@yyu.edu.tr, <sup>2</sup> hayatiicavus@gmail.com

(Geliş/Received: 08/10/2021;

Kabul/Accepted: 09/11/2021)

**Öz:** Yüz tanıma sistemleri, kriminoloji, personel takibi ve güvenlik sistemleri gibi görüntü içeren alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Görüntü içeren verileri işlemek için görüntü işleme, makine öğrenmesi ve derin öğrenme algoritmalarından yararlanılmaktadır. Yüz tanıma sistemleri kayıp bireylerin bulunması için de umut verici biyometrik teknolojilerden biri olabilir. Çünkü ebeveyn ve akrabaların kaybolan bireyin yüz fotoğrafına sahip olma olasılığı, parmak izi veya iris gibi diğer biyometrik verilere ulaşma ihtimalinden daha yüksek olabilmektedir. Bu çalışmada Evrişimsel Sinir Ağları (ESA) yöntemi kullanarak kaybolan, kaçırılan ya da aranan bireylerin bulunması temeline dayanan bir sistem tasarlamak ve tasarlanan bu sistem ile yüz tahmini yapmak amaçlanmaktadır. Bu kapsamda sistemde kullanılmak üzere, tarafımızca oluşturulan ve hiçbir çalışmada henüz kullanılmamış olan, aile yüz veri setine ESA tekniği uygulanarak aile yüz referans modeli oluşturulmaktadır. Daha sonra bu çalışmaya özel geliştirilen web tabanlı bir robot resim oluşturma programı ile yüz referans modeli baz alınarak robot resim oluşturulmaktadır. Aile yüz veri seti içerisinde rastgele seçilen 10 ailenin aile referans modeline ait robot resmi ile aileden seçilen bir birey kıyaslanmıştır. Bu kıyaslama sonucunda %88,77 ile %93,90 arasında başarı oranları elde edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Aile Yüz Veri Seti, Evrişimsel Sinir Ağı, Robot Resim Oluşturma, Yüz Tanıma.

### Create a Sketch Application with Convolutional Neural Network Based Face Recognition Methods

**Abstract:** Facial recognition systems are frequently used in image-containing fields such as criminology, personel tracking and security systems. Image processing, machine learning and deep learning algorithms are used to process data containing images. Facial recognition systems can also be one of the promising biometric technologies for finding missing individuals. Because the probability of parents and relatives to have a face photograph of the disappeared individual may be higher than the possibility of accessing other biometric data such as fingerprints or iris. In this study, it is aimed to design a system based on finding lost, abducted or wanted individuals using the Convolutional Neural Networks (CNN) method and to make face estimation with this designed system. In this context, a family face reference model is created by applying the ESA technique to the family face dataset, which was created by us and has not been used in any study yet, to be used in the system. Then, a robot image is created based on the face reference model with a web-based robotic image creation program developed specifically for this study. The robot picture of the family reference model of 10 randomly selected families from the family face data set was compared with an individual selected from the family. As a result of this comparison, success rates between 88.77% and 93.90% were obtained.

**Key words:** Family Face Data Set, Convolutional Neural Network, Create a Sketch, Face Recognition.

#### 1. Giriş

Ses, görüntü ve belge inceleme alanlarındaki ilerleme başta makine öğrenmesi olmak üzere derin öğrenme ve YSA (Yapay Sinir Ağları) gibi alanların da etkisiyle mümkün olmaktadır. Görüntü inceleme alanı; dijital görüntü işleme, yüz tanıma, nesne tanıma, desen tanıma, kod tanıma ve optik karakter tanıma gibi teknolojileri barındırmaktadır [1]. Bu teknolojilerden yüz tanıma teknolojisi kayıp bireylerin bulunması için umut verici biyometrik teknolojilerden biri olabilir. Çünkü ebeveynlerinin ve akrabalarının kaybolan bir bireyin yüz fotoğrafına sahip olma olasılığı, parmak izi veya iris gibi diğer biyometrik yöntemlerden daha yüksek olabilmektedir.

Yüz tanıma sistemlerinin kullanımı diğer biyometrik tanıma sistemlerine göre daha kolay olabilmektedir. İris, retina ve parmak izi tanıma sistemlerinde kişinin göz tarayıcısına bakması ya da parmak izini belirlenen cihazın üzerine tutması gerekmektedir. Oysaki yüz tanıma sisteminde böyle bir gereklilik olmayabilir, çünkü kişiyi rahatsız etmeden de görüntüsü alınabilir.

\* Sorumlu yazar: [farukayata@yyu.edu.tr](mailto:farukayata@yyu.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0003-2403-3192, <sup>2</sup> 0000-0001-5602-5221

Görüntüleri bilgisayarda işleyebilen birçok algoritma mevcuttur. Bu algoritmalar; makine öğrenmesi, derin öğrenme ve YSA başlıkları altında toplanmaktadır. Bu algoritmaların uygulamadaki başarı oranları çok yüksek değildir; çünkü kameranın açısı, aydınlatma, poz ve yüz ifadesi gibi değişkenler yüzün tanınmasında zorluklar çıkarabilir [2]. Yüksek başarı oranının elde edilmek istenildiği durumlarda YSA tabanlı sınıflandırma algoritmalarının tercih edilmesi daha doğru olacaktır [3]. YSA'ların geliştirilerek daha iyi bir beyin modellenme amacına sahip mimarileri derin öğrenme olarak adlandırılmaktadır. Derin öğrenmenin özelleştirilmiş bir mimarisi olan ESA görüntü işleme ve yüz tanıma sistemlerinde oldukça başarılıdır [4]. Mevcut literatürün taranması sonucunda yüz tanıma sistemlerinde ESA yöntemi kullanarak başarı sağlamış birkaç çalışma aşağıda verilmiştir.

Alimovski ve Erdemir'in 2021 yılında yaptıkları çalışmada afin dönüşümü yöntemini kullanarak veri arttırımı yapmışlardır ve bu tekniğin ESA tabanlı yüz tanıma sistemlerindeki etkisini gözlemlemişlerdir. Deneysel sonuçlar ile yüz tanıma sürecinde %94,4 doğruluk elde etmişlerdir.

Akgül ve ark.'ı 2021 yılında ESA tabanlı yüz tanıma algoritmasını geliştirerek yüz üzerinde maske olup olmadığının kontrolünü sağlamışlardır. Bu sistem için Simüle Maskeli Yüz Veri Seti kullanmışlardır. Testler sonucunda %97,09 başarı oranı elde etmişlerdir.

Zhou ve ark. tarafından 2020 yılında yapılan çalışmada [5], yüz tanıma sistemlerinde aydınlatma, poz ve yüz ifadesi gibi hataya sebep olan durumları en aza indirmek için ESA tabanlı bir sistem önermişlerdir. Yüz tanıma ve hizalama için kıvrımlı sinir ağı modeli tasarlamışlardır. Analiz sonuçlarında %95,3 başarılı tanıma gerçekleştirmişlerdir. Önerdikleri sistemle farklı açılarda çekilen görüntüler üzerinde başarılı sonuçlar elde etmişlerdir.

Ayata ve ark.'nın 2020 yılında yaptıkları çalışmada [6], ESA kullanarak yüz tanıma işlemini gerçekleştirip istemediğiniz kişilerin kişisel bilgisayarınızı kullanmasını kısıtlayan ve bu kısıtlamaya ek olarak kişisel bilgisayarınızı kullanmak isteyen kişinin fotoğrafını çekerek bu fotoğrafı sistemde daha önce tanımlanmış olan ve bilgisayar sahibine ait cep telefonuna mesaj olarak gönderen bir uygulama geliştirmişlerdir. Testler sonucunda en kötü açı ve ışık değerinde %76,31 ve en iyi açı ve ışık değerinde de %99,15 başarı sağlamışlardır. Geliştirdikleri sistem ile ESA yöntemini yüz tanımada kullanarak kişisel bilgisayarların güvenliğini arttırmışlardır.

Godbole ve Burad tarafından 2019 yılında yapılan çalışmada [7], farklı açılardan çekilen yüz görüntülerinden yüzü tanımak için yeni bir algoritma önermişlerdir. Ayrıca yüz görüntüsü tanıma işlemi yapıldıktan sonra yüz ifade tanıma işlemini de gerçekleştirmişlerdir.

Yüz tanıma, yüz izleme, duygu analizi ve yüz modelleme alanlarında sıklıkla kullanılan yüz nirengileme, insan yüzündeki ağız, burun, kaş, göz ve yüz çehresi gibi ortak bulunan bazı referans noktaların saptanmasıdır [8-10].

İrk, cinsiyet, poz değişikliği, ışık, yüz ifade farklılıkları ve kullanılan aksesuarlar yüz nirengilemeyi oldukça zor bir hale sokmaktadır [8]. İlgili mevcut literatür tarandığında yüz nirengi noktalarının tespiti; yüz tanıma sistemlerinde görüntüyü tanımda zorluklara sebep olan görünüm varyasyonlarını, poz ve oklüzon problemlerini (diş ve çene bozuklukları) düzeltmede [11,12], yüz ifadelerinin tespitinde [13] ve yüz modelleme [14] alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Yüz nirengi noktalarının tespitinde oldukça güvenilir algoritmalar [36-37] bulunmasına rağmen bu konu halen araştırılmaya açık bir problemdir. Yüz organlarındaki belirgin noktalar düz yüzeylere oranla daha hassas olarak bulunabilir [8-38-39] yada etkin biçim modelleri ile sezimin hassasiyeti artırılabilir [40].

Günümüz yüz tanıma sistemleri, güvenlik güçlerinin videolardaki ya da görüntülerdeki yüzleri tespit ederek şüphelilere ait birçok verinin elde edilmesini sağlamaktadır. Güvenlik birimleri bazı durumlarda şüphelilere ulaşmakta zorluk yaşayabilir bu gibi durumlarda şüpheliyi gören kişilerden destek alarak adli tıp ressamı ya da bazı yazılımlar ile robot resimler oluştururlar. Bu robot resimleri kendi veri tabanındaki görüntüler içerisinde arayarak suçlulara ulaşmaya çalışırlar [15]. Jain ve ark. tarafından 2012 yılında yapılan çalışmada [16], robot resimleri eşleştirmede temelde yaşanan üç sorunun olduğunu bunlardan ilkinin yüz yaşlanmasından dolayı yaşanan sıkıntılar, ikincisinin; yüzdeki izlerden kaynaklı sorunlar, sonuncusunu ise robot resimlerin gerçek yüzlerle eşleştirme zorlukları olarak belirtmişlerdir. Bu sorunların çözümü için de kaliteli veri tabanlarının oluşturulması ve gerçek görüntülere mutlaka bir ön işlem uygulanarak iyileştirme yapılması gerektiğini belirtmişlerdir. Bu bilgiler ışığında, ilgili literatür taraması yapılarak robot resim oluşturma ve eşleştirme adına yapılan birkaç çalışma aşağıda listelenmiştir.

Liu ve ark. tarafından 2018 yılında yapılan çalışmada [15], geliştirdikleri algoritma ile yüz görüntüleri ve bu görüntülere ait robot resimlerin eşleştirilmesini sağlamışlardır. Çalışmalarını üç farklı veri setinde (E-PRIP, PRIP-VSGC ve UoM-SGFS) test edip, geliştirdikleri algoritma ile, sırasıyla %70,1, %61,6 ve %86,9 başarılı eşleştirme değerleri elde etmişlerdir.

Iranmanesh ve ark.'nın 2018 yılında geliştirdikleri sistemde yüz resimleri ile robot resimleri eşleştirmek için Öznitelik Destekli Derin Evrışimli Sinir Ağı kullanmışlardır. Sistemin testlerini E-PRIP ve IIIT-D veri setleri üzerinde gerçekleştirerek %76,4 başarılı eşleştirme değeri elde etmişlerdir [17].

Wan ve Panetta'nın 2016 yılında yaptıkları çalışmada yüz resimleri ile robot resimleri eşleştirmek için bir sistem geliştirmişlerdir. Bu sistemde özellik çıkarıcı olarak Yerel ikili Model, sınıflandırıcı olarak da ki-kare uzaklığını kullanmışlardır. CUHCK, FERET ve TUPIS veri setlerinde testlerini gerçekleştirmişlerdir. Test sonuçlarında en yüksek başarıyı TUPIS veri setinde %88,5 olarak elde etmişlerdir [18].

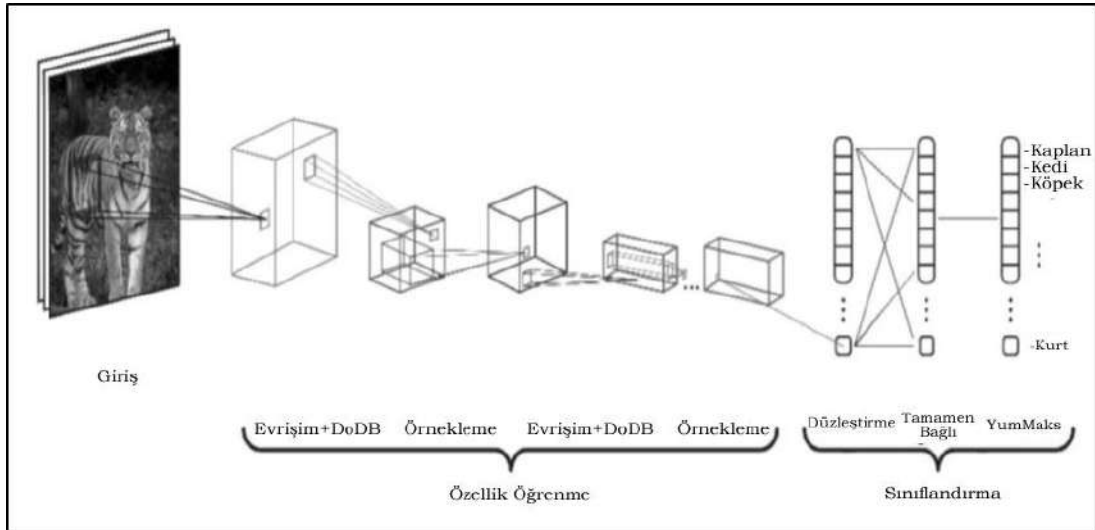
Bu çalışmada, kaybolan, kaçırılan ya da aranan bireylerin bulunması temeline dayanan ESA kullanan bir sistem tasarlayıp, tasarlanan bu sistem ile yüz tahmini yapmak amaçlanmaktadır. Bu kapsamda tarafımızca ilk kez oluşturulan Aile yüz veri seti kullanılmıştır. Aranan bireylerin bulunması noktasında emniyet güçleri bazı zorluklar ile karşılaşabilmektedirler. Bu zorluklar zamansal veya materyal eksikliğinden kaynaklı olabilmektedir. Kaybolan bir bireyin yıllarca bulunamaması gibi bir durumda o bireyin yüz hatlarında değişiklikler olabilmektedir. Ayrıca kaybolan bireye ait herhangi bir görüntünün olmaması gibi bir durumda o bireyin yıllar sonraki değişimi tahmin edilemeyebilir. Bu gibi zorlukları aşabilme adına bu çalışmada aile bireylerinin görüntülerinden yola çıkarak ve hazırlanan robot resim oluşturma programı kullanılarak bir tahminleme yapılmaktadır.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Evrimsel Sinir Ağı

ESA daha çok görüntü içeren verilerin sınıflandırılmasında kullanılan YSA tabanlı bir yöntemdir. ESA temelde, ham olarak verilen görüntünün hangi görüntü sınıfına ait olduğu ya da o görüntüyü tanımlayan en iyi sınıf olasılığının çıkartılması işlemini yapmaktadır. Bu işlev insanlar için doğumdan itibaren süre gelen bir öğrenmedir. İnsan bir görüntüye baktığında farkında olmadan görüntünün ayırt edici özelliklerini çıkarır ve o nesneyi sınıflandırır [19].

ESA görüntüyü parçalara ayırarak her parçaya bir filtre uygulamaktadır. Her filtreleme sonrasında görüntü bir parça küçülmektedir. Sonra bu parçalar arasında ilişki kurarak tanımaya çalışmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Evrimsel sinir ağı [19]

### 2.2. Aile Yüz Veri Seti

Tarafımızda oluşturulan bu veri seti alanda bir ilki temsil etmektedir. Daha önce hiçbir çalışmada aile bireylerinden oluşan bu derece ayrıntılı bir veri seti kullanılmamıştır. Aile yüz veri seti; 39 çekirdek ailedeki bireylerin, çoğunluğu biyometrik resim (kimlik, pasaport ve ehliyet gibi belgelerde kullanılan, en az 600dpi olacak şekilde yüksek kaliteye sahip, arka fonu beyaz ve başka objelerden arındırılmış vesikalık fotoğraf türü) olan yüz görüntülerinden oluşmaktadır (Şekil 2). Bu veri setinde her ailenin 4-9 arasında değişen bireylerinin yüz görüntüleri bulunmaktadır. Toplam yüz görüntü sayısı 208'dir.

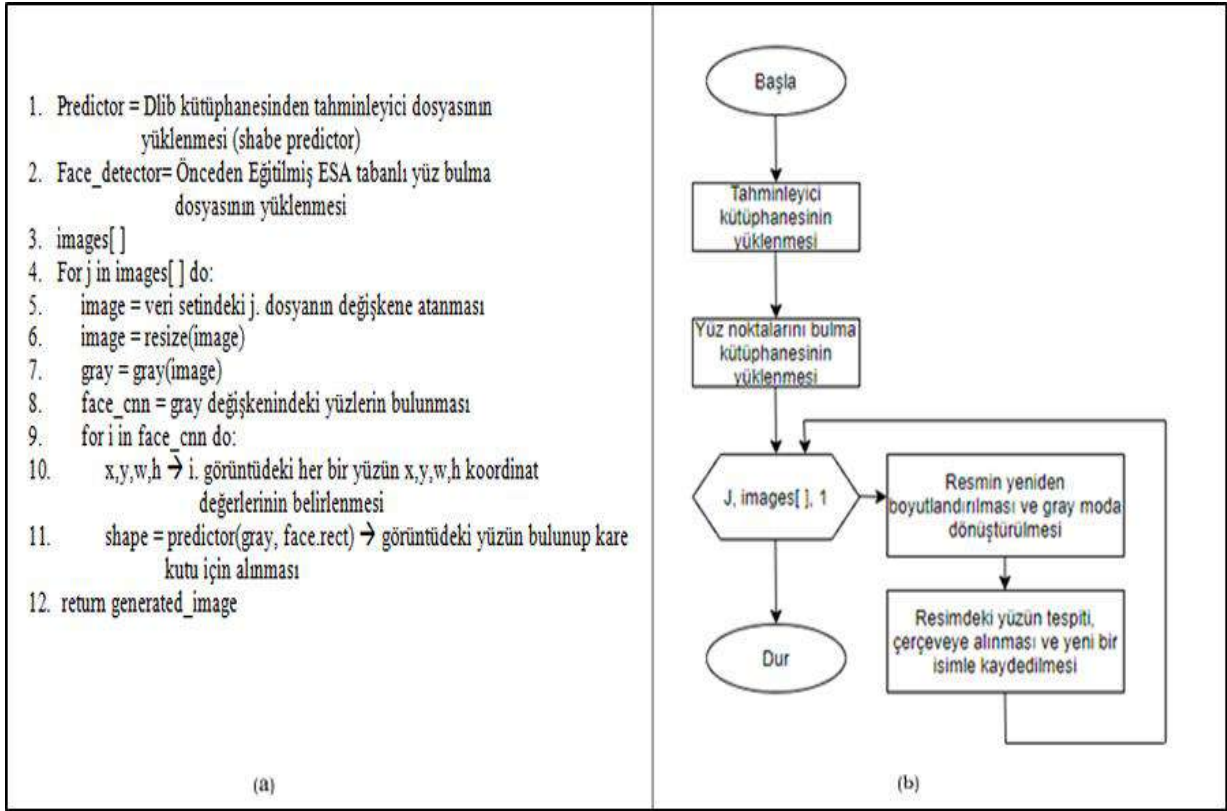


1.Aile						
2.Aile						
3.Aile						
	1.Birey	2.Birey	3.Birey	4.Birey	5.birey	6.Birey

Şekil 2. Aile yüz veri setinden örnek bir kaç aile

### 2.3. Görüntüdeki Yüzlerin Ve Bu Yüzdeki Nirengi Noktalarının Tespiti

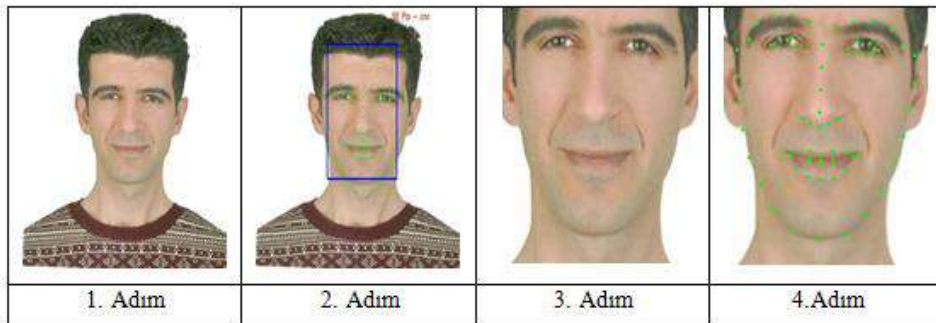
Eğitilebilen birçok katmandan oluşan ve bu sayede yüksek miktarda öznelik üretebilen, ileri beslemeli, ESA mimarisi, diğer yüz tanıma algoritmalarına göre daha hızlı öğrenir [20-22]. ESA yöntemi kullanılarak görüntüdeki yüzün tespiti için hazırlanan programın algoritması ve akış diyagramı Şekil 3'te verilmektedir. Görüntülerdeki yüzlerin tespiti için daha önceden eğitilmiş birçok kütüphaneyi barındıran Dlib kütüphanesi kullanılmaktadır. Hazırlanan programın ilk adımında dlib kütüphanesinden gerekli kütüphane dosyaları yüklenmektedir. Daha sonra her bir görüntü yeniden boyutlandırılıp gray moda dönüştürülmektedir. Ardından her bir görüntüdeki yüzler tespit edilip bu yüzler kare kutu içine alınmaktadır.



**Şekil 3.** ESA yöntemi için kullanılan algoritma (a) ve akış diyagramı (b)

Yüz tanıma, yüz izleme, duygu analizi ve yüz modelleme alanlarında sıklıkla kullanılan yüz nirengileme, insan yüzündeki ağız, burun, kaş, göz ve yüz çehresi gibi ortak bulunan bazı referans noktaların saptanmasıdır [8-10].

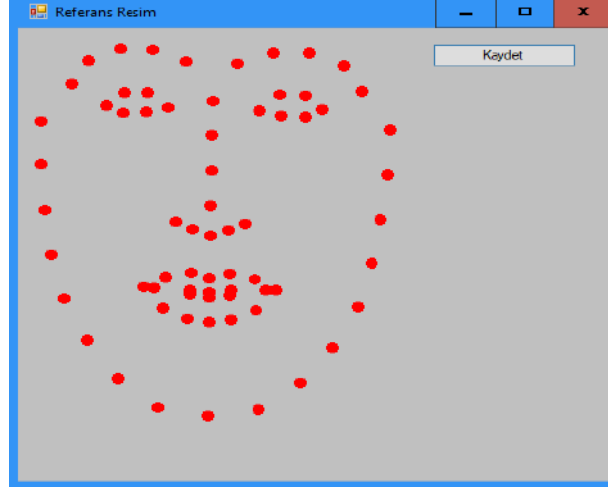
Aktive Shape Model (ASM), 1995'te Tim Cootes ve Chris-Taylor tarafından geliştirilmiştir. Görüntüdeki nesnenin bir örneğine uyması için yenilemeli olarak çalışabilen, esneyebilen bir nesne şeklinin istatistiksel modelidir. Bu yöntem şekilleri, bir dizi noktalarla ifade eder. Oluşturulan bu şekillerin hizalanması için Procrustes Analiz yaklaşımı kullanılır. Hizalanmış verilerin ortak bir ortalamaya sahip olmasıyla iki şekil hizalanmış (eşleştirilmiş) olur [23-25]. Çalışmada kullanılan Aile Yüz veri setindeki tüm görüntülere hazırlanan algoritma uygulanarak öncelikle tüm yüzler daha sonra da bu yüzlerdeki nirengi noktaları tespit edilip veri tabanına kaydedilmektedir (Şekil 4).



**Şekil 4** Veri setindeki görüntülerde yüzün ve yüzdeki nirengi noktalarının tespiti

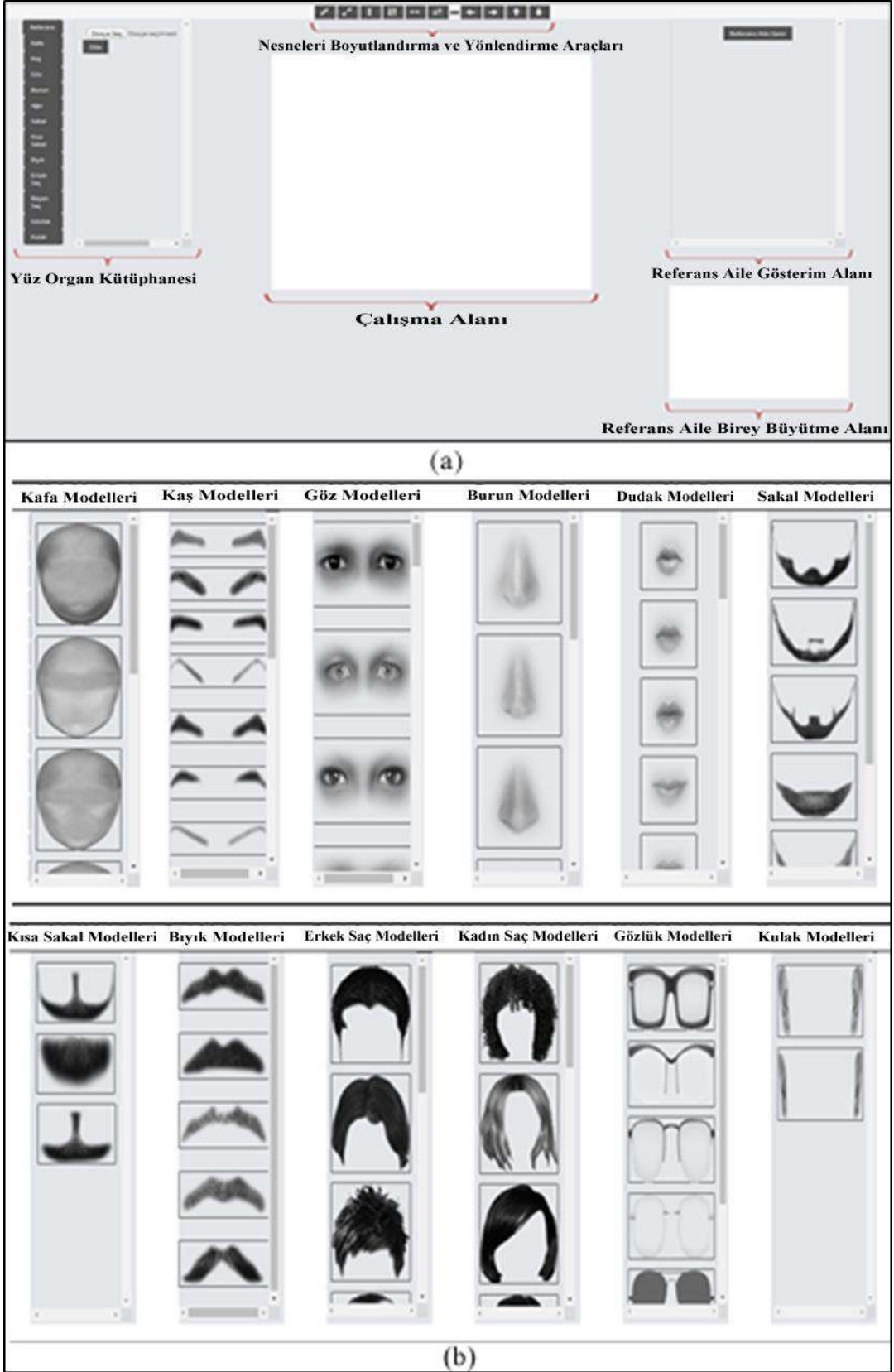
#### 2.4. Aile Referans Modelinin ve Robot Resmin Oluşturulması

Çalışma için Microsoft Visual Studio programında hazırlanan program ile her bir aileyi temsil edebilecek aile referans yüz modeli oluşturulmaktadır. Aile yüz referans modelini oluşturabilmek için öncelikle veri tabanına aile bazlı kaydedilen görüntülerdeki her bireyin yüz nirengi noktaları arasındaki mesafeler Öklid uzaklığı yöntemiyle hesaplanır. Daha sonra bu uzaklıkların aritmetik ortalaması alınarak aileyi temsil edecek bir referans model oluşturulur (Şekil 5).



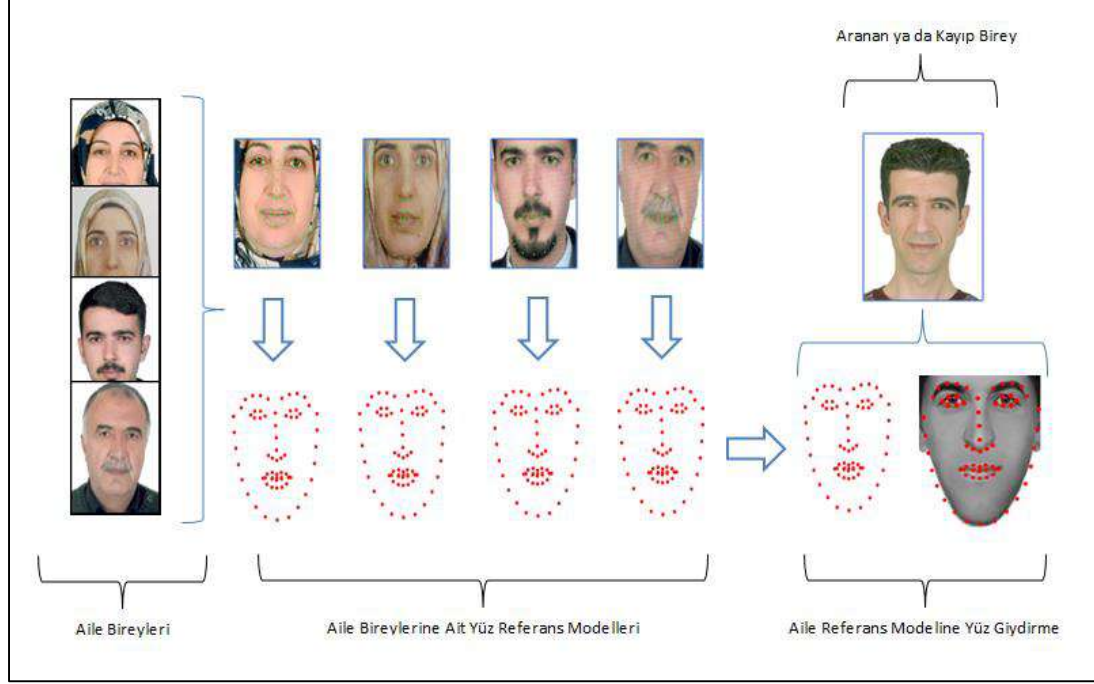
Şekil 5. Aile yüz referans modeli

Aile yüz referans modeline göre robot resmin oluşturulması için html tabanlı bir betik dil olan JavaScript kullanılmıştır. Şekil 6'da bu çalışmaya özgü hazırlanan web tabanlı robot resim oluşturma programının ara yüzü gösterilmektedir.



Şekil 6. (a) Robot resim oluşturma program ara yüzü (b) Organ kütüphanesi

Şekil 7’de sistemin genel yapısı gösterilmektedir. Aile bireylerinden alınan resimler görüntü işleme teknikleri kullanılarak düzenlenir. Makine öğrenmesi yöntemlerinden ESA kullanılarak görüntülerdeki yüzler ve yüz üzerindeki organları gösteren yüz nirengi noktaları belirlenir. Bu nirengi noktalarının temsili koordinat değerleri veri tabanına kaydedilir. Geliştirilen yazılım ile her ailedeki bireylerden oluşan, aileyi en uygun şekilde temsil edecek, aile referans modeli oluşturulur. Web tabanlı hazırlanan robot resim oluşturma programında aile referans modeli baz alınarak, aranan/kayıp bireye göre, yüz giydirme işlemi yapılmaktadır.



Şekil 7. Sistemin çalışmasını gösteren genel blok diyagramı

### 3. Bulgular

Yapılan çalışma kapsamında farklı veri setleri üzerinde yüzleri bulmak için ESA, DSA (Derin Sinir Ağları), YGH-DVM (Yönelimli Gradyan Histogramı - Destek Vektör Makineleri) teknikleri kullanılmaktadır. Bu teknikler kullanılarak veri setleri üzerinde yapılan testlerin sonuçları Tablo 4.’te gösterilmektedir.

Tablo 1. Uygulanan yöntemlerin veri setlerine göre başarı oranları

		ESA	DSA	YGH-DVM
<b>FEI Veri Seti</b>	Başarılı Tahmin Adeti (2800)	2768	2733	2736
	Başarılı Tahmin Oranı	98,86	97,61	97,71
	Zaman Değeri	03:22:20	00:10:33	00:13:40
<b>CelebA Veri Seti</b>	Başarılı Tahmin Adeti (2800)	2797	2682	2737
	Başarılı Tahmin Oranı	99,89	95,79	97,75
	Zaman Değeri	01:40:01	00:03:41	00:01:23
<b>Aile Veri Seti</b>	Başarılı Tahmin Adeti (208)	208	191	199
	Başarılı Tahmin Oranı	100,00	91,83	95,67
	Zaman Değeri	00:07:19	00:00:35	00:00:28

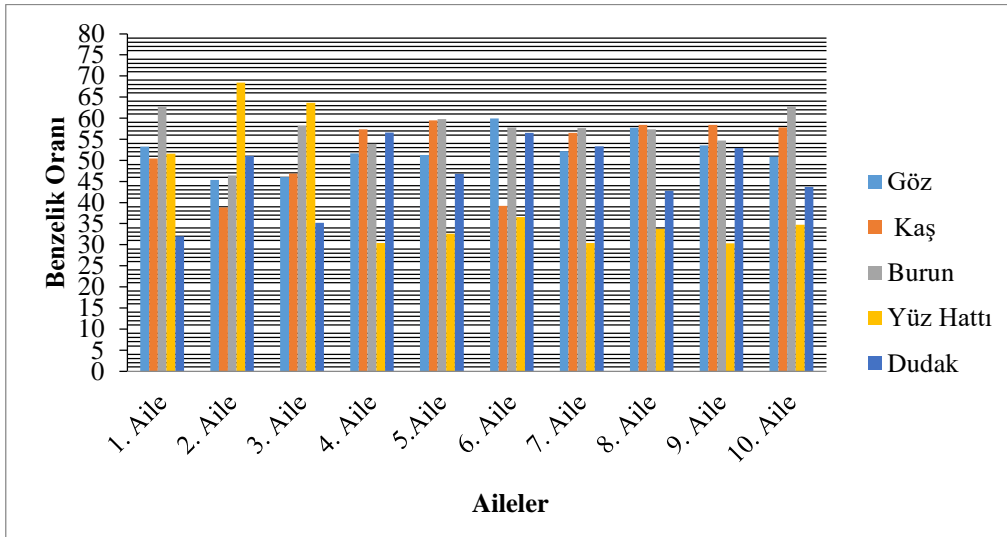
Tablo 1’de gösterilen analiz sonuçları incelendiğinde; En yüksek başarı oranını ESA yöntemi ile, %100 başarılı tahmin ile, Aile Yüz veri seti kullanılarak elde edilmiştir. Diğer yöntemlerin ESA yöntemi kadar başarılı yüz tahmini yapamadığı ama zamansal anlamda ESA yönteminden daha başarılı oldukları görülmüştür. Bu sebeple çalışmada yüzün tespiti ve nirengileme sürecinde ESA yöntemi tercih edilmiştir.

39 aileden oluşan Aile Yüz veri seti üzerinde ESA mimarisi kullanılarak görüntülerdeki yüzler tespit edilmiştir. Daha sonra bu yüzler üzerindeki yüz nirengi noktaları tespit edilip bu noktaların temsili koordinat değerleri veri tabanına kaydedilmiştir. Aile Yüz veri setinden rastgele seçilen 10 ailenin aile içi benzerlikleri test edilmiştir. Bu benzerlik oranları her bir ailedeki bireyin yüz organlarını oluşturan nirengi noktalarının koordinat değerleri arasındaki mesafeler dikkate alınarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 2’de gösterilmektedir.

**Tablo 2.** Aile yüz organlarının benzerlik oranları

	Göz	Kaş	Burun	Yüz Hattı	Dudak
1. Aile	53,25	50,41	62,77	51,56	32,01
2. Aile	45,32	38,84	46,39	68,42	51,02
3. Aile	46,06	46,89	58,21	63,68	35,16
4. Aile	51,69	57,34	53,95	30,41	56,62
5. Aile	51,31	59,50	59,76	32,60	46,83
6. Aile	59,92	39,19	57,79	36,54	56,55
7. Aile	52,17	56,50	57,61	30,40	53,31
8. Aile	57,72	58,44	57,32	33,78	42,75
9. Aile	53,55	58,41	54,71	30,36	52,97
10. Aile	50,93	57,79	62,86	34,72	43,71

Tablo 2’de ailelerdeki bireylerin yüz organlarının benzerlik oranları verilmektedir. 1. Aile bireyleri arası en benzer organın burun olduğu, 2. Aile bireyleri arası en benzer organın yüz hattı olduğu, 3. Aile bireyleri arası en benzer organın yüz hattı olduğu, 4. Aile bireyleri arası en benzer organın kaş olduğu, 5. Aile bireyleri arası en benzer organın burun olduğu, 6. Aile bireyleri arası en benzer organın göz olduğu, 7. Aile bireyleri arası en benzer organın burun olduğu, 8. Aile bireyleri arası en benzer organın kaş olduğu, 9. Aile bireyleri arası en benzer organın kaş olduğu, 10. Aile bireyleri arası en benzer organın burun olduğu görülmektedir. Benzerlik oranlarını gösteren grafik Şekil 8’de verilmektedir.



**Şekil 8.** Aile yüz organlarının benzerlik oranlarını gösteren grafik

Rastgele seçilen 10 aileden oluşturulan referans modele göre yüz giydirme (robot resim oluşturma) işlemi yapılmıştır. Bu robot resimler çalışmada kullanılan uygulama ile yüz ve yüz nirengi noktaları tespit edilip veri tabanına kaydedilmiştir. Daha sonra her aileden seçilen bireye ait robot resim ile gerçek resmin ne kadar



benzediğini test etme adına yüz nirengi noktaları arasındaki mesafe değerleri kıyaslanmıştır. Testlerde tahmin performansının ölçümünde kullanılan istatistiklerden; Hata kareler ortalaması (MeanSquaredError - MSE), Hata kareler ortalamasının karekökü (RootMeanSquaredError - RMSE), Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MeanAbsolutePercentageError - MAPE) kullanılmıştır (Tablo 3).

**Tablo 3.** Tahmin performansı hata ölçüm değerleri

	MAPE	RMSE	MSE
<b>1. Aile</b>	10.34	3.11	9.66
<b>2. Aile</b>	7.14	2.28	5.19
<b>3. Aile</b>	7.41	2.37	5.60
<b>4. Aile</b>	6.10	1.86	3.45
<b>5. Aile</b>	10.20	3.31	10.95
<b>6. Aile</b>	11.23	3.62	13.12
<b>7. Aile</b>	10.64	3.52	12.37
<b>8. Aile</b>	7.41	2.10	4.42
<b>9. Aile</b>	9.74	3.02	9.10
<b>10. Aile</b>	6.88	1.98	3.93

Tahmin doğruluğunu ölçmek için en sık kullanılan istatistiksel yöntem MAPE'dir. MAPE, bireysel mutlak hataların talebe (her döneme ayrı ayrı) bölünmesiyle elde edilir. Aslında, yüzde hatalarının ortalamasıdır [26].

Talandova ve ark. 2016 yılında [29], aile içindeki bireylerin yüz benzerliklerini ölçmek için Biometric Device Broadway 3d aygıtının Turnstile Enrolment Application (TEA) yazılımını kullanmışlardır. Testler için iki aileye ait veri seti kullanmışlardır. Birinci derece akrabalarda benzerlik oranının yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Cao ve ark. 2012 yılında [10], Labeled Faces in the Wild (LFW) veri seti üzerinde aynı bireye ait farklı görüntülerdeki yüzlerini eşleştirmeye çalışmışlardır. Kendi geliştirdikleri algoritma ile %89,73 başarı elde etmişlerdir. Ayrıca Dehshibi ve ark. 2012 yılında [30], 4 aileden oluşan veri setleri üzerinde Yerel Gabor İkili Desen Histogram Dizisi yöntemi kullanarak aile içi yüz benzerliklerini incelemişlerdir. Testler sonucunda aile içi yüz benzerliğinin %40,54 olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada 39 aileden oluşan Aile Yüz veri seti üzerinde ESA yöntemi ve Öklid uzaklığı kullanılarak çekirdek ailedeki bireyler arasında benzerliği bulmak için yapılan testler sonucunda en yüksek benzerlik oranı %68,42 ile yüz hattı olmuştur (bkz. Tablo 1).













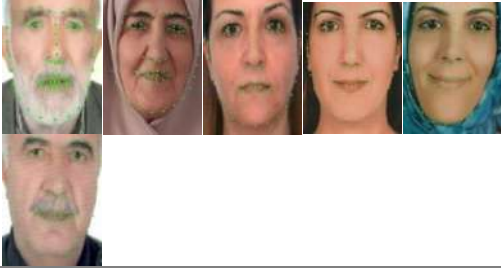


Aileler arasındaki benzersizliği ölçme adına, bir aileden elde edilen tahmin değerleri ile başka bir aileden bir bireyin gerçek değerleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen analiz sonuçları Tablo 4'te gösterilmektedir.

**Tablo 4.** Dört aile benzerlik sorgulama tahmin performansı hata değerleri

	MAPE	RMSE	MSE
<b>1. Aile - 8. Aile Bireyi</b>	16.84	5.16	26.67
<b>4. Aile - 10. Aile Bireyi</b>	22.75	6.97	48.61
<b>9. Aile - 1. Aile Bireyi</b>	20.56	6.21	38.61
<b>6. Aile - 9. Aile Bireyi</b>	21.51	6.81	46.47











Yüz giydirmeye işlemi için rastgele seçilen 10 ailenin ve o ailelerden seçilen bireylerin robot resimleri Tablo 5 ve Tablo 6'da gösterilmektedir.

**Tablo 5.** Rastgele seçilen 10 aile ve o ailelerden seçilen bireylerin robot resimleri

Aileler	Aile Resimleri	Aranan – Kayıp Birey	Robot Resmi
1. Aile			
2. Aile			
3. Aile			
4. Aile			
5. Aile			



**Tablo 6. (devam)** Rastgele seçilen 10 ailenin ve o ailelerden seçilen bireylerin robot resimleri

Aileler	Aile Resimleri	Aranan – Kayıp Birey	Robot Resmi
6. Aile			
7. Aile			
8. Aile			
9. Aile			
10. Aile			

Zhang ve ark. 2011 yılında [31], Han ve ark. 2013 yılında [32], Klum ve ark. 2013 yılında [33] ve Liu ve ark. 2018 yılında [15] farklı veri setleri üzerinde bireylerin görüntüleri ile robot resimlerini eşleştirmek için birçok sistem geliştirmişlerdir. Bu sistemlerde kullanılan algoritmaların kendilerine özgü ama veri setlerinin benzer olabileceğini belirtmişlerdir. Bireylerin robot resimlerini oluşturmak için Holistik yöntemlerin (bilgisayar yazılımları) daha başarılı olduğunu ve veri setleri oluşturulurken genelde bu yöntemin kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir. Literatürde belirtilen çalışmaların test sonuçları dikkate alındığında en yüksek başarı oranının bu yöntem ile %98,70 olduğu görülmektedir [31]. Bu çalışmada da Holistik yöntem temelli bir uygulama hazırlanmıştır. Web tabanlı bu uygulama ile robot resimler oluşturulmaktadır.

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada, ESA yöntemi kullanılarak kaybolan, kaçırılan ya da aranan bireylerin bulunması temeline dayanan bir sistem tasarlanıp, tasarlanan bu sistem ile yüz tahmini yapılmaktadır. Çalışma kapsamında kullanılmak üzere 39 aileden birey görüntüleri toplanmıştır. Literatürde bu tarz bir veri seti bulunmadığı için oluşturulan veri seti ve yapılan çalışma alanında bir ilki temsil etmektedir. Yapılan çalışma ile aile yüz veri setindeki bireylerin görüntülerine ESA yöntemi uygulanarak yüz ve yüz organlarının temsili koordinat değerleri hesaplanmaktadır.

Daha sonra Öklid uzaklık yöntemi ile bu koordinat değerlerinin arasındaki mesafeler tespit edilerek yüz organlarının ölçüleri hesaplanmaktadır. Sonraki adımda bu ölçüm değerleri kullanılarak aileye özgü referans bir yüz modeli çıkartılmaktadır. Son adımda ise bu modele göre yüz giydirme işlemi yapılarak robot resim oluşturulmaktadır.

Rastgele seçilen 10 aileden oluşturulan referans modele göre yüz giydirme (robot resim oluşturma) işlemi yapılmıştır. Bu robot resimlerin her aileden rastgele seçilen bir bireye ne kadar benzediği test edilmiştir. Tahmin doğruluğunu ölçmek için en sık kullanılan istatistiksel yöntem olan MAPE tercih edilmiştir. Tablo 3 incelendiğinde en düşük hata orana sahip aile 6,10 ile dördüncü ailedir. En yüksek hata değerine sahip aile ise 11,23 ile altıncı ailedir. MAPE değeri %10'un altında olan modeller "çok iyi" olarak sınıflandırılmaktadır [27,28].

Tablo 4'te gösterildiği gibi aileler arasından rasgele seçilen dört aile için sorgulama yapılarak tahmin doğruluk değerleri hesaplanmıştır. Bir aileden elde edilen tahmin değerleri ile başka bir aileden bir bireyin gerçek değerleri kıyaslanmaktadır. Test sonuçları incelendiğinde hata oranlarının yüksek olduğu görülmektedir. Yani, rastgele seçilen bir ailenin yüz referans modeli ile bir başka aileden seçilen bir bireyin kıyaslanmasında yüz nirengi noktaları arasındaki mesafelerin uzak olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum tahmin modeli ile gerçek modelin birbirine benzemediğini ve farklı aileler arasında yüz benzerliğinin düşük olduğunu göstermektedir.

Aile içi benzerliği ölçme adına yapılan test sonuçları Tablo 2'de gösterilmektedir. Bu çizelge incelendiğinde, aileler arasında en çok benzerlik gösteren organın burun, en az benzerlik gösteren organın ise dudak olduğu görülmektedir. Ayrıca aileler arasında en çok benzerlik oranını %68,42 ile 2. ailedeki yüz hattı oluşturmaktadır.

İleriye yönelik çalışmalarda;

- Şekil 6'da gösterilen yüz organ kütüphanesine boyun, alın kırıxıklığı, gözaltı kırıxıklığı ve renk bileşenleri gibi yeni bölümler eklenerek kütüphane genişletilebilir. Bu yeni bölümlerin eklenmesi kalıtsal bir benzerlik yaratmasa da robot resim oluştururken benzerlik yüzdesini artırabilir.
- Bir ressam tarafından 12 bölümden oluşan kütüphaneye her bölüm için yeni yüz organları (göz, burun, kaş, dudak, kulak ve kafa modeli), yüz nitelikleri (saç, sakal ve bıyık) ve yüz organ aksesuarları (gözlük, hızma ve piercing) çizilerek kütüphanedeki organların çeşitliliği artırılabilir. Bu sayede robot resim oluştururken benzerlik yüzdesi artırılabilir.
- Geliştirilen sistemde yüz tanıma için kullanılan ESA algoritması geliştirilerek veya farklı algoritmalar kullanılarak başarı oranları artırılabilir.

**Bilgilendirme:** Bu çalışma 2021 yılında Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi İstatistik Ana Bilim Dalı'nda yapılan Doktora tezinden türetilmiştir.

### Kaynaklar

- [1] Anonim. (2020, 9 Nisan). Makine öğrenmesi. [Online]. Erişim: <http://www.prowmes.com/blog/makine-ogrenmesi/>.
- [2] A. Varol ve B. Çebe, "Algorithms of face recognition," 5th International Computer ve Instructional Technologies Symposium, Elazığ, Türkiye, 2011, ss. 22-24
- [3] M. Pişkin. (2020, 3 Mart). Yüz tanıma | Mesut Pişkin. [Online]. Erişim:<http://mesutpiskin.com/blog/yuz-tanima.html>.
- [4] E. Cengil ve A. Çınar, "A new approach for image classification: Convolutional neural network," European Journal of Technic EJT, c. 6, s. 2, ss. 96-103, 2016.
- [5] A. Zhou, J. Chen, J. Ding ve Z. Pan, "Face recognition based on two-stage cnn combined with transfer learning," 2019 IEEE 4th International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC), Xiamen, China, 2020, ss. 401-406.
- [6] F. Ayata, H. Çavuş, M. İnan, E. Seyyarer, E. Biçek ve E. Kına, "Dostroajan: Facial recognition based system input control agent," AJIT-e: Online Academic Journal of Information Technology, c. 11, s. 40, ss. 82-96, 2020.
- [7] R. Godbole ve S. Burad, "Face expression detection using CNN," International Journal of Innovative Research in Technology, c. 5, s. 12, ss. 16-18, 2019.
- [8] O. Çeliktutan, Ç. H. Akakin ve B. Sankur, "İnsan yüzlerinde 2b nirengi noktalarının otomatik saptanması," IEEE 16th Signal Processing, Communication and Applications Conference, 2013, ss. 1-27.
- [9] N. Wang, X. Gao, D. Tao ve W. Liu, "Facial feature point detection: A comprehensive survey," Neurocomputing, c. 275, ss. 50-65, 2014.
- [10] X. Cao, Y. Wei ve F. Wen, "Face alignment by explicit shape regression," 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2012, ss. 2887-2894.
- [11] Z. Feng, J. Kittler, L. Member, W. Christmas ve X. Wu, "A unified tensor-based active appearance face model," ACM Transactions on Multimedia Computing Communications and Applications, 2017, ss. 1-12.
- [12] Z. Zhang, P. Luo, C. Loy ve X. Tang, "Facial landmark detection by deep multi-task learning," European Conference on Computer Vision, Springer, 2014, ss. 94-108.
- [13] U. Ayvaz ve H. Gürüler, "Bilgisayar kullanıcılarına yönelik duygusal ifade tespiti," Bilişim Teknolojileri Dergisi, c. 10, ss. 231-231, 2017.

- [14] T. Whitmarsh, R. Velkamp, M. Spagnuolo, S. Marini ve F. Haar, "Landmarkdetection on 3d facescansbyfacial model registration," 1st International Symposium on Shapes and Semantics, Citeseer, 2008, ss. 71–5.
- [15] D. Liu, J. Li, N. Wang, C. Peng ve X. Gao, "Composite components-based faces ketch recognition," Neurocomputing, c. 302, ss. 46-54, 2018.
- [16] A. K. Jain, B. Klare ve U. Park, "Face matching and retrieval in forensics applications", IEEE Multi Media,c. 19, ss. 1-20, 2012.
- [17] S. M. Iranmanesh, H. Kazemi, S. Soleymani, A. Dabouei ve N. M. Nasrabadi, "Deep sketch-photo face recognition assisted by facial attributes," 2018 IEEE 9th International Conference on Biometrics Theory, Applications and Systems (BTAS), RedondoBeach, CA, USA, 2018, ss.1-10.
- [18] Q. Wan ve K. Panetta, "A Facial recognition system formatching computerized composite sketches to facial photos using human visual system algorithms," 2016 IEEE Symposium on Technologies for Homeland Security (HST), 2016, ss. 1-6.
- [19] B. Akpınar, "Görüntü sınıflandırma için derin öğrenme ile bayesçi derin öğrenme yöntemlerinin karşılaştırılması," Yüksek lisans tezi, İstatistik, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar Üniversitesi, Afyon,Türkiye, 2019.
- [20] S. Akay, "Facial action unit detection in videos using deep neural networks," Yüksek lisans tezi, Bilgisayar Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2018.
- [21] A. Haniçlı, "Evrişimsel sinir ağları kullanılarak ekg ve yüz tabanlı biyometrik tanıma," Yüksek lisans tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa, Türkiye, 2019.
- [22] M. Coşkun, A. Uçar, Ö. Yıldırım ve Y. Demir, "Face recognition based on convolutional neural network," 2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), IEEE, Kremenchuk, Ukraine, 2017, ss. 376-379.
- [23] J. Sung ve D. Kim, "A background robust active appearance model using active contour technique," Pattern Recognition. c. 40, ss. 108-120, 2007.
- [24] R. Shbib ve S. Zhou,"Facial expression analysis using active shape model," International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition,c. 8, ss. 9-22, 2015.
- [25] P. Martins, "Active appearance models for facial expression recognition and monocular head pose estimation," Doktora tezi, Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği, Coimbra Üniversitesi, Coimbra, 2008.
- [26] N. Vandeput. (2020, 28 Ekim). ForecastKPIs: RMSE, MAE, MAPE Bias. [Online]. Erişim: <https://towardsdatascience.com/forecast-kpi-rmse-mae-mape-bias-cdc5703d242d>.
- [27] C. D. Lewis, Industrial and Business Forecasting Methods. Londra: Butterworths Publishing, Boston, London, 1982.
- [28] C. Turhan, G. Gökçen ve T. Kazanasmaz, "Yapay sinir ağları ile İzmir'deki çok katlı binaların toplam enerji tüketimlerinin tahmin edilmesi," 11. Ulusal Tesilat Mühendisliği Kongresi, İzmir, 2013, ss. 411-422.
- [29] H. Talandova, L. Kralik ve M. Adamek, "Determination of the uncertaintiesand the physiological similarities of family members by using the biometric device the broadway 3D," International Journal of Applied Engineering Research, c.11, ss. 6373-6375, 2016.
- [30] M. Dehshibi, J. Shanbezadeh ve M. Alavi, "Facial family similarity recognition using local gaborbinary pattern histogram sequence," 2012 12th International Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS), IEEE, 2012, ss. 219-224.
- [31] C. Zhang ve Z. Zhang, "A survey of recent advances in face detection," Learning-Technical Report MSR-TR-2010-66, <https://doi.org/10.1.1.167.5270>, 2011.
- [32] H. Han, B. Klare, K. Bonnen ve A. Jain, "Matching composite sketches to face photos: a component based approach," IEEE Transactions on Information Forensics and Security, c. 8, ss. 191-204, 2013.
- [33] S. Klum, H. Han, A. Jain ve B. Klare, "Sketch based face recognition: forensic vs. composite sketches," International Conference on Biometrics (ICB), IEEE, 2013, ss. 1-8.
- [34] E. Alimovski ve G. Erdemir , "Veri Artırma Tekniklerinin Derin Öğrenmeye Dayalı Yüz Tanıma Sisteminde Etkisi", İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, c. 3, sayı. 1, ss. 76-80, Nis. 2021.
- [35] İ. Akgül, V. Kaya ve A. Baran, "Examination of facial mask detection using deep learning methods against coronavirus," 4. Uluslararası İpek Yolu Akademik Çalışmalar Sempozyumu, Nevşehir, Turkey, ss.149-154, 2021.
- [36] Rowley, H. A., Member, S., Baluja, S., Kanade, T., Neural network-based face detection, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., 20, pp: 23–38, 1998.
- [37] Viola, P., Jones, M. J., Robust real-time face detection, Int. J. Comput. Vision, 57,2, pp: 137–154, 2004.
- [38] Kozakaya, T., Shibata, T., Yuasa, M., Yamaguchi, O., Facial feature localization using weighted vector concentration approach, Image Vision Computer., 28,5, pp: 772–780, 2010.
- [39] Asteriadis, S., Nikolaidis, N., Pitas, I., Facial feature detection using distance vector fields, Pattern Recogn., 42,7, pp: 1388–1398, 2009.
- [40] Rogers, M., Graham, J., Robust active shape model search, Proceedings of the 7th European Conference on Computer Vision-Part IV, ECCV '02, 2002, pp: 517–530, London, UK, UK. Springer-Verlag.

## Sol-Jel Yöntemi ile Sentezlenen La katkılı CdO Nanoparçacıkların, Yapısal Karakterizasyonu ve Dielektriksel Özelliklerinin Belirlenmesi

Ezgi GÜRGENÇ<sup>1\*</sup>, Aydın DİKİCİ<sup>2</sup>, Fatih BİRYAN<sup>3</sup>, Fehmi ASLAN<sup>4</sup>, Kenan KORAN<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Enerji Sistemleri Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>2</sup> Enerji Sistemleri Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>3</sup> Kimya Bölümü, Fen Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>4</sup> Raylı Sistemler Makine Teknolojisi, Yeşilyurt MYO, Turgut Özal Üniversitesi, Malatya, Türkiye

<sup>5</sup> Kimya Bölümü, Fen Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

\*<sup>1</sup> ezgigurcenc89@gmail.com, <sup>2</sup> adikici1@firat.edu.tr, <sup>3</sup> fatihbiryana@gmail.com, <sup>4</sup> faslan558@gmail.com, <sup>5</sup> kkoran@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 22/10/2021;

Kabul/Accepted: 12/12/2021)

**Öz:** Bu çalışmada, saf ve nadir toprak elementlerinden olan Lantan (La) katkılı kadmiyum oksit (CdO) nanoparçacıkları sol-jel yöntemi ile sentezlendi. Katkılama farklı mol yüzdelinde (1%, 3%, 5% ve 7%) gerçekleştirildi. Sentezlenen nanoparçacıklar FE-SEM, EDX, XRD ve FT-IR analizleri ile karakterize edildi. Farklı oranlardaki La katkılı CdO nanoparçacıkların dielektrik sabiti, dielektrik kayıp faktörü ve ac iletkenlik değerleri oda sıcaklığında frekansın bir fonksiyonu olarak empedans analizör cihazı ile belirlendi. La katkılı nanoparçacıklar sol-jel yöntemi ile başarılı bir şekilde sentezlenmiştir. Sentezlenen nanoparçacıklar küre benzeri formdadır ve La katkılı nanoparçacıkların boyutları saf CdO'ya göre daha yüksektir. Frekansın artması ile birlikte dielektrik özelliklerinde azalma olmuş ve daha yüksek frekanslarda sabit bir değere yaklaşmıştır. 1% La katkısı ile 6.87 olan dielektrik sabiti 7% La katkısı ile 28.15'e yükselmiştir. Dielektrik kayıp değerleri La katkısı ile azalma göstermiştir. 1% La katkısı ile  $9.799 \times 10^{-5}$  S/cm olan iletkenlik değeri 7% La katkısı ile  $6.110 \times 10^{-7}$  S/cm olarak ölçülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Metal Oksit Yarı İletken, Nadir Toprak Elementi, Sol-jel, Nanomalzeme, Dielektrik.

### Structural Characterization and Determination of Dielectrical Properties of La-doped CdO Nanoparticles Synthesized by Sol-Gel Method

**Abstract:** In this study, pure cadmium oxide (CdO) and one of the rare earth elements Lanthanum (La) doped CdO nanoparticles were synthesized by sol-gel method. Doping was carried out at different mole percentages (1%, 3%, 5% and 7%). The synthesized nanoparticles were characterized by FE-SEM, EDX, XRD and FT-IR analyses. The dielectric constant, dielectric loss factor and ac conductivity values of La doped CdO nanoparticles at different ratios were determined as a function of frequency at room temperature with an impedance analyzer device. The La doped nanoparticles were successfully synthesized by the sol-gel method. The synthesized nanoparticles are in spherical form and the dimensions of the La doped nanoparticles are higher than pure CdO. With the increase in frequency, the dielectric properties decreased and approached a constant value at higher frequencies. The dielectric constant, which was 6.87 with 1% La doping, increased to 28.15 with 7% La doping. The dielectric loss values decreased with the doping of La. The conductivity value, which was  $9.799 \times 10^{-5}$  S/cm with 1% La doping, was measured as  $6.110 \times 10^{-7}$  S/cm with 7% La doping.

**Key words:** Metal Oxide Semiconductor, Rare Earth Element, Sol-gel, Nanomaterial, Dielectric.

#### 1. Giriş

Nanoteknoloji, nanometre ölçeğindeki şekil ve boyutlara sahip malzemeler kullanılarak geliştirilen yapıların, sistemlerin ve cihazların üretimini, işlenmesini ve uygulamasını içeren son yıllarda oldukça popüler bir hale gelmiş bir alandır. Nanomalzemeler benzersiz ve kendilerine has fizikokimyasal ve yüzey özelliklerine sahip malzemelerdir. Ayrıca nanomalzemelerin boyutları, mekanik özellikleri, elektronik özellikleri, termal iletkenlikleri ve kimyasal reaktiflikleri oldukça üstündür [1]. Günümüz araştırmacıları son yıllarda II-VI yarı iletken malzemelerinden yararlanarak nanoteknoloji alanında oldukça ilerleme kaydetmişlerdir. Yarı iletkenler, atomların yüksek yüzey/hacim oranları ve kuantum hapsedme etkilerinden dolayı nano boyutlu aralıkta kendilerine has elektronik, elektrik, manyetik, optik ve kimyasal özelliklere sahiptirler. Bu özelliklerinden dolayı yarı

\* Sorumlu yazar: [ezgigurcenc89@gmail.com](mailto:ezgigurcenc89@gmail.com). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-0653-4041, <sup>2</sup> 0000-0003-4892-2277, <sup>3</sup> 0000-0001-9198-3329, <sup>4</sup> 0000-0002-5304-0503, <sup>5</sup> 0000-0002-2218-7211

iletkenler fototransistörler, sensörler, diyotlar, düşük emisyonlu pencereler, ince film dirençleri, bellek cihazları ve süper kapasitörler gibi uygulamalarda kendilerine yer bulmaktadırlar [2]. İletkenlerden, çinko oksit (ZnO), kalay oksit (SnO<sub>2</sub>), indiyum oksit (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), titanyum oksit (TiO<sub>2</sub>), nikel oksit (NiO) ve kadmiyum oksit (CdO) gibi yarı iletken metal oksit nanoparçacıklar mükemmel optik ve elektriksel özelliklere sahiptirler. Bu nedenle bu nanoparçacıklar güneş pilleri, ışık yayan diyotlar, ekranlar, fotovoltaiik hücreler, kızılötesi dedektörler, reflektörler ile optik dalga kılavuzları gibi birçok elektrik ve optoelektronik uygulamalarda kendilerine yer bulmaktadırlar [3, 4]. Bu yarı iletken metal oksit nanoparçacıkları arasında CdO kafes noktalarında yer alan Cd ve O atomları ile NaCl kristal yapısına sahip önemli bir n-tipi yarı iletkenlerdendir. CdO diğer metal oksit yarı iletkenlere göre düşük maliyeti, kimyasal kararlılığı, geniş bant aralığı, düşük elektrik direnci ve görünür bölgede yüksek iletimi gibi üstün özelliklerinden dolayı oldukça ilgi çekicidir [4-6].

Nanoparçacıkların boyutları ve özellikleri hazırlanma koşullarına ve sentezleme yöntemlerine göre değişiklik gösterebilmektedir. CdO nanoparçacıklar günümüzde, sol-jel, sprey piroliz, hidrotermal, kimyasal buhar biriktirme ve kimyasal banyo biriktirme gibi çeşitli metotlarla sentelenebilmektedir [7-9]. Sol jel kullanarak nanoparçacıklar hazırlamanın en önemli avantajları, bileşimin iyi bir kimyasal kontrolünün yapılabilmesi, düşük sıcaklıkta tavlama, nihai ürünün homojenliği, sentez parametrelerinin değiştirilerek parçacık boyutu ve morfolojisinin değiştirilebilmesidir [10, 11].

CdO nanoparçacıklara Ni, Al, Fe, Mn, Cr, La, In, Y, Tl, Sc, Sm, Dy ve Ag gibi metalik iyonlar katılarak elektriksel, optik, termal ve yapısal özellikleri büyük ölçüde değiştirilebilir [12-14]. Yarı iletkenlerin dielektrik sabitleri en önemli özelliklerinden biridir. Bunun nedeni temel ve teknolojik hususların sıcaklık ve büyüklüğe bağlı olmasıdır. Bu nedenle, pratik uygulamalarda nanomalzemenin frekansa bağlı dielektrik sabiti bilgisi oldukça önemli ve gereklidir [15].

Tripathi vd., hafif kimyasal metotla sentezledikleri CdO nanoparçacıkların dielektrik özelliklerini araştırmışlardır [15]. Mikrodalga ışınlama yöntemi ile sentezlenen CdO/SnO<sub>2</sub> nanoparçacıkların dielektrik, EMI ekranlama etkinliği, doğrusal ve doğrusal olmayan optik özellikleri Senthil vd. tarafından araştırılmıştır [16]. Sharmila vd., tutuklanmış çökeltme yöntemi ile sentezlenen ZnO/CdO nanoparçacıkların dielektrik ve iletkenlik özelliklerini araştırmışlardır [17]. Bir başka çalışmada kimyasal birlikte çökeltme yöntemi ile sentezlenen CdO nanoparçacıkların yapısal ve dielektrik özellikleri araştırılmıştır [18]. Bhargava vd., birlikte çökeltme yöntemi ile sentezledikleri Mn katkılı CdO nanoparçacıkların dielektrik ve optik özelliklerini araştırmışlardır [12]. Literatür çalışmaları incelendiğinde bizim fikrimize göre La katkılı CdO nanoparçacıkların sol-jel yöntemi ile sentezlenmesi ve dielektrik özelliklerinin araştırılması ile ilgili bir çalışmaya rastlanmamıştır ve bu yüzden bu çalışmanın yapılması kararlaştırılmıştır.

Bu çalışmada, farklı mol.% oranlarında La katkılanmış CdO nanoparçacıkları sol-jel yöntemi ile sentezlenmiştir. Sentezlenen nanoparçacıkların yapısal karakterizasyonları FE-SEM, EDX, XRD ve FT-IR yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Nanoparçacıkların dielektriksel özellikleri detaylıca incelenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

Kadmiyum (Cd) ve Lantan (La) kaynakları olarak sırasıyla Kadmiyum asetat dihidrat (C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>CdO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O) ve Lantan (III) nitrat heksahidrat (La(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> · 6H<sub>2</sub>O) kullanıldı. 20 ml metanole 0.5 M C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>CdO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O katıldı ve manyetik karıştırıcı ile çözünene kadar karıştırıldı (birinci çözelti). Bir başka beherde 20 ml' lik metanolde 2.5 M NaOH çözüldü ve bu çözelti birinci çözültüye karıştırma devam ederken yavaşça döküldü. Elde edilen çözelti 60 °C' de 2 saat süreyle karıştırıldı ve bu süre sonunda oda sıcaklığına gelinceye kadar beklendi. Daha sonra süzgeç kâğıdıyla çöken parçacıklar süzüldü ve birkaç defa alkolle yıkandı. Bu işlemden sonra saf su ile birkaç defa durulandı ve etüvde 80 °C' de kurutulduktan sonra havanda dövüldü. Elde edilen nanoparçacıklar 450 °C' de 1 saat süreyle fırında tavlandı. La katkılı nanoparçacıkların sentezi de aynı şekilde gerçekleştirildi. Tek fark olarak birinci çözültüye farklı mol.%' lerde (1%, 3%, 5% ve 7%) La(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> · 6H<sub>2</sub>O katıldı. Katılama oranı seçilirken yüksek katkı oranlarının ana malzemenin yapısında değişiklikler meydana getirebileceği ve elde edilen tozların kompozit bir yapıya dönüşebileceği için katılama oranı çalışmanın amacına uygun olarak en fazla 7% olarak seçilmiştir. Sol-Jel yöntemi ile sentezlenen CdO ve La katkılı CdO nanoparçacıkların fonksiyonel gruplarının ve yapısal özelliklerinin karakterizasyonu için Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) ve X-ışını kırınımı (XRD) analizleri gerçekleştirildi. FT-IR analizlerinde Thermo Scientific Nicolet IS5 FT-IR spektrometre ve XRD analizlerinde ise Rigaku D / Max 2200 difraktometre cihazları kullanıldı. FT-IR analizi 4000-550 cm<sup>-1</sup> tarama aralığında yapıldı. XRD analizi, CuKα (λ = 1.5406 Å) radyasyonunda 2θ = 20 ila 80° tarama aralığı ve 40 kV/40 mA' da gerçekleştirildi. Nanoparçacıkların kristal boyutlarını belirlemek için yüksek yoğunluklu (111) ve (200) piklerinden yararlanıldı ve Scherer denklemi yardımıyla kristal boyutları hesaplandı [4];

$$D = 0.9 \lambda / \beta \cos(\theta) \quad (1)$$

burada  $\lambda$ , X-ışınının nm cinsinden dalga boyudur,  $\beta$  radyanda yarı maksimumda tam genişliktir ve  $\theta$  derece cinsinden kırınım açısıdır. Nanoparçacıkların kristal parametreleri, ( $a = b = c$ ) için denklem (2) kullanılarak (1 1 1) pikinden hesaplanmıştır [4];

$$d_{(hkl)} = \frac{a}{\sqrt{(h^2 + k^2 + l^2)}} \quad (2)$$

burada  $d$  iki bitişik düzlem arası uzaklıktır ve  $h, k$  ve  $l$  ise Miller indisleridir. Birim hücrelerin hacimleri ise ( $V$ ) aşağıdaki ilişkidendir hesaplanmıştır [4];

$$V = a^3 \quad (3)$$

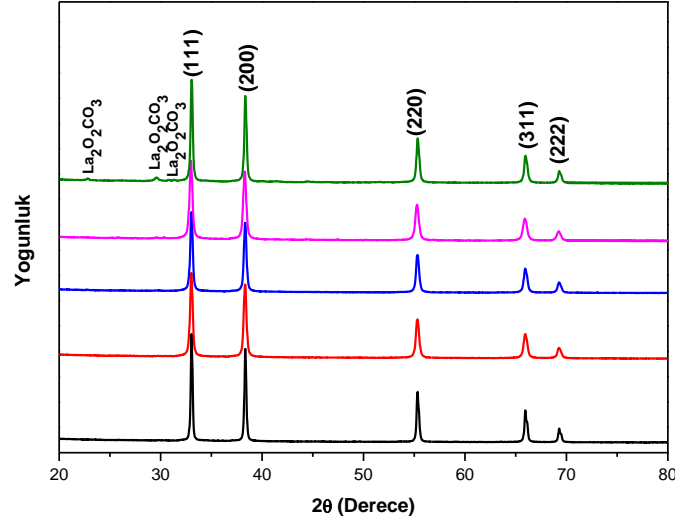
Sentezlenen saf ve La katkılı nanoparçacıklarının morfolojileri ve kimyasal bileşimleri sırasıyla Zeiss Crossbeam 540 marka alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) ve enerji dağıtıcı X-ışını spektroskopisi (EDX) analizi ile incelendi. Pellet haline getirilen numunelerin dielektrik özelliklerini belirlemek için HIOKI IM3536 marka LCR metre kullanıldı. Numunelerin dielektrik parametreleri oda sıcaklığında 1-200 kHz frekans aralığında ölçüldü.

### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. Yapısal Özellikler

Katkısız ve farklı oranlarda La katkılı CdO nanoparçacıkların XRD kırınım desenleri Şekil 1 'de görülmektedir. Tüm kırınım zirveleri 78-0653 numaralı JCPDS kartı ile uyumludur ve CdO' nun kübik fazına mükemmel bir şekilde karşılık gelmektedir. Saf CdO' da  $33.06^\circ$ ,  $38.36^\circ$ ,  $55.36^\circ$ ,  $65.99^\circ$  ve  $69.30^\circ$ ,  $2\theta$  derecelerine karşılık gelen yüksek pikler sırasıyla (111), (200), (220), (311) ve (222) düzlemlerine karşılık gelmektedir. Bu pikler saf CdO' nun karakteristik pikleridir [2, 5, 13]. La katkılı nanoparçacıkların tepe pozisyonları ve yoğunlukları, La katkılama oranına göre farklılık göstermekle beraber yine JCPDS no.78-0653 ile mükemmel şekilde eşleşmektedir. La katkılı numunelerin kırınım desenleri incelendiğinde yüksek katkı oranına sahip numune hariç (7%La-CdO) diğer numunelerde farklı fazlara ait piklere rastlanmamıştır. Bu durum 1%, 3% ve 5% La katkı oranlarında sentezlenen tozların yüksek saflıkta ve tek fazlı yapıda olduğunu teyit etmektedir. Ayrıca, La' nın sentezlenen La katkılı tozlarda CdO konakçı kafesine etkili bir şekilde katkı sağladığını ve La parçacıklarının CdO yüzeyinde iyi bir dağılım gösterdiğini göstermektedir [1, 13]. 7% katkı oranında ise CdO' ya ait karakteristik piklerin yanında yaklaşık  $22.8^\circ$ ,  $29.58^\circ$  ve  $31.33^\circ$   $2\theta$  açılarında  $\text{La}_2\text{O}_3$  piklerine de rastlanmıştır [19]. Bu durumun bu katkı oranında La miktarının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. La katkı oranı arttıkça 7% La katkılı numune hariç diğer numunelerde piklerin bir miktar daha düşük  $2\theta$  açılara kaydıkları görülmüştür. Bu durumun  $\text{La}^{3+}$  iyonlarının CdO kafesi içerisine uniform olarak ikame etmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. İkame durumunda ve farklı iyon yarıçapları nedeniyle ( $\text{Cd}^{3+}$  yarıçapı =  $0.097 \text{ nm} < \text{La}^{3+}$  yarıçapı =  $0.1061 \text{ nm}$ ), bir kafes distorsiyonu meydana gelir ve bu distorsiyon katkı konsantrasyonunun artmasıyla artar [2, 13].  $2\theta$  açılarındaki değişim sınırlı olmuştur bunun nedeni olarak iyonik yarıçaplar arasındaki farkların düşük olması gösterilebilir [13]. Yine bu numunelerde katkı oranı arttıkça pik şiddetlerinin düştüğü görülmüştür. Pik şiddetlerindeki bu düşüş iyonik yarıçap farklarından ve katkılanan atomların konak kafesinin yerini değiştirmesinden kaynaklanmış olabilir [2].

Sentezlenen saf ve farklı oranlarda La katkılı nanoparçacıkların  $2\theta$  değerleri, kırınım düzlemleri, kafes boyutları, birim hücre hacimleri, kristal boyutları ve ortalama kristal boyutlarının hesaplanan değerleri Tablo 1' de verilmiştir. Tüm hesaplanan değerler La katkılama oranının değişiminden etkilenmiştir. Yüksek katkılama oranı hariç diğer numunelerin kafes boyutları ve birim hücre hacimleri saf CdO' ya göre az miktarda daha yüksektir ve katkı oranı arttıkça artmıştır. Yüksek katkı oranında ise kafes parametreleri ve birim hücre hacmi en düşüktür. Farklı katkı elementleriyle ve farklı oranlarda katkılanan CdO' lar ile ilgili yapılan çalışmalarda da kafes parametreleri ve birim hücre hacimlerinde farklılıklar görülmüştür [2, 4, 13]. La katkılı nanoparçacıkların ortalama kristal boyutları saf CdO' dan daha düşüktür ve en düşük değer 5% La katkılı numunede  $14.6426 \text{ nm}$ ' dir. XRD sonuçları saf ve La katkılı CdO nanoparçacıklarının başarı bir şekilde sentezlendiğini ortaya koymaktadır.



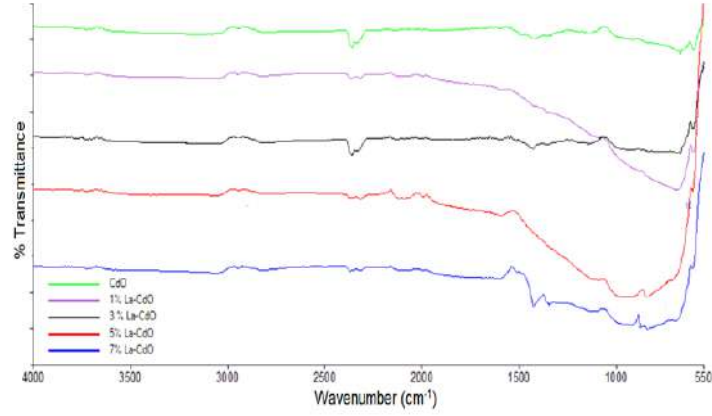
Şekil 1. Sentezlenen nanoparçacıkların XRD analiz sonuçları.

Tablo 1. Sentezlenen nanoparçacıkların  $2\theta$  değerleri, kırınım düzlemleri, kafes boyutları, birim hücre hacimleri, kristal boyutları ve ortalama kristal boyutlarının hesaplanan değerleri.

Numune	Kırınım düzlemleri	$2\theta$ kırınım açıları (derece)	$a=b=c$ (Å)	$V$ (Å <sup>3</sup> )	Kristal boyutu (nm)	Ortalama kristal boyutu (nm)
CdO	111	33.06	4.6896	103.1337	37.2756	36.4391
	200	38.36			35.6026	
1%La-CdO	111	33.04	4.6918	103.2785	25.1889	16.6699
	200	38.35			24.8208	
3%La-CdO	111	33.03	4.6924	103.3181	26.8783	17.7981
	200	38.34			26.5161	
5%La-CdO	111	32.99	4.6990	103.7599	22.0941	14.6426
	200	38.29			21.8336	
7%La-CdO	111	33.06	4.6890	103.0961	30.9406	20.1789
	200	38.36			29.5961	

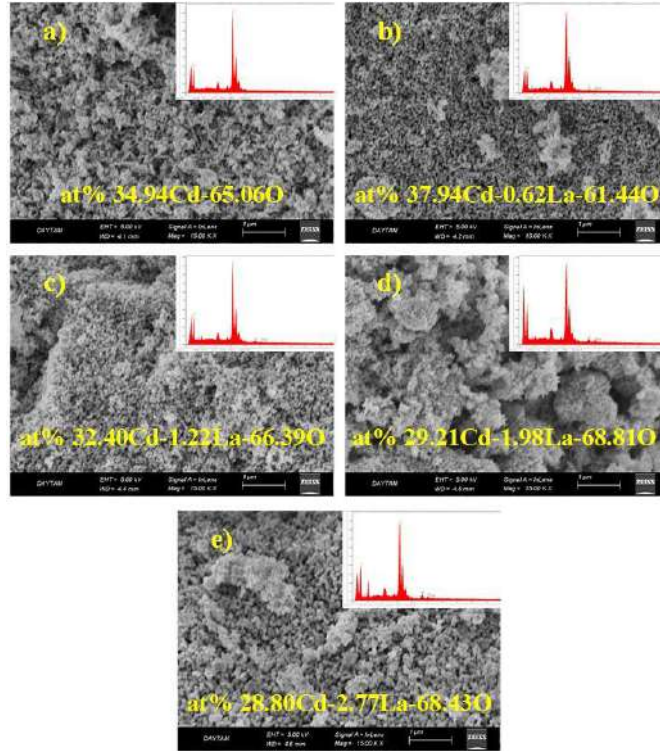
Sol-Jel yöntemi ile sentezlenmiş katkısız ve farklı oranlarda La katkılı CdO nanoparçacıklarının FT-IR spektrumları Şekil 2' de görülmektedir. La katkısının CdO kafesini etkilemesiyle bant yoğunlukları ve pozisyonları değişmiştir. Saf CdO' da yaklaşık  $2939\text{ cm}^{-1}$  ve 1%, 3%, 5% ve 7% La katkılı numunelerde sırasıyla yaklaşık  $2944, 2942, 2942$  ve  $2944\text{ cm}^{-1}$ ' deki bantlar  $\text{CH}_2$  molekülleri için asimetrik ve simetrik modların germe titreşimine atfedilebilir [1, 20]. Saf ve 1% La katkılı numunede yaklaşık  $2361\text{ cm}^{-1}$ , diğer numunelerde ise yaklaşık  $2375\text{ cm}^{-1}$  deki geçirgenlik bantları  $\text{O}=\text{C}=\text{O}$  titreşimine atfedilmektedir [1, 20]. Yaklaşık  $1361$  ve  $1464\text{ cm}^{-1}$  deki geçirgenlik zirveleri, CdO' nun sallanma ve bükülme titreşimleri olarak atanabilir [1]. Yaklaşık  $554$  ile  $668\text{ cm}^{-1}$  arasındaki bantlar metal oksijen (Cd-O) germe titreşimlerine atfedilmiştir [1, 7, 20]. Bu sonuçlar, La' nın CdO nanoparçacıklarına uygun şekilde katkılındığını ve CdO oluşumunun gerçekleştiğini göstermektedir.





Şekil 2. Sentezlenen nanoparçacıkların FT-IR analiz sonuçları.

Şekil 3.' de saf ve La katkılı CdO nanoparçacıkların FE-SEM görüntüleri ve EDX analiz sonuçları görülmektedir. Sentezlenen katkısız ve La katkılı CdO parçacıklar nanoboyuttadırlar ve nanoparçacıkların morfolojileri neredeyse küre benzeri formdadır. Sentezlenen nanoparçacıklar yüksek yüzey enerjilerinden dolayı yer yer topaklanmışlardır [5]. Ölçülen ortalama tanecik boyutları saf ve 1%, 3%, 5% ve 7% La katkılı numuneleri için yaklaşık 43.77, 55.87, 54.26, 50.49, 55.63 nm' dir. La katkılı numunelerin tanecik boyutları saf CdO' ya göre bir miktar daha yüksektir. EDX analizlerinden görüldüğü gibi La katkılı numunelerde La' ya rastlanmış ve La oranı katkı oranı arttıkça beklenildiği üzere artmıştır. Bu durum La katkısının başarıyla gerçekleştirdiğini göstermektedir.



Şekil 3. FE-SEM görüntüleri ve EDX analiz sonuçları a) CdO, b) 1%La-CdO, c) 3%La-CdO, d) 5%La-CdO ve e) 7%La-CdO.



### 3.2. Dielektriksel Özellikler

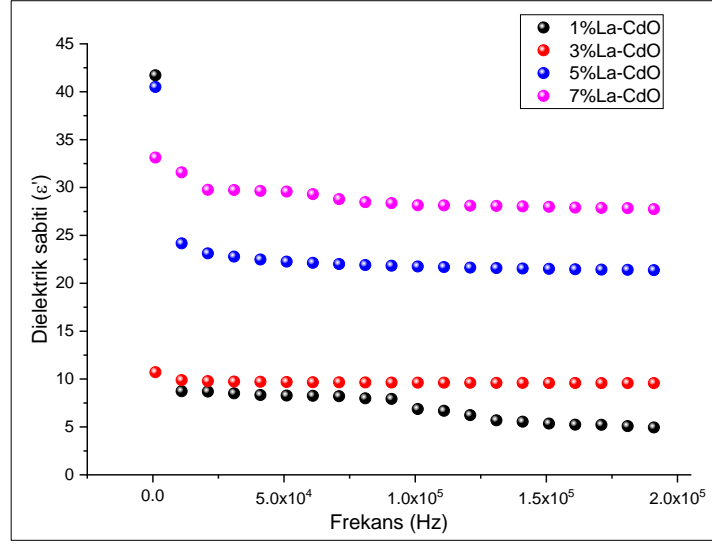
La katkılı CdO nanoparçacıkların dielektrik özelliklerin belirlenmesinde kullanılan en yaygın metod Empedans analizi tekniğidir [21]. Toz halindeki nanoparçacıklar öncelikle 5 ton basınç altında sıkıştırılarak pellet haline getirildi. Kalınlığı ölçülüp, temas alanı hesaplandıktan sonra kondaktörler arasına konulan numunelere elektrik alan uygulanarak dielektrik parametreleri ölçüldü. 1-200 kHz frekans aralığı için kapasitans ( $C_p$ ), kayıp faktörü (DF), iletkenlik ( $G_p$ ) değerleri kaydedildi ve sırasıyla dielektrik sabiti ( $\epsilon'$ ), dielektrik kayıp faktörü ( $\epsilon''$ ), AC iletkenlik ( $\sigma_{ac}$ , S/cm) değerleri Denklem 4-6 kullanılarak hesaplandı [22].

$$\epsilon' = C_p \frac{d}{A\epsilon_0} \quad (4)$$

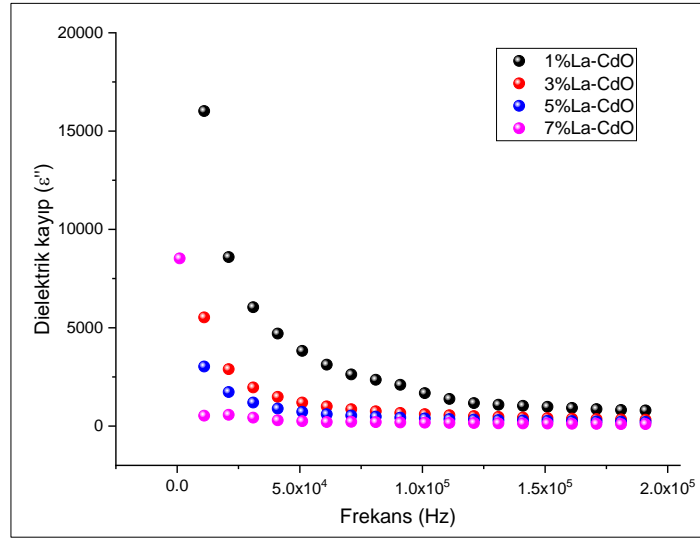
$$\epsilon'' = \epsilon' DF \quad (5)$$

$$\sigma = G_p \frac{d}{A} \quad (6)$$

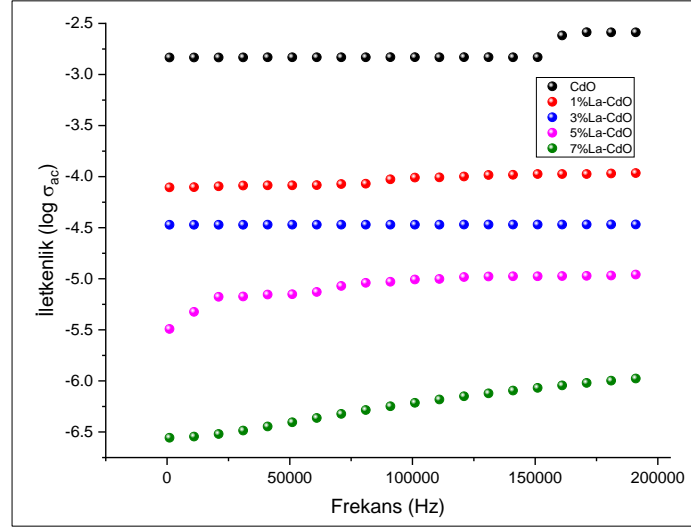
Bu denklemlerde “ $C_p$ ” ile simgelenen değer kapasitans, “ $\epsilon_0$ ”  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m olarak bilinen boşluğun dielektrik sabiti “ $d$ ” nanoparçacık örneklerine ait pellet kalınlığı ve “ $A$ ” numunenin temas alanını ifade etmektedir. CdO nanoparçacıkların artan La katkısı ile elde edilen dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp değerlerinin frekansla değişim grafikleri karşılaştırmalı olarak sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5’te gösterilmiştir. La katkısı ile dielektrik sabiti artış göstermiştir. Düşük frekans bölgesinde dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp değerlerinde artan frekansla önemli bir düşüş olmasına rağmen daha yüksek frekans bölgesinde bu düşme eğilimi oldukça azalmaktadır [23]. Bu durumun nedeninin daha düşük frekans bölgesinde ara yüzey, atomik ve elektronik polarizasyonunun daha etkin olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu etkilerden atomik ve elektronik polarizasyonlar ani gelişen etkileşimlerdir ve dielektrik özelliklerin frekansa bağlılığını çok etkilemez. Ara yüzey polarizasyonu düşük frekans bölgesinde dielektrik özelliklerine en fazla etki eden mekanizmadır [24, 25]. Malzemenin içyapısına bağlı olan dielektrik kayıp değerlerinin frekansla değişiminde de benzer davranış görülmektedir [26]. Dielektrik ölçüm esnasında malzemeye uygulanan elektromanyetik enerjinin bir kısmı da ısı enerjisine dönüşür. Bu enerji malzemenin ısınmasına sebep olur. La katkısının artması ile malzeme içerisindeki iletim kayıpları azalmış ve CdO nanoparçacıkları artan La oranı sayesinde daha az ısınmıştır [27]. AC iletkenlik değerlerinin frekansla değişimi Şekil 6’da gösterilmiştir. İletkenlik, saf ve katkılı numuneler için elektron atlamalı yaklaşımdan kaynaklanır. AC iletkenliğin geliştirilmiş değeri, atlama, tünelleme veya serbest bant iletimi gibi farklı iletim süreçlerinden kaynaklanır [15]. Saf CdO için iletkenlik değeri  $2 \times 10^{-3}$  S/cm olarak gözlenirken La katkısı ile CdO nanoparçacıkların AC iletkenliğinde azalma meydana gelmiştir. 1% La katkısı ile  $9.799 \times 10^{-5}$  S/cm olan iletkenlik değeri 7% La katkısı ile  $6.110 \times 10^{-7}$  S/cm olarak ölçülmüştür. Bunun nedeninin, La katkısı ile malzeme içerisindeki iletim mekanizmasının kısmen de olsa engellendiği düşünülmektedir. Düşük frekanslarda, yük taşıyıcılarının atlama yoluyla rastgele akışının, frekanstan bağımsız bir iletkenliğe yol açtığı gözlemlenebilir. Daha yüksek frekanslarda, La katkılı CdO'nun iletkenliği artan bir eğilim gösterir. La katkılı CdO nanoparçacıkların dielektrik özellikleri Tablo 2’de özetlenmiştir.



Şekil 4. La katkılı CdO nanoparçacıkların dielektrik sabitinin frekansla değişimi.



Şekil 5. La katkılı CdO nanoparçacıkların dielektrik kayıp faktörünün frekansla değişimi.



Şekil 6. La katkılı CdO nanoparçacıkların ac iletkenlik değerinin frekansla değişimi.

Tablo 2. La katkılı CdO nanoparçacıkların Farklı Sıcaklıklarda 10 kHz'deki Dielektrik Sonuçları

Numune	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$\sigma_{ac}$	$\log \sigma_{ac}$
1%La-CdO	6.871	1675.380	$9.799 \times 10^{-5}$	-4.008
3%La-CdO	9.625	603.145	$3.388 \times 10^{-5}$	-4.470
5%La-CdO	21.754	388.028	$9.838 \times 10^{-6}$	-5.007
7%La-CdO	28.150	172.911	$6.110 \times 10^{-7}$	-6.213

$\epsilon'$  : Dielektrik Sabiti;  $\epsilon''$  : Dielektrik Sabiti;  $\sigma_{ac}$ : İletkenlik

#### 4. Sonuçlar

Saf ve La katkılı CdO nanoparçacıklar sol-jel yöntemi ile başarılı bir şekilde sentezlenmiştir. Nanoparçacıkların yapısal özellikleri La katkısından etkilenmiştir. Sentezlenen nanoparçacıklar küresel benzeri yapıdadır. La katkısı ile taneciklerin boyutları bir miktar büyümüştür. La katkılı CdO nanoparçacıkların homojen olmayan içyapıları ve uygulanan elektrik alan sonucu meydana gelen polarizasyonlardan dolayı, dielektrik sabiti ve dielektrik kayıpların düşük frekanslarda daha yüksek olduğu ortaya konulmuştur. Daha yüksek frekans değerlerine çıktığında polarizasyon etkisinin azalması sonucu dielektrik sabiti ve kayıpların azaldığı belirlenmiştir. Kompozit içerisinde artan La oranı ile dielektrik sabiti 6.87'den 28.75'e yükselmiştir. Bu artış La ilavesiyle ara yüzey polarizasyonun artmasından kaynaklanmaktadır. AC iletkenlik değeri 1% La katkısında  $9.799 \times 10^{-5}$  S/cm, 7% La katkısında ise  $6.110 \times 10^{-7}$  S/cm olarak belirlenmiştir. İletkenliğin La katkısı ile azalması elektron atlamalı mekanizmayı kısmen engellemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Bu sonuçlar incelendiğinde ve bu tür malzemelerin elektriksel özelliklerinin frekansa duyarlılığı sebebiyle La katkılı CdO nanoparçacıkları dielektrik kapasitör, mikroelektronik gibi alanlar ve dielektrik özellikler gereken uygulamalar için kullanılabilir.

#### Teşekkür

Yazarlardan Ezgi GÜRGENÇ 100/2000 doktora burs programı ile verdiği burs desteği için Yüksek Öğretim Kuruluna (YÖK) teşekkür eder. E.G. ve A.D. fikir sahibi. E.G. ve F.A. nanoparçacıkları sentezledi ve yapısal özellikleri yorumladı. F.B. ve K.K. dielektrik özellikleri ölçmek için gerekli pelletleri hazırladı ve dielektrik ölçümlerini gerçekleştirdi. E.G., F.B. ve K.K. dielektrik özellikleri yorumladı.

**Kaynaklar**

- [1] Sivakumar S, Venkatesan A, Soundhirarajan P, Khatiwada C P. Synthesis, characterizations and anti-bacterial activities of pure and Ag doped CdO nanoparticles by chemical precipitation method. *Spectrochim. Acta, Part A* 2015; 136: 1751-1759.
- [2] Mohanraj K, Balasubramanian D, Chandrasekaran J, Bose A C. Synthesis and characterizations of Ag-doped CdO nanoparticles for PN junction diode application. *Mater. Sci. Semicond. Process.* 2018; 79: 74-91.
- [3] Gandhi A C, Wu S Y. Strong deep-level-emission photoluminescence in NiO nanoparticles. *Nanomater.* 2017; 7(8): 231.
- [4] Ravichandran A, Xavier A R, Pushpanathan K, Nagabhushana B, Chandramohan R. Structural and optical properties of Zn doped CdO nanoparticles synthesized by chemical precipitation method. *JJ. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 2016; 27(3): 2693-2700.
- [5] Gupta V K, Fakhri A, Tahami S, Agarwal S. Zn doped CdO nanoparticles: structural, morphological, optical, photocatalytic and anti-bacterial properties. *J. Colloid Interface Sci.* 2017; 504: 164-170.
- [6] Ranjithkumar R, Irudayaraj A A, Jayakumar G, Raj A D, Karthick S, Vinayagamoorthy R. Synthesis and properties of CdO and Fe doped CdO nanoparticles. *Mater. Today.* 2016; 3(6): 1378-1382.
- [7] Mosquera E, del Pozo I, Morel M. Structure and red shift of optical band gap in CdO–ZnO nanocomposite synthesized by the sol gel method. *J. Solid State Chem.* 2013; 206: 265-271.
- [8] Tawfik W Z, Esmat M, El-Dek S. Drastic improvement in magnetization of CdO nanoparticles by Fe doping. *Appl. Nanosci.* 2017; 7(8): 863-870.
- [9] Yathisha R, Nayaka Y A, Manjunatha P, Vinay M, Purushothama H. Doping, structural, optical and electrical properties of Ni<sup>2+</sup> doped CdO nanoparticles prepared by microwave combustion route. *Microchem. J.* 2019; 145: 630-641.
- [10] Makwana P, Dhruv D, Solanki S, Boricha H, Satyaprasad A, Ranjan M, Solanki P, Shah N. Modifications in structural, optical and electrical properties of nanocrystalline CdO: role of sintering temperature. *J. Sol-Gel Sci. Technol.* 2019; 89(3): 866-875.
- [11] Pascariu P, Tudose I V, Sucheana M, Koudoumas E, Fifere N, Airinei A. Preparation and characterization of Ni, Co doped ZnO nanoparticles for photocatalytic applications. *Appl. Surf. Sci.* 2018; 448: 481-488.
- [12] Bhargava R, Khan S, Ansari M M N, Ahmad N. Synthesis and characterization of pure and Mn incorporated CdO nanoparticles. *Mater. Today. Proc.* 2018; 5(9): 17636-17640.
- [13] Geetha M, Shivananjaiah H. Structural and photoluminescence properties of La<sup>3+</sup> doped CdO nanophosphors synthesised via green mediated solution combustion route. *J. Rare Earths* 2019; 37(9): 916-923.
- [14] Salem A. Silver-doped cadmium oxide nanoparticles: synthesis, structural and optical properties. *Eur. Phys. J. Plus* 2014; 129(12): 1-12.
- [15] Tripathi R, Dutta A, Das S, Kumar A, Sinha T. Dielectric relaxation of CdO nanoparticles. *Appl. Nanosci.* 2016; 6(2): 175-181.
- [16] Senthil S, Srinivasan S, Thangeeswari T, Madhu B, Silambarasan M. Enhanced dielectric, EMI shielding effectiveness, linear and nonlinear optical properties of CdO/SnO<sub>2</sub> nanocomposites. *Nano-Struct. Nano-Objects* 2020; 24: 100554.
- [17] Sharmila P, Sebastain R M, Sagar S, Mohammed E, Tharayil N J. Dielectric properties and conductivity of (ZnO/CdO) mixed oxide nanocomposite. *Ferroelectr.* 2015; 474(1): 144-155.
- [18] Sagadevan S, Veeralakshmi A. Synthesis, structural, and dielectric characterization of cadmium oxide nanoparticles. *nt. J. Chem. and Mol. Eng.* 2015; 8(12): 1492-1495.
- [19] Choi J, Chung Y H. Preparation of lanthanum oxide and lanthanum oxycarbonate layers on titanium by electrodeposition with organic solution. *J. Nanomater.* 2016; 2016: 5140219.
- [20] Sivakumar S, Venkatesan A, Soundhirarajan P, Khatiwada C P. Thermal, structural, functional, optical and magnetic studies of pure and Ba doped CdO nanoparticles. *Spectrochim. Acta, Part A* 2015; 151: 760-772.
- [21] Gurgenc T, Biryan F. Production, thermal and dielectrical properties of Ag-doped nano-strontium apatite and nano h-BN filled poly (4-(3-(2, 3, 4-trimethoxyphenyl) acryloyl) phenyl acrylate) composites. *J. Polym. Res.* 2020; 27(7): 1-13.
- [22] Gurgenc T. Structural characterization and dielectrical properties of Ag-doped nano-strontium apatite particles produced by hydrothermal method. *J. Mol. Struct.* 2021; 1223: 128990.
- [23] Çalışkan E, Koran K, Görgülü A O, Çetin A. Electrical properties of amino acid substituted novel cinnamic acid compounds. *J. Mol. Struct.* 2020; 1222: 128830.
- [24] Pethrick R A, Hayward D. Real time dielectric relaxation studies of dynamic polymeric systems. *Prog. Polym. Sci.* 2002; 27(9): 1983-2017.
- [25] Çalışkan E, Biryan F, Koran K. Dipeptit Kaplı Manyetik Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanopartikülünün Termal ve Dielektrik Özelliklerinin İncelenmesi. *Türk Doğa ve Fen Dergisi* 2021; 10(1): 259-268.
- [26] Li Y, Cordovez M, Karbhari V. Dielectric and mechanical characterization of processing and moisture uptake effects in E-glass/epoxy composites. *Composites, Part B* 2003; 34(4): 383-390.
- [27] Ilgaz A, Perin D. Karbon Nanotüp Katkılı Levha Kalıplama Pestilinin AC Elektriksel İletkenliğinin ve Dielektrik Özelliklerinin İncelenmesi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 2021; 10(2): 296-303.



## Uzunköy (Zile Batısı, Tokat) Çevresinin Tektonik Özellikleri

Ayhan ÜSTÜNDAŞ<sup>1\*</sup>, Murat İNCEÖZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Teknik Bilimler M.Y.O. Sivas, Türkiye  
<sup>2</sup> Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye  
<sup>\*1</sup> ayhanustundas@gmail.com, <sup>2</sup> minceoz@gmail.com

(Geliş/Received: 26/10/2021;

Kabul/Accepted: 06/12/2021)

**Öz:** Alpin dağ oluşumu hareketlerinin etkili olduğu bölgede Erken Kimmeriyen, Oregoniyen ve Pireniyen orojenik fazlarının izleri saptanmıştır. İnceleme alanında görülen bindirme fayları, Tokat Metamorfikleri ile Amasya Grubu'na ait formasyonların, Çekerek Formasyonu üzerine itilmesiyle ve Çekerek Formasyonu üyeleri arasındaki tektonik dokunaklarla belirgindir. Yaklaşık olarak KD-GB doğrultulu ve KKB'ya eğimli olan bindirme fayları, bölgedeki Orta Eosen sonrası tektonik hareketlere bağlı olarak oluşmuştur. Gerek kıvrım eksenleri gerekse bindirme faylarının sahip oldukları doğrultular, bölgenin Geç Alpin Orojenezi döneminde yaklaşık K-G ve/veya KB-GD doğrultulu basınç gerilmesi etkisinde kaldığını göstermektedir.

**Anahtar kelimeler:** Zile, Tokat Masifi, Amasya Grubu, Bindirme Fayı, Tektonik Klip.

### Tectonics Features of Uzunköy (West of Zile, Tokat, N. Turkey) and its Surroundings

**Abstract:** The area was affected mainly by the Alpine orogenic events and the effects of the Early Cimmeric, Oregonian and the Pyrenean orogenic phases have been determined. Thrust faults were formed in related with overthrusting of Tokat Metamorphics and Amasya Group to Çekerek Formation and of overthrusting members of Çekerek Formation over each other. Thrust faults dipping in NNW direction and striking in NE-SW were formed by tectonic movements after Middle Eocene. Fold axis, and strikes of thrust faults indicate that this region was affected by compressional tectonic regime approximately in N-S and/or NW-SE strike during the period of Late Alpine Orogeny.

**Key words:** Zile, Tokat Massif, Amasya Group, Thrust Fault, Klippe.

#### 1. Giriş

Çalışma alanı Tokat iline bağlı Zile ilçesinin yaklaşık 6 km batısında yer almaktadır. Yaklaşık 270 km<sup>2</sup>'lik bir alanı kapsayan inceleme alanı 1/25.000 ölçekli Çorum H-35 a3 paftasının tamamını, Çorum H-35 a2, Çorum H-35 b1, Çorum H-35 b4, Çorum H-35 c1 ve Çorum H-35 d2 paftalarının bir kısmını içine alır (Şekil 1A, 1B).

Çalışma alanı batıda İğdir köyü ile İkizyaka köyünün oluşturduğu hat ile sınırlanır. Kuzeyde Çaykışla ve Kervansaray köyleriyle, doğuda Palanlı köyü, güneyde Yenidağıcı ve Büyükkarayün köyleriyle sınırlıdır (Şekil 1C).

Çalışma alanı ve yakın çevresinde, 1947 yılından beri araştırmacılar tarafından jeolojik amaçlı çalışmalar yapılmıştır. Baykal [1], Okay [2], Alp [3], Tüysüz [4] genel jeolojik amaçlı, Tatar [5], Koçyiğit [6], Bozkurt ve Koçyiğit [7, 8], Okay ve Tüysüz [9], Koçbulut ve Tatar [10], Koçbulut ve diğ [11] tektonik amaçlı çalışmalar yapmışlardır.

#### 2. Stratigrafi

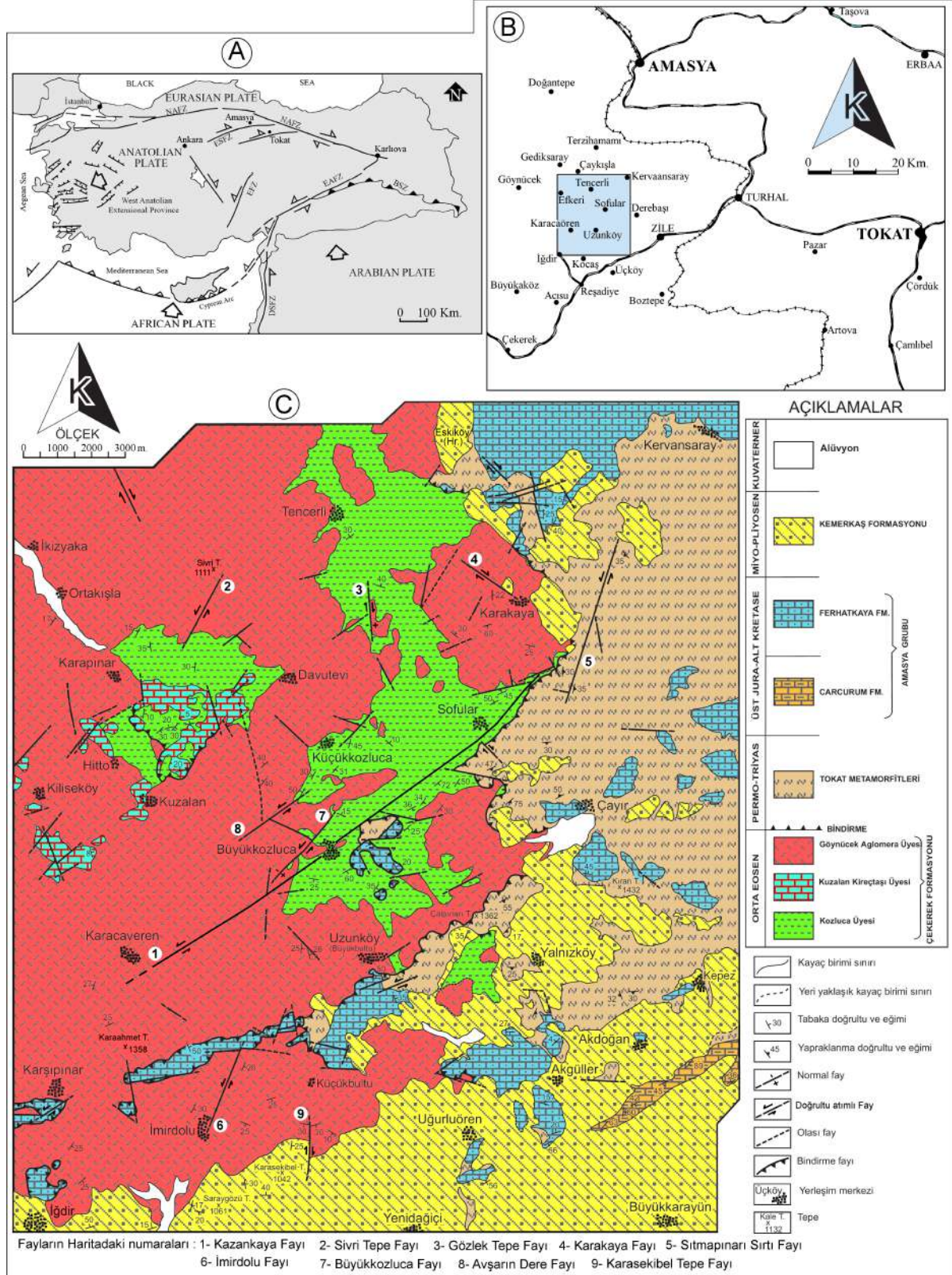
Çalışma alanında yüzeyleyen en yaşlı birim Permo-Triyas yaşlı Tokat Metamorfikleri'dir. Tokat Metamorfikleri, inceleme alanında fillit, mermer, metavolkanitler, metatortullar ve mikaşistler ile temsil edilmektedir. Tokat Metamorfikleri üzerine uyumsuzlukla, kireçtaşlarından oluşan Geç Jura-Erken Kretase yaşlı Amasya Grubu'na ait formasyonlar gelmektedir. Amasya Grubu, birbirine yanal yönde geçişli, litolojik ve fasiyes özelliklerine göre ayrılan Ferhatkaya ve Carcurum formasyonlarından oluşmaktadır. Tokat Metamorfikleri ve Amasya Grubu'na ait kayaçlar, çalışma alanında yer alan Orta Eosen yaşlı Çekerek Formasyonu üzerine tektonik bir dokunakla gelmektedirler. İnceleme alanında geniş yayılımlar sunan Orta Eosen yaşlı Çekerek Formasyonu alttan üste doğru Kozluca üyesi, Kuzalan kireçtaşı üyesi ve Göynücek aglomera üyesi olmak üzere üç üyeden oluşmaktadır. İnceleme alanında uyumsuz bir dokunakla Orta Eosen yaşlı Çekerek Formasyonu üzerinde yer alan

\* Sorumlu yazar: [ayhanustundas@gmail.com](mailto:ayhanustundas@gmail.com). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-9998-5687, <sup>2</sup> 0000-0002-8845-153X



Uzunköy (Zile Batısı, Tokat) Çevresinin Tektonik Özellikleri

Miyö-Pliyosen yaşlı Kemerkaş Formasyonu, genel olarak çakıltı-şakı kumtaşı ardalanması, çamurtaşı, jips ara tabakaları ve travertenlerden oluşmaktadır (Şekil 1C).



Şekil 1. (A) (B) Çalışma alanının konumu ve (C) jeolojik haritası.

### 3. Tektonik

Alp-Himalaya Orojenik Kuşağı içerisindeki önemli bölgelerden biri olan Türkiye'nin tektonik birliklerinin sınıflaması 1800'lü yılların başından bu yana denenmiştir. Bu sınıflamalardan Ketin'in [12] sınıflamasına göre, Türkiye kuzeyden güneye doğru Pontid, Anatolid, Torid ve Kenar Kıvrımları olmak üzere 4 tektonik birliğe ayrılmıştır. Şengör ve Yılmaz'ın [13] sınıflaması, Ketin'in [12] sınıflamasındaki Pontid kuşağını kuzeyde Rodop-Pontid Kıtası ve güneyde Sakarya Kıtası olmak üzere ikiye ayırmıştır. Böylece Türkiye beş tektonik birliğe ayrılmıştır [14].

İnceleme alanı, Anadolu'nun önemli tektonik birliklerinden biri olan Pontid Tektonik Birliği (Sakarya Kıtası) içerisinde, Kuzey Anadolu Fay Zonu ile Kuzey Anadolu Ofiyolit Kuşağı arasında, Blumenthal [15] tarafından Tokat Kristalin Masifi olarak adlandırılmış olan birimi de içeren bölgede yer alır (Şekil 1C).

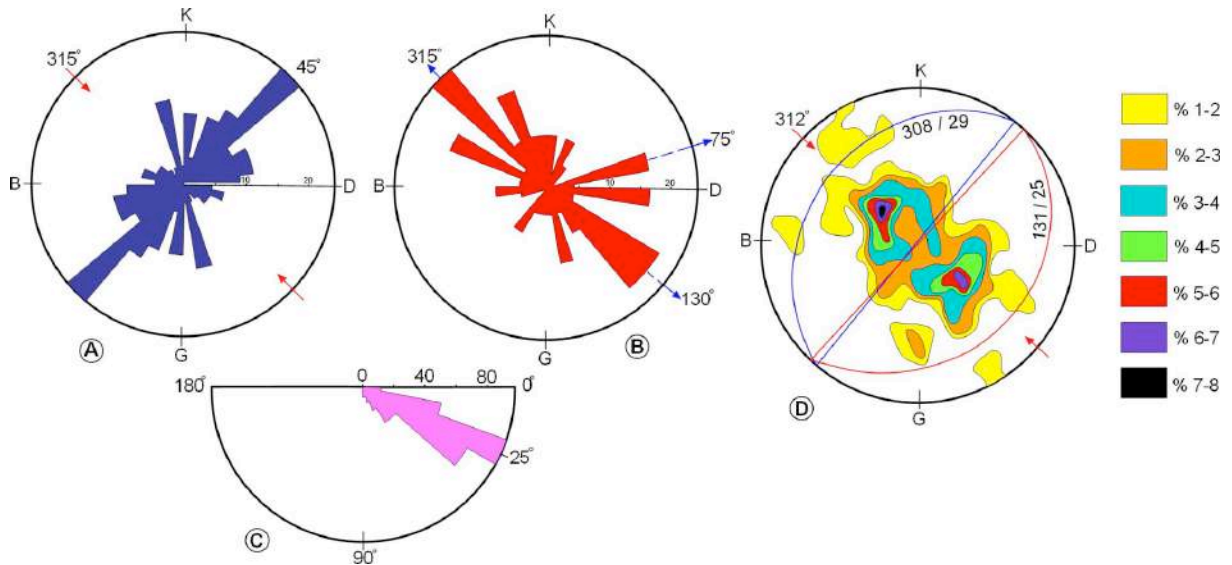
Silüriyen'den günümüze değin etkin olan jeotektonik olaylar hem bölgenin hem de Türkiye'nin tektonik evriminde önemli bir rol oynamıştır.

Aşağıdaki alt bölümlerde, önce çalışma alanında belirlenmiş tabaka duruşları, kıvrımlı yapılar, kırıklı yapılar ve uyumsuzluklar hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra ise, inceleme alanındaki tektonik yapıların mekanik yorumu ve bölgenin jeotektonik evrimi açıklanmıştır.

#### 3.1. Tabaka duruşları

Çalışma alanında, Tokat Metamorfittleri üzerinde uyumsuz olarak yer alan Üst Jura-Alt Kretase, Amasya Grubu'nun Ferhatkaya ve Carcurum formasyonları ile temsil edilmektedir. Ferhatkaya Formasyonu'ndan alınan 23 tabaka duruşu, birimin düzenli bir tabakalanma sergilemediğini göstermektedir. Birimden hemen her yönde tabaka duruşu ölçülmüştür. Oldukça dar bir alanda gözlenen Carcurum Formasyonu'nda ise, daha düzenli bir tabaka duruşu gözlenmektedir. Birimden alınan 14 tabaka duruşundan birkaçı dışındakiler birimin alandaki yüzeyleme uzanımına paralellik sunmaktadırlar. Bu verilere göre birimin egemen doğrultusu yaklaşık K50°D ve eğimi ise yaklaşık 45° GD'ya doğrudur.

İnceleme alanında çok geniş alanlarda yüzeyleyen ve çoğunlukla düzenli bir tabakalanma sunan Orta Eosen yaşlı Çekerek Formasyonu'nu oluşturan Kozluca, Kuzalan kireçtaşı ve Göynücek aglomera üyelerinden toplam 65 tabaka eğim ve doğrultu değerleri ölçülmüş ve bu değerler kullanılarak kontur ve gül diyagramları hazırlanmıştır (Şekil 2). Hazırlanan gül diyagramlarında egemen doğrultu yönü değerinin 45° (Şekil 2A), egemen eğim yönü açılarının 75°, 130° ve 315° (Şekil 2B), egemen eğim açısının ise 25° (Şekil 2C) olduğu saptanmıştır. Aynı tabaka duruşları değerlendirilerek kontur diyagramı da hazırlanmış ve egemen eğim yönü açılarının 131° ve 308° olduğu görülmüştür (Şekil 2D).



Şekil 2. Çekerek formasyonunda ölçülen tabaka duruşlarına ait (A) Doğrultu gül diyagramı, (B) Eğim yönü gül diyagramı, (C) Eğim açısı gül diyagramı ve (D) kontur diyagramı (Toplam 65 ölçü).

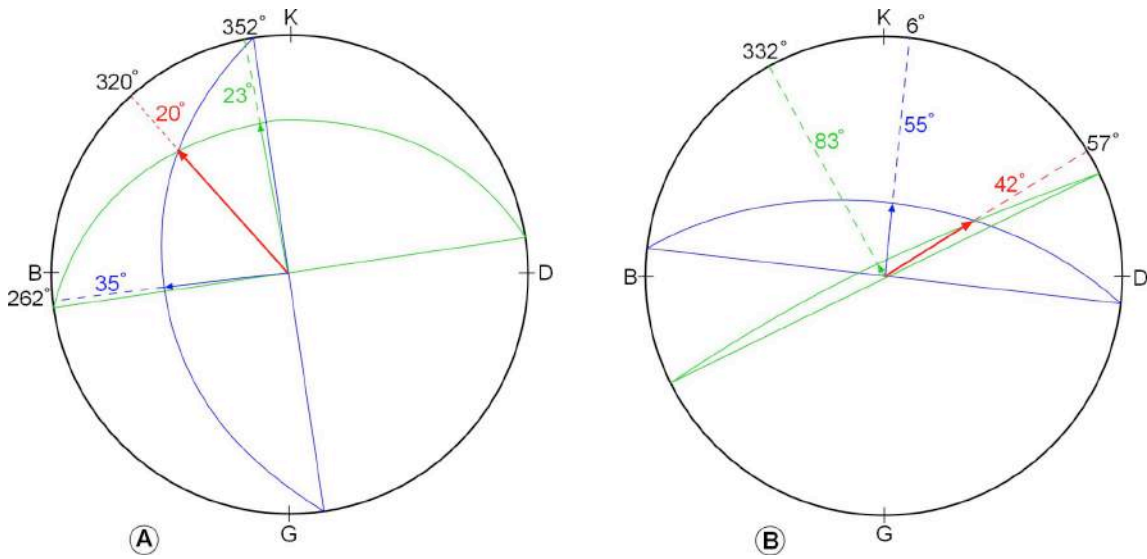


### 3.2 Kıvrımlı yapılar

Çalışma alanında makro ölçekte kıvrımlı yapılar gözlenememiştir. Sahip olduğu litolojik özellikleri nedeniyle, tabaka duruşlarında sıkça değişimler gösteren Çekerek Formasyonu, haritalanamayacak ölçekte küçük boyutlu kıvrımlı yapılar ve basit bükülmeler bulundurmaktadır. Bu tür yapılar, Karapınar köyünün kuzeybatısında ve Eskiköy'ün güneyinde, Tokat Metamorfitlerinin Çekerek Formasyonu'nun Kozluca üyesi üzerine bindirdiği yerde gözlenmektedir.

Karapınar köyünün 500 m kuzeybatısındaki dere yarmasında Çekerek Formasyonu içerisinde gözlenen küçük ölçekli bir antiklinalin kanatlarından biri  $352^{\circ}/23^{\circ}$ , diğeri de  $262^{\circ}/35^{\circ}$  olmak üzere iki tabaka duruşu alınmıştır. Bu veriler kullanılarak hazırlanan  $\beta$ -diyagramından elde edilen kıvrım ekseninin duruşunun  $320^{\circ}/20^{\circ}$  olduğu saptanmıştır (Şekil 3A).

Eskiköy'ün 1 km güneyinde bindirme düzlemi altında Orta Eosen yaşlı Çekerek Formasyonu'nun Kozluca üyesi içerisinde devrik bir antiklinal gelişmiştir. Kanat duruşları  $332^{\circ}/83^{\circ}$  ve  $6^{\circ}/55^{\circ}$  olarak ölçülen devrik antiklinalin kıvrım ekseninin duruşu  $57^{\circ}/42^{\circ}$  olarak saptanmıştır (Şekil 3B). Bindirme düzlemi altında gözlenen bu antiklinal güneye devriktir.



Şekil 3. (A) Karapınar köyünün 500 m KB'sındaki dere yarmasında izlenen kıvrıma ve (B) Eskiköy'ün 1 km G'inde yer alan devrik kıvrıma ait  $\beta$ -diyagramları.

Ayrıca, Çekerek Formasyonu'ndan ölçülen 65 tabaka duruşu değerlendirilerek çizilen kontur diyagramında, tabakaların ortalama olarak güneydoğuya ( $131^{\circ}$ ) ve kuzeybatıya ( $308^{\circ}$ ) doğru eğim kazandıkları belirlenmiştir. Birimi oluşturan tabakaların farklı yönlerde doğru eğim kazanmasıyla ortaya çıkan kıvrım ekseninin duruşu  $219^{\circ}/2^{\circ}$  olarak bulunmuştur (Şekil 2D).

### 3.3. Kırıklı yapılar

Çalışma alanında gözlenen önemli kırıklı yapılar; Sofular bindirmesi, Kuzalan bindirmesi, Karşıpınar, Ziyaret Tepe ve Büyükkozluca klipleri, Kazankaya, Sivri Tepe, Gözlek Tepe, Karakaya, Sıtmapınarı Sırtı, İmirdolu, Büyükkozluca, Avşarın Dere ve Karasekibel Tepe fayları ile Kiliseköy çevresindeki Çekerek Formasyonu'nun, Kuzalan kireçtaşı ve Göynücek aglomera üyeleri arasında gelişmiş daha küçük ölçekli faylanmalar sayılabilir (Şekil 1C).

**Sofular bindirmesi:** İnceleme alanının kuzeyinde yer alan, Eskiköy'ün 1 km güneybatısında normal bir faydan itibaren güneydoğuya doğru izlenmeye başlayan Sofular bindirmesi, Miyo-Pliyosen yaşlı Kemerkaş Formasyonu altından yer yer yüzeyleyerek Karakaya köyünün doğusuna kadar izlenmektedir. Bu noktadan itibaren güneybatıya doğru bir kavis çizerek, adını aldığı Sofular köyünün doğusundan geçen bindirme fayı, en belirgin şekilde burada gözlenmektedir. Sofular köyünün güneyinde normal bir fayla doğuya doğru ötelenen

bindirme fayı, Uzunköy (Büyükbultu)'ün güneyinden geçerek, inceleme alanının güneybatısındaki Karaahmet Tepe'ye (1358 m) kadar uzanmaktadır.

Bindirme hattı boyunca Tokat Metamorfileri, üzerinde yer alan Amasya Grubu'nun Ferhatkaya Formasyonu'na ait kireçtaşları ile birlikte Orta Eosen yaşlı Çekerek Formasyonu'nun yer yer Kozluca üyesi üzerine, yer yer de Göynücek aglomera üyesi üzerine bindirmiştir.

Sofular bindirmesi, inceleme alanında gözlemlendiği hat boyunca bazı kesimlerde genç çökeller tarafından örtülmüştür. Karakaya köyünün kuzeyinde ve doğusunda, harita alanının doğusundaki Çayır köyünün güneybatısında ve alanının güneyindeki Uğurluören köyünün kuzeyinde Miyo-Pliyosen yaşlı Kemerkaş Formasyonu'na ait çökeller, Çayır köyünde ise ayrıca alüvyonlar tarafından örtülmüştür.

Bindirme fayı yer yer, fayın doğrultusuna yaklaşık dik faylarla ötelenmiştir. Ayrıca, fay hattı boyunca Çekerek Formasyonu'nun Kozluca üyesi içerisinde yer yer haritalanamayacak ölçekte kıvrımlı yapılar gelişmiştir.

Faylanmadan etkilenen ve fay izini örten birimlerin yaşları göz önüne alındığında, bindirmenin Geç Eosen-Miyosen zaman aralığında geliştiği söylenebilir.

**Kuzalan bindirmesi:** Çalışma alanının ortabatısındaki Kuzalan köyünün kuzeyinde yer alan bindirme fayı, sivri ucu güneye doğru olan bir V çizmektedir. Yaklaşık 3,5 km uzunluğunda gözlenen bindirme fayı, her iki ucunda da daha genç faylarla kesilmiştir. Bindirme fayı boyunca Orta Eosen yaşlı Çekerek Formasyonu'nun yer yer Kuzalan kireçtaşı üyesi, yer yer de Kozluca üyesi, aynı formasyonun Göynücek aglomera üyesi üzerine bindirmiştir. Bindirme fayının tavan ve taban bloklarında yer alan birimlerin yaşı göz önüne alındığında bindirmenin yaşının Geç Eosen-Erken Miyosen zaman aralığında olduğu kabul edilebilir.

**Büyükkozluca klipi:** Büyükkozluca köyünün yaklaşık 500 m doğusunda yer alan klip yaklaşık olarak toplam 1 km<sup>2</sup>'lik bir alanı kaplamaktadır. Bindirme fayı düzlemi boyunca Tokat Metamorfileri ve Amasya Grubu'nun Ferhatkaya Formasyonu birlikte Çekerek Formasyonu'nun Kozluca üyesi üzerine itilmişlerdir. Klipin Orta Eosen yaşlı Çekerek Formasyonu'nun Kozluca üyesi ile olan bindirme ilişkisi yer yer daha genç faylarla kesilir. Bindirme fayı izini örten herhangi bir birim gözlenememiş olduğundan ve ana bindirme hattının yaşı göz önüne alındığında, faylanmanın yaşının Orta Eosen sonrası ve Miyosen öncesi bir zaman aralığında olduğu söylenebilir.

**Karşıpınar klipi:** İnceleme alanının batı sınırındaki Karşıpınar köyünün hemen güneybatısında yer alan klip, çalışma alanı sınırları içerisinde çok dar bir alanda gözlenmektedir. Yaklaşık olarak güneye doğru eğimli olan bindirme düzlemi boyunca Ferhatkaya Formasyonu, Çekerek Formasyonu'nun Göynücek aglomera üyesi üzerinde yer alır. Klipin kenarları boyunca, bindirme fayını örten herhangi bir birim gözlenememiştir. Ancak daha güneyde benzer yapıda gözlenen Ziyarettepe klipi Miyo-Pliyosen yaşlı Kemerkaş Formasyonu tarafından örtülmüştür. Bindirme fayını örten ve faylanmadan etkilenen birimlerin yaşları göz önüne alındığında, bindirmenin Orta Eosen sonrası ve Miyosen öncesi bir zaman aralığında geliştiği söylenebilir.

**Ziyaret tepe klipi:** Klip, çalışma alanının batı kenarına yakın İğdir köyünün 750 m kuzeybatısındaki Ziyaret Tepe çevresinde yer alır. Yaklaşık 400 m<sup>2</sup>'lik bir alanı kaplayan klipin bindirme düzlemi boyunca, Geç Jura- Erken Kretase yaşlı Ferhatkaya Formasyonu, Orta Eosen yaşlı Çekerek Formasyonu'nun Göynücek aglomera üyesi üzerine bindirmiştir. Klipin güney sınırı, Miyo-Pliyosen yaşlı Kemerkaş Formasyonu'nun travertenli seviyeleriyle örtülmüştür. Faylanmadan etkilenen ve fay hattını örten birimlerin yaşları göz önüne alındığında, bindirmenin Orta Eosen-Miyosen zaman aralığında geliştiği söylenebilir.

**Kazankaya fayı:** Çalışma alanında Sofular köyünün KD'sinden başlayıp GB'ye doğru uzanan fay, Karacaveren köyünün G'ine kadar uzanmakta ve bu noktadan itibaren izlenememektedir. Ancak, MTA'nın 1:250.000 ölçekli Çorum paftası Diri Fay haritasına [16] göre ara ara izlenemeyen Kazankaya fayı, GB'ye doğru adını aldığı harita alanı dışındaki Kazankaya köyüne kadar devam etmektedir. Çalışma alanındaki uzunluğu yaklaşık 11 km olan fay, sol yanal doğrultu atımlıdır.

**Sivri tepe fayı:** Harita alanının kuzeybatısında, Karapınar köyünün 1,7 km kuzeydoğusundan başlayarak kuzeydoğuya doğru izlenen Sivri Tepe fayı, KD'de Sivri Tepe (1111 m)'ye kadar ulaşmaktadır. İnceleme alanında yaklaşık 1,5 km kadar izlenebilen fay hattının GB ucu boyunca Çekerek Formasyonu'nun Göynücek aglomera üyesi ile Kozluca üyesi karşı karşıya gelmiştir. Fay hattı boyunca fay düzlemini ölçme olanağı bulunmamakla birlikte, gözlemler fay düzleminin yaklaşık düşey olduğunu göstermektedir. Faylanmadan etkilenen birimlerin yaşları göz önüne alındığında, faylanmanın Orta Eosen sonrasında meydana geldiği söylenebilir.

**Gözlek tepe fayı:** Harita alanının KB bölümündeki Davutevi köyünün 2 km KD'sinden başlayan ve kuzeye doğru 1,5 km kadar izlenebilen normal bileşenli sağ yanal doğrultu atımlı bir faydır. Yaklaşık K-G doğrultulu fay boyunca Orta Eosen yaşlı Çekerek Formasyonu'nun Göynücek aglomera üyesi ile Kozluca üyesi karşı karşıya gelmiştir. Fayın doğu bloğu düşmüş, batı bloğu yükselmiştir. Faylanmadan etkilenen birimlerin yaşları göz önüne alındığında, faylanmanın Orta Eosen sonrasında meydana geldiği söylenebilir.

**Karakaya fayı:** Karakaya fayı, adını aldığı ve harita alanının orta kuzey bölümündeki Karakaya köyünün içinden başlayarak kuzeybatıya doğru yaklaşık 1250 m kadar devam eden sağ yanal doğrultu atımlı bir faydır.

İnceleme alanında Karakaya fayı boyunca Orta Eosen yaşlı Çekerek Formasyonu'nun Göynücek aglomera üyesi ile Miyo-Pliyosen yaşlı Kemerkaş Formasyonu karşı karşıya gelmiştir. Faylanma, Miyo-Pliyosen'den sonraki bir zaman aralığında meydana gelmiştir.

**Sıtmapınarı sırtı fayı:** Sıtmapınarı Sırtı fayı inceleme alanında, Sofular köyünün 2 km kuzeydoğusundan başlayarak, kuzeydoğuya doğru yaklaşık 3,5 km kadar devam eden normal bileşenli sol yanal doğrultu atımlı bir faydır. Fay boyunca Tokat Metamorfitlelerine ait mermerleri ve diğer litolojileri kesikliğe uğratmıştır. Fayın Triyas sonrasında meydana geldiği söylenebilir.

**İmirdolu fayı:** Harita alanının GB bölümündeki İmirdolu köyünden başlayıp, kuzeydoğuya doğru izlenen fay yaklaşık 2 km uzunluğundadır. Düşey bir fay olan İmirdolu fayı, kuzey ucunda yer alan bir kırık hattını, sol yönlü olarak ötelemiştir. Bu durum fay düzleminin, sol yanal doğrultu atım bileşeninin olduğunu göstermektedir. Faylanmanın Orta Eosen sonrasında oluştuğu söylenebilir.

**Büyükkozlucu fayı:** Harita alanının orta bölümündeki Büyükkozlucu köyünün KB'sinde yer alan KD-GB doğrultulu olarak izlenebilen fay, sol yanal doğrultu atım bileşeni olan normal bir faydır. Yaklaşık 1800 m boyunca izlenebilen fayın duruşu  $144^{\circ}/76^{\circ}$  olarak ölçülmüştür. Faylanma, fayın etkilediği birimlerin yaşlarına göre Orta Eosen sonrası gelişmiştir.

**Avşarın dere fayı:** Büyükkozlucu köyünün 1250 m kuzeybatısında yer alan normal bileşenli sol yanal doğrultu atımlı bu fay, Büyükkozlucu fayına yaklaşık paralel olarak uzanmaktadır. Fay boyunca Orta Eosen yaşlı Çekerek Formasyonu'nun Kozluca ve Göynücek aglomera üyeleri yan yana gelmiştir. Faylanmadan etkilenen birimlerin yaşları göz önüne alındığında, faylanmanın Orta Eosen sonrasında geliştiği söylenebilir.

**Karasekibel tepe fayı:** Harita alanının güneyindeki Küçükbuldu köyünün güneyinden başlayarak, güneye doğru yaklaşık 1100 m izlenebilen sağ yanal doğrultu atımlı bir faydır. Fay hattı boyunca Orta Eosen yaşlı Çekerek Formasyonu'nun Göynücek aglomera üyesi ve Miyo-Pliyosen yaşlı Kemerkaş Formasyonu karşı karşıya gelmiştir. Faylanma, Pliyosen sonrasında meydana gelmiştir.

İnceleme alanında varlığı saptanan ve yukarıda açıklanan belli başlı bu faylardan başka, buraya alınmamış daha küçük ölçekli faylanmalar da söz konusudur. Bu faylanmalar Orta Eosen sonrası tektonik rejime bağlı olarak oluşmuştur. Bu durum, Kiliseköy, Küçükkozlucu ve Karakaya köyleri çevresinde açıkça gözlenmektedir (Şekil 1C).

### 3.4. Uyumsuzluklar

Alpin dağ oluşum hareketlerinin etkisinde kalan bölge, bu hareketlere bağlı olarak etkili olmuş orojenez fazlarının izlerini taşımaktadır. İnceleme alanında, birimlerin konum ve ilişkileri, Alpin orojenezinin Erken Kimmeriyen, Oregonyen ve Pireniyen fazlarının izlerini ortaya koymaktadır.

### 3.5. Bölgedeki tektonik yapıların mekanik yorumu

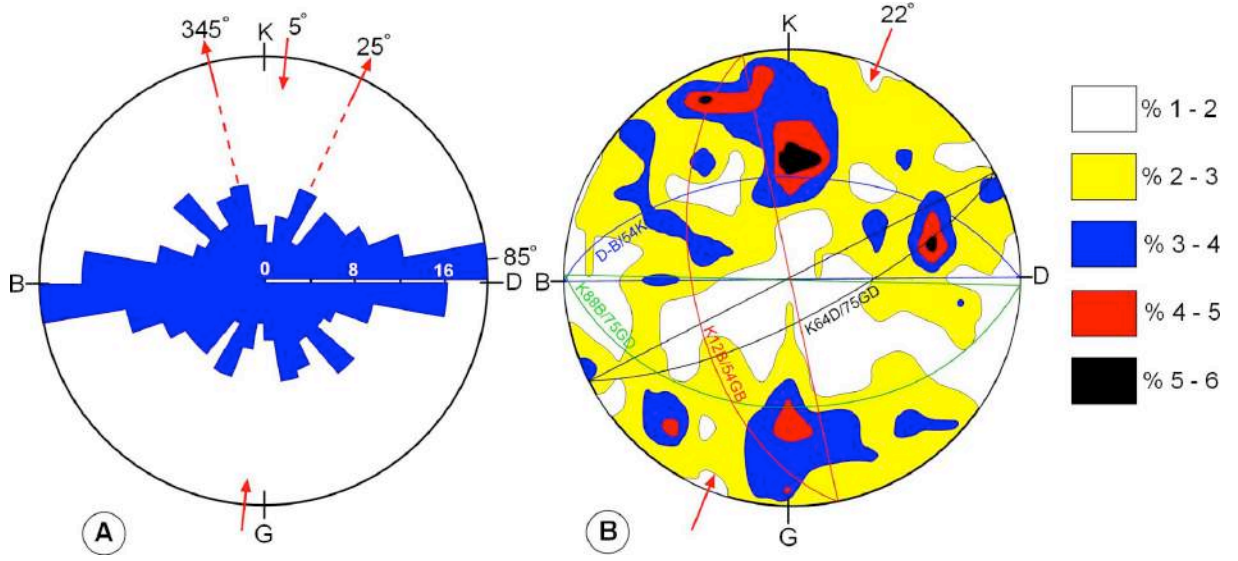
İnceleme alanındaki tektonik unsurların mekanik yorumunun yapılabilmesi için, öncelikle bu yapıları oluşturan gerilme sistemlerinin bilinmesi gerekir. Bu amaçla çalışma alanındaki tabakalı ve kırıklı yapıların kontur ve gül diyagramlarından yararlanılarak kuvvet yönleri saptanmış ve tektonik yapılarla olan mekanik ilişkileri incelenmiştir (Şekil 4). Hazırlanan gül ve kontur diyagramlarından bu kırıkları oluşturan en büyük basınç gerilmesinin Erken Kretase sonunda  $K5^{\circ}-22^{\circ}D-G5^{\circ}-22^{\circ}B$  doğrultusunda etkili olduğu şeklinde yorumlanmıştır.

Bölgede haritalanabilir ölçekteki fayların doğrultuları harita üzerinden ölçülerek doğrultu gül diyagramı hazırlanmıştır. Hazırlanan gül diyagramından, bu fayları oluşturan en büyük basınç gerilmesinin  $K20^{\circ}D-G20^{\circ}B$  doğrultusunda etkili olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 5).

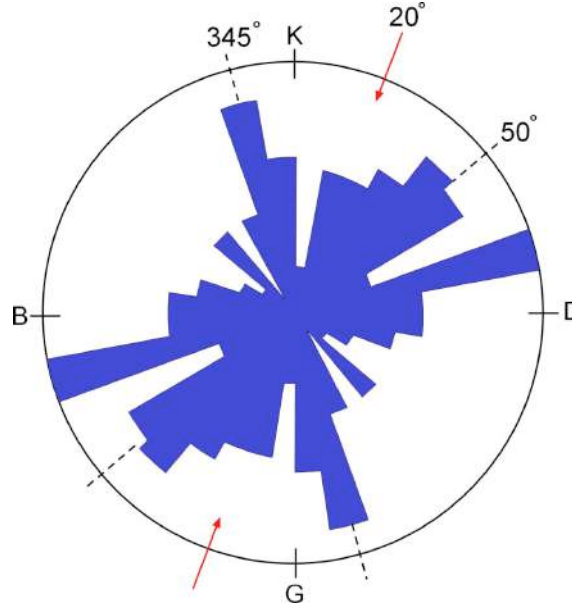
Orta Eosen yaşlı Çekerek Formasyonu'na ait tabakalı yapılardan, kontur diyagramında elde edilen kıvrım eksen doğrultuları ve Erken Kretase öncesi birimler ile Orta Eosen yaşlı birimler arasında gelişen bindirme faylarının doğrultuları  $K40^{\circ}-50^{\circ}D$ 'dur. Bu yapıların gelişmesi, bölgenin Orta Eosen sonunda yaklaşık  $K45^{\circ}B-G45^{\circ}D$  doğrultulu basınç gerilmesinin etkisinde kalmış olduğunu göstermektedir. Çekerek Formasyonu'ndaki tabaka duruşlarından yararlanılarak hazırlanan diyagramlarda da (Şekil 2), Orta Eosen sonundaki ana sıkışma gerilmesinin  $K45^{\circ}B-G45^{\circ}D$  doğrultusunda etkili olduğu anlaşılmaktadır. Bu sonuçlar, kıvrım eksenleri ve bindirme faylarının doğrultuları göz önüne alındığında varılan sonuçlarla uyum halindedir. Bölgenin kuzey-güney doğrultuda daralması ve doğu-batı doğrultuda genişlemesi söz konusudur.

Sonuç olarak, hem bu çalışmada elde edilen sonuçlar ve hem de bölgede yapılan diğer çalışmalarda varılan sonuçlardan da anlaşılacağı gibi, bölgede yer alan tektonik unsurların yaklaşık K-G doğrultulu sıkışma rejiminin etkisi ile geliştiği ve bölgenin yükseldiği sonucuna varılmıştır. Bölgenin yükselmesindeki temel etken, Neo-

Tetis'in kapanımından beri süregelen sıkışmalar ve bu sıkışmalar sonucunda gelişen ve hareket doğrultusu K-G olan bindirmelerdir.



Şekil 4. Ferhatkaya Formasyonu'nda ölçülen kırıklı yapılara ait (A) doğrultu gül diyagramı ve (B) kontur diyagramı (Toplam 194 ölçü).



Şekil 5. İnceleme alanında haritalanabilir ölçekteki fayların doğrultuları kullanılarak hazırlanmış gül diyagramı.

### 3.6. Bölgenin jeotektonik evrimi hakkında düşünceler

Anadolu'nun önemli tektonik birliklerinden biri olan Pontid Tektonik Birliği (Sakarya Kıtası) üzerinde ve Kuzey Anadolu Fay Zonu ile Kuzey Anadolu Ofiyolit Kuşağı arasında yer alan çalışma alanı, içerisinde bulunduğu bölgenin jeotektonik evriminin açıklanmasında yararlanılabilecek önemli veriler içermektedir. İnceleme alanında görülen tektonik yapıların yaklaşık KB-GD doğrultulu basınç gerilmesi etkisinde geliştiği ve bu basınç gerilmesini oluşturan olayın da Neo-Tetisin kuzey kolunun kapanmasıyla gelişen evrim ile ilişkili olduğu birçok araştırmacı tarafından kabul edilmektedir [7-11, 14, 17-20].

Bölgenin jeotektonik evrimini yalnızca çalışma alanından derlenen tektonik verilerle açıklamak oldukça zordur. Bu nedenle inceleme alanı ve yakın çevresinin jeotektonik evrimini açıklarken inceleme alanından elde edilen veriler ile daha önceki çalışmalarda ortaya konan evrim modelleri birlikte değerlendirilmiştir.

Sakarya Kıtası'nda Liyas'tan beri süregelen çökelim Erken Kretase'de ortak bir nitelik kazanmıştır. Bu döneme kadar varlığını sürdüren düzensiz (fay kontrollü) topografya üzerinde farklı su derinliğinde gelişmiş çökellerin, hatta karasal alanların (örneğin Amasya-Zile yöresi) bulunduğu bölge bütünüyle derin bir denizle kaplanmıştır [21]. Bu dönemde, Amasya Grubu'na ait Ferhatkaya ve Carcurum formasyonları çökelmiştir.

Sakarya ve Kırşehir kıtalarında Eosen yeni bir transgresyon ile temsil edilir. Geç Paleosen (?) - Erken Eosen'de başlayan bu çökelim, Sakarya ve Kırşehir kıtaları üzerinde sığ denizel niteliğini korurken, Çankırı Havzası K-G doğrultulu fayların denetiminde, çarpışma sonrası bir havza olarak açılmış [14], bu havzada Çekerek Formasyonu'nun Kozluca üyesine ait tortullar çökelmiştir.

Havza Erken Eosen sonunda en derin haline ulaşmıştır. Bu dönemi takiben havza kenarları havzaya doğru itilip yükselmeye başlamış, böylece kırıntılılar içerisine havza kenarlarından bloklar taşınmıştır. Bu bloklu ve olistostromal birimlerin çökeliminden ardından havza sığlaşmış, Oligosen'de içerisinde kalın karasal çökellerin geliştiği bir dağarası havza niteliği kazanmıştır. Bu dönemde havza kenarlarında ise aşırı kalınlaşmaya bağlı olarak karasal volkanizma gelişmiştir [14]. Bu volkanizmanın sonucu, çalışma alanında geniş yayılımlar sunan Göynücek aglomera üyesi oluşmuştur. Neojen'de ise havzada karasal çökellerden oluşan Kemerkaş Formasyonu'na ait kırıntılılar ve evaporitler çökelmiştir.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, elde edilen belli başlı sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir;

1. Alpin dağ oluşum hareketlerinin etkili olduğu bölgede, Erken Kimmeriyen, Oregoniyen ve Pireniyen orojenik fazlarının izleri, bu fazları temsil eden uyumsuzluk düzlemleriyle saptanmıştır.

2. Yaklaşık KD-GB doğrultulu bindirme fayları (Sofular ve Kuzalan bindirmeleri), inceleme alanının en önemli kırıklı yapılarıdır. Eğimleri her yerde aynı olmamakla birlikte, yaklaşık K'e, KB'ya KD'ya eğimli olan bindirme fayı düzlemleri boyunca Tokat Metamorfileri'nin, Geç Jura-Erken Kretase yaşlı Amasya Grubu formasyonlarıyla birlikte Orta Eosen yaşlı Çekerek Formasyonu'nun üyeleri üzerine itilmiş ve faylanma da Orta Eosen sonrası tektonik hareketlere bağlı olarak gelişmiştir.

3. Gerek kıvrımlı yapılar ve gerekse bindirme fayları yaklaşık K-G ve/veya KB-GD doğrultulu basınç gerilmesi altında oluşmuş tektonik yapılarıdır. Bu yapıları oluşturan basınç gerilmesinin, Neo-Tetis'in kapanımından beri süregelen sıkışmalar sonucu gelişen kuzey-güney yönlü bindirmelerden kaynaklanmıştır.

4. Bölgenin jeotektonik evrimini oluşturan olaylar dizisinin; bölgede Liyas'ta gelişen riftleşme ile açılmaya başlayan Neo-Tetis okyanusunun Erken Kretase'den itibaren kapanmaya başlaması ve bu alanların Miyosen'de tamamen kapanmasıyla kontrol edildiği, daha sonraki tektonik olayların ise, Neo-Tetis'in kapanmasından beri devam eden sıkışma rejimi ile gelişen, K-G doğrultuda hareket eden bindirmelerden kaynaklanmıştır.

#### Kaynaklar

- [1] Baykal F. Zile-Tokat-Yıldızeli bölgesinin Jeolojisi. İstanbul Üniv. Fen Fak. Mecm. Seri B, 1947; 12(3): 191-209.
- [2] Okay AC. Sivas ile Tokat arasındaki bölgenin jeoloji etüdü. İ.Ü. Fen Fak. Mecm. Seri B. 1955; 20(1-2): 95-108.
- [3] Alp D. Amasya yöresinin Jeolojisi. Doktora Tezi, İstanbul Üniv. Fen Fak. Monografileri. İstanbul, Türkiye, 1972.
- [4] Tüysüz O. Amasya ve Çevresinin Jeolojisi. Türkiye 11. Petrol Kongresi, Bildiriler kitabı 1996; Ankara, 32-48.
- [5] Tatar Y. Ofiyolitli Çamlıbel (Yıldızeli) bölgesinin stratigrafisi ve petrografisi. M.T.A. Enst. Derg. 1977; 88: 56-73.
- [6] Koçyiğit A. Hasanoğlan (Ankara) yöresinin tektono-stratigrafisi: Karakaya orojenik kuşağının evrimi. Yerbilimleri 1987; 14: 269-293.
- [7] Bozkurt E, Koçyiğit A. Almus Fault Zone: its age, total offset and relation to the North Anatolian Fault Zone. Turk J Earth Sci. 1995; 4: 93-104.
- [8] Bozkurt E, Koçyiğit A. The Kazova Basin: an active negative flower structure on the Almus Fault Zone, a splay fault system of the North Anatolian Fault Zone, Turkey. Tectonophysics 1996; 265: 239-254.
- [9] Okay AI. Tüysüz O, Tethyan sutures of northern Turkey. Geological Society, London, Special Publications 1999; 156(1): 475-515.
- [10] Koçbulut F, Tatar O. Orta Anadolu Bindirme Kuşağının Akdağmadeni-Yavru arasındaki stratigrafik özellikleri. Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi 2001; 18(2): 103-112.
- [11] Koçbulut F, Kavak KŞ, Tatar O, Analysis of Ezinepazarı-Sungurlu Fault Zone (Turkey) using Landsat TM data and its kinematic implications. Arab. J. Geosci. 2015; 8 (8): 6425-6439.
- [12] Ketin İ. Tectonic units of Anatolia (Asia Minor). Mineral Research and Exploration İns. of Turkey Bull. 1966; 66: 23-34.

- [13] Şengör AMC, Yılmaz Y. Tethyan evolution of Turkey: A plate tectonic approach. *Tectonophysics* 1981; 75: 181-241.
- [14] Tüysüz O. Karadeniz'den Orta Anadolu'ya bir jeotravers: Kuzey Neo-Tetisin tektonik evrimi. *TPJD Bülteni* 1993; 5(1): 1-33.
- [15] Blumenthal MM. Beitrage zur Geologie des Landschaften am Mittleren und unteren Yeşilirmak (Tokat, Amasya, Havza, Erbaa, Niksar), MTA Yayınları, Seri D, 1950; No 4: 1-153.
- [16] Emre Ö, Duman YT, Özalp S, Elmacı H, Olgun Ş. 1:250.000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Harita Serisi, Çorum (NK 36-16) Paftası. Seri No: 30, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye, 2011.
- [17] Barka A. Kuzey Anadolu fay zonundaki bazı Neojen-Kuvaterner havzalarının jeolojisi ve tektonik evrimi. *Türkiye Jeoloji Kurumu, Ketin Sempozyumu*; 1984; Ankara. 209-227.
- [18] Şengör AMC, Yılmaz Y, Sungurlu O. 1985, Tectonics of the Mediterranean Cimmerides. Nature and evolution of the western termination of the Paleo-Tethys: The Geological Evolution of the Eastern Mediterranean (Edts. Dixon JE, Robertson AHF), *Geol. Soc. Spec. Publ.* 17, Blackwell Sci. Publ. 1985; 77-112.
- [19] Okay AI. Tectonic units and sutures in the Pontides, northern Turkey. In: Şengör AMC. (ed.) *Tectonic evolution of the Tethyan region*. Kluwer Academic Publications, Dordrecht 1989; 259: 109-115.
- [20] Tüysüz O, Dellaloğlu AA. Orta Anadolu'da Çankırı Havzası ve çevresinin Erken Tersiyer'deki paleocoğrafik evrimi. *Türkiye 10. Petrol Kongresi, Bildiriler Kitabı* 1994; Ankara. 56-76.
- [21] Altın D, Koçyiğit A, Farinacci A, Nicosia U, Conti MA. Kuzeybatı Anadolu güneyinin Jura-Erken Kretase'de paleocoğrafik evrimi. *Tübitak Doğa Türk Yerbilimleri Dergisi* 1992; 1: 1-9.



## Atık Sulardan Cd(II) İyonlarının Adsorpsiyonu için Doğal Adsorban Olarak Kızılcım (*Pinus Brutia* Ten.) Talaşının Performansının Değerlendirilmesi

Erdem TORUN<sup>1</sup>, Celal DURAN<sup>2\*</sup>, Duygu ÖZDEŞ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ormanlık ve Çevre Bilimleri Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane, Türkiye

<sup>2</sup> Kimya Bölümü, Fen Fakültesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye

<sup>3</sup> Kimya ve Kimyasal İşleme Teknolojileri Bölümü, Gümüşhane Meslek Yüksekokulu, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane, Türkiye

<sup>1</sup> erdemtore@gmail.com, <sup>2\*</sup> cduran@ktu.edu.tr, <sup>3</sup> duyguozdes@hotmail.com

(Geliş/Received: 28/10/2021;

Kabul/Accepted: 11/01/2022)

**Öz:** Bazı ağır metallerin çok düşük derişimlerde bile vücuda alınımı, kan bileşiminin bozulmasına, merkezi sinir sistemi fonksiyonlarında azalmaya ve akciğer, böbrek ve karaciğer gibi organlarda hasarlara neden olabilir. Bu nedenle ağır metal iyonlarının, alıcı ortama verilmeden önce sulardan ve atık sulardan uzaklaştırılması gerekmektedir. Bu çalışmada, Cd(II) iyonlarının sulardan ve atık sulardan adsorpsiyon tekniğiyle gideriminde etkili ve ucuz adsorban olarak kızılçım (*Pinus Brutia* Ten.) talaşının kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Adsorpsiyon deneylerinde kullanılan kızılçım talaşı fiziksel veya kimyasal herhangi bir ön işleme tabi tutulmadan doğal olarak kullanılmıştır. Kızılcım talaşı, çeşitli yöntemlerle karakterize edildikten sonra adsorpsiyon verimi üzerine başlangıç sulu çözelti pH<sup>1</sup>, denge süresi, adsorban miktarı ve başlangıç Cd(II) derişimi gibi deneysel faktörlerin etkileri incelenmiş ve ayrıca endüstriyel atık sularda Cd(II) iyonlarıyla birlikte bulunabilecek bazı tuzların etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlardan optimum pH 6.0 ve denge süresi 240 dk olarak belirlenmiştir. Mekanizma hakkında fikir edinmek için elde edilen verilere izoterm modelleri (Langmuir ve Freundlich) uygulanmıştır. Kızılcım talaşının maksimum adsorpsiyon kapasitesi Langmuir izoterm modeli kullanılarak 11.88 mg g<sup>-1</sup> olarak hesaplanmıştır. Kızılcım talaşının rejenere edilmeden 5 kez kullanılabilceği ve adsorplanan Cd(II) iyonlarının desorpsiyonu için de 2.0 M HCl çözeltisinin uygun olduğu görülmüştür. Sonuç olarak kızılçım talaşının atık sulardan Cd(II) iyonlarının uzaklaştırılmasında etkili bir adsorban olarak kullanılabilceği ortaya konulmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Kızılcım, *Pinus Brutia* Ten., Adsorpsiyon, Ağır Metal, Kadmiyum.

### Evaluation of the Performance of Red Pine Sawdust (*Pinus Brutia* Ten.) as a Natural Adsorbent for Adsorption of Cd(II) Ions from Wastewater

**Abstract:** The intake of some heavy metals such as lead and cadmium, even at very low concentrations, may cause deterioration of blood composition, decrease in central nervous system functions and damage to organs such as lungs, kidneys and liver. For this reason, heavy metal ions must be removed from water and wastewater before being released into the receiving environment. In the present study, the usability of red pine (*Pinus Brutia* Ten.) sawdust as an effective and low cost adsorbent in removal of Cd(II) ions, one of the toxic heavy metals, from aqueous solutions by adsorption method was investigated. The sawdust utilized in the adsorption experiments was used naturally without any physical or chemical pretreatment. After the red pine sawdust was characterized by various methods, the effects of experimental parameters such as initial aqueous solution pH, equilibrium time, amount of adsorbent and initial Cd(II) concentration on the adsorption efficiency were investigated, and the effects of some salts that can be found in industrial wastewater were investigated. From the results obtained, the optimum pH was determined as 6.0 and the equilibrium time was 240 minutes. Isotherm models (Langmuir and Freundlich) were applied to the obtained data in order to elucidate the adsorption mechanism. The maximum adsorption capacity of red pine sawdust was calculated as 11.88 mg g<sup>-1</sup> using the Langmuir isotherm model. It has been seen that red pine sawdust can be used 5 times without regeneration and 2.0 M HCl solution is suitable for desorption of the adsorbed Cd(II) ions. As a result, it has been demonstrated that red pine sawdust can be used as an effective adsorbent in the removal of Cd(II) ions from wastewater.

**Key words:** Red Pine, *Pinus Brutia* Ten., Adsorption, Heavy Metal, Cadmium.

#### 1. Giriş

İnsan vücuduna çoğunlukla beslenme ve hava yolu ile giren ağır metaller biyolojik olarak parçalanamadıklarından canlı organizmalarda birikerek toksik etkilere neden olurlar [1]. Endüstriyel faaliyetlerin son yıllarda hızla ilerlemesiyle ağır metallerin kullanımı daha da artmış ve bu kullanıma bağlı olarak ortaya çıkan kirlilik çevreye, sulara ve özellikle besin zincirine kadar ulaşmıştır [2]. Tolere edilebilir seviyelerden daha fazla

\* Sorumlu yazar: [cduran@ktu.edu.tr](mailto:cduran@ktu.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-1671-8100, <sup>2</sup> 0000-0002-1306-9061, <sup>3</sup> 0000-0002-8692-2676



miktarda ağır metallere maruz kalan insanlarda; kanser, kansızlık, solunum yolu hastalıkları, mide rahatsızlıkları, beyin dokularında tahribat, böbrek yetmezliği, yüksek tansiyon, ruhsal ve nörolojik etkilere bağlı olarak gelişen davranış bozuklukları gibi sorunlar gözlemlenmiştir [3]. Cd(II), en tehlikeli ağır metallere biridir [4]. Çevremizdeki Cd(II) kaynakları; boyalar, plastik katkı maddeleri, CdS ve Zn üretimi yapan işletmelerdir. Ayrıca sigara dumanı da önemli bir kadmiyum kaynağıdır. İnsan vücudu kadmiyumu, esansiyel elementlerden biri olan kalsiyum gibi algılar ve kadmiyum vücutta zamanla birikmeye başlar. Kalsiyum eksikliği nedeniyle kemikler zayıflar ve iskelet ufalanarak sonuçta ölümlere bile neden olabilir [5,6]. Bu nedenlerle endüstriyel faaliyetler sonucunda içme sularına ve besin zincirine kadar ulaşan kadmiyumun ve diğer ağır metallere alıcı ortama verilmeden önce sulardan ve atık sulardan uzaklaştırılması gerekmektedir.

Ağır metallere sulardan ve atıksulardan uzaklaştırılması amacıyla adsorpsiyon [7], kimyasal çöktürme [8], iyon değiştirme [9] ve membran filtrasyonu [10] gibi yöntemler geliştirilmiştir. Adsorpsiyon tekniği, ekonomik oluşu ve kolay uygulanabilirliği açısından yaygın tercih edilen yöntemlerdendir. Adsorpsiyon işleminin etkinliği önemli ölçüde, seçilen adsorbanın özelliğine bağlıdır [11]. Geniş yüzey alanına ve gözenekli yapıya sahip olan aktif karbon, yüksek oranda ağır metal giderim verimine sahiptir. Bu özellikleri açısından ideal bir adsorban olarak değerlendirilse de; pahalı olması ve ülkemizde üretimi sınırlı olması yaygın kullanımını engellemektedir. Bu nedenle aktif karbona alternatif olabilecek adsorbanların geliştirilmesi ve literatüre kazandırılması önem arz etmektedir. Bu amaçla; enginar yaprağından elde edilen biyokömür [12], NaOH ile modifiye edilmiş uçucu kül [13], çam kozalağı biyokömürü [14], ceviz kabuğu [15], mango kabuğu [16] ve portakal kabuğu [17] gibi adsorbanlar çeşitli araştırmacılar tarafından ağır metal iyonlarının gideriminde kullanılmıştır. Diğer taraftan meşe talaşı [18], Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ile modifiye edilmiş kavak ağacı talaşı [19], maleik asit ile modifiye edilmiş çam ağacı talaşı [20], *Aucoumea klaineana* talaşı [21] ve tiyüre ile modifiye edilmiş kavak biyokömürü [22] gibi çeşitli odun talaşı türlerinin Cd(II) iyonlarının adsorpsiyonunda kullanıldığı görülmüştür.

Bu çalışmada ise Kızılcım (*Pinus brutia* Ten.) talaşının Cd(II) iyonlarının sulu çözeltilerden adsorpsiyon yöntemiyle gideriminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Yapılan literatür çalışmasına göre; kızılcım talaşının farklı türden metal iyonlarının adsorpsiyonunda kullanılmış olduğu görülmesine rağmen [23,24], Cd(II) iyonlarının adsorpsiyonunda, adsorban olarak uygulandığı herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Mevcut çalışmada, Cd(II) iyonlarının giderim verimi üzerine; başlangıç sulu çözelti pH'ı, denge süresi, başlangıç metal iyonu derişimi, adsorban miktarı gibi deneysel parametrelerin etkileri detaylı olarak çalışılmış ve şartlar optimize edilmiştir. Adsorpsiyon mekanizması hakkında fikir edinmek ve adsorban kapasitesini hesaplamak için elde edilen veriler çeşitli izoterm modellerine uygulanmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Adsorbanın hazırlanması ve karakterizasyonu

Cd(II) iyonlarının sulu çözeltilerden adsorpsiyon yöntemiyle giderimi için adsorban olarak Kızılcım (*Pinus Brutia* Ten.) talaşı kullanılmıştır. Hem geliştirilen yöntemin maliyetini düşürmek ve hem de fazla kimyasal reaktif kullanımından kaçınmak açısından, kızılcım talaşı herhangi bir kimyasal ön işleme tabi tutulmadan doğal olarak kullanılmıştır. Adsorpsiyon deneylerinde kullanılacak olan kızılcım talaşı öncelikle öğütülmüş ve 0.15 mm'den daha küçük boyuttaki adsorban, 105°C etüvde 24 saat bekletilerek kurutulmuştur. Havadaki bağıl nemin adsorban tarafından emiliminin engellenmesi için de kullanılıncaya kadar desikatörde muhafaza edilmiştir. Adsorbanın karakterizasyonu için; Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrofotometre (FTIR) kullanılmış ve ayrıca nem miktarı ve nötral yük noktasındaki pH (pH<sub>pzc</sub>) analizleri de yapılmıştır.

### 2.2. Kullanılan kimyasallar ve cihazlar

Analitik saflıkta kullanılan tüm kimyasallar Fluka (Buch, Switzerland) veya Merck (Darmstadt, Germany) firmalarından temin edilmiştir. Çalışmaların her aşamasında destile/deiyonize su kullanılmıştır. Cd(II) iyonlarının çalışma ve standart çözeltileri 1000 mg L<sup>-1</sup> derişimindeki stok çözeltisinden seyreltilerek hazırlanmıştır. Adsorban karakterizasyonunda uygulanan FTIR ve SEM analizleri sırasıyla Perkin Elmer 1600 FT-IR model spektrofotometre ve ZIESS Evo Ls 10 model SEM cihazı ile yapılmıştır. Nem tayini için Santen SE 125 model etüv kullanılmıştır. Adsorpsiyon işlemlerinden sonra sulu çözeltide kalan Cd(II) iyonlarının tayini için; Perkin Elmer AAnalyst 400 model alevli atomik absorpsiyon spektrofotometre (FAAS), kesikli yöntemle gerçekleştirilen adsorpsiyon testleri için; BOECO PSU-15i model mekanik çalkalayıcı, adsorban ve adsorbatı birbirinden ayırmak

için; BOECO S-8 model santrifüj cihazı, sulu çözeltilerin pH değerlerinin ayarlanmasında; Hanna pH-2221 model masaüstü pH metre ve adsorban tartımları için; Sartorius BP1106 model analitik terazi kullanılmıştır.

### 2.3. Adsorpsiyon prosedürü

Adsorpsiyon deneyleri çalkalama yöntemi (batch) ile yürütülmüştür. Bu amaçla polipropilen santrifüj tüplerine kızılçam talaşından belli miktarlarda (0.01-1.00 g) tartıldıktan sonra üzerlerine pH'ları seyreltik HNO<sub>3</sub> veya NaOH ile ayarlanmış değişik derişimlerde (50-1000 mg L<sup>-1</sup>) 10 mL Cd(II) çözeltileri ilave edilmiş ve adsorbat/adsorban karışımları 800 dev/dk hızda mekanik çalkalayıcı üzerinde farklı zaman aralıklarında (1-360 dk) çalkalanmıştır. Daha sonra adsorbat çözeltileri adsorbandan 3500 dev/dk hızda 5 dk santrifüj edilerek ayrılmıştır. Çözeltide adsorplanmadan kalan Cd(II) derişimleri FAAS ile tayin edildikten sonra 1 g kızılçam talaşının adsorpladığı Cd(II) miktarı Denklem 1 yardımıyla hesaplanmıştır.

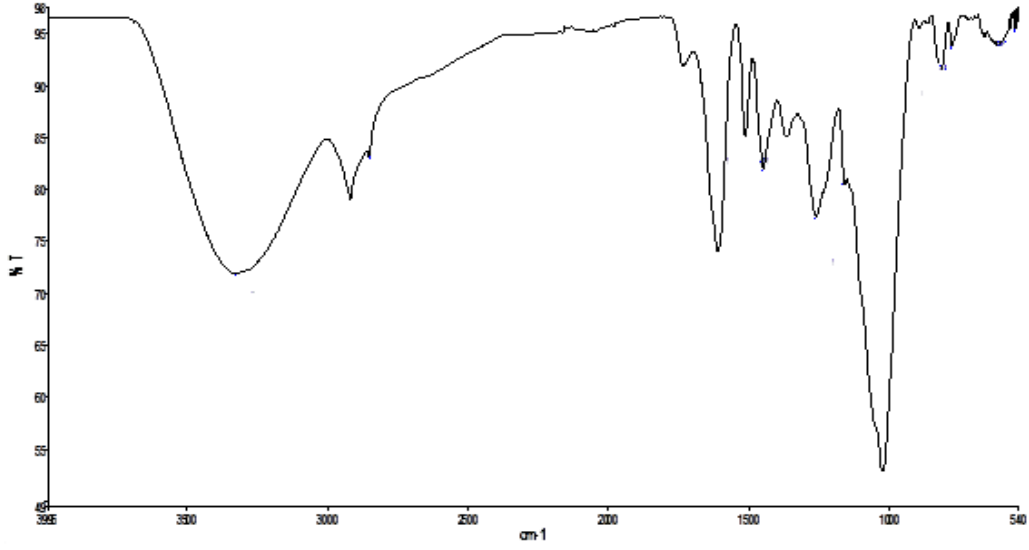
$$q_e = \frac{(C_o - C_e) \times V}{m} \quad (1)$$

Eşitlikte  $q_e$ ; 1 g kızılçam talaşının adsorpladığı adsorbat miktarı (mg g<sup>-1</sup>),  $C_o$ ; başlangıç Cd(II) derişimi (mg L<sup>-1</sup>),  $C_e$ ; dengede çözeltide adsorplanmadan kalan Cd(II) miktarı (mg L<sup>-1</sup>),  $V$ ; çözelti hacmi (mL) ve  $m$ ; adsorban miktarını (g) ifade etmektedir.

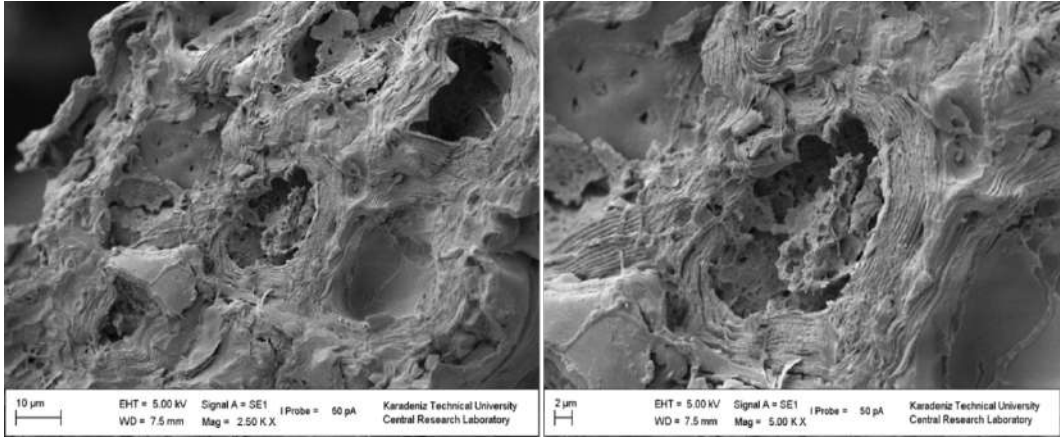
## 3. Bulgular ve Tartışma

### 3.1. Adsorbanın karakterizasyonu

Kızılçam talaşının nem miktarı %9.2 ve  $pH_{pzc}$  değeri ise 3.9 olarak hesaplanmıştır.  $pH_{pzc}$  değerinin 7.0'dan düşük olması, kızılçam talaşının yapısındaki asidik grupların bazik gruplara göre daha baskın olduğuna işaret etmektedir [25].  $pH_{pzc}$  değerini dikkate alarak sulu çözelti pH değerinin değişmesiyle adsorbanın yüzey yükü hakkında yorum yapılabilir. Şöyle ki; adsorbanın net yüzey yükü,  $pH_{\text{çözelti}} < pH_{pzc}$  olduğu durumlarda pozitifken,  $pH_{\text{çözelti}} > pH_{pzc}$  durumunda negatiftir. Böylece adsorbanın  $pH_{pzc}$  değerinden daha yüksek pH değerlerinde yapılan adsorpsiyon çalışmalarında, Cd(II) gibi sulu çözeltide katyonik halde bulunan metal iyonlarının elektrostatik etkileşimden dolayı daha yüksek verimle adsorplanacağı düşünülmektedir. Kızılçam talaşının adsorpsiyondan sorumlu yüzey fonksiyonel gruplarının belirlenmesi amacıyla alınan FTIR spektrumu Şekil 1'de gösterilmiştir. Spektrum incelendiğinde; 3324.15 cm<sup>-1</sup>, 2919.23 cm<sup>-1</sup>, 1610.99 cm<sup>-1</sup>, 1366.17 cm<sup>-1</sup>, 1261.81 cm<sup>-1</sup> ve 1023.49 cm<sup>-1</sup>'de pikler olduğu görülmektedir. 3324.15 cm<sup>-1</sup> dalga boyunda gözlenen pik, numunede mevcut alkolik, karboksilik ya da hidroksil grup içeren fenolik -OH gruplarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu pik kızılçam talaşının içerdiği nem, alkol ya da fenol gruplarından kaynaklanıyor olabilir. 2919.23 cm<sup>-1</sup>'deki pik alifatik yapıdaki C-H titreşim bağlarını temsil etmektedir [26]. 1610.99 cm<sup>-1</sup> yapıdaki C=C bağlarına işaret etmektedir. 1366.17 cm<sup>-1</sup> ve 1261.81 cm<sup>-1</sup>'de görülen pikler, C-N ve C=S esneme titreşimlerine ve 1023.49 cm<sup>-1</sup>'de görülen pik C-O gerilimine ait olabileceği düşünülmektedir [27]. Kızılçamın yüzey morfolojisini incelemek için elde edilen SEM görüntüsü Şekil 2'de verilmiştir. Doğal kızılçam talaşının Cd(II) iyonlarının sulu çözeltiden adsorplanmasına imkan sağlayacak gözenekli bir yapıya ve lifli bir dokuya sahip olduğu Şekil 2'den görülmektedir.



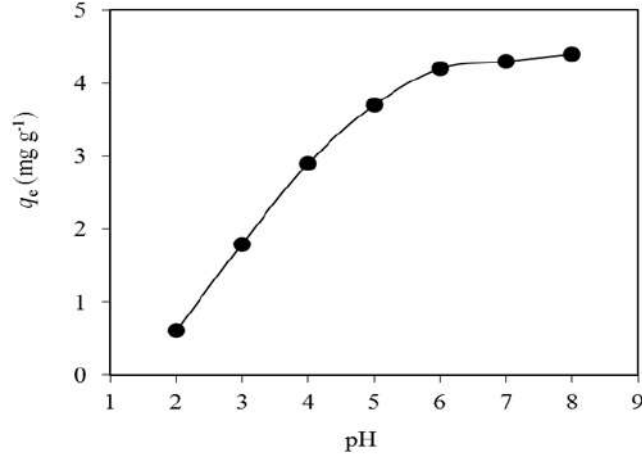
Şekil 1. Kızılcım talaşına ait FTIR spektrumu



Şekil 2. Kızılcım talaşına ait SEM görüntüleri

### 3.2. Başlangıç sulu çözelti pH'nın giderim verimi üzerine etkisi

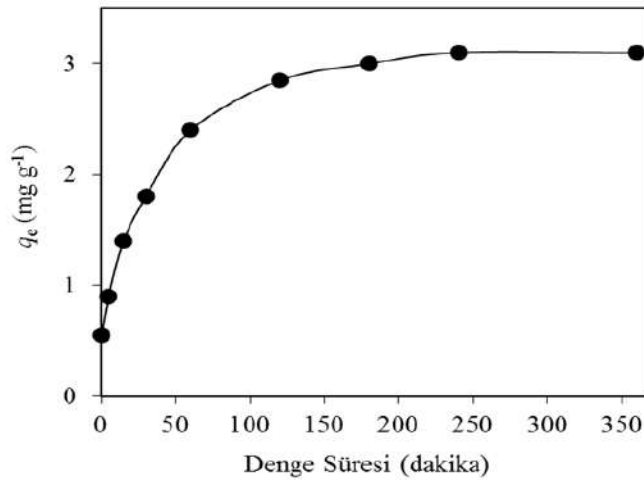
Cd(II) iyonlarının kızılcım talaşı üzerine adsorpsiyonuna başlangıç sulu çözelti pH'nın etkisi, pH 2.0–8.0 aralığında incelenmiştir. Sulu çözülden metal iyonlarının adsorpsiyonu oldukça karmaşık mekanizmalar içermekle birlikte, baskın etkileşim türünün, metal iyonu ile adsorban yüzeyi arasında gerçekleşen elektrostatik etkileşim olduğu düşünülmektedir. Sulu çözeltinin pH değeri azaldıkça yani asidik ortam oluştuğunda, adsorban çevresinin  $H_3O^+$  iyonlarıyla çevrilmiş olması nedeniyle yüzey fonksiyonel grupları pozitif yüklü hale gelir. Cd(II) iyonlarının da sulu çözeltide katyonik halde bulunması nedeniyle, asidik pH değerlerinde  $H_3O^+$  iyonları elektrostatik itmeden dolayı Cd(II) katyonlarının adsorbana yaklaşmasını engeller. Bu nedenle asidik pH değerlerinde Cd(II) adsorpsiyon veriminin düşük olduğu görülmektedir (Şekil 3). Sulu çözelti pH değeri arttıkça,  $H_3O^+$  iyonlarının adsorban yüzeyindeki aktif bölgelere tutunmak için Cd(II) iyonları ile olan yarışmalı etkisinin azalması ve ayrıca kızılcım talaşının yüzeyindeki pozitif yük yoğunluğunun azalmasına bağlı olarak elektrostatik etkileşimin artması sonucunda Cd(II) adsorpsiyon verimi artmaktadır [19]. pH etkisi, adsorbanın  $pH_{pzc}$  değeri ile yakından ilişkilidir. Kızılcım talaşının  $pH_{pzc}$  değeri 3.9 olarak tespit edilmiştir. Sulu çözeltinin pH değeri 3.9'dan düşük olduğunda adsorbanın net yüzey yükü pozitif, bu değer üzerinde ise negatiftir. Şekil 3'ten de görüldüğü üzere Cd(II) iyonları için adsorpsiyon verimi pH 4.0'dan sonra artış gösterme eğilimindedir. pH 6.0'dan sonra adsorpsiyon verimi az miktarda da olsa artmış ve daha sonra sabit seviyelere yaklaşmıştır. Yüksek pH değerlerinde ve yüksek derişimlerde Cd(II) katyonlarının hidroksitleri halinde çökmesi durumunu da dikkate alarak maksimum giderim veriminin elde edildiği en uygun pH değeri sonraki çalışmalar için 6.0 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3. Cd(II) iyonlarının kızılçam talaşı üzerine adsorpsiyonuna başlangıç pH'nın etkisi (Baş. Cd(II) kons.: 100 mg L<sup>-1</sup>, adsorban miktarı: 0.100 g)

### 3.3. Adsorpsiyon verimi üzerine denge süresinin etkisi

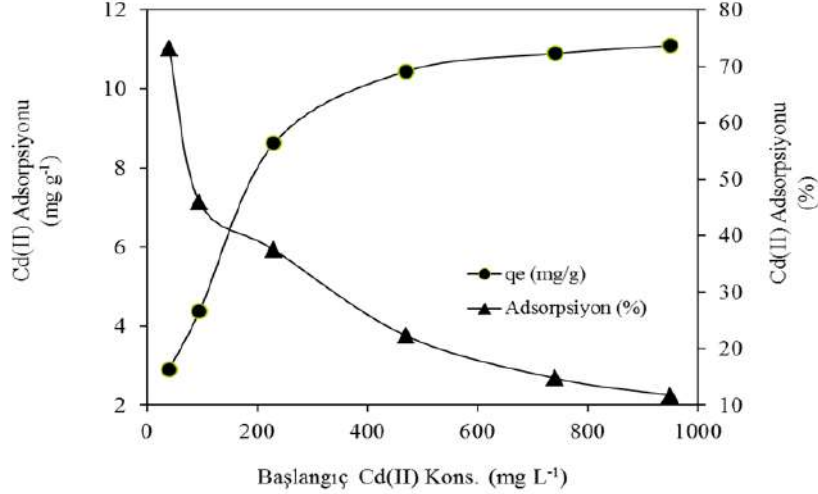
Denge süresinin kısa olması, atık sularda bulunan kirletici türlerin kısa sürede ve düşük maliyetle bertarafı açısından önemli olup, geliştirilen adsorpsiyon proseslerinin endüstriyel anlamda kullanılabilirliği ihtimalini artırmaktadır. Cd(II) iyonlarının kızılçam talaşı üzerine adsorpsiyonuna denge süresinin etkisi 1-360 dk zaman aralığında farklı sürelerde incelenmiştir. Bu amaçla yapılan deneylerde, polietilen tüplere 0.100 g kızılçam talaşından tartıldıktan sonra üzerlerine pH değeri 6.0 olan 50 mg L<sup>-1</sup> başlangıç derişimindeki Cd(II) çözeltilerinden 10'ar mL ilave edilmiştir. Belirlenen çalkalama sürelerinden sonra adsorbat ve adsorban karışımları birbirinden santrifüjle ayrılmıştır. Çözeltide adsorplanmadan kalan Cd(II) derişimleri FAAS ile belirlendikten sonra 1 g kızılçam talaşının değişik zaman aralıklarında adsorpladığı Cd(II) miktarları ( $q_t$ ) hesaplanmıştır. Şekil 4'ten de görüldüğü gibi adsorpsiyonun ilk aşamalarında kızılçam talaşı yüzeyindeki aktif adsorpsiyon bölgelerinin açık olması nedeniyle, adsorpsiyon oldukça hızlı bir şekilde gerçekleşmiştir. Denge süresine yakın aşamalarda ise adsorpsiyon hızı yavaşlamakta olup, bu durum Cd(II) iyonlarının kızılçam talaşının gözenek içlerine doğru difüzyonla hareket ettiklerini gösterir [28]. Adsorpsiyonun dengeye ulaşması için gerekli olan sürenin 240 dk olduğu görülmekte olup, bu aşamadan sonra adsorpsiyon merkezlerinin doygunluğa ulaşmasıyla adsorpsiyonda önemli bir artış olmamaktadır (Şekil 4).



Şekil 4. Cd(II) iyonlarının kızılçam talaşı üzerine adsorpsiyonuna denge süresinin etkisi (pH: 6.0, Baş. Cd(II) kons.: 50 mg L<sup>-1</sup>, adsorban miktarı: 0.100 g)

### 3.4. Adsorpsiyon verimi üzerine başlangıç Cd(II) derişiminin etkisi

Adsorpsiyon verimi üzerine başlangıç Cd(II) derişiminin etkisi kızılçım talaşı miktarı sabit tutularak, 50–1000 mg L<sup>-1</sup> aralığında değişen başlangıç metal iyonu derişimlerinde incelenmiştir. Başlangıç Cd(II) derişimlerine karşı adsorplanan adsorbat miktarları ( $q_e$ ) ve adsorpsiyon yüzdeleri arasındaki ilişki Şekil 5'te görülmektedir.



Şekil 5. Cd(II) iyonlarının kızılçım talaşı üzerine adsorpsiyonuna başlangıç metal iyonu derişiminin etkisi (pH: 6.0, adsorban miktarı: 0.100 g, denge süresi: 240 dk)

Başlangıç Cd(II) derişimi artarken gram adsorban başına adsorplanan Cd(II) miktarı ( $q_e$ ) 2.89 mg g<sup>-1</sup>'den 11.1 mg g<sup>-1</sup>'e artmakta, buna rağmen adsorpsiyon yüzdesi %73.1'den %11.7'ye azalmaktadır. Yüksek Cd(II) derişimlerinde adsorpsiyon için itici bir güç olan derişim gradiyenti oluşmakta, bu da  $q_e$  değerini artırmaktadır [29]. Kızılcım talaşı yüzeyindeki aktif adsorpsiyon bölgelerinin yüksek Cd(II) derişimlerinde aşırı doygunluğa erişmesi nedeniyle de adsorpsiyon yüzdesi azalmaktadır.

Cd(II)'nin kızılçım talaşı üzerine adsorpsiyon mekanizmasının incelenmesi ve adsorpsiyon kapasitesinin hesaplanması amacıyla elde edilen verilere Langmuir ve Freundlich izoterm modelleri uygulanmıştır. Langmuir izoterm modeli [30]; adsorban yüzeyinin homojen olduğu, adsorbe edilen moleküller arasında hiçbir etkileşimin olmadığı ve adsorban üzerinde aynı enerjiye sahip, sabit sayıda aktif bölge bulunduğu fikrine dayanmaktadır. Freundlich izoterm modeli [31] ise adsorban yüzeyi üzerinde bulunan adsorpsiyon yüzeylerinin heterojen olduğu yani farklı türdeki adsorpsiyon alanlarından oluştuğunu varsaymaktadır. Langmuir ve Freundlich izoterm modelinin doğrusal eşitlikleri sırasıyla Denklem 2 ve 3'te verilmiştir.

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_{\text{maks}}} + \frac{1}{bq_{\text{maks}}} \quad (2)$$

$$\ln q_e = \ln K_f + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (3)$$

Burada  $q_e$ ; gram adsorban başına adsorplanan adsorbat miktarı (mg g<sup>-1</sup>),  $q_{\text{maks}}$ ; tek tabaka adsorpsiyon kapasitesi (mg g<sup>-1</sup>),  $C_e$ ; dengede çözültide adsorplanmadan kalan adsorbat miktarı (mg L<sup>-1</sup>),  $b$ ; serbest enerji ya da adsorpsiyon entalpisi ile ilgili sabit (L mg<sup>-1</sup>),  $K_f$  (mg g<sup>-1</sup>); adsorpsiyon kapasitesini gösteren sabit ve  $n$ ; adsorpsiyon yoğunluğunu gösteren birimsiz sabittir.  $C_e/q_e$ 'ye karşı  $C_e$  grafiği çizilerek (Denklem 2) bu grafiğin eğim ve kesim noktasından da sırasıyla  $q_{\text{maks}}$  ve  $b$  değerleri tayin edilirken,  $\ln q_e$ 'nin  $\ln C_e$ 'ye karşı grafiği çizilerek (Denklem 3) bu grafiğin eğiminden ve ordinatı kesim noktasından sırasıyla  $n$  ve  $K_f$  sabitleri bulunur.  $n$  sabitinin 1-10 aralığında olması, adsorpsiyon işleminin uygunluğunu ifade etmektedir [20]. Çizilen bu grafiklere göre elde edilen bu sabitler ilgili korelasyon katsayılarıyla birlikte Tablo 1'de verilmiştir. Langmuir izoterm modelinin uygulanmasıyla elde edilen korelasyon katsayısı, Freundlich izoterm modeline göre daha yüksektir. Bu durum kızılçım talaşının yüzeyinde bulunan aktif adsorpsiyon bölgelerinin homojen dağılım gösterdiğine işaret etmektedir. Freundlich izoterm modelinden elde edilen  $n$  değeri 3.03 olarak bulunmuş olup, bu değer adsorpsiyonun uygunluğunu göstermektedir. Kızılcım talaşının maksimum adsorpsiyon kapasitesi ise Langmuir izoterm modelinden yararlanılarak 11.88 mg g<sup>-1</sup> olarak hesaplanmıştır. Kızılcım talaşının Cd(II) adsorplama kapasitesinin, sulu çözülti

başlangıç pH değeri ve denge süresi de dikkate alınarak, literatürde bulunan; Areca (bir palmye türü) [32], *Cyperus laevigatus* sürgünleri [33], mangan oksit minerali [34], atık kestane kabuğu [35], çay dalı biyokömürü [36], doğal kil [37], yumurta kabuğu [38] ve doğal pirinç kabuğu [39] gibi adsorbanlarla karşılaştırılması Tablo 2’de verilmiştir. Kızılçam talaşının daha önce kullanılan adsorbanların pek çoğundan daha yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip olduğu görülmektedir.

**Tablo 1.** Cd(II) iyonlarının kızılçam talaşı üzerine adsorpsiyonu için izoterm sabitleri

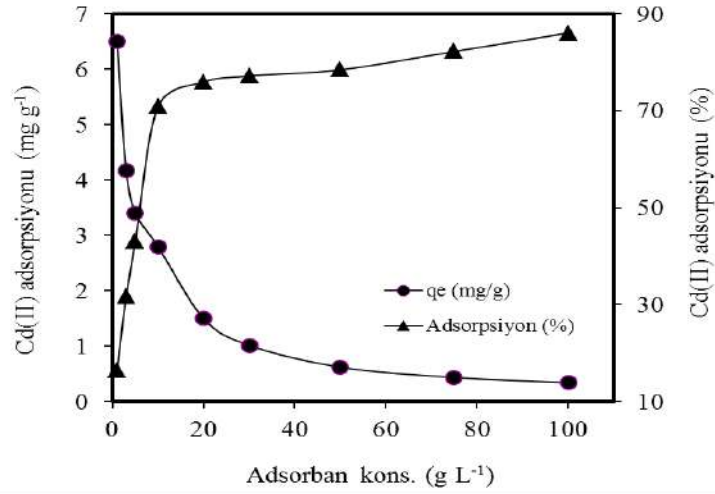
Langmuir izoterm modeli		Freundlich izoterm modeli	
$q_{\max}$ (mg g <sup>-1</sup> )	11.88	$K_f$ (mg g <sup>-1</sup> )	1.35
$b$ (L mg <sup>-1</sup> )	0.018	$n$	3.03
$R^2$	0.997	$R^2$	0.946

**Tablo 2.** Literatürdeki mevcut adsorbanların Cd(II) adsorpsiyon kapasitelerinin ve deneysel şartların karşılaştırılması

Adsorban	Ads. kapasitesi (mg g <sup>-1</sup> )	pH	Denge süresi (saat)	Referans
Areca (Palmye türü)	1.12	6.6	2.0	[32]
<i>Cyperus laevigatus</i> sürgünleri	7.49	5.5	2.0	[33]
Mangan oksit minerali	6.8	-	2.0	[34]
Atık kestane kabuğu	9.9	5-6	-	[35]
Çay dalı biyokömürü	74.04	6.0	24	[36]
Doğal kil	5.25	5.0	3.0	[37]
Yumurta kabuğu	10.37	6.0	1.5	[38]
Doğal pirinç kabuğu	8.58	9.0	10	[39]
Kızılçam talaşı	11.88	6.0	4.0	Bu çalışma

### 3.5. Adsorpsiyon üzerine adsorban miktarının etkisi

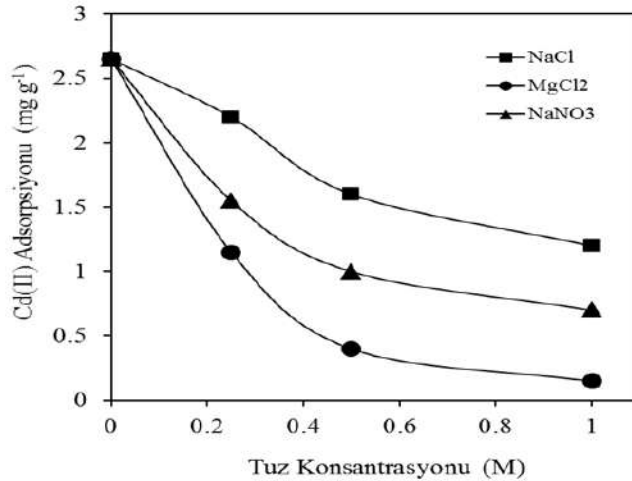
Sulu çözeltilerden Cd(II) iyonlarının kızılçam talaşı üzerine adsorpsiyonunda, adsorban miktarının etkisi 1.0-100.0 g L<sup>-1</sup> derişim aralığındaki kızılçam talaşı süspansiyonları kullanılarak incelenmiştir. Adsorban derişimine karşı adsorplanan adsorbat miktarları ( $q_e$ ) ve adsorpsiyon yüzdeleri arasındaki ilişki Şekil 6’da görülmektedir. Sabit Cd(II) derişiminde kızılçam talaşı miktarının 1.0 g L<sup>-1</sup>’den 100.0 g L<sup>-1</sup>’ye artırılması doygunluğa ulaşmamış adsorpsiyon yüzeylerinin meydana gelmesine neden olmakta ve ayrıca muhtemel topaklanmanın yüzey alanını azaltmasıyla gram kızılçam talaşı başına adsorplanan Cd(II) miktarı 6.5 mg g<sup>-1</sup>’den 0.34 mg g<sup>-1</sup>’a azalmıştır [40]. Buna rağmen kızılçam talaşı miktarının artırılması aktif adsorpsiyon bölgelerinin artmasına neden olacağından adsorpsiyon yüzdesi %16’dan %86’ya artış göstermiştir (Şekil 6).



Şekil 6. Cd(II) iyonlarının kızılcım talaşı üzerine adsorpsiyonuna adsorban derişiminin etkisi (pH: 6.0, Baş. Cd(II) kons.: 50 mg L<sup>-1</sup>, denge süresi: 240 dk)

### 3.6. Cd(II) giderim verimi üzerine tuz etkisi

Sularda yaygın olarak bulunabilecek NaCl, MgCl<sub>2</sub> ve NaNO<sub>3</sub> gibi tuzların Cd(II) iyonlarının giderim verimi üzerine etkilerinin olup olmadığı 0.25 ile 1.0 M derişim aralığında tuz içeren çözeltilerle test edilmiştir. Tuz derişiminin artmasıyla, kızılcım talaşı üzerinde Cd(II) iyonlarının gideriminde azalma meydana geldiği gözlenmiştir (Şekil 7). Tuz katyonlarının kızılcım talaşı üzerinde bulunan aktif adsorpsiyon bölgelerine tutunmak için Cd(II) iyonlarıyla yarışma halinde olması bu azalmanın sebebi olarak düşünülebilir [41]. Bu tuzlardan çift yüklü katyona sahip MgCl<sub>2</sub>'nin Cd(II) adsorpsiyonunu negatif yönde daha fazla etkilediği görülmektedir.



Şekil 7. Cd(II) iyonlarının kızılcım talaşı üzerine adsorpsiyonuna tuz etkisi (pH: 6.0, adsorban miktarı: 0.100 g, başlangıç Cd(II) derişimi: 50 mg L<sup>-1</sup>, denge süresi: 240 dk)

### 3.7. Adsorbannın desorpsiyonu ve rejenerasyonsuz tekrar kullanılabilirliği

Cd(II) iyonlarının kızılcım talaşından desorpsiyonu için 0.1-2.0 M derişim aralığında HCl ve HNO<sub>3</sub> çözeltileri desorbe edici ajan olarak test edilmiştir. Bu amaçla, 0.100 g adsorban ile başlangıç pH değeri 6.0'a ayarlanmış 100 mg L<sup>-1</sup> başlangıç derişimine sahip Cd(II) çözeltisi, 240 dk boyunca muamele edilmiştir. Bu sürenin sonunda Cd(II) adsorplamış adsorban çözeltiden ayrılarak kurutulmuş ve 0.1-2.0 M derişim aralığındaki 10 mL HCl ve 10 mL NaOH çözeltileri ile ayrı ayrı 240 dk boyunca muamele edilmiştir. Asit çözeltilerinin derişimi 0.1

M'dan 2.0 M'a artırıldığında desorpsiyon verimi HCl ve NaOH için sırasıyla %58'den %92'ye ve %40'dan %64'e yükseldiği görülmüştür. Cd(II) iyonlarının kızılçam talaşından desorpsiyonu için 2.0 M HCl çözeltisinin etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Kızılçam talaşının rejenere edilmeden tekrar kullanılabilirliğini test etmek amacıyla; 0.100 g adsorban ile başlangıç pH değeri 6.0'a ayarlanmış 100 mg L<sup>-1</sup> başlangıç derişimine sahip Cd(II) çözeltisi, 240 dk boyunca muamele edilmiştir. Bu sürenin sonunda Cd(II) adsorplamış adsorban çözeltiden ayrılarak kurutulmuş ve ardından tekrar 100 mg L<sup>-1</sup> başlangıç derişimine sahip Cd(II) çözeltisi ile muamele edilmiştir. Yapılan işlem aynı şekilde beş kez tekrarlanmış ve her defasında adsorbanın Cd(II) tutma kapasitesinin azaldığı gözlemlenmiştir. İlk yüklemekten beşinci kez yüklemeye ulaşıldığında; adsorpsiyon veriminin 4.8 mg g<sup>-1</sup>'den 2.3 mg g<sup>-1</sup>'e, adsorpsiyon yüzdesinin ise %53.0'dan %25.3'e azaldığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlardan kızılçam talaşının rejenere edilmeden en az beş kez kullanılabilceği görülmüştür.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada toksik ağır metal iyonlarından biri olan Cd(II) iyonlarının sulu çözeltilerden adsorpsiyon yöntemiyle uzaklaştırılmasında etkili ve düşük maliyetli adsorban olarak kızılçam talaşının kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Adsorpsiyon verimi üzerine çeşitli deneysel parametrelerin etkileri incelenmiş ve ayrıca endüstriyel atık sularda bulunabilecek bazı tuzların giderim verimi üzerine etkileri tartışılmıştır. Elde edilen veriler değerlendirildiğinde; Cd(II) iyonlarının adsorpsiyonunda optimum sulu çözelti pH'ı 6.0 olarak belirlenmiştir. Adsorpsiyon veriminin 240 dakikalık denge süresi sonucunda maksimuma ulaştığı görülmüştür. Cd(II) iyonlarının adsorpsiyonu için optimize edilen pH değeri literatürdeki diğer çalışmalarla uyum içerisindedir [32-38]. Denge süresi daha önce yapılan pek çok çalışmada optimize edilen süreden daha uzun olmasına [32-34, 37, 38] karşın, kızılçam talaşının Cd(II) adsorpsiyon kapasitesinin de daha önce kullanılan pek çok adsorbandan daha yüksek olduğu görülmüştür [32-35, 37-39]. Başlangıç metal iyonları derişiminin artırılmasıyla, adsorpsiyon miktarının arttığı buna rağmen adsorpsiyon yüzdesinin azaldığı tespit edilmiştir. Adsorban derişiminin artırılmasıyla, adsorpsiyon miktarının azaldığı, adsorpsiyon yüzdesinin de arttığı gözlenmiştir. Ayrıca NaCl, MgCl<sub>2</sub> ve NaNO<sub>3</sub> gibi sularda yaygın olarak bulunabilecek tuzların metal iyonlarının adsorpsiyon verimini düşürdüğü görülmüştür. Adsorbanın rejenere edilmeden en az 5 kez kullanılabilceği ve Cd(II) iyonlarının desorpsiyonu için de 2.0 M HCl çözeltisinin uygun olduğu tespit edilmiştir. Cd(II) iyonlarının kızılçam talaşı üzerine adsorpsiyonunda elde edilen verilerin Langmuir izoterm modeli ile uyum sağladığı görülmüş olup, bu durum adsorban yüzeyinde bulunan aktif adsorpsiyon bölgelerinin homojen dağılım gösterdiğine işaret etmektedir. Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde, adsorpsiyon yöntemiyle sulu çözeltilerden Cd(II) iyonlarının uzaklaştırılmasında kızılçam (*Pinus brutia* Ten.) talaşının etkili ve ucuz adsorban olarak kullanılabilceği sonucuna varılmıştır. Böylece doğada oldukça fazla miktarda bulunan ve hazırlanışı zor pek çok adsorbana alternatif olabilecek bir adsorban türü, diğer adsorbanlara alternatif olarak sunulmuştur. Ayrıca çalışmada kullanılan kızılçam talaşı kimyasal reaktif gerektirecek herhangi bir ön işleme tabi tutulmadan doğal olarak kullanılmıştır. Bu durum, hem ucuz olan prosesin maliyetini daha da düşürmüş, hem de fazla kimyasal kullanımını engelleyerek yeşil kimyaya katkı sağlamıştır.

**Bilgilendirme:** Bu çalışma, Erdem TORUN'un "Kızılçam (*Pinus brutia* Ten.) talaşı kullanılarak sulu çözeltilerden kadmiyum (II) iyonlarının adsorpsiyonla uzaklaştırılması" isimli Yüksek Lisans Tezinden üretilmiş olup, 15.B0110.02.01 No'lu Proje kapsamında Gümüşhane Üniversitesi BAP Koordinasyonu Birimi tarafından desteklenmiştir. Çalışmanın bir kısmı 7. Ulusal Analitik Kimya Kongresinde özet bildiri olarak sunulmuştur.

#### Kaynaklar

- [1] Shammi SA, Salam A, Khan MAH. Assessment of heavy metal pollution in the agricultural soils, plants, and in the atmospheric particulate matter of a suburban industrial region in Dhaka, Bangladesh. *Environ Monit Assess* 2021; 193(2):104.
- [2] Briffa J, Sinagra E, Blundell R. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon* 2020; 6(9): e04691.
- [3] Gupta UC, Gupta SC. Heavy metal toxicity in humans and its preventive and control measures. *Curr Res Nutr Food Sci* 2011; 7(4): 221-231.
- [4] Kaparapu J, Prasad MK. Equilibrium, kinetics and thermodynamic studies of cadmium(II) biosorption on *Nannochloropsis oculata*. *Appl Water Sci* 2018; 8 (6): 179.



- [5] Torun E, Kızılcım (*Pinus brutia* Ten.) talaşı kullanılarak sulu çözeltilerden kadmiyum (II) iyonlarının adsorpsiyonla uzaklaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ormanlık ve Çevre Bilimleri Ana Bilim Dalı, Gümüşhane, 2015.
- [6] Eugenia AM, Leticia F, Julio G. Cadmium toxicity for humans and the environment. *Informe Medico* 2009; 11(11): 597-605.
- [7] Danish EY, Marwani HM, Almoslehi KF, Bakhsh EM. Adsorptive removal of lanthanum based on hydrothermally synthesized iron oxide-titanium oxide nanoparticles. *Environ Sci Pollut Res* 2020; 27: 5408-5417.
- [8] Meunier N, Drogui P, Montane C, Hausler R, Mercier G, Blais JF. Comparison between electrocoagulation and chemical precipitation for metals removal from acidic soil leachate. *J Hazard Mater* 2006; 137: 581-590.
- [9] Hussain ST, Khaleefa Ali SA. Removal of Heavy Metal by Ion Exchange Using Bentonite Clay *J Ecol Eng* 2020; 22(1): 104-111.
- [10] Ates N, Uzal N. Removal of heavy metals from aluminum anodic oxidation wastewaters by membrane filtration. *Environ Sci Pollut Res* 2018; 25(22): 22259-22272.
- [11] Wang Q, Cui P, Yang Q, Chen L, Wang W, Deng W, Wang Y. Analysis of the Cd(II) Adsorption Performance and Mechanisms by Soybean Root Biochar: Effect of Pyrolysis Temperatures. *Bull Environ Contam Toxicol* 2021; 107:553-558.
- [12] Mahmoud ME, Abou-Ali SAA, Elweshahy SMT. Efficient and ultrafast removal of Cd(II) and Sm(III) from water by leaves of *Cynara scolymus* derived biochar. *Mater Res Bull* 2021; 141: 111334.
- [13] Zhao X, Zhao H, Huang X, Wang L, Liu F, Hu X, Li J, Zhang G, Ji P. Effect and mechanisms of synthesis conditions on the cadmium adsorption capacity of modified fly ash. *Ecotoxicol Environ Saf* 2021; 223: 112550.
- [14] Teng D, Zhang B, Xu G, Wang B, Mao K, Jianxu W, Sun J, Feng X, vd. Efficient removal of Cd(II) from aqueous solution by pinecone biochar: Sorption performance and governing mechanisms. *Environ Pollut* 2020; 265: 115001.
- [15] Lu X, Wu J, Guo Y. Removal of Cd(II) from aqueous solution by sulfur-functionalized walnut shell: adsorption performance and micro-structural morphology. *Desalination Water Treat* 2019; 169: 322-332.
- [16] Zhang L, Ren Y, Xue Y, Cui Z, Wei Q, Han C, He J. Preparation of biochar by mango peel and its adsorption characteristics of Cd(II) in solution. *RSC Adv* 2020; 10: 35878.
- [17] Akinhanmi TF, Ofudje EA, Adeogun AI, Aina P, Joseph IM. Orange peel as low-cost adsorbent in the elimination of Cd(II) ion: kinetics, isotherm, thermodynamic and optimization evaluations. *Bioresour Bioprocess* 2020; 7: 34.
- [18] Takdastan A, Samarbaf S, Tahmasebi Y, Alavi N, Babaei AA. Alkali modified oak waste residues as a cost-effective adsorbent for enhanced removal of cadmium from water: Isotherm, kinetic, thermodynamic and artificial neural network modeling. *J Ind Eng Chem* 2019; 78: 352-363.
- [19] Katarina N, Garg VK. Green synthesis of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles loaded sawdust carbon for cadmium (II) removal from water: Regeneration and mechanism. *Chemosphere* 2018; 208: 818-828.
- [20] Hashem A, Badawy SM, Farag S, Mohamed LA, Fletcher AJ, Taha GM. Non-linear adsorption characteristics of modified pine wood sawdust optimised for adsorption of Cd(II) from aqueous systems. *J Environ Chem Eng* 2020; 8: 103966.
- [21] Guechi E, Hamdaoui O, Benabdesselam S. Kinetic and thermodynamic study for the removal of cadmium(II) ions from aqueous media by *Aucoumea klaineana* sawdust, *Desalination Water Treat* 2021; 209: 447-453.
- [22] Zhu Y, Liang H, Yu R, Hu G, Chen F. Removal of Aquatic Cadmium Ions Using Thiourea Modified Poplar Biochar, *Water* 2020; 12: 1117.
- [23] Ozdes D, Gundogdu A, Kemer B, Duran C, Kucuk M. Assessment of kinetics, thermodynamics and equilibrium parameters of Cr(VI) biosorption onto *Pinus brutia* Ten. *Can J Chem Eng* 2014; 92: 139-147.
- [24] Gündoğdu A, Ozdes D, Duran C, Bulut VN, Soyлак M, Şentürk HB. Biosorption of Pb(II) ions from aqueous solution by pine bark (*Pinus Brutia* Ten.). *Chem Eng J* 2009; 153 (1-3): 62-69.
- [25] Mestre AS, Pires J, Nogueira JMF, Carvalho AP. Activated Carbons for the Adsorption of Ibuprofen. *Carbon* 2007; 45: 1979-1988.
- [26] Peng Y, Wu S. The Structural and Thermal Characteristics of Wheat Straw Hemicellulose. *J Anal Appl Pyrolysis* 2010; 88: 134-139.
- [27] Gündoğdu A, Çay Atıklarından Aktif Karbon Üretimi, Karakterizasyonu ve Adsorpsiyon Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Trabzon, 2010.
- [28] Sheikh Z, Amin M, Khan N, Khan MN, Sami SK, Khan SB, Hafeez I, Khan SA, vd. Potential application of *Allium Cepa* seeds as a novel biosorbent for efficient biosorption of heavy metals ions from aqueous solution. *Chemosphere* 2021; 279: 130545
- [29] Serencam H, Ozdes D, Duran C, Tufekci M. Biosorption properties of *Morus alba* L. for Cd (II) ions removal from aqueous solutions. *Environ Monit Assess*, 2013; 185: 6003-6011.
- [30] Langmuir I. The Adsorption of Gases on Plane Surfaces of Glass, Mica and Platinum. *J Am Chem Soc* 1918; 40: 1361-1403.
- [31] Freundlich HMF. Over the Adsorption in Solution. *J Phys Chem* 1906; 57: 385-470.
- [32] Zheng W, Li X, Wang F, Yang Q, Deng P, Zeng G. Adsorption Removal of Cadmium and Copper from Aqueous Solution by *Areca*, A Food Waste. *J Hazard Mater* 2008; 157: 490-495.

- [33] Ammaria, TG, Al-Labadia, I, Tahboub A, Ghrair A. Assessment of Unmodified Wetland Bio-Waste: Shoots of *Cyperus laevigatus*, for Cadmium Adsorption from Aqueous Solutions. *Process Saf Environ* 2015; 95: 77-85.
- [34] Sönmezay A, Öncel MS, Bektaş N. Adsorption of Lead and Cadmium Ions from Aqueous Solutions Using Manganoxide Minerals. *Trans Nonferrous Met Soc China* 2012; 22: 3131–3139.
- [35] Vázquez G, Mosquera O, Freire MS, Antorrena G, González-Álvarez J. Alkaline Pre-Treatment of Waste Chestnut Shell From a Food Industry to Enhance Cadmium, Copper, Lead and Zinc Ions Removal. *Chem Eng J* 2012; 184: 147– 155.
- [36] Han C, Wang M, Ren Y, Zhang L, Ji Y, Zhu W, Song Y, He J. Characterization of pruned tea branch biochar and the mechanisms underlying its adsorption for cadmium in aqueous solution. *RSC Adv* 2021; 11: 26832.
- [37] Abbou B, Lebkiri I, Ouaddari H, Elkhatabi O, Habsaoui A, Lebkiri A, Rifi EH. Kinetic and Thermodynamic Study on Adsorption of Cadmium from Aqueous Solutions Using Natural Clay. *JOTCSA* 2021; 8(2): 677–92.
- [38] Abatan OG, Alaba PA, Oni BA, Akpojevwe K, Efevbokhan V, Abnisa F. Performance of eggshells powder as an adsorbent for adsorption of hexavalent chromium and cadmium from wastewater. *SN Appl Sci* 2020; 2: 1996.
- [39] Kumar U, Bandyopadhyay M. Sorption of cadmium from aqueous solution using pretreated rice husk. *Biores Technol* 2006; 97(1): 104–109.
- [40] Ghasemi E, Heydari A, Sillanpaa M. Superparamagnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@EDTA nanoparticles as an efficient adsorbent for simultaneous removal of Ag(I), Hg(II), Mn(II), Zn(II), Pb(II) and Cd(II) from water and soil environmental samples. *Microchem J* 2017; 131: 51-56.
- [41] Peighambaroust SJ, Foroutan R, Peighambaroust SH, Khatooni H, Ramavandi B. Decoration of Citrus limon wood carbon with Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> to enhanced Cd<sup>2+</sup> removal: A reclaimable and magnetic nanocomposite. *Chemosphere* 2021; 282: 131088.



## Entegre Dirençlerin Çift ve Tek Dereceli Bozulma Analizi

Ertan ZENCİR<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Elektrik - Elektronik Mühendisliği, Türk Hava Kurumu Üniversitesi,  
Ankara, Türkiye

\*<sup>1</sup> ezencir@thk.edu.tr

(Geliş/Received: 30/10/2021;

Kabul/Accepted: 01/01/2022)

**Öz:** Yarı iletken yükselteçlerdeki bozulma, esas olarak aktif cihazların giriş-çıkış özelliklerinde karşılaşılan yüksek dereceli katsayılarından kaynaklanmaktadır. Bipolar jonksiyonlu transistörler (BJT), bir üstel diyot akım-gerilim ilişkisi ile modellendiğinde, polarlama akımından ve diğer BJT parametrelerinden bağımsız olarak, 7.33 dBm'lik giriş üçüncü dereceden intermodülasyon ürünü (IIP3) üzerinde bir üst sınır gösterir. CMOS transistörler için, kanal uzunluk modülasyonu ile birlikte doğrusal olmayan büyük sinyal davranışı, ortak-kaynak konfigürasyonunda savak akımında üçüncü dereceden intermodülasyon ürünleri üretme potansiyeline sahiptir. Doğrusallığı bozma kaynaklarının sadece aktif cihazlardan kaynaklandığı fikri, analog devreleri analiz ederken eksik ve/veya yanıltıcı sonuçlara yol açar. Dirençlerin doğrusal olmama durumları, sistemin IIP3 değerinin sınırladığı verimsiz/yanlış tasarım kararlarına ve gerilime bağlı doğrusal olmamaya neden olabilir. Bu makale, entegre dirençlerin doğrusallık bozulmalarını açıklar ve dirençlerin gerilim bağımlılığını sonlu IM3 ve IM2 ürünleri ile ilişkilendirir. Ayrıca, polisilyyum ve difüzyon dirençleri için direnç akımlarının IIP3 ve IIP2'si, genel devre doğrusallık gereksinimini sağlayacak şekilde direnç boyutlarının optimum seçimini gerçekleştirmek üzere kaleme alınmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Entegre Direnç, Doğrusal Olmama, Bozulma.

## Even and Odd Order Distortion Analysis of Integrated Resistors

**Abstract:** Distortion in semiconductor amplifiers is due mainly to higher order coefficients encountered in active device input-output characteristics. Bipolar junction transistors (BJT), when modeled by an exponential diode current-voltage relationship, show an upper limit on input third order intermodulation product (IIP3) of 7.33 dBm that is independent of bias current and other BJT parameters. For CMOS transistors, nonlinear large signal behavior accompanied by channel length modulation has the potential to generate third order intermodulation products in the drain current in a common source configuration. The notion that the sources of nonlinearity are due only to active devices leads to incomplete and/or misleading conclusions while analyzing analog circuits. Resistor nonlinearities can cause inefficient/incorrect design decisions overlooking the limiting of system IIP3 due resistors, voltage dependent nonlinearity. This paper describes on-chip resistor nonlinearities and relates the voltage dependency of resistors to finite IM3 and IM2 generation. IIP3 and IIP2 of resistor currents for polysilicon and diffusion resistors are derived for optimal design of resistor sizes to meet overall circuit linearity requirement.

**Key words:** Integrated Resistor, Nonlinearity, Distortion.

### 1. Giriş

Analog entegre devrelerin doğrusal çalışması, esas olarak, entegre devrenin genellikle kazanç bloklarını oluşturan aktif cihazların doğrusallığı ile belirlenir. Aktif cihaz doğrusallığına ek olarak, entegre dirençlerin rezistans değerlerinin, terminallerine uygulanan gerilime bağımlılığı, yüksek hassasiyetli çalışma gerektiren analog entegre devrelerin tasarımında bir doğrusallık sorunu oluşturur. Yüksek hassasiyetli devrelerde direnç etkisine yaygın bir örnek olarak, bir sayısal-analog dönüştürücünün (SAD) doğrusallığına esas olarak çıkış bloğunda bulunan akım-gerilim dönüştürücüde kullanılan işlemsel yükseltgeçin geri besleme direncinin etki etmesi [1-2] veya yüksek çözünürlüklü sıcaklık sensörlerindeki algılama dirençlerinin sensörün doğrusallığı üzerindeki etkisi gösterilebilir [3]. Direnç doğrusallığını araştıran en eski çalışmalardan biri [4], direncin doğrultucu özelliklerinin olmadığı varsayımıyla akımın gerilim ve üçüncü dereceden gerilim ifadelerine bağlı olduğu tek bir fonksiyon olarak akım-gerilim karakteristiğini ortaya atmıştır. Karbon dirençlerde [4] gözlenen gerilime bağlı direnç, yarı iletken dirençlerde de ikinci ve üçüncü dereceden akım bozulması şeklinde gözlenir. Direnç doğrusallığı, cihaz eşleştirme ve  $1/f$  gürültüsünü çapraz ilişkilendiren bir analiz, basit bir karakterizasyon

\* Sorumlu yazar: [ezencir@thk.edu.tr](mailto:ezencir@thk.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-7041-8352

modeli sağlar [5]. Direnç doğrusallığının hassas ölçülmesi, iki sentezleyici kullanılan çift frekans yöntemiyle yapılabilir [6]. Bu hassas ölçüm, teorik analiz kadar önemlidir [7].

Bu çalışmanın amacı, fiziksel akım-gerilim özelliklerine dayalı olarak polisilyum ve difüzyon entegre dirençlerin üçüncü derece intermodülasyon bozulma karakteristiklerini analiz etmektir. Yapılan analiz simülasyon sonuçları ile desteklenmektedir. Doğrusallığını etkileyen mekanizmalar ve doğrusallığı iyileştirmek için uygun tasarım görüşleri de tartışılmaktadır.

## 2. Entegre Dirençlerin İncelenmesi

### 2.1. Polisilyum Direnç Karakteristikleri

Entegre devre uygulamalarında direnç oluşturmak için çok sayıda malzeme kullanılmıştır. Özel yüksek performanslı analog işlemlerde bulunan püskürtmeli ince film dirençler, cihaz eşleştirme, sıcaklık katsayısı ve gerilim katsayıları açısından ölçülen en yüksek kalitede dirençlerdir [8]. Polisilyum dirençler, analog entegre devrelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Doğrusal olmayan davranışları genellikle analog simülasyon motorlarında hafife alınmıştır. Doğrusal olmayan etkilerden kaçınmak için analog tasarımcılar, fiziksel anlamda daha uzun dirençler kullanırlar, bu da daha büyük silisyum alanı ve dolayısıyla optimumun altında tasarım gerçekleştirmeleri ile sonuçlanır [9]. Bu nedenle, üzerinde çalışılan teknoloji için gerilimin doğrusallığının tam olarak anlaşılması gerekir.

Doğrusal olmayan bir dirençten geçen akım, polinomal bir ifade aracılığıyla gerilimi ile ilişkilendirilir. Genel bir polisilyum direncin rezistans değeri Denklem 1' deki gibi ifade edilir.

$$R_{poly} = R_{body} + 2R_{head} \quad (1)$$

Burada  $R_{body}$ , direncin ana polisilyum malzemesinin rezistansıdır ve  $R_{head}$ , dopant etkileşiminin yakınındaki terminallerden kaynaklanan dirençtir. Terminal direnci ihmal edildiğinde, polisilyum direncin rezistans değeri, birinci ve ikinci dereceden sıcaklık ve gerilim bağımlılığına sahip ana gövde direncine indirgenir ve Denklem 2' deki şekilde ifade edilir.

$$R_{poly} = R_{sh} \left( \frac{L}{W} \right) (1 + c_1 \Delta T + c_2 T^2) \left( 1 + \frac{1}{1 + \alpha \left( \frac{v}{L} \right)^2} \right) \quad (2)$$

Polisilyum rezistans değeri sıcaklığa göre değişirken, direncin uçları arasındaki gerilim farkına da ikinci dereceden bir bağımlılık mevcuttur. Sabit bir sıcaklıkta, direncin değeri büyük ölçüde  $v/L$  oranına bağlıdır.  $L$  için çok büyük bir değer seçmek, direncin genişliğinde önemli bir artışa neden olacaktır. Bu nedenle, kabul edilebilir maksimum doğrusal olmama (ikinci veya üçüncü derece bozulma) için optimum uzunluğu bulmak amacıyla bir analiz yapılması gerekir. Denklem 2 kullanılarak yapılabilecek bir başka gözlem, direncin gerilim bağımlılığının akımda ikinci dereceden bozulma üretme potansiyeline sahip olduğu görülmektedir. Ancak, Bölüm 3'te ortaya konacak olan analiz, akımda çift dereceli yerine kübik doğrusal olmayanlığın varlığını göstermektedir.

### 2.2. Difüzyon Direnç Karakteristikleri

Genel bir difüzyon tabakası direncinin rezistansı Denklem 3' deki şekilde ifade edilebilir.

$$R_{diff} = R_{sh} \left( \frac{L}{W} \right) (1 + c_1 \Delta T + c_2 \Delta T^2) \left( 1 + \alpha_1 \left( \frac{v}{L} \right) + \alpha_2 \left( \frac{v}{L} \right)^2 \right) \quad (3)$$

Burada  $R_{sh}$  difüzyon tabakasının levha direncidir,  $L$  direncin uzunluğudur,  $W$  direncin genişliğidir,  $c_1$  birinci dereceden sıcaklık katsayısıdır,  $c_2$  ikinci dereceden sıcaklık katsayısıdır,  $\alpha_1$  birinci derece gerilim katsayısı,  $\alpha_2$  ikinci derece gerilim katsayısı,  $\Delta T$  oda sıcaklığından kayma ve  $v$  direncin terminaleri arasındaki diferansiyel gerilimdir. Difüzyon dirençlerin sıcaklık bağımlılığı, polisilyum dirençlere çok benzer. Polisilyum dirençten farklı olarak, difüzyon direncin gerilim bağımlılığı, hem birinci hem de ikinci dereceden diferansiyel gerilim bağımlılığına sahiptir, ancak kübik bir doğrusallık ifadesi mevcut değildir. Bölüm 3, üçüncü dereceden intermodülasyon oluşum mekanizmasını açıklamaktadır.

### 3. Bozulma Analizi

#### 3.1. Polisilyum Dirençlerde Doğrusal Olmama

Sabit bir sıcaklıkta Denklem 2 ile tanımlanan polisilyum dirençten geçen akım Denklem 4' deki şekilde ifade edilir.

$$I_{poly} = \frac{v}{R_{poly}} = \frac{1}{R_{sh} \left( \frac{L}{W} \right)} \left( \frac{v}{1 + 1/(1 + \alpha(v/L)^2)} \right) \quad (4)$$

$v = 0$ ' da seri açılımı gerçekleştirerek ve  $R_{o,poly} = R_{sh} \left( \frac{L}{W} \right)$  seçerek Denklem 4, Denklem 5' deki haline indirgenir.

$$I_{poly} = \frac{1}{R_{o,poly}} \left( \frac{1}{2} v + \left( \frac{\alpha}{4L^2} \right) v^3 - \left( \frac{\alpha^2}{8L^4} \right) v^5 + O(v^6) \right) \quad (5)$$

Üçüncü dereceden doğrusal olmayanlığı azaltmak için  $L$  mümkün olduğunca büyük seçilmelidir, bu da aynı direnç için daha yüksek  $W$  anlamına gelir. Polisilyum dirençten geçen akım için giriş üçüncü dereceden kesişme noktası (*IIP3*), 3. dereceden bir yükseltgeçin birinci ve üçüncü derece katsayıları kullanılarak [10] Denklem 6' da ki şekilde ifade edilebilir.

$$A_{IIP3,poly} = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{k_1}{k_3}} = \frac{4}{\sqrt{6\alpha}} L \quad (6)$$

Burada  $k_1 = 1/(2R_{o,poly})$  ve  $k_2 = \alpha/(4R_{o,poly}L^2)$  şeklinde ifade edilir. Denklem 6' da görüldüğü gibi, direnç akımının giriş üçüncü dereceden kesişme noktası gerilimi, direncin gerilim katsayısı ile ters orantılı ve direncin uzunluğu  $L$  ile doğru orantılıdır. Direnci içeren analog devrenin gerekli doğrusallığının bilinmesi ve direncin *IIP3*' ünün bu değerden daha yüksek bir değere ayarlanması, devre performansının direncin doğrusal olmama durumu ile sınırlandırılmamasını garanti edecektir. Tasarımcı, teknoloji parametresi  $\alpha$  üzerinde kontrole sahip olmayabilir, ancak  $L$  seçimi üzerinde tam kontrole sahiptir. Denklem 5'te ikinci dereceden bir terim olmadığı için giriş ikinci dereceden kesişme noktasının (*IIP2*) sonsuz olduğuna dikkat edilmelidir.

#### 3.2. Difüzyon Dirençlerde Doğrusal Olmama

Sabit bir sıcaklıkta difüzyon dirençten geçen akım Denklem 7' de verildiği gibi ifade edilebilir.

$$I_{diff} = \frac{v}{R} = \frac{1}{R_{sh} \left( \frac{L}{W} \right)} \left( \frac{v}{1 + \alpha_1 \left( \frac{v}{L} \right) + \alpha_2 \left( \frac{v}{L} \right)^2} \right) \quad (7)$$

Denklem 7' nin  $v=0$ ' da seriye açılması ve  $R_{o,diff} = R_{sh} \left( \frac{L}{W} \right)$  olarak seçilmesi ile Denklem 8 elde edilir.

$$I_{diff} = \left( \frac{1}{R_{o,diff}} \right) v - \left( \frac{\alpha_1}{R_{o,diff}L} \right) v^2 + \left( \frac{\alpha_1^2 - \alpha_2}{R_{o,diff}L^2} \right) v^3 - \left( \frac{\alpha_1^3 - 2\alpha_1\alpha_2}{R_{o,diff}L^3} \right) v^4 + \left( \frac{\alpha_1^4 - 3\alpha_1^2\alpha_2 + \alpha_2^2}{R_{o,diff}L^4} \right) v^5 + O(v^6) \quad (8)$$

Doğrusal akım terimi olan  $V/R_{o,diff}$  teknoloji parametreleri  $R_{o,diff}$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  ve difüzyon levhasının uzunluğuna bağlı olan hem çift hem de tek derecelerden bozulma terimleri içerir. İkinci dereceden ve kübik doğrusal olmamayı azaltmak için  $L$  mümkün olduğunca büyük seçilmelidir, bu da aynı direnç için daha büyük  $W$  anlamına gelir.

Akım ifadesindeki sıfır olmayan gerilim katsayıları, direnç için sonlu *IIP3* ve *IIP2* değerlerini ifade eder. Denklem 6 ve Denklem 8'deki birinci ve üçüncü derece katsayılar kullanılarak giriş üçüncü dereceden kesişme noktası Denklem 9' da ifade edildiği şekilde türetilebilir.

$$A_{IIP3,diff} = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{k_1}{k_3}} = \frac{2}{\sqrt{3(\alpha_1^2 - \alpha_2)}} L \quad (9)$$

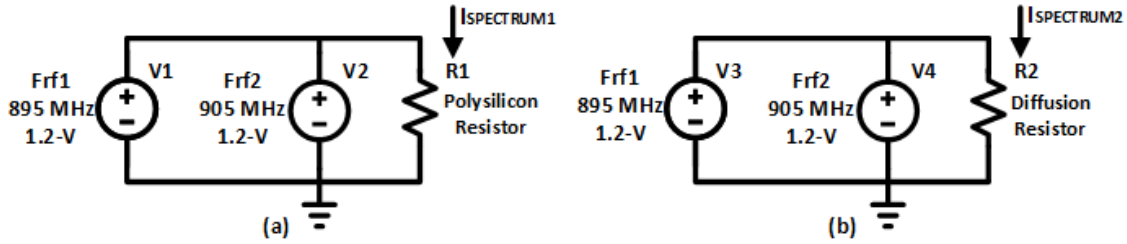
Burada  $k_1 = 1/R_{o,diff}$  ve  $k_3 = (\alpha_1^2 - \alpha_2)/(R_{o,diff}L^2)$  şeklinde ifade edilir. Denklem 9, difüzyon direnci akımının  $IIP3'$  ünün direncin gerilim katsayıları ile ters orantılı olduğunu ve polisilyum direnç durumunda olduğu gibi direncin uzunluğu  $L$  ile doğru orantılı olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, giriş ikinci dereceden keşişim noktası ( $IIP2$ ) Denklem 10' da verildiği şekilde ifade edilebilir [7].

$$A_{IIP2,diff} = \frac{k_1}{k_2} = \frac{1}{\alpha_1} L \quad (10)$$

$IIP3'$  e benzer bir şekilde, difüzyon direncinin  $IIP2'$  si, birinci dereceden gerilim katsayısı  $\alpha_1$  ile ters ve  $L$  ile doğrusal orantılı olarak değişir. Böylece direnç uzunluğunu seçme kararı, devrenin doğrusallık gereksinimi göz önünde bulundurularak yapılabilir.

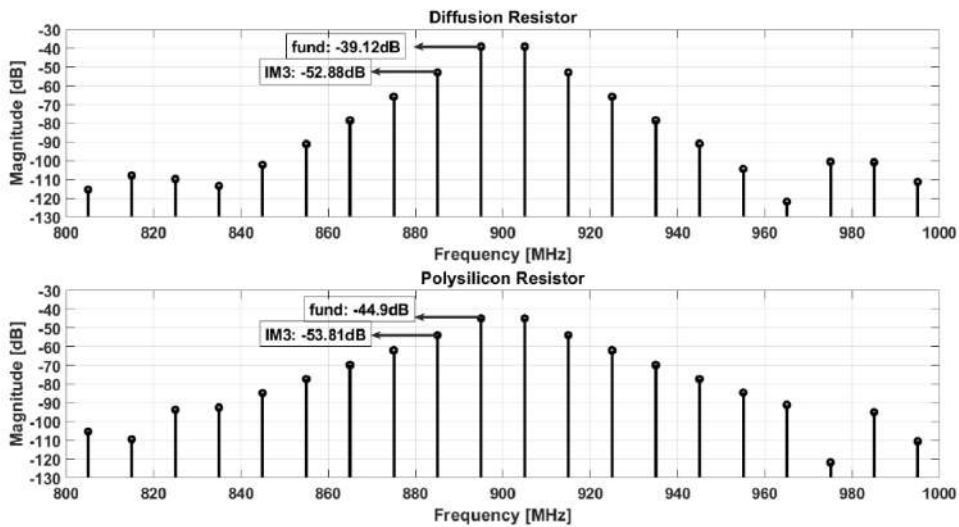
#### 4. Direnç Doğrusallığı Simülasyon Sonuçları

Önceki kısımda belirtilen analizi doğrulamak için Şekil 1' de verilen test devresi, Cadence: Virtuoso bilgisayar destekli tasarım programı ile TSMC 65nm standart CMOS tasarım parametreleri kullanılarak kurulmuştur.



Şekil 1. İki tonlu (a) polisilyum, (b) difüzyon direnç test devresi

Şekil 1' de gösterilen iki tonlu test devresinde, direnç üzerinden akan akımın zaman düzlemindeki simülasyon sonuçlarının Fourier dönüşümü gerçekleştirildiğinde Şekil 2' deki sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 2. Direnç zamana bağlı akımların Fourier dönüşümü

Burada gösterilen IM3 ve temel tonların büyüklük değerlerine göre IIP3 değerleri aşağıdaki metodoloji ile hesaplanmıştır.

$$\Delta I_{dB} = I_{fund,dB} - I_{IM3,dB} \quad (11)$$

$$\Delta I_{linear} = 10^{\left(\frac{\Delta I_{dB}}{20}\right)} \quad (12)$$

$$\Delta I_{linear,rms} = \frac{\Delta I_{linear}}{\sqrt{2}} \quad (13)$$

$$\Delta I_{dBm} = 10 \log \left( \frac{\Delta I_{linear,rms}^2 * R}{10^{-3}} \right) \quad (14)$$

$$V_{in,rms} = \frac{V_{in}}{\sqrt{2}} \quad (15)$$

$$V_{in,dBm} = 10 \log \left( \frac{V_{in,rms}^2}{10^{-3} * R} \right) \quad (16)$$

$$IIP_3 = V_{in,dBm} + \frac{\Delta I_{dBm}}{2} \quad (17)$$

Bu metodoloji kullanılarak farklı direnç boyutları için IIP3 değerleri hesaplanmıştır ve Tablo 1' de verilen sonuçlar elde edilmiştir.

**Tablo 1.** Direnç IIP3 simülasyon sonuçları

	<i>Polisilyum Direnç</i>						<i>Difüzyon Direnç</i>					
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	R <sub>5</sub>	R <sub>6</sub>	R <sub>7</sub>	R <sub>8</sub>	R <sub>9</sub>	R <sub>10</sub>	R <sub>11</sub>	R <sub>12</sub>
Direnç (Ω)	60.6	57	58.3	59	59.3	59.5	55.7	54.8	56.5	57.3	57.7	58
Genişlik (μm)	0.1	0.5	1	2	4	8	0.1	0.5	1	2	4	8
Uzunluk (μm)	0.5	2	4	8	16	32	0.5	2	4	8	16	32
<b>IIP3 (dBm)</b>	34.66	37.69	40.8	41.11	45.21	49.8	35.64	40.25	44.5	46.22	51.82	57.7

## 5. Sonuç

Gerilim bağımlı direnç ifadelerinden başlayarak direnç akımlarında ikinci ve üçüncü derece katsayıların üretimini göstermek için entegre polisilikon ve difüzyon dirençlerinin doğrusal olmama analizler sunulmuştur. Analog devrelerin doğrusal olmayan davranışındaki ana etken aktif cihazlardır, ancak uygun şekilde analiz edilmediğinde entegre dirençler de doğrusal olmama kaynağı olabilir. Bu, aslında uygun boyut seçimleriyle ortadan kaldırılabilir olan ideal altı tasarım kararlarına yol açabilir. Bu çalışmada sunulan analiz, bir polisilikon direncin IIP3'ünün direncin uzunluğu ile doğru orantılı olduğunu ve böylece direncin kullanıldığı devrenin IIP3 gereksinimini bilerek optimum bir tasarımın mümkün olduğunu göstermektedir. Ayrıca difüzyon direnci akımlarının IIP2 ve IIP3'ünün her ikisinin de direncin uzunluğuna doğrusal olarak bağlı olduğu gösterilmiştir. Bu makalede gösterilen yöntem, daha iyi doğrusallık ve ideal boyutta direnç seçimleri için farklı direnç gerilim değerlerine göre uygulanabilir.



### Kaynaklar

- [1] P. Steinmann and E. Beach. Simple analytical model of the thermal resistance of resistors in integrated circuits, *IEEE Trans. Electron Devices*, 2010; 57(5): 1029–1036.
- [2] S. Kuboki, K. Kato, N. Miyakawa and K. Matsubara. Nonlinearity analysis of resistor string A/D converters, *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 29, no. 6, pp. 383-390,1982.
- [3] S. Pan, Y. Luo, S. Heidary Shalmany and K. A. A. Makinwa. A Resistor-Based Temperature Sensor With a 0.13 pJ · K<sup>2</sup> Resolution FoM in *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 53, no. 1, pp. 164-173, 2018.
- [4] T. Williams and J. Thomas. Current Noise and Nonlinearity in Carbon Resistors, *IRE Trans. Compon. Parts*, 1958; 13: 112–114.
- [5] S. D. M. Da Rold, S. Van Huylenbroeck, B. Knuts, E. Simoen. On the Basic Correlation between Polysilicon Resistor Linearity, Matching and 1/f Noise. *Proceedings of the 29th European Solid-State Device Research Conference*, 1999: 648–651.
- [6] Wambacq P, Sansen W. (1998) Description of nonlinearities in analog integrated circuits. In: *Distortion Analysis of Analog Integrated Circuits. The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science (Analog Circuits and Signal Processing)*, vol 451. Springer, Boston, MA.
- [7] Minowa and H. Tominaga. Resistor's Linearity Testing, *Electromagn. Meas. Dig.*, 2004; 1: 356–357.
- [8] W. Lane and G. Wrixon. The design of thin-film polysilicon resistors for analog IC applications. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1989; 36(4): 738–744.
- [9] R. Virkus, D. Weiser, K. Green, D. Richardson, and G. Westphal. Modeling of non-linear polysilicon resistors for analog circuit design. *Proc. of Int. Conf. Microelectron. Test Struct.*, 2001; 14: 89–91.
- [10] B. Razavi. *RF Microelectronics* (Pearson, Upper Saddle River, NJ, 2012)

## Stockwell Dönüşümü, ONE-R Özellik Seçme Yöntemi ve Rastgele Orman Algoritması ile Güç Kalitesi Bozulumu Sinyallerinin Sınıflandırılması

Düzgün AKMAZ<sup>1\*</sup>

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

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

(Geliş/Received: 02/11/2021;

Kabul/Accepted: 03/02/2022)

**Öz:** Bu çalışmada Güç Kalitesi (GK) bozulumu sinyallerinin sınıflandırılması için bir yöntem uygulanmıştır. Yöntemde Stockwell dönüşümünün (S-dönüşümü-SD) farklı GK sinyallerine uygulanması ile 2 boyutlu Zaman-Frekans (TF Time-Frequency) matrisi elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen matrisin ve GK sinyallerinin farklı entropi değerleri ile sınıflandırma öznelikleri elde edilmiştir. Ancak elde edilen sınıflandırma özneliklerinin tamamının kullanılması, gerçekleştiren yöntemin karmaşık hale gelmesine neden olmaktadır. Bu yüzden bu çalışmada ONE-R özellik seçme yöntemi sınıflandırmadaki etkili özelliklerin belirlenmesi, daha az öznitelik ve daha basit bir yapı ile yüksek sınıflandırma başarısının sağlanması için kullanılmıştır. Belirlenen öznelıklar ve Rastgele Orman (RO) algoritması ile GK bozulmaları sınıflandırılmıştır. Benzetim sonuçları, yöntemin başarılı olduğunu göstermiştir. Aynı zamanda benzetim sonuçları gerçekleştirilen yöntemin bir kere eğitildikten sonra, 35 dB ve üzerindeki gürültü seviyelerine sahip farklı GK bozulmalarının sınıflandırılması için de etkili olduğunu göstermiştir.

**Anahtar kelimeler:** Güç Kalitesi, Stockwell Dönüşümü, ONE-R Özellik Seçme Yöntemi, Rastgele Orman Algoritması.

### Classification of Power Quality Disturbance Signals with Stockwell Transform, ONE-R Feature Selection Method and Random Forest Algorithm

**Abstract:** In this study, a method was applied to classify the Power Quality (PQ) distortion signals. In the method, a 2-dimensional Time-Frequency (TF) matrix was obtained by applying the Stockwell transform (S-transform-ST) to different PQ signals. Then, classification features were obtained with different entropy values of the obtained matrix and PQ signals. However, using all of the obtained classification features causes the performing method to become complicated. Therefore, in this study, the ONE-R feature selection method was used to determine the effective features in classification, to ensure high classification success with fewer features and a simpler structure. PQ disturbances were classified with the determined features and Random Forest (RF) algorithm. The simulation results showed that the method was successful. At the same time, the simulation results showed that the applied method, once trained, is also effective in the classification of different PQ disturbances with noise levels of 35 dB and above.

**Key words:** Power Quality, ONE-R Feature Selection Method, Random Forest Algorithm, Stockwell Transform.

## 1. Giriş

Güç sistemlerindeki sinyallerin tüketicilere sürekli olarak ulaştırılması istenmektedir. Bununla birlikte son zamanlarda doğrusal olmayan yük kullanımının artması, evirici gibi anahtarlama elemanlarına sahip cihazların sistemlere dâhil edilmesi gibi bazı durumlar, şebekelerdeki sinyallerin kararlılığını ve kalitesini düşürmektedir. Aynı zamanda yıldırım ve rüzgâr gibi bazı çevresel faktörlerin eklenmesi ile güç sistemlerinde farklı arızalar oluşabilmektedir. Bu arızaların doğru tanımlanması arızalara müdahale süresini kısaltabilir. Bu yüzden literatürde birçok yöntem, farklı Güç Kalitesi (GK) arıza sinyallerinin belirlenmesi, segmentasyonu, özellik çıkarımı ve sınıflandırılması için geliştirilmiştir [1-4].

Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD) ve Destek Vektör Makineleri (DVM) [5], Ampirik Kip Ayırımı-Hilbert dönüşümü ve olasılıksal sinir ağı modeli [6], Gabor-Wigner dönüşümü ve Nöral Ağlar (NA) [7], S-Dönüşümü (SD) ve NA [8] gibi birçok farklı yaklaşım GK olaylarının sınıflandırılması için uygulanmıştır. Bu çalışmalara ek olarak bazı hibrit yaklaşımlar da GK bozulumu sinyallerinin sınıflandırılması için tamamlanmıştır [9,10]. Hibrit yöntemlerde birden fazla sinyal işleme aracı veya yapay zekâ algoritması kullanılarak sınıflandırma yapılmaktadır. [9]' da ADD/hızlı Fourier dönüşümü sinyal işleme aracı ve kural bazlı bir sınıflandırma yöntemi kullanılırken, [10]' da ise ADD/Hiperbolik SD ve çok sınıflı DVM GK bozulmalarının sınıflandırılması için kullanılmıştır.

\* Sorumlu yazar: [dakmaz@munzur.edu.tr](mailto:dakmaz@munzur.edu.tr). Yazarın ORCID Numarası: 0000-0002-4183-6424

Bazı çalışmalarda ise ayrıca farklı özellik seçme yöntemleri de GK sinyallerinin sınıflandırılması için kullanılmıştır. Özellik seçme yöntemlerinde daha az sınıflandırma özelliği ile yüksek bir sınıflandırma başarısı sağlanması amaçlanmaktadır. Özellik sayısı azaldığı için daha kısa sürede eğitim ve test verileri sınıflandırılabilir. Aynı zamanda daha az sınıflandırma özelliğinin kullanılması önerilen sınıflandırma yöntemlerinin daha basit yapılara dönüşmesini de sağlayabilmektedir. [11]'de dalgacık paket dönüşümü sinyal işleme yöntemi, genetik algoritma özellik seçme yöntemi ve bulanık k-en yakın komşu sınıflandırma algoritması kullanılmıştır. [12]'de SD sinyal işleme yöntemi, istatistiksel bir özellik seçme yöntemi ve olasılıksal sinir ağı GK sinyallerinin sınıflandırılması için uygulanmıştır. [13]'te SD/Varyasyon kip ayrıştırması sinyal işleme yöntemi, sıralı (ileri/geriye) doğru seçim-Gram-Schmidt ortogonalleşmesi özellik seçme yöntemleri ve DVM, GK bozulmalarının sınıflandırılması için uygulanmıştır.

Literatürde yukarıda belirtilen çalışmaların dışında birçok farklı yöntem geliştirilmiş olup bunlara ait bilgiler [1-3]'te özetlenmiştir. Bu çalışmalar incelendiğinde birçok farklı sinyal işleme aracının GK sinyalleri için kullanıldığı görülmektedir. Bu sinyal işleme araçlarından SD, sinyalleri zaman ve frekans düzleminde inceleyebildiği için birçok farklı çalışmada kullanılmıştır [12-17]. Bu yüzden bu çalışmada da SD sinyal işleme yöntemi kullanılmıştır. Daha önce gerçekleştirilen [12-17]'den farklı olarak bu çalışmada SD sinyal işleme aracı, ONE-R özellik seçme yöntemi ve RO algoritması ile birlikte uygulanmıştır. Benzetim sonuçları gerçekleştirilen yöntemin GK bozulmalarını sınıflandırmada başarılı olduğunu göstermiştir. Aynı zamanda benzetim sonuçları 40 dB gürültülü verilerdeki eğitim sonrası yöntemin bir daha eğitime ihtiyaç duymadan 35, 40, 45, 50,55, 60 dB gürültüye sahip GK bozulmalarını büyük bir doğruluk oranında sınıflandırabildiğini de göstermiştir.

## 2. Stockwell Dönüşümü (S-dönüşümü)

SD, Sürekli Dalgacık Dönüşümünün (SDD), “faz düzeltmesi” olarak görülebilir. Bir fonksiyonun SDD'si denklem (1)'deki gibi tanımlanır [17].

$$W(\tau, d) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)\omega(d, t - \tau)dt \quad (1)$$

Ölçek parametresi  $d$ , dalgacığın  $\omega(d, t)$  “genişliğini” belirler ve böylece çözünürlüğü kontrol eder.  $h(t)$  fonksiyonunun SD'si, faz faktörü ile çarpılan spesifik bir ana dalgacıklı bir SDD olarak tanımlanır [17].

$$S(\tau, f) = e^{j2\pi f\tau}W(d, \tau) \quad (2)$$

Burada ana dalgacık aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\omega(t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2 f^2}{2}} e^{-j2\pi f t} \quad (3)$$

Ölçek parametresi,  $f$  frekansının tersidir. Denklem (3)'teki dalgacık, kabul edilebilir bir dalgacık için sıfır ortalama koşulunu sağlamaz; bu nedenle, denklem (2) kesinlikle bir SDD değildir. Açıkça yazıldığında, SD denklem 4'teki gibi tanımlanır [17].

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}} e^{-j2\pi f t} dt \quad (4)$$

SD ayrıca  $h(t)$ 'nin Fourier spektrumu  $H(f)$  üzerindeki işlemler olarak denklem 5'teki gibi de yazılabilir [17].

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\alpha + f) e^{-\frac{2\pi^2 \alpha^2}{f^2}} e^{j2\pi \alpha \tau} d\alpha, \quad f \neq 0. \quad (5)$$

Güç sistemi sinyalleri  $h(t)$ ,  $h(kT)$  olarak ayrık formda ifade edilebilir. Burada  $k=0, 1, \dots, N-1$  olup  $N$  toplam örnekleme sayısı iken,  $T$  ise örnekleme zaman aralığıdır.  $h(kT)$ 'nin ayrık Fourier dönüşümü Denklem 6'daki gibi elde edilebilir.

$$H\left[\frac{n}{NT}\right] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-1} h(kT). e^{(-\frac{j2\pi nk}{N})} \quad (6)$$

Burada  $n=0, 1, \dots, N-1$ .

Bir ayrık zaman serisinin  $h(kT)$  SD'si denklem 7 ile belirlenebilir. ( $\tau \rightarrow kT$  ve  $f \rightarrow n/NT$ )

$$S\left[kT, \frac{n}{NT}\right] = \sum_{m=0}^{N-1} \mathbf{H}\left[\frac{m+n}{NT}\right] e^{-\frac{2\pi^2 m^2}{n^2}} e^{\frac{j2\pi mk}{N}} \quad n \neq 0 \quad (7)$$

Burada  $m=0, 1, \dots, N-1$  ve  $n=1, \dots, N-1$  dir. Denklem 8,  $n=0$  için elde edilir.

$$S[kT, 0] = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} h\left(\frac{m}{NT}\right) \quad (8)$$

Hızlı Fourier dönüşümü verimliliğinden ve konvolüsyon (evrişim) teoreminin avantajından yararlanarak ayrık SD hızlı bir şekilde hesaplanabilir. SD, faz spektrumunun yanı sıra genlik spektrumunu da lokalize eder.

### 3. ONE-R Özellik seçme yöntemi

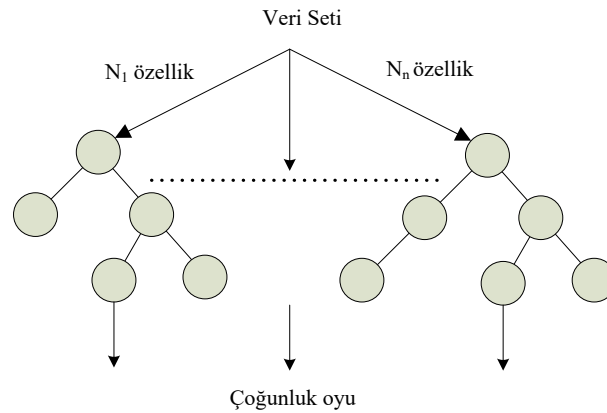
One-R, Holte [18] tarafından önerilen basit bir algoritmadır. Eğitim verisindeki her öznelik için bir kural oluşturulur ve ardından en küçük hataya sahip kural seçilir. Sayısal olarak değerli tüm özellikleri sürekli olarak ele alır ve değer aralığını birkaç ayrık aralığa bölmek için basit bir yöntem kullanır. Yalnızca bir özelliğe dayalı basit kurallar üretir. Minimal bir sınıflandırıcı biçimi olmasına rağmen, diğer öğrenme şemaları için bir kıyaslama olarak temel bir performansı belirlemek için yararlı olabilir [18].

One-R algoritma adımları kısaca aşağıdaki gibi ifade edilebilir [19]:

- \*Her bir özellik  $f$  için,  $f$ 'nin etki alanındaki her  $v$  değeri için,  $v$  değerine sahip  $f$  özellik örnek setini seç,
- \* $c$  = seçilen sette en sık rastlanan sınıf değeri, her bir  $f$  özelliği için “ $f$  özelliği  $v$  değerini alıyorsa sınıfı  $c$ ” kuralını ekle,
- \*En yüksek sınıflandırma oranına sahip kuralı çıktı olarak üret.

### 4. Rastgele Orman Algoritması

Bu algoritmada ilk olarak orijinal eğitim veri setinden birden çok önyüklemeli eğitim veri seti oluşturur. Daha sonra her bir önyüklemeli eğitim veri seti için bir ağaç üretilir. Son olarak bu ağaçların çoğunluk oyunu kullanarak sınıflandırma yapılır. Önyükleme, rastgele ormandaki her bir karar ağacının farklı olmasını sağlar. Aynı zamanda bu algoritmanın bir sınıflandırıcı yerine birden fazla sınıflandırıcı kullanması ve bu sınıflandırıcıların çoğunluk oylarını kullanması RO algoritmasını etkili bir sınıflandırma algoritması haline getirir. Tüm bu özellikler RO yönteminin aşırı öğrenme durumunu minimize eder ve birçok farklı algoritmaya göre başarılı olmasını sağlar [20,21]. Şekil 1, bu algoritmanın akış şemasını göstermektedir.



Şekil 1. Rastgele orman algoritması

## 5. Benzetim Sonuçları

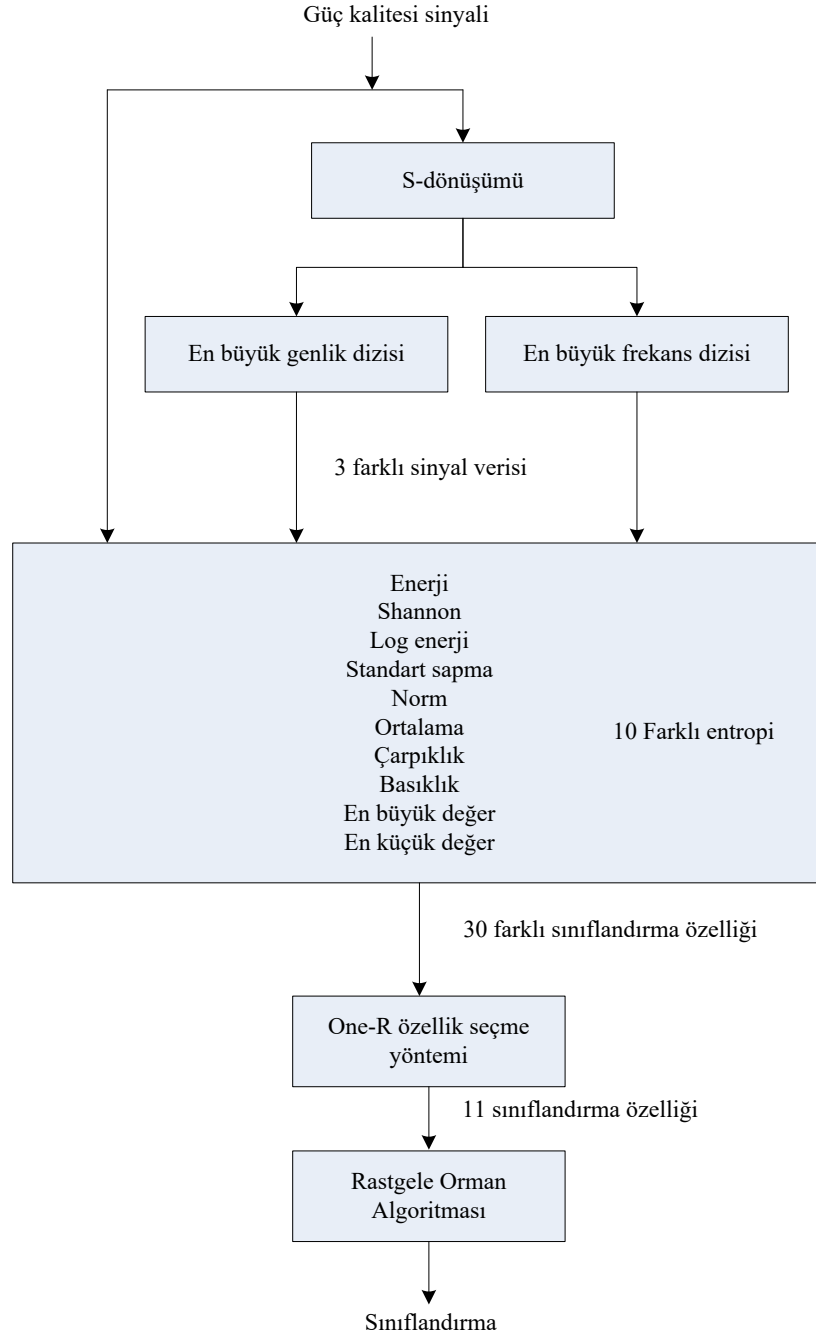
Bu çalışmada sinüs, gerilim çukuru (sag), gerilim tepesi (swell), harmonik (harmonic), geçici rejim gerilim bileşenleri (transient), gerilim kesintisi (interruption), gerilim çukuru ile harmonik (sag with harmonic), gerilim tepesi ile harmonik (swell with harmonic) ve gerilim kırışması (flicker) sinyalleri incelenmiştir.

Yukarıda belirtilen sinyaller sentetik olarak üretilmiş olup sinyallerin parametreleri [22]'de belirtilen aralıklar içinde rastgele olarak seçilmiştir. Tablo 1'de bu sentetik sinyallerin parametreleri verilmiştir [22].

**Tablo 1.** Güç kalitesi olaylarının matematiksel denklemleri.

Sınıf	Güç kalitesi sinyali	Güç kalitesi sinyallerinin matematiksel denklemleri	Parametreler
C <sub>1</sub>	Sinüs	$v(t)=\sin(\omega t)$	Frekans=50Hz
C <sub>2</sub>	Gerilim çukuru (Sag)	$v(t)=(1-\alpha(u(t-t_1)-u(t-t_2)))\sin(\omega t)$	$0.1 \leq \alpha \leq 0.9$ $T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$
C <sub>3</sub>	Gerilim tepesi (Swell)	$v(t)=(1+\alpha(u(t-t_1)-u(t-t_2)))\sin(\omega t)$	$0.1 \leq \alpha \leq 0.8$ $T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$
C <sub>4</sub>	Gerilim kesintisi (Interruption)	$v(t)=(1-\alpha(u(t-t_1)-u(t-t_2)))\sin(\omega t)$	$0.9 \leq \alpha \leq 1$ $T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$
C <sub>5</sub>	Harmonik (Harmonic)	$v(t)=(\alpha_1 \sin(\omega t) + \alpha_3 \sin(3\omega t) + \alpha_5 \sin(5\omega t) + \alpha_7 \sin(7\omega t))$	$0.05 \leq \alpha_3 \leq 0.15$ $0.05 \leq \alpha_5 \leq 0.15$ $0.05 \leq \alpha_7 \leq 0.15$ $\sum \alpha_i^2 = 1$
C <sub>6</sub>	Geçici rejim (Transient)	$v(t)=(\sin(\omega t) + \alpha_{osc} \exp(-(t-t_1)/\tau_{osc}))\sin(\omega_{nosc}(t-t_1))$	$\tau_{osc}=0.008-0.04$ sn $\omega_{nosc}=100-400$ Hz
C <sub>7</sub>	Gerilim çukuru ile harmonik (Sag with harmonic)	$v(t)=(1-\alpha(u(t-t_1)-u(t-t_2))) (\alpha_1 \sin(\omega t) + \alpha_3 \sin(3\omega t) + \alpha_5 \sin(5\omega t) + \alpha_7 \sin(7\omega t))$	$0.1 \leq \alpha \leq 0.9$ $T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$ $0.05 \leq \alpha_3 \leq 0.15$ $0.05 \leq \alpha_5 \leq 0.15$ $0.05 \leq \alpha_7 \leq 0.15$ $\sum \alpha_i^2 = 1$
C <sub>8</sub>	Gerilim yükselmesi ile harmonik (Swell with harmonic)	$v(t)=(1+\alpha(u(t-t_1)-u(t-t_2))) (\alpha_1 \sin(\omega t) + \alpha_3 \sin(3\omega t) + \alpha_5 \sin(5\omega t) + \alpha_7 \sin(7\omega t))$	$0.1 \leq \alpha \leq 0.8$ $T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$ $0.05 \leq \alpha_3 \leq 0.15$ $0.05 \leq \alpha_5 \leq 0.15$ $0.05 \leq \alpha_7 \leq 0.15$ $\sum \alpha_i^2 = 1$
C <sub>9</sub>	Gerilim kırışması (Flicker)	$v(t)=(1+\alpha_f \sin(\beta_f \omega t))\sin(\omega t)$	$\alpha_f=0.1-0.2$ $\beta_f=5-10$ Hz

SD sinyal işlemini kullanan bazı çalışmalarda sinyallerin örnekleme frekansı 3.2 kHz olarak seçilmiştir [15, 16]. Bu yüzden bu çalışmada benzer şekilde 3.2 kHz örnekleme frekansı kullanılmıştır. Bu çalışmadaki sinyal üretme ve özellik çıkarma adımları için MATLAB programı kullanılmıştır. ONE-R ve RO algoritması için ise WEKA programı kullanılmıştır. WEKA programı, veri madenciliğinde ve farklı güç kalite çalışmalarında güncel olarak kullanılan bir programdır [23, 24]. Çalışmada kullanılan sınıflandırma yönteminin genel algoritması Şekil 2'de gösterilmiştir. Aynı zamanda Şekil 2'de sınıflandırma özelliklerinin nasıl elde edildiği de gösterilmiştir.



**Şekil 2.** Sınıflandırma yöntemi

Yöntemin başarısını test etmek için farklı şartlar altında eğitim ve test verileri üretilmiştir. Eğitim verilerinde her bir GK bozulumu için 100 farklı benzetim gerçekleştirilmiştir. Toplamda 9 farklı GK sinyali için 900 farklı arıza meydana gelmiştir.

Üretilen eğitim verilerine 40 dB gürültü eklenmiştir. Benzer şekilde rastgele üretilmiş 900 tane test verisi için de GK sinyallerine 40 dB gürültü eklenmiştir.

Sınıflandırma özelliklerini elde etmek için SD, 40 dB gürültü içeren GK sinyallerine uygulanmıştır. SD sonrası her bir sinyalin 2 boyutlu Zaman-Frekans (TF Time-Frequency) matrisi elde edilmiştir. Bu matris, karmaşık sayılar içeren NxM boyutunda bir matristir. Matrisin sütunları zamanla ve satırları frekansla ilgilidir.

TF konturunun/matrisinin sütun değerlerinde en büyük değer aranarak zaman - en büyük genlik dizisi (TmA-Time-maximum amplitude), satır değerlerinde en büyük değer aranarak ise frekans - en büyük genlik dizisi (FmA-Frequency-maximum amplitude) elde edilmiştir. Daha sonra GK sinyali, zaman en büyük genlik dizisi ve frekans en büyük genlik dizisinin 10 farklı entropi (enerji, shannon, log enerji, standart sapma, norm, ortalama, çarpıklık, basıklık, en büyük değer, en küçük değer entropi) değerleri alınarak toplamda 30 (3 sinyal x10 entropi) farklı sınıflandırma özelliği elde edilmiştir. Daha sonra 30 farklı sınıflandırma özelliği ve RO algoritması kullanılması ile GK bozulmaları sınıflandırılmıştır. Tablo 2, 30 farklı sınıflandırma özelliği ve RO algoritması ile elde edilen benzetim sonuçlarını göstermektedir. Burada hem eğitim hem de test verilerindeki GK sinyallerinde 40 dB gürültü bulunmaktadır.

**Tablo 2.** 30 farklı sınıflandırma özelliği ve RO yöntemi ile elde edilen benzetim sonuçları (eğitim ve test 40 dB gürültülü).

	Eğitim	Test
<b>Başarı %</b>	100	99.11
<b>Süre (sn)</b>	0.12	0.1

Tablo 2' den görüldüğü gibi eğitim sonrası yapılan test verilerindeki başarı %99.11 olmuştur. WEKA program sonuçları, modeli eğitim verileri üzerinde test etmek için geçen sürenin 0.12 sn olduğunu gösterirken, verilen test setinde modeli test etmek için geçen sürenin ise 0.1 sn olduğunu göstermiştir. Bunlara ek olarak WEKA programı eğitim verilerinde modeli oluşturmak için geçen sürenin 0.3 sn olduğunu göstermiştir. Bu tablodan görüldüğü gibi 30 farklı sınıflandırma özelliği ile yüksek bir sınıflandırma başarısı elde edilmiştir. Fakat özellik seçimi yöntemi ile daha az sınıflandırma özelliği ile benzer şekilde yüksek sınıflandırma başarısı elde edilebilmektedir. Bu çalışmada, daha az sınıflandırma verisi ile yüksek bir sınıflandırma başarısı sağlamak ve benzetimlerdeki süreyi kısaltmak için ONE-R özellik seçimi yöntemi ve RO algoritması kullanılmıştır. İlk olarak ONE-R yöntemi ile sınıflandırma için en etkili özellikler belirlenmiş ve bu özellikler sıralanmıştır. Daha sonra bu özellikler sıra ile eklenerek RO algoritmasının eğitim ve test başarısı incelenmiştir. Burada en az sınıflandırma özelliği ile en yüksek sınıflandırma başarısı sağlanmaya çalışılmıştır.

Tablo 3, ONE-R algoritmasının seçtiği özellikler ve RO yönteminin sınıflandırma başarısını göstermektedir. Tablo 3'ten görüldüğü gibi yöntemin eğitim başarısı değişmemektedir. Ancak test başarısı değişmektedir. 11 veri kullanılarak en yüksek test başarısı elde edilmiştir. 11 özellikten sonra eklenen özellikler test sınıflandırma başarısını düşürmektedir. Bu yüzden belirlenen 11 özellik, sınıflandırma için kullanılmıştır. Bu yaklaşım, bazı çalışmalarda kullanılmıştır [5, 10]. Benzer şekilde, bu çalışmalardan görüldüğü gibi en az veri ile elde edilen en yüksek sınıflandırma başarısından sonra eklenen özellikler sınıflandırma başarısını düşürmektedir [5].

**Tablo 3.** ONE-R yönteminin belirlediği özellikler ve RO algoritmasının sınıflandırma başarısı.

Farklı veri sayısı	Eğitim sınıflandırma başarısı %	Test sınıflandırma başarısı %	Belirlenen özellikler (KO)
1	100	58.55	12
2	100	82.11	12,20
3	100	95.44	12,20,3
4	100	96	12,20,3,11
5	100	96	12,20,3,11,15
6	100	95.77	12,20,3,11,15,16
7	100	96.88	12,20,3,11,15,16,5
8	100	97	12,20,3,11,15,16,5,13
9	100	97.77	12,20,3,11,15,16,5,13,2
10	100	97.33	12,20,3,11,15,16,5,13,2,24
11	<b>100</b>	<b>98.1</b>	<b>12,20,3,11,15,16,5,13,2,24,8</b>
12	100	97.88	12,20,3,11,15,16,5,13,2,24,8,26
13	100	97.55	12,20,3,11,15,16,5,13,2,24,8,26,25
14	100	97.98	12,20,3,11,15,16,5,13,2,24,8,26,25,19

Tablo 4'te ise belirlenen özelliklerin tanımları gösterilmiştir. Tablo 4 incelendiğinde farklı sinyallerin farklı entropi değerlerinin sınıflandırma için seçildiği görülmektedir.

**Tablo 4.** ONE-R algoritmasının belirlediği sınıflandırma özelliklerinin tanımı.

	<b>Özellik</b>	<b>Sinyal</b> <b>En büyük genlik dizisi</b> <b>En büyük frekans dizisi</b>	<b>Entropi</b>
<b>1</b>	12	En büyük genlik dizisi	Shannon
<b>2</b>	20	En büyük genlik dizisi	En küçük değer
<b>3</b>	3	Sinyal	Log enerji
<b>4</b>	11	En büyük genlik dizisi	Enerji
<b>5</b>	15	En büyük genlik dizisi	Norm
<b>6</b>	16	En büyük genlik dizisi	Ortalama
<b>7</b>	5	Sinyal	Norm
<b>8</b>	13	En büyük genlik dizisi	Log enerji
<b>9</b>	2	Sinyal	Shannon
<b>10</b>	24	En büyük frekans dizisi	Standart sapma
<b>11</b>	8	Sinyal	Basıklık

Tablo 4'teki seçilen sınıflandırma özelliklerine göre eğitim ve test verisinde belirlenen 11 sınıflandırma özelliği kullanılmıştır. Diğer sınıflandırma özellikleri veri tabanından kaldırılmıştır. Tekrardan WEKA programı kullanılarak benzetim sonuçları incelenmiştir.

Tablo 5'te ise belirlenen 11 farklı sınıflandırma özelliği ile elde edilen benzetim sonuçlarını göstermektedir.

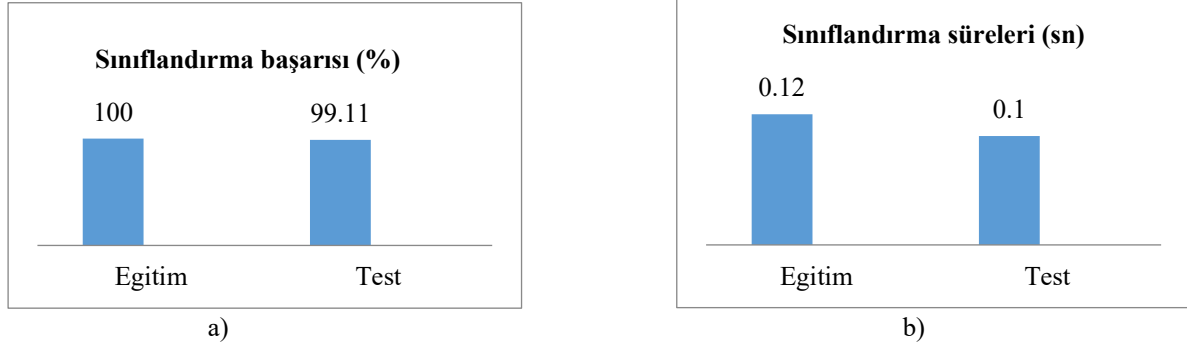
**Tablo 5.** ONE-R özellik seçme yöntemi ile belirlenen 11 farklı sınıflandırma özelliği ve RO algoritması ile elde edilen benzetim sonuçları (eğitim ve test 40 dB gürültülü).

	<b>Eğitim</b>	<b>Test</b>
<b>Başarı %</b>	100	98.11
<b>Süre (sn)</b>	0.01	0.02

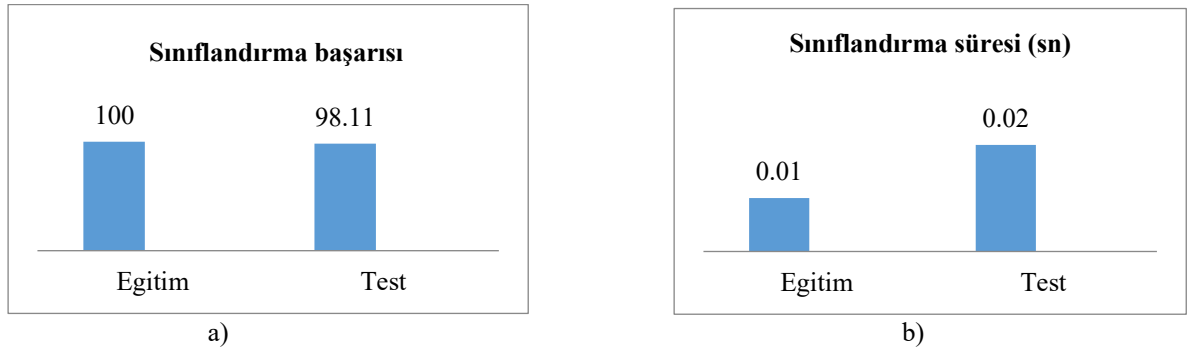
Tablo 5'ten görüldüğü gibi seçilen 11 özellik ile test verisinde %98.11'lik bir sınıflandırma başarısı elde edilmiştir. Tablo 2'de ise 30 sınıflandırma özelliği kullanılması durumunda test verilerinde %99.11'lik bir sınıflandırma başarısının elde edildiği görülmüştür. Elde edilen sonuçlar iki yöntemin de sınıflandırmada başarılı olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte Tablo 2 ve Tablo 5'te görüldüğü gibi belirlenen 11 sınıflandırma özelliği ile çok daha kısa sürede eğitim ve test gerçekleştirilmiştir. Tablo 2'de 30 sınıflandırma verisi kullanıldığında test için gerekli sürenin 0.1 sn olduğu sonucuna varılırken, Tablo 5'te 11 sınıflandırma özelliği ile bu sürenin 0.02 sn olduğu görülmüştür. Böylece daha kısa sürede yüksek bir sınıflandırma başarısı elde edilmiştir. Şekil 3 ve Şekil 4'te elde edilen sonuçlar grafiksel olarak da verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde belirlenen 11 özellik ile başarılı bir sınıflandırma yapıldığı görülmektedir. Ancak, Şekil 3 ve Şekil 4'ten görüldüğü gibi belirlenen 11 özellik ile çok daha kısa sürede eğitim ve test verilerinin sınıflandırması yapılmıştır.

Bu çalışmadaki yöntemin başarısını göstermek için aynı zamanda farklı özellik seçme yöntemlerinin de test edilmesi gereklidir. Bu yüzden bu çalışmada ayrıca korelasyon öznitelik değerlendirmesi ve kazanç oranı özellik seçme yöntemleri de kullanılmıştır. Bu özellik seçme yöntemleri ile ilgili ayrıntılı bilgi [25, 26]'da bulunabilir. Tablo 6'da farklı özellik seçme yöntemleri ile belirlenen 11 sınıflandırma özelliğinin kullanılması ile elde edilen test verisi sınıflandırma sonuçları gösterilmiştir. Bu tablodan görüldüğü gibi en yüksek test sınıflandırma başarısı, ONE-R özellik seçme yöntemi ile elde edilmiştir. Bu yüzden çalışmada ONE-R özellik seçme yöntemi kullanılmıştır.





Şekil 3. 30 sınıflandırma özelliği ile benzetim sonuçları a) Eğitim/Test verilerinin sınıflandırma sonuçları b) Eğitim/Test verilerinin sınıflandırma süreleri



Şekil 4. 11 sınıflandırma özelliği ile benzetim sonuçları a) Eğitim/Test verilerinin sınıflandırma sonuçları b) Eğitim/Test verilerinin sınıflandırma süreleri

Tablo 6. Farklı özellik seçme yöntemi ile belirlenen 11 farklı sınıflandırma özelliği ve RO algoritması ile elde edilen benzetim sonuçları (eğitim ve test 40 dB gürültülü).

Özellik seçme algoritması	Test
ONE-R	98.11
Kazanç oranı	97.88
Korelasyon öznelik değerlendirme	97

Burada diğer bir önemli durum ise 11 seçilen sınıflandırma özelliğinin farklı gürültü seviyelerinde de başarılı olduğunun test edilmesidir. Bunu gerçekleştirmek için farklı gürültüye sahip test verileri kullanılmıştır. Test verilerine 30, 35, 40, 45, 50, 55 ve 60 dB gürültü eklenmiştir. Eğitim verisinde ise 40 dB gürültü kullanılmıştır. Tablo 7’de farklı gürültü seviyeleri için gerçekleştirilen yöntemin sınıflandırma başarıları verilmiştir.

Tablo 7. ONE-R özellik seçme yöntemi ile belirlenen 11 farklı sınıflandırma özelliği ve RO yöntemi ile farklı gürültüye sahip test verilerindeki sınıflandırma başarıları (eğitim 40 dB gürültülü).

Test verisi gürültü seviyesi (dB)	30	35	40	45	50	55	60
Başarı (%)	90.66	95.66	98.1	97.66	98	98.11	98

Bu çalışmada 40 dB gürültü değerine sahip eğitim verileri için bir yöntem geliştirilmiştir. Burada GK olaylarının parametreleri Tablo 1’de belirtilen aralıklarda rastgele seçilmiştir. Bu nedenlerden dolayı Tablo 7’den görüldüğü gibi 40 ile 60 dB gürültü aralığında yöntemin başarıları küçük değişiklikler göstermiştir.

Ancak genel olarak bütün benzetim sonuçları yöntemin, bir kere eğitildikten sonra 35 dB üzerindeki gürültü seviyelerindeki GK sinyallerinin sınıflandırılmasında etkili olduğunu göstermiştir.

Tablo 8’de ise bu çalışmadaki yöntem sonuçları ile [11]’de tamamlanan çalışma sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu tablodan görüldüğü gibi tamamlanan yöntemde daha az sınıflandırma özelliği ile 35 ve 40 dB gürültü seviyeleri için daha yüksek bir sınıflandırma başarıları elde edilmiştir.

**Tablo 8.** Farklı gürültü seviyeleri için önerilen yöntemin, [11] ile karşılaştırılması.

Referans	Güç kalitesi sayısı	Özellik sayısı	Başarı (35 dB)	Başarı (40 dB)
[11]	10	16	93.96	95.96
Önerilen	9	11	95.66	98.1

Elde edilen tüm sonuçlar önerilen yöntemin GK sinyallerinin sınıflandırılmasında başarılı olduğunu göstermiştir.

## 6. Sonuçlar

Günümüzde güç sistemlerinde oluşabilecek arızalara daha doğru bir şekilde müdahale edebilmek için güç kalitesi sinyallerinin sınıflandırılması gereklidir. Bu yüzden birçok farklı yöntem, güç kalite sinyallerinin sınıflandırılması için geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin olabildiğince etkili ve basit olması istenmektedir. Bu çalışmada S dönüşümü ve Rastgele Orman algoritmasına dayalı bir yöntem, sınıflandırma için uygulanmıştır. Uygulamada 30 farklı sınıflandırma verisi kullanılmıştır. Bu yöntem her ne kadar sınıflandırma için başarılı olsa da verilerin arttığı günümüzde daha az sınıflandırma verisi ile yüksek sınıflandırma başarısının elde edilmesi beklenmektedir. Bu yüzden çalışmada ayrıca ONE-R özellik seçme yöntemi uygulanmıştır. Benzetim sonuçları test verilerinde, 30 veri yerine belirlenen 11 farklı sınıflandırma verisi ile yüksek sınıflandırma başarısı elde edildiğini göstermektedir. Aynı zamanda benzetim sonuçları incelendiğinde 30 veri yerine belirlenen 11 veri kullanılmasının sınıflandırma yöntemini daha basit bir yapıya dönüştürdüğünü ve daha kısa sürede farklı güç kalitesi sinyallerini sınıflandırabildiğini de göstermiştir.

## Kaynaklar

- [1] Choong F, Reaz MBI, Mohd-Yasin F. Advances in signal processing and artificial intelligence technologies in the classification of power quality events: a survey. *Electr. Power Compon. Syst* 2005; 33(12): 1333-1349.
- [2] Mishra M. Power quality disturbance detection and classification using signal processing and soft computing techniques: A comprehensive review. *Int. Trans. Electr. Energy Syst.* 2019; 29(8): e12008.
- [3] Khetarpal P, Tripathi MM. A critical and comprehensive review on power quality disturbance detection and classification. *Sustainable Comput. Inf. Syst* 2020; 100417.
- [4] Akmaz D, Approximate-derivative-based signal-processing method to segment power-quality disturbances. *IET Gener. Transm. Distrib* 2020;14(21): 4835-4846.
- [5] Erişti, H., Uçar, A., & Demir, Y. (2010). Wavelet-based feature extraction and selection for classification of power system disturbances using support vector machines. *Electric power systems research*, 80(7), 743-752.
- [6] Shukla S, Mishra S, Singh B. Empirical-mode decomposition with Hilbert transform for power-quality assessment. *IEEE Trans. Power Delivery* 2009;24(4): 2159-2165.
- [7] Cho SH, Jang G, Kwon SH. Time-frequency analysis of power-quality disturbances via the Gabor–Wigner transform. *IEEE Trans. Power Delivery* 2009;25(1): 494-499.
- [8] Lee IW, Dash PK. S-transform-based intelligent system for classification of power quality disturbance signals. *IEEE Trans. Ind. Electron* 2003; 50(4): 800-805.
- [9] Deokar, S. A., & Waghmare, L. M. (2014). Integrated DWT–FFT approach for detection and classification of power quality disturbances. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 61, 594-605.
- [10] Hajian, M., & Foroud, A. A. (2014). A new hybrid pattern recognition scheme for automatic discrimination of power quality disturbances. *Measurement*, 51, 265-280.
- [11] Panigrahi BK, Pandi VR. Optimal feature selection for classification of power quality disturbances using wavelet packet-based fuzzy k-nearest neighbour algorithm. *IET Gener. Transm. Distrib* 2009;3(3): 296-306.
- [12] Huang N, Xu D, Liu X, Lin L. Power quality disturbances classification based on S-transform and probabilistic neural network. *Neurocomputing* 2012; 98: 12-23.
- [13] Abdoos AA, Mianaei P K, Ghadikolaei M R. Combined VMD-SVM based feature selection method for classification of power quality events. *Appl. Soft Comput* 2016;38: 637-646.
- [14] Dash PK, Panigrahi BK, Panda G. Power quality analysis using S-transform. *IEEE Trans. Power Delivery* 2003; 18(2): 406-411.
- [15] Bhende CN, Mishra S, Panigrahi BK. Detection and classification of power quality disturbances using S-transform and modular neural network. *Electr. Power Syst. Res.* 2008;78(1): 122-128.
- [16] Mishra S, Bhende CN, Panigrahi BK. Detection and classification of power quality disturbances using S-transform and probabilistic neural network. *IEEE Trans. Power Delivery* 2007; 23(1): 280-287.

- [17] Zhao F, Yang R. Power quality disturbance recognition using S-transform. In 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting 2006; 7-pp.
- [18] Yildirim P. Filter based feature selection methods for prediction of risks in hepatitis disease. *International Journal of Machine Learning and Computing* 2015;5(4): 258.
- [19] Budak H. Özellik seçim yöntemleri ve yeni bir yaklaşım. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2018;22: 21-31.
- [20] Misra S, Li H, He J. Noninvasive fracture characterization based on the classification of sonic wave travel times. In *Machine Learning for Subsurface Characterization* 2020;243-287.
- [21] Kiranmai SA, Laxmi AJ. Data mining for classification of power quality problems using WEKA and the effect of attributes on classification accuracy. *Protection and Control of Modern Power Systems* 2018; 3(1):1-12.
- [22] Moravej Z, Abdoos AA, Pazoki MJEPC. Detection and classification of power quality disturbances using wavelet transform and support vector machines. *Electr. Power Compon. Syst* 2009;38(2):182-196.
- [23] Vinayagam A, Veerasamy V, Radhakrishnan P, Sepperumal M, Ramaiyan, K. An ensemble approach of classification model for detection and classification of power quality disturbances in PV integrated microgrid network. *Applied Soft Computing* 2021; 106; 107294.
- [24] Kiranmai SA, Laxmi AJ. Data mining for classification of power quality problems using WEKA and the effect of attributes on classification accuracy. *Protection and Control of Modern Power Systems* 2018; 3(1); 1-12.
- [25] Budak H. Özellik seçim yöntemleri ve yeni bir yaklaşım. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2018; 22;21-31.
- [26] Yildirim P. Filter based feature selection methods for prediction of risks in hepatitis disease. *International Journal of Machine Learning and Computing* 2018; 5(4); 258.

## Sürdürülebilir Biyoenerji Üretimi İçin Mikroalg Tabanlı Mikrobiyal Yakıt Hücreleri

Ahmet SAATÇI<sup>1\*</sup>, Banu TAŞKAN<sup>2</sup>, Ergin TAŞKAN<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Çevre Sağlığı Programı, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Bingöl Üniversitesi, Bingöl, Türkiye  
<sup>2,3</sup> Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye  
<sup>1</sup> asaatci@bingol.edu.tr, <sup>2</sup> btaskan@firat.edu.tr, <sup>3</sup> etaskan@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 05/11/2021;

Kabul/Accepted: 03/02/2022)

**Öz:** Nüfus artışı ve endüstriyel gelişme nedeniyle küresel enerji ihtiyacı ve enerji tüketimi endişe verici bir oranda artmaktadır. Artan enerji talebini karşılamak için alternatif yenilenebilir enerji kaynaklarına ihtiyaç vardır. Mikrobiyal yakıt hücreleri (MYH'ler) atıklardan doğrudan elektrik üretebilmesi ve eş zamanlı olarak atıkların arıtımını gerçekleştirebilmesinden dolayı yenilenebilir enerji üretimi açısından son yıllarda oldukça dikkat çekmektedir. Diğer taraftan mikroalgler, bünyelerinde enerji değeri yüksek bileşikler depolaması ve fotosentez yoluyla CO<sub>2</sub>'yi uzaklaştırarak oksijen üretmesi nedeniyle yenilenebilir enerji üretimi alanında ve çevresel uygulamalarda ön plana çıkmıştır. Son yıllarda mikroalglerin MYH sistemlerinde kullanılması ile mikroalglerin MYH'nin verimliliğini artırabildiği ve biyoelektrik üretimi için uygun maliyetli ve sürdürülebilir bir yaklaşım sağlayabildiği anlaşılmıştır. Mikroalg tabanlı MYH'ler (MT-MYH) diğer MYH sistemlerine kıyasla daha fazla sürdürülebilir olmasına rağmen, şu an literatürdeki veriler yetersizdir. Bu sistemlerin verimliliğini artırmak ve büyük ölçekli uygulamaların yaygınlaşabilmesi için bu sistemler üzerine yapılan araştırmaların artırılması gerekmektedir. Bu çalışmada sürdürülebilir bir biyoenerji üretimi için mikroalg tabanlı MYH'ler detaylı bir şekilde analiz edilerek ele alınmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Mikrobiyal Yakıt Hücresi, Mikroalg, Biyoelektrik, Enerji Üretimi.

### Microalgae-based Microbial Fuel Cells For Sustainable Bioenergy Production

**Abstract:** The global energy requirement and energy consumption have been increasing at an alarming rate because of the population increase and industrial development. Alternative renewable energy sources are needed to provide increased energy demand. The microbial fuel cells (MFCs) have attracted much attention in recent years in terms of renewable energy production because of the MFCs can directly electricity generation from the wastes and simultaneous wastewater treatment. On the other hand, microalgae have come to the forefront of renewable energy production and environmental applications because they can store the high energy-value compounds and produce oxygen by removing CO<sub>2</sub> through photosynthesis. In recent years, it has been discovered that the use of microalgae in MFC systems can increase the efficiency of MFC and provide a cost-effective and sustainable approach to bioelectric generation. Although microalgae-based MFCs are more sustainable than other MFC systems, the data in the literature are insufficient at the moment. In order to increase the efficiency of these systems and to spread large-scale applications, the research on these systems should be increased. In this study, microalgae-based MFCs were analyzed and discussed in detail for sustainable bioenergy production.

**Key words:** Microbial Fuel Cell, Microalgae, Bioelectricity, Energy Production.

### 1. Giriş

Günümüzde artan küresel enerji ihtiyacının %87'si fosil yakıtlar ile karşılanmakta ve bu yakıtların kullanımları sırasında karbondioksit (CO<sub>2</sub>) salınımı meydana gelmektedir. Bu durum, küresel ısınma gibi ciddi çevresel problemlere neden olmaktadır [1]. Fosil yakıt tüketimine bağlı CO<sub>2</sub> emisyonlarının sadece on yıl içinde (2009-2019) 388.5 ppm'den 409.95 ppm'e ulaştığı rapor edilmiştir [2]. Atmosferdeki CO<sub>2</sub> değeri her geçen gün artmakla birlikte 2021 yılı ağustos ayında bu değer 414.47 ppm'e ulaştığı rapor edilmiştir [3]. CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltmak için alternatif temiz enerji kaynakları geliştirmek son derece önemlidir. Günümüzde rüzgar, güneş ve biyoenerji gibi temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları karbon nötr ve sürdürülebilir teknolojilerdir. Ancak bu teknolojilerin kurulum ve işletme maliyetlerinin yüksek olması halen önemli bir dezavantajdır [4]. Atıksu arıtımı ve eş zamanlı elektrik üretimi sağlamanın yanı sıra herhangi bir CO<sub>2</sub> emisyonuna neden olmaması, mikrobiyal yakıt hücresi (MYH) teknolojisini diğer alternatif sürdürülebilir enerji üretim sistemleri karşısında ön plana çıkarmaktadır [5].

\* Sorumlu yazar: [asaatci@bingol.edu.tr](mailto:asaatci@bingol.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-4283-2230, <sup>2</sup> 0000-0001-7751-1165, <sup>3</sup> 0000-0002-9496-3697

MYH'ler organik veya inorganik maddeleri mikroorganizmaların metabolik aktivitesi yoluyla elektrik enerjisine dönüştüren biyoelektrokimyasal reaktörlerdir [6]. 20. yüzyılın başlarında Potter tarafından *Escherichia coli* bakterisinin kullanımı ile elektrik üretimi için ilk olarak mikroorganizmaların kullanımı kavramı ortaya çıkmış ve yaklaşık 0.2 mA'lık küçük bir elektrik akımı üretilebilmiştir [7]. MYH'lerde bakteriler organik maddelerin ayrıştırılması ve elektron üretimi amacıyla yaygın bir şekilde kullanılmasına karşın şu ana kadar kullanılmış bakteri türlerinin birçoğu yüksek verimde bir elektrik akımı üretememiştir. Son yıllarda ise MYH sistemlerinde mikroalglerin kullanımı oldukça yaygın hale gelmiştir [8]. Mikroalg tabanlı MYH'ler (MT-MYH), fotosentez yaparak biyoyakıt üretebilen ve eş zamanlı olarak CO<sub>2</sub> giderimi yapabilen fosil yakıtlara kıyasla oldukça verimli, temiz ve yenilenebilir bir enerji üretim teknolojisidir [9,10]. Bu sistemlerde enerji üretimi, biyokütle tarafından güneş enerjisinin kimyasal enerjiye dönüştürülmesine bağlıdır. Mikroalgler, %9'a kadar enerji dönüşüm verimliliği sağlayabilen, fotosentetik organizmalar arasında en yüksek enerji dönüşüm verimliliğine sahip organizmalardır [11]. Bu nedenle, atıksu arıtımı ve enerji üretimi için doğrudan mikroalg biyokütlesi veya canlı mikroalglerin kullanılması daha yüksek enerji dönüşümü sağlaması açısından daha yüksek güç çıkışı için umut verici bir yaklaşım olabilir. Alg tabanlı biyoelektrokimyasal sistemler, MYH'ler, mikrobiyal karbon yakalama hücreleri (MKYH), MT-MYH'ler veya sediment tipi MYH'ler (SMYH) olarak çeşitli temel konfigürasyonlarda kullanılmaktadır [5].

Mikroalgler MYH'lerde anot veya katot bölmelerinde farklı amaçlar için rahat bir şekilde kullanılabilir. Mikroalglerin yüksek besin içeriğinden (protein, lipid ve karbonhidrat) dolayı MYH'lerin anot bölgesinde elektroaktif mikroorganizmalar için besi maddesi olarak kullanılarak yüksek elektrik üretimi sağlanabilmektedir. Bunun yanında mikroalgler MYH'nin katot bölgesinde oksijen üretici olarak kullanılarak katot için harici havalandırma ihtiyacını karşılayabilmektedir. Diğer taraftan yapılan son literatür çalışmalarında mikroalg hücrelerinin anot bölgesinde elektrik üreticisi (elektroaktif mikroorganizma) olarak kullanıldığı çalışmalar mevcuttur [2]. Özetle mikroalglerin MYH sisteminde kullanımını, klasik MYH çalışmalarına kıyasla birçok avantaj sağlamakta ve sürdürülebilir elektrik üretimi açısından gelecek vadetmektedir.

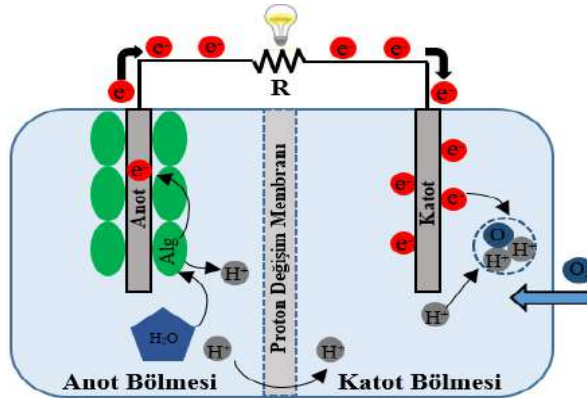
Bu derleme çalışmasında, mikroalglerin çeşitli MYH sistemlerinde kullanımını tartışılmıştır. Ayrıca, MT-MYH'lerin performansı ve uygulamaları hakkında detaylı bir analiz yapılmıştır.

## 2. Alglerin Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinde Kullanımı

### 2.1. Elektron Üretici Olarak Kullanımı

Geleneksel MYH'lerde kullanılan mikroorganizmaların hücre yüzeyleri iletken değildir ve metabolik parçalanma sonucu oluşan elektronlar doğrudan anot sıvısına taşınmaz. Bu nedenle hücreler ve elektrotlar arasında arabulucu olarak nötr kırmızısı (NR), metilen mavisi (MB), tiyonik ve fenolik bileşikler gibi çeşitli toksik özelliği olabilen ve kararsız elektrokimyasallar kullanılmaktadır. Kullanılan fenolik araçlar pahalıdır ve uzun süreli işletmelerde mikroorganizmalar için toksik özellik gösterebilir [12].

Elektron üretme yeteneği olan mikroalgler, ortamda herhangi bir yapay redoks medyatörü, elektrokatalitik bir elektrot veya elektroaktif bir bakteri bulunmadan anot bölgesinde ototrofik şartlar altında biyoelektrik üretebilirler. Anot yüzeyine tutunmuş mikroalgler ürettikleri elektronları medyatör aracılığıyla taşınmak yerine yapısında bulunan ve pili adı verilen iletken nano teller vasıtasıyla doğrudan elektrota iletebilirler (Şekil 1).



Şekil 1. Mikroalglerin elektron üretici olarak kullanımı

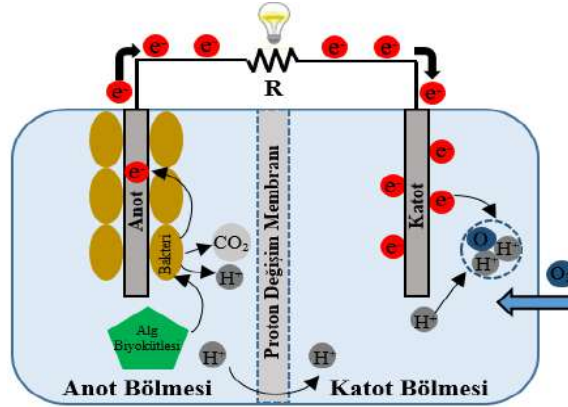
Mikroalgler MT-MYH'lerin anot bölgesinde başarılı bir şekilde elektron üreticisi olarak kullanılmıştır. Literatürde bazı mikroalglerin elektrik üretimi amacıyla MYH sisteminde biyokatalizör olarak kullanıldığı çalışmalar Tablo 1'de özetlenmiştir. MYH sisteminde güç üretimi karanlıkta solunum reaksiyonunun ve ışıktaki fotosentetik reaksiyonun akım üretebileceği anodik biyofilm ile oluşturulabilir. Anot bölgesinde mikroalgler tarafından oksijen üretilmesi, oksijenin güçlü bir elektron alıcısı olması nedeniyle elektron akışını önemli ölçüde azaltarak MT-MYH için sınırlayıcı bir etken olur. Oksijen MYH'nin anot bölgesi için sınırlayıcı olduğundan mikroalgal anotun verimi, aydınlık fazda üretilen oksijenin karanlık fazda (fotosentezin olmadığı durumda) mikroalgler veya diğer bakteriler tarafından besin maddesinin oksidasyonunda kullanılmasına bağlıdır. [13].

**Tablo 1.** Mikroalglerin anot bölgesinde elektron üreticisi olarak kullanıldığı çalışmalar

Mikroalg türü	MYH konfigürasyonu	Güç yoğunluğu (mW/m <sup>2</sup> )	Ref
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Tek bölmeli	6.03	[14]
<i>Spirulina platensis</i>	Tek bölmeli	1.64 (aydınlık) ve 0.132 (karanlık)	[15]
<i>Spirulina platensis</i>	Tek bölmeli	10	[16]
<i>Spirulina platensis</i>	Tek bölmeli	6.5	[17]
<i>Chlorella vulgaris</i>	Tek bölmeli	40.81	[18]
<i>Chlorella sorokiniana</i>	Tek bölmeli	83.4 ± 2.1	[19]
<i>Chlorella vulgaris</i>	Tek bölmeli	0.45	[20]
<i>Clorophytom plants</i>	Çift bölmeli	10	[21]

## 2.2. Besin Maddesi Olarak Kullanımı

Mikroalg biyokütlesi, düşük maliyeti ve yüksek besin içeriğinden dolayı MYH'lerin anot bölgesinde besin kaynağı olarak kullanım için oldukça uygundur. Mikroalg biyokütlesi temel olarak protein, karbonhidrat ve lipitlerden oluşmaktadır [22]. Bu bileşenler, MYH'lerde yüksek elektron üretimi sağlayabilen yüksek enerjili bileşiklerdir. MYH sisteminde anot biyofilminde bulunan bakteriler, mikroalg biyokütlesini parçalayıp elektron ve protonları üreterek sürdürülebilir bir elektrik üretimi sağlayabilmektedir (Şekil 2).



**Şekil 2.** Mikroalg biyokütlesinin MYH'de besin maddesi olarak kullanımının şematik gösterimi

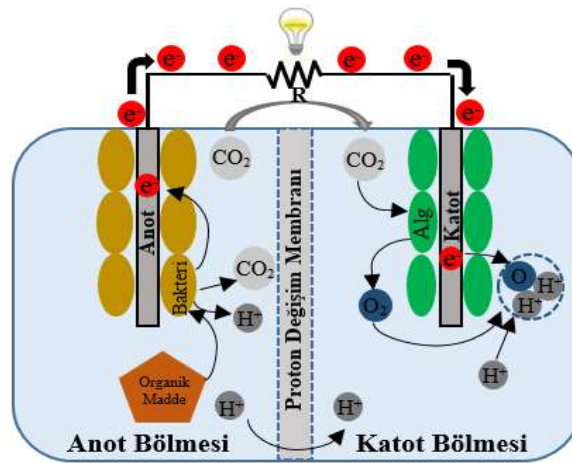
Mikroalg biyokütlesinin kompleks yapıdaki hücre duvarı ve lipid içeriği, anot biyofilminde bulunan elektroaktif türler için besin maddesi olarak kullanımını zorlaştırmaktadır. Bu dezavantaj, mikroalg biyokütlesine uygulanabilecek ön işlemler ile giderilebilir. Literatürde sonikasyon (ses dalgaları) [23], ısı işlem [24] veya mikrodalga [25] gibi çeşitli teknikler kullanılarak MYH sisteminde kullanılmadan önce mikroalg biyokütlesinin biyolojik olarak ayrıştırılabilirliği artırılmaya çalışılmıştır. Yapılan çalışmalar, uygulanan ön işlemin biyokütle içeriğine bağlı olarak etkilerinin değiştiğini ve bazı durumlarda mikroalg biyokütlesinin herhangi bir ön işlem uygulanmadan da besin maddesi olarak kullanılabilirliğini göstermiştir [23-25]. Literatürden elde edilen veriler, mikroalg biyokütlesinin MYH için iyi bir besin maddesi olduğunu ve diğer organik besin maddeleriyle kıyaslanabilir bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

**Tablo 2.** MYH’lerde anot bölgesinde besin maddesi olarak kullanılan çeşitli mikroalg biyokütellerinin enerji üretim potansiyelleri

Mikroalg türü	Ön işlem metodu	Güç üretimi ve biyokütle konsantrasyonu	Ref.
<i>Chlorella vulgaris</i> ve <i>Ulva lactuca</i>	Yok	<i>Chlorella vulgaris</i> ile 2.5 kWh/kg <i>Ulva lactuca</i> ile 2 kWh/kg	[22]
	<i>Ulva lactuca</i> -tambur kurutma (%93 toplam su kaybı)	0.98 W/m <sup>2</sup>	
	<i>Chlorella vulgaris</i> -sprey kurutma		
Aktif çamur ve <i>Scenedesmus obliquus</i>	Yok	5 g/L biyokütlede 1.78 W/m <sup>2</sup> , 2 g/L biyokütlede 0.85 W/m <sup>2</sup> ve 1 g/L biyokütlede 0.56 W/m <sup>2</sup>	[23]
	Mikroalg biyokütlesine sonikasyon	0.604 V	
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Asit-termal ön işlem	102 mW/m <sup>2</sup>	[24]
	Yok	86 mW/m <sup>2</sup>	
<i>Laminaria saccharina</i>	Otoklav	218 mW/m <sup>2</sup>	[25]
	Mikroalga	118 mW/m <sup>2</sup>	
<i>Synechococcus leopoliensis</i>	Ön çürütmeli kaskad sistem	42 W/m <sup>3</sup>	[26]
Lipid tabakası ekstrakte edilmiş mikroalgler	Modifiye Bligh ve Dyer ekstraksiyon yöntemi ile lipid ekstraksiyonu	67.07 mW/m <sup>2</sup>	[27]
<i>Chlorella vulgaris</i>	Yok	15 mW/m <sup>2</sup>	[28]
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	Yok	5.3 mW/m <sup>2</sup>	

### 2.3. Oksijen Üreticisi Olarak Kullanımı

Mikroalg hücrelerinin MYH sisteminde ana kullanım alanlarından biri de katot bölgesinde oksijen üreticisi olarak kullanımınıdır. MYH’lerde elektrik üretiminin sürekliliğini sağlamak için katot bölgesinde yeterli çözünmüş oksijen seviyesi sağlanmalıdır. Bu amaçla kullanılan en yaygın metot, katot bölgesinin harici bir hava kaynağı kullanılarak mekanik olarak havalandırılmasıdır. Katot bölgesinde yeterli çözünmüş oksijen seviyesini sağlamak için uygulanan mekanik havalandırma toplam işletme maliyetinin yaklaşık %50’sini oluşturmaktadır [29]. Katot bölgesinde fototrofik mikroorganizmalar kullanarak oksijen üretmek bu mevcut dezavantajın üstesinden gelebilmek için oldukça avantajlı bir yöntemdir. Mikroalgler fotosentez yolu ile katotta gerekli oksijeni üretirken, karbon kaynağı olarak CO<sub>2</sub>’i kullanır (Şekil 3). Bu açıdan bakıldığında, MYH’lerin katot bölgesinde fototrofik mikroorganizmaların kullanımı ciddi avantajlara sahiptir.

**Şekil 3.** MYH’de mikroalglerin oksijen üreticisi olarak kullanımının şematik gösterimi



MYH'nin pratik uygulamasını sınırlandıran faktörlerden biri de etkili ve sürdürülebilir katot reaksiyon katalizörlerinin bulunamamasıdır. Mikroalgelere dayalı biyo-katotların kullanımı, katot bölgesi için daha ekonomik doğal bir alternatiftir [30,31]. Literatürde MYH'lerin katot bölgesinde oksijen üreticisi olarak farklı mikroalg türlerin kullanıldığı çeşitli çalışmalar Tablo 3'te özetlenmiştir.

**Tablo 3.** MYH katodunda oksijen üreticisi olarak farklı mikroalg türleri ile yapılan çalışmalar

Katot	Anot	Tür	Güç yoğunluğu	Ref
Karbon keçe	Karbon fiber kumaş	<i>Chlorella vulgaris</i>	3720 mW/m <sup>3</sup>	[32]
Karbon fiber kumaş	Platin (pt) kaplı karbon kumaş	<i>Scenedesmus obliquus</i>	30 mW/m <sup>2</sup>	[33]
Karbon fiber kumaş	Pt katalizörlü karbon keçe	<i>Chlorella vulgaris</i>	187 mW/m <sup>2</sup>	[34]
Siyah akrilik	Karbon fiber kumaş	<i>Synechococcus leopoliensis</i>	42.500 mW/m <sup>3</sup>	[26]
Karbon kumaş	Karbon kumaş	<i>Chlorella vulgaris</i>	13.5 mW/m <sup>2</sup>	[35]
Grafit keçe	Karbon fiber kumaş	<i>Chlorella vulgaris</i>	2572.8 mW/m <sup>2</sup>	[36]
Grafit keçe	Grafit keçe	<i>Laminaria saccharina</i>	250 mW/m <sup>2</sup>	[25]
Karbon kağıdı	Karbon kağıdı	<i>Scenedesmus obliquus</i>	102 mW/m <sup>2</sup>	[24]
Karbon bezler	Karbon bezler	Lagün alg kültürü	11.5 mW/m <sup>2</sup>	[37]
Karbon keçe	Karbon keçe	<i>Chlorella vulgaris</i>	24.4 mW/m <sup>2</sup>	[38]
Grafit karbon	Grafit karbon	<i>Chlorella vulgaris</i>	3.35 mW/m <sup>2</sup>	[39]
Karbon keçe	Karbon fiber kumaş	<i>Chlorella vulgaris</i>	2485.35 mW/m <sup>3</sup>	[40]
Karbon fiber fırçalar	Karbon kumaş	<i>Chlorella vulgaris</i>	5600 mW/m <sup>3</sup>	[41]
Grafit çubuk	Grafit çubuk	<i>Chlorella vulgaris</i>	0.95 mW/m <sup>2</sup>	[30]
Grafit fiber fırça	Pt katalizörlü hava katodu	<i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Ulva lactuca</i>	980 mW/m <sup>2</sup> ve 760 mW/m <sup>2</sup>	[22]

Yapılan çalışmalarda, katot bölgesinde *Chlorella vulgaris* kullanılan MYH, abiyotik katoda kıyasla 2.8 kat daha yüksek güç üretmiştir [38]. *Chlorella vulgaris*'in yanı sıra, *Scenedesmus obliquus*'un da MYH katot bölgesinde biyoelektrik üretmek için kullanılabilen bir mikroalg olduğu bulunmuştur. *Scenedesmus obliquus*'un katotta kullanılması, geleneksel MYH'ye kıyasla %32 daha yüksek güç üretmiştir [33]. Buna karşın, CO<sub>2</sub> konsantrasyonu yükseldikçe *Scenedesmus obliquus* büyüme oranının arttığı, ancak daha yüksek konsantrasyonlarda önemli düzeyde düştüğü gözlenmiştir. [42]. Mikroalg tabanlı MYH'lerde elektrik üretim miktarını etkileyen bir diğer etken ise mikroalg konsantrasyonudur. Yapılan çalışmalarda mikroalg tabanlı MYH'lerde CO<sub>2</sub>'nin uzaklaştırılması için farklı mikroalg konsantrasyonları analiz edilmiş ve mikroalg yoğunluğunun artmasının elektrik üretimini artırdığı tespit edilmiştir [41]. Literatürde yapılan çalışmalar, mikroalglerin etkili oksijen üreticiler olarak MYH'lerin performansını artırmak için verimli, uygun maliyetli bir yaklaşım olmakla birlikte katodik reaksiyonu hızlandırabileceğini göstermiştir [43].

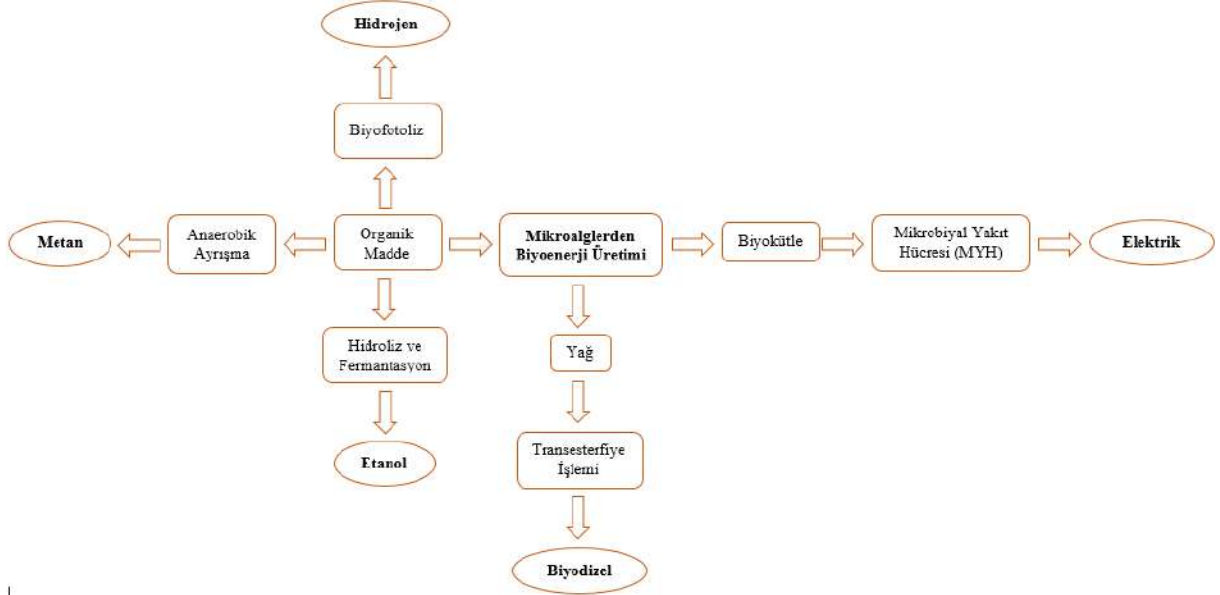
### 3. Mikroalg Tabanlı Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinin Sınırlamaları

Mikroalglerin MYH'lerde kullanımı çevre dostu ve sürdürülebilir bir yaklaşım olmasına rağmen kullanımı sınırlandıran etkenler bulunmaktadır. MT-MYH şu ana kadar laboratuvar ölçekli olarak uygulanmış bir teknolojidir ve bu teknolojinin büyük ölçekli kullanımını proton değişim membranı (PDM) maliyeti, anot ve katot elektrotlarının maliyeti, katot katalizörlerinin ve anot bölgesinde kullanılan medyatörlerin maliyeti sınırlandırmaktadır [44,45]. MYH'lerin yatırım maliyetinin büyük kısmı, PDM (%38) ve elektrot ve katalizör (%47) kaynaklı olup [46] işletme maliyetlerinin yaklaşık %50'si mekanik havalandırma ihtiyacından oluşmaktadır [29]. Mikroalglerin MYH'lerin katot bölgesinde kullanılmasıyla mikroalgler tarafından üretilen oksijen, mekanik havalandırma ihtiyacını azaltmaktadır. Bunun yanı sıra mikroalglerin kullanımıyla oluşturulan biyo-katotlar, pahalı katot malzemelerine ekonomik bir alternatif olarak görülmekte fakat düşük güç üretimi kullanımı sınırlandırmaktadır[30]. Ototrofik mikroalglerin yavaş büyüme hızı da kullanımı sınırlandıran bir diğer etkidir. MT-MYH sistemlerinin pratik olarak uygulanabilmesi için hem mikroalg biyokatotların hem de MYH proseslerinin önündeki sınırlamaların kaldırılması gerekir [8].

### 4. Mikroalg Tabanlı Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinin Uygulamaları



Klasik MYH biyokimyasal enerjiyi, MT-MYH ise ışık enerjisini metabolik reaksiyon ve fotosentez yoluyla elektriğe dönüştürmek için canlı mikroorganizmaları kullanan gelişmiş yenilenebilir enerji üretim teknolojileridir. Mikroalgleri MYH'ye dâhil eden MT-MYH sistemi ise; elektrik üretimi, atık su arıtımı, CO<sub>2</sub> giderimi ve biyokütle üretiminin tek bir sistemde birleştirildiği sürdürülebilir bir teknolojidir. Mikroalgal biyokütle, biyodizel, biyoetanol, biyohidrojen, metan ve biyoelektrik üretmek için uygun bir biyomateryaldir (Şekil 4).



Şekil 4. Mikroalg biyokütlesi kullanılarak enerji üretim şeması [31]

#### 4.1. Biyoelektrik Üretimi

Elektrik üretimi, MYH'lerin öngörülen ana uygulama alanıdır. Mikroorganizmaların yardımıyla MYH'ler organik bileşiklerde depolanan kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürme potansiyeline sahiptir. MYH'ler biyoelektrik üretim kapasitesi için bir asırdan fazla bir süredir araştırılmaktadır [47]. Laboratuvar ölçekli biyoreaktörlerde önceden hazırlanmış veya doğal kaynaklardan elde edilen mikroalg biyokütlesi, MT-MYH'lerde kullanılabilir. Wang ve ark., mikroalg tabanlı katot kullanmış bir MYH'de 21 mW/m<sup>2</sup> maksimum güç üretimi elde etmiş ve katotun modifikasyonu (karbon nanotüp kaplaması) ile güç çıkışını 38 mW/m<sup>2</sup>'ye yükseltmiştir [48]. Xu S. ve ark., *C. Pyrenoidosa*'yı, hava katotlu MYH anotunda kullanmış ve klasik MYH'den elde edilenden (0.03 W/m<sup>2</sup>) 200 kat daha fazla (6.03 W/m<sup>2</sup>) güç çıkışı elde etmişlerdir [14]. Farklı mikroalgler kullanılarak yapılan çalışmalarda, MT-MYH sistemi ile üretilen maksimum güç yoğunluklarının 10 mW/m<sup>2</sup> ile 1780 mW/m<sup>2</sup> arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmalar, ışık yoğunluğu ve süresi [39], sıcaklık [49], CO<sub>2</sub> kaynağı [35] gibi çeşitli faktörlerin MYH'nin güç üretimini ciddi şekilde etkileyen parametreler olduğunu göstermiştir. MT-MYH'lerde üretilen maksimum güç üretimi, kullanılan alg türlerine, büyüme koşullarına ve kullanılan besin maddesine göre değişmekte olup yapılan araştırmalar mikroalg kullanımı ile MT-MYH'nin yüksek güç üretim değerlerine ulaşabileceğini kanıtlamıştır.

#### 4.2. Biyoyakıt Üretimi

MYH'lerin hem katot hem de anot bölmelerinde mikroalgler kullanılarak farklı biyoyakıt türlerinin üretimi sağlanmıştır [2]. De Schampelaire ve Verstraete [50] tarafından yapılan bir çalışmada klasik bir MYH sisteminin anot bölmesinde üretilen CO<sub>2</sub> bir fotobiyoreaktör sistemine verilerek mikroalg kültürlenmesinde kullanılmıştır. Bu fotobiyoreaktör sisteminde üretilen mikroalg biyokütlesi, biyogaz üretimi amacıyla bir anaerobik fermentör sisteminde besin kaynağı olarak kullanılmıştır. Ayrıca anaerobik fermantasyon atık suları, MYH'nin anot bölmesinde organik besin kaynağı olarak kullanılmıştır. Bu sistem ile 2-2.5 ton/ha.ya mikroalg biyokütlesi ve 500 N.m<sup>3</sup>/g biyogaz üretimi elde edilmiştir.

Başka bir çalışmada biyodizel, biyoetanol ve biyoelektrik üretimi tek bir sistemde entegre edilmiştir [51]. Bunun için *Chlorella vulgaris* içeren fotobiyoreaktörler ve bir MYH reaktörü, mevcut bir biyoetanol üretim sistemi ile birleştirilmiştir. Fermantasyon işlemi sonucunda açığa çıkan CO<sub>2</sub>'in katotta *Chlorella vulgaris* hücreleri tarafından kullanılması sağlanmıştır. Aynı zamanda MYH'nin katot bölmesinde üretilen mikroalg biyokütlesi, elektrik üretiminin fermentasyon basamağı için anotta hammadde olarak kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, *Chlorella vulgaris*'in yüksek düzeyde yağ içerdiği rapor edilmiştir. Literatürde birçok mikroalg türü biyoyakıt üretimi için kullanılmıştır. Sonuçlar düşük lipit içeriği ve yüksek karbonhidrat içeriğine sahip mikroalg biyokütlelerin dahi piroliz gibi ön işlemlerden geçirildikten sonra biyoetanol gibi farklı biyoyakıtların üretimi için kullanılabilir olduğunu göstermiştir [52].

### 4.3. Atıkların Arıtımında Alginin Kullanımı

MT-MYH'lerin potansiyel uygulamalarından atık iyileştirme üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Esas olarak biyolojik oksidasyon sonucunda açığa çıkan gazların MT-MYH'ye verilmesiyle mikroalgler tarafından eşzamanlı atık su arıtımı ve CO<sub>2</sub> giderimi yapılabilmektedir. Arıtma çamuru [53], evsel atık su [54], gıda atıkları [55], bira fabrikası atıkları [56], farmasötik atık su [57] gibi atıklar MYH'ler için besin kaynağı olarak kullanılabilir. Ayrıca, literatürde yapılmış çalışmalarda araştırmacılar farklı MYH konfigürasyonları tasarlamıştır. Örneğin, Jiang ve ark. [58] atık suyu iyileştirmek ve biyoelektrik üretmek için membransız bir MYH ile entegre bir fotobiyoreaktör sistemi tasarlamıştır. Bu tasarım, KOİ, fosfor (P) ve azotu (N<sub>2</sub>) gidermek ve eşzamanlı elektrik üretimi sağlamak için yukarı akışlı MYH'nin atık su ile beslenmesi esasına dayanmaktadır. Bu sistemde, maksimum 481 mW/m<sup>3</sup> güç yoğunluğu ve %99.3 fosfor, %99.0 azot, %78 KOİ giderimi gerçekleşmiştir. Daha sonra, *Scenedesmus abundance* fotobiyoreaktör sisteminde kültürlenerek ilaç endüstrisi atık sularının ön arıtımını sağlamak ve biyoelektrik üretimi amacıyla MT-MYH ile birleştirilmiştir. Bu sistemde, atık su ilk olarak ön arıtma işlemi için fotobiyoreaktöre besleme yapılmıştır. Daha sonra ileri arıtım gerçekleştirmek için MT-MYH'de hammadde olarak kullanılmış ve sürdürülebilir elektrik üretimi sağlanmıştır. Ön arıtım sonunda sistem, maksimum 0.740 V, 0.838 W/m<sup>2</sup> güç yoğunluğu ve %95 oranında KOİ giderimi sağlamıştır. Bir başka çalışmada, katot katalizörü olarak *Synechococcus sp.* ve *Chlorococcum sp.*'den oluşan MT-MYH kullanılarak mutfak atık sularının arıtımı araştırılmıştır. Elde edilen maksimum güç yoğunlukları, *Chlorococcum sp.* ile 30.2 mW/m<sup>2</sup> iken, *Synechococcus sp.* ile 41.5 mW/m<sup>2</sup> olarak rapor edilmiştir. Bu tür entegre sistemleri sıfır çevresel etkiye sahip elektrik ve mikroalg biyokütle üretimini sağlamanın yanı sıra farklı atık su türlerinin biyolojik arıtımı için de kullanılabilir [2].

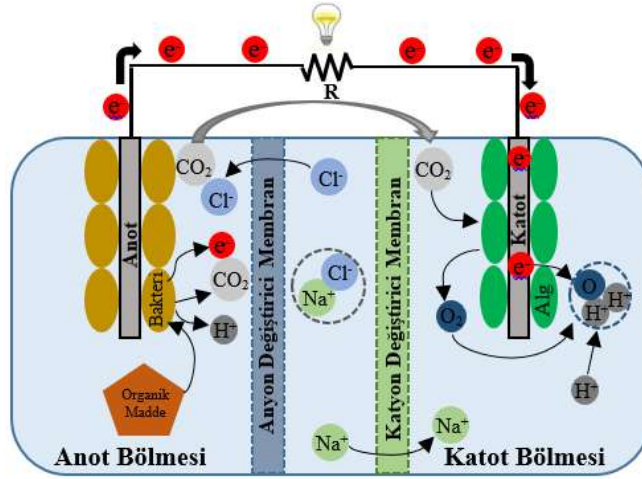
MYH, enerji üretimi ve kirleticilerin atık sudan uzaklaştırılması için umut verici bir yaklaşım olmasına rağmen, süt endüstrisi atık suyu ve hayvan dışkıları gibi amonyumu (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) fazla atıksuların kullanıldığı sistemlerde yüksek miktarda amonyak (NH<sub>3</sub>) oluşturmaktadır [59]. MYH'lerde toplam azot (TN) giderimi %95'e ulaşabilirken, NH<sub>3</sub> buharlaşması, NH<sub>3</sub> gideriminin yaklaşık %60'ına karşılık gelmektedir. Elektrik üretimi sırasında, katotta pH'ın yükseldiği ve bu da NH<sub>4</sub><sup>+</sup> iyonunun katot yoluyla serbest NH<sub>3</sub>'a dönüşümünü arttırdığı bulunmuştur [60]. MYH'lerin NH<sub>3</sub> emisyonu, iklim değişikliği ve hava kalitesi üzerinde olumsuz etkisi yüksek olan ve kullanımını sınırlandıran önemli bir faktördür. Bu bağlamda, enerji üretimine etki etmeden NH<sub>3</sub> emisyonunu azaltmak amacıyla farklı çalışmalar yapılmıştır. Son zamanlarda Li ve ark. [61], NH<sub>3</sub> emisyonunu 0.037 mg N/L'ye düşüren yeni bir bakır (Cu) ilaveli 3D katot geliştirmiştir. Bu çalışma ile yüksek güç yoğunluğu (14.4 W/m<sup>3</sup>) ve kirletici giderimi (%88.1 KOİ ve %92.8 TN) sağlanmıştır.

MT-MYH'lerin etkin ve ekonomik bir şekilde kullanımı için mikroalglerin üretim maliyeti önem taşımaktadır. Mikroalg üretiminde açık havuzlar ve kapalı fotobiyoreaktörler olmak üzere iki tip sistem kullanılmaktadır. Açık havuzlara kıyasla, fotobiyoreaktörlerde biyokütle eldesi daha fazla ancak mikroalglerin ihtiyaç duyduğu ışığı sağlamak için kullanılan yapay ışık kaynakları nedeniyle yatırım maliyeti daha yüksektir [62]. Bununla birlikte bu dezavantajlar, MT-MYH sisteminde üretilen mikroalglerin biyoenerji üretiminde hammadde olarak kullanımı ile aşılabilir [63]. Mikroalg üretim maliyetinin oluşturduğu sınırlamalar, eşzamanlı mikroalg büyümesi ve enerji üretimi için entegre sistemlerin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Örneğin Wu ve ark. [64] atık suyun mikroalgler için kültür ortamı olarak kullanıldığı çift bölmeli entegre bir MYH sistemi geliştirmiş, atıksu kullanımı ile fotobiyoreaktör maliyetini, katotta mikroalg kullanarak katalizör kullanım maliyetini ortadan kaldırmıştır. Tahmini yatırım maliyetinin geleneksel MYH sistemine kıyasla daha düşük olduğunu gözlemlemiştir. Gajda ve ark.[65], katotta yetiştirilen mikroalg ile beslenen ve aynı anda elektrik ve sistemde kullanılacak biyokütleyi üreten biyotik bir MYH geliştirmiştir. Aynı zamanda mikroalg biyokütlesi, anot bölmesindeki mikroorganizmalar tarafından besin maddesi olarak kullanılmak üzere anoda devridaim edilebilir. Bu çalışma MYH'lerin katotunda üretilen biyokütleden elektrik üretmek için sürdürülebilir bir alternatif olarak kabul edilmektedir. Powell ve Hill [51] biyodizel, biyoetanol ve biyoelektrik üretimini tek bir sisteme entegre

ederek katotta üretilen  $CO_2$ 'yi yakalayan *Chlorella vulgaris*'i büyütmek için bir fotobiyoreaktörü bir MYH'ye bağlamış, eş zamanlı olarak elde edilen alg biyokütlesini sistemin elektrik üretmesini sağlayan anotta besin maddesi ve biyodizel için hammadde olarak kullanılmıştır. Tüm sistem açısından, MT-MYH'nin atıksu arıtımının yanında eş zamanlı olarak mikroalg biyokütlesi ve elektrik üretmek için gelecek vadeden bir yaklaşım olduğuna şüphe yoktur.

#### 4.4. Tuzluluk Giderimi

Geleneksel yöntemler kullanılarak kullanılan deniz suyundan tuz arındırma işlemleri yüksek maliyet gerektiren sistemlerdir. Fakat mikroalg tabanlı tuzdan arındırma hücresi (MT-DMYH) adı verilen özel yakıt hücreleri geleneksel sistemlere kıyasla daha düşük maliyetli olup sera gazı ve atık ısı emisyonlarını azaltabilmektedir. MT-DMYH'ler, deniz suyundan tuzu arındırırken eş zamanlı olarak biyoelektrik üretimi sağlamakta çevre dostu bir yaklaşım olarak verimli bir şekilde kullanılabilir. MT-DMYH, anyon ve katyon değişirici membranların kullanılması ile deniz suyu içerisindeki anyonları ve katyonları elektrik yükü altında çekerek iyonların ayrılmasını sağlamaktadır (Şekil 5) [66].



Şekil 5. MT-DMYH şematik gösterimi

Ashwani ve diğ. [67], *Scenedesmus obliquus* mikroalgini MT-DMYH'lerin katot bölgesinde kullanmış ve sistemin tuz giderim verimini araştırmışlardır. 20 g NaCl/L giriş konsantrasyonu için sistemin tuz giderim verimliliği %42.6 olarak elde edilmiş, 35 g NaCl/L giriş konsantrasyonunda ise giderim verimliliğinin %55.3'e ulaştığı rapor edilmiştir. Diğer bir çalışmada araştırmacılar, *Chlorella pyrenoidosa*'yı biyokatot olarak kullandıkları farklı konsantrasyonlarda toplam çözünmüş katı madde (TDS) (2.5 g/L ve 5.0 g/L) tuzlu su ile beslenen beş odacıklı bir MT-DMYH tasarlamıştır. 2.5 g/L tuzluluk seviyesi ile çalışan MT-DMYH, maksimum 45.52 mW/m<sup>2</sup> güç yoğunluğu, %71 tuz giderim verimliliği ve hava katotlu bir MYH'den %78 daha fazla KOİ giderim verimliliği sağlayarak yüksek bir performans sergilemiştir. Kokabian ve ark. [68] tarafından yapılan çalışmada, *Chlorella vulgaris* kullanılarak üç farklı MT-DMYH konfigürasyonunun performansı (statik, sürekli ve fotobiyoreaktör) detaylı bir şekilde incelenmiştir. Statik MT-DMYH kullanılarak maksimum 0.75 W/m<sup>2</sup> güç yoğunluğu üretilirken, maksimum biyokütle büyüme hızının sürekli modda 7 mg/L.sa düzeyinde olduğu rapor edilmiştir. Çalışma sonucunda, güç yoğunluğu ile birlikte KOİ'nin giderim oranı, TDS konsantrasyonunun artırılmasına bağlı olarak artmıştır.

MT-DMYH'lerde mikroalg tabanlı biyokatot kullanılan çeşitli çalışmalar Tablo 5'te özetlenmiştir. Bu çalışmalar MT-DMYH'nin potansiyel enerji ve mikroalg biyokütle üretimi ile atık suların tuzdan arındırılması için yenilenebilir, umut verici ve sürdürülebilir bir teknoloji olduğunu kanıtlamaktadır.

Tablo 5. MT-DMYH'lerin tuz giderim verimleri ve ulaşılan maksimum güç yoğunlukları

Mikroalg Türü	Atıksu Türü	Tuzluluk Derecesi (g/L)	Tuzluluk Giderimi (%)	KOİ Giderimi (%)	Maksimum Güç Yoğunluğu (mW/m <sup>3</sup> )	Referans
<i>Chlorella vulgaris</i>	Mandıra	35	52	-	20.25	[69]
<i>Chlorella vulgaris</i>	Aritma çamuru		64.2	68.02	1.1	[70]
<i>Chlorella vulgaris</i>	Sentetik		40	63.3	151	[71]
<i>Chlorella vulgaris</i>	Sentetik (farklı kons.)	35	32.2	64	675	[68]

## 5. Sonuçlar

Bu derleme çalışmasında, MT-MYH sistemleri ile biyoenerji üretimi detaylı bir şekilde analiz edilerek tartışılmıştır. Mikroalg biyokütlesi pahalı besin kaynaklarına kıyasla düşük maliyetli ve sürdürülebilir bir besin kaynağıdır. Mikroalgler, MYH'lerin anot ve katot bölmelerinde işletme maliyetini azaltmak ve sistem performansını arttırmak amacı ile kullanılabilirler. Ayrıca, MYH'lerin anot bölmesinde elektron üreticisi olarak görev yapmasının yanında elektroaktif bakteriler için besin kaynağı olarak kullanılabilirler. Diğer taraftan, katot bölmesinde mekanik havalandırma sistemlerine kıyasla düşük maliyetli bir oksijen üreticisidir. Katot bölmesinde mikroalg kültürlenmesi, oksijen üretiminin yanında düşük maliyetli alg biyokütle üretimi gerçekleştirilmesine imkân tanımaktadır. Tüm bunlara ilave olarak, MT-MYH sistemleri biyodizel üretimi, atıksu arıtımı ve tuz giderimi gibi uygulamalarda kullanım potansiyeli nedeni ile gelecek vadettirmektedir. Elde edilen veriler, MT-MYH sistemlerinin yakın gelecekte büyük ölçekli olarak inşa edilip uygulanabilir bir şekilde işletilebilmesi için optimizasyon ve modelleme çalışmalarına ihtiyaç duyulacağını göstermektedir.

## Kaynaklar

- [1] F. A. Alatraktchi, Y. Zhang, and I. Angelidaki, "Nanomodification of the electrodes in microbial fuel cell: Impact of nanoparticle density on electricity production and microbial community," *Appl. Energy*, vol. 116, pp. 216–222, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.058>.
- [2] M. E. Elshobary, H. M. Zayed, J. Yun, G. Zhang, and X. Qi, "Recent insights into microalgae-assisted microbial fuel cells for generating sustainable bioelectricity," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 4, pp. 3135–3159, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.251>.
- [3] "Dünya Karbondioksit Salımını (2021)." <https://www.co2.earth>.
- [4] E. Kabir, P. Kumar, S. Kumar, A. A. Adedun, and K.-H. Kim, "Solar energy: Potential and future prospects," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, pp. 894–900, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.094>.
- [5] S. Arun, A. Sinharoy, K. Pakshirajan, and P. N. L. Lens, "Algae based microbial fuel cells for wastewater treatment and recovery of value-added products," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 132, p. 110041, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110041>.
- [6] B. E. Logan and J. M. Regan, "Electricity-producing bacterial communities in microbial fuel cells," *Trends Microbiol.*, vol. 14, no. 12, pp. 512–518, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tim.2006.10.003>.
- [7] M. C. Potter. "Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds," *Proc. R. Soc. London, Ser. B*, vol. 84, pp. 260–276, 1911.
- [8] D.-J. Lee, J.-S. Chang, and J.-Y. Lai, "Microalgae–microbial fuel cell: A mini review," *Bioresour. Technol.*, vol. 198, pp. 891–895, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.061>.
- [9] H. M. Zayed, X. Qi, J. Yun, and H. Zhang, "Anaerobic Digestion of Microalgae Biomass for Methane Production BT - Microalgae Biotechnology for Development of Biofuel and Wastewater Treatment," M. A. Alam and Z. Wang, Eds. Singapore: Springer Singapore, 2019, pp. 397–421.
- [10] M. Ashour, M. E. Elshobary, R. El-Shenody, A.-W. Kamil, and A. E.-F. Abomohra, "Evaluation of a native oleaginous marine microalga *Nannochloropsis oceanica* for dual use in biodiesel production and aquaculture feed," *Biomass and Bioenergy*, vol. 120, pp. 439–447, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.12.009>.
- [11] M. Shukla and S. Kumar, "Algal growth in photosynthetic algal microbial fuel cell and its subsequent utilization for biofuels," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, pp. 402–414, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.067>.
- [12] J. K. Jang *et al.*, "Construction and operation of a novel mediator- and membrane-less microbial fuel cell," *Process Biochem.*, vol. 39, no. 8, pp. 1007–1012, 2004, doi: [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(03\)00203-6](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(03)00203-6).
- [13] J. R. Kim, S. H. Jung, J. M. Regan, and B. E. Logan, "Electricity generation and microbial community analysis of alcohol powered microbial fuel cells," *Bioresour. Technol.*, vol. 98, no. 13, pp. 2568–2577, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.09.036>.
- [14] C. Xu, K. Poon, M. M. F. Choi, and R. Wang, "Using live algae at the anode of a microbial fuel cell to generate electricity," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 22, no. 20, pp. 15621–15635, 2015, doi: [10.1007/s11356-015-4744-8](https://doi.org/10.1007/s11356-015-4744-8).

- [15] C.-C. Fu, C.-H. Su, T.-C. Hung, C.-H. Hsieh, D. Suryani, and W.-T. Wu, "Effects of biomass weight and light intensity on the performance of photosynthetic microbial fuel cells with *Spirulina platensis*," *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 18, pp. 4183–4186, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.03.059>.
- [16] C.-C. Lin, C.-H. Wei, C.-I. Chen, C.-J. Shieh, and Y.-C. Liu, "Characteristics of the photosynthesis microbial fuel cell with a *Spirulina platensis* biofilm," *Bioresour. Technol.*, vol. 135, pp. 640–643, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.138>.
- [17] C.-C. Fu, T.-C. Hung, W.-T. Wu, T.-C. Wen, and C.-H. Su, "Current and voltage responses in instant photosynthetic microbial cells with *Spirulina platensis*," *Biochem. Eng. J.*, vol. 52, no. 2, pp. 175–180, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2010.08.004>.
- [18] C. Karthikeyan *et al.*, "3D Flower-Like FeWO<sub>4</sub>/CeO<sub>2</sub> Hierarchical Architectures on rGO for Durable and High-Performance Microalgae Biophotovoltaic Fuel Cells," *Appl. Biochem. Biotechnol.*, vol. 192, no. 3, pp. 751–769, 2020, doi: [10.1007/s12010-020-03352-4](https://doi.org/10.1007/s12010-020-03352-4).
- [19] J.-H. Hwang *et al.*, "A strategy for power generation from bilgewater using a photosynthetic microalgal fuel cell (MAFC)," *J. Power Sources*, vol. 484, p. 229222, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229222>.
- [20] F.-L. Ng *et al.*, "Integration of bioelectricity generation from algal biophotovoltaic (BPV) devices with remediation of palm oil mill effluent (POME) as substrate for algal growth," *Environ. Technol. Innov.*, vol. 21, p. 101280, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101280>.
- [21] D. P. B. T. B. Strik, H. V. M. Hamelers (Bert), J. F. H. Snel, and C. J. N. Buisman, "Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell," *Int. J. Energy Res.*, vol. 32, no. 9, pp. 870–876, Jul. 2008, doi: <https://doi.org/10.1002/er.1397>.
- [22] S. B. Velasquez-Orta, T. P. Curtis, and B. E. Logan, "Energy from algae using microbial fuel cells," *Biotechnol. Bioeng.*, vol. 103, no. 6, pp. 1068–1076, Aug. 2009, doi: [10.1002/bit.22346](https://doi.org/10.1002/bit.22346).
- [23] N. Rashid, Y.-F. Cui, M. Saif Ur Rehman, and J.-I. Han, "Enhanced electricity generation by using algae biomass and activated sludge in microbial fuel cell," *Sci. Total Environ.*, vol. 456–457, pp. 91–94, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.03.067>.
- [24] S. Kondaveeti, K. S. Choi, R. Kakarla, and B. Min, "Microalgae *Scenedesmus obliquus* as renewable biomass feedstock for electricity generation in microbial fuel cells (MFCs)," *Front. Environ. Sci. Eng.*, vol. 8, no. 5, pp. 784–791, 2014, doi: [10.1007/s11783-013-0590-4](https://doi.org/10.1007/s11783-013-0590-4).
- [25] V. Gadhamshetty, D. Belanger, C.-J. Gardiner, A. Cummings, and A. Hynes, "Evaluation of Laminaria-based microbial fuel cells (LbMs) for electricity production," *Bioresour. Technol.*, vol. 127, pp. 378–385, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.079>.
- [26] X. A. Walter, J. Greenman, B. Taylor, and I. A. Ieropoulos, "Microbial fuel cells continuously fuelled by untreated fresh algal biomass," *Algal Res.*, vol. 11, pp. 103–107, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.06.003>.
- [27] A. Khandelwal, A. Vijay, A. Dixit, and M. Chhabra, "Microbial fuel cell powered by lipid extracted algae: A promising system for algal lipids and power generation," *Bioresour. Technol.*, vol. 247, pp. 520–527, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.119>.
- [28] A.-M. Lakaniemi, O. H. Tuovinen, and J. A. Puhakka, "Production of Electricity and Butanol from Microalgal Biomass in Microbial Fuel Cells," *BioEnergy Res.*, vol. 5, no. 2, pp. 481–491, 2012, doi: [10.1007/s12155-012-9186-2](https://doi.org/10.1007/s12155-012-9186-2).
- [29] A. Gonzalez del Campo, J. F. Perez, P. Cañizares, M. A. Rodrigo, F. J. Fernandez, and J. Lobato, "Characterization of light/dark cycle and long-term performance test in a photosynthetic microbial fuel cell," *Fuel*, vol. 140, pp. 209–216, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.087>.
- [30] E. E. Powell, R. W. Evitts, G. A. Hill, and J. C. Bolster, "A Microbial Fuel Cell with a Photosynthetic Microalgae Cathodic Half Cell Coupled to a Yeast Anodic Half Cell," *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 33, no. 5, pp. 440–448, Jan. 2011, doi: [10.1080/15567030903096931](https://doi.org/10.1080/15567030903096931).
- [31] Z. Baicha *et al.*, "A critical review on microalgae as an alternative source for bioenergy production: A promising low cost substrate for microbial fuel cells," *Fuel Process. Technol.*, vol. 154, pp. 104–116, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.08.017>.
- [32] Y. Zhang, Y. Zhao, and M. Zhou, "A photosynthetic algal microbial fuel cell for treating swine wastewater," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 26, no. 6, pp. 6182–6190, 2019, doi: [10.1007/s11356-018-3960-4](https://doi.org/10.1007/s11356-018-3960-4).
- [33] R. Kakarla and B. Min, "Evaluation of microbial fuel cell operation using algae as an oxygen supplier: carbon paper cathode vs. carbon brush cathode," *Bioprocess Biosyst. Eng.*, vol. 37, no. 12, pp. 2453–2461, 2014, doi: [10.1007/s00449-014-1223-4](https://doi.org/10.1007/s00449-014-1223-4).
- [34] T. Liu, L. Rao, Y. Yuan, and L. Zhuang, "Bioelectricity Generation in a Microbial Fuel Cell with a Self-Sustainable Photocathode," *Sci. World J.*, vol. 2015, p. 864568, 2015, doi: [10.1155/2015/864568](https://doi.org/10.1155/2015/864568).
- [35] A. González del Campo, P. Cañizares, M. A. Rodrigo, F. J. Fernández, and J. Lobato, "Microbial fuel cell with an algae-assisted cathode: A preliminary assessment," *J. Power Sources*, vol. 242, pp. 638–645, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.05.110>.
- [36] H. He, M. Zhou, J. Yang, Y. Hu, and Y. Zhao, "Simultaneous wastewater treatment, electricity generation and biomass production by an immobilized photosynthetic algal microbial fuel cell," *Bioprocess Biosyst. Eng.*, vol. 37, no. 5, pp. 873–880, 2014, doi: [10.1007/s00449-013-1058-4](https://doi.org/10.1007/s00449-013-1058-4).
- [37] J. Lobato, A. González del Campo, F. J. Fernández, P. Cañizares, and M. A. Rodrigo, "Lagooning microbial fuel cells: A first approach by coupling electricity-producing microorganisms and algae," *Appl. Energy*, vol. 110, pp. 220–226,

- 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.04.010>.
- [38] X. Wu, T. Song, X. Zhu, P. Wei, and C. C. Zhou, "Construction and Operation of Microbial Fuel Cell with *Chlorella vulgaris* Biocathode for Electricity Generation," *Appl. Biochem. Biotechnol.*, vol. 171, no. 8, pp. 2082–2092, 2013, doi: [10.1007/s12010-013-0476-8](https://doi.org/10.1007/s12010-013-0476-8).
- [39] D. F. Juang, C. H. Lee, and S. C. Hsueh, "Comparison of electrogenic capabilities of microbial fuel cell with different light power on algae grown cathode," *Bioresour. Technol.*, vol. 123, pp. 23–29, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.07.041>.
- [40] M. Zhou, H. He, T. Jin, and H. Wang, "Power generation enhancement in novel microbial carbon capture cells with immobilized *Chlorella vulgaris*," *J. Power Sources*, vol. 214, pp. 216–219, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.04.043>.
- [41] X. Wang *et al.*, "Sequestration of CO<sub>2</sub> discharged from anode by algal cathode in microbial carbon capture cells (MCCs)," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 25, no. 12, pp. 2639–2643, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2010.04.036>.
- [42] E. E. Powell, M. L. Mapiour, R. W. Evitts, and G. A. Hill, "Growth kinetics of *Chlorella vulgaris* and its use as a cathodic half cell," *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 1, pp. 269–274, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.032>.
- [43] W. Logroño *et al.*, "Single chamber microbial fuel cell (SCMFC) with a cathodic microalgal biofilm: A preliminary assessment of the generation of bioelectricity and biodegradation of real dye textile wastewater," *Chemosphere*, vol. 176, pp. 378–388, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.099>.
- [44] K. K. Jaiswal *et al.*, "Microalgae fuel cell for wastewater treatment: Recent advances and challenges," *J. Water Process Eng.*, vol. 38, p. 101549, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101549>.
- [45] A. J. Slate, K. A. Whitehead, D. A. C. Brownson, and C. E. Banks, "Microbial fuel cells: An overview of current technology," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 101. Elsevier Ltd, pp. 60–81, Mar. 01, 2019, doi: [10.1016/j.rser.2018.09.044](https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.044).
- [46] I. Chakraborty, S. Das, B. K. Dubey, and M. M. Ghangrekar, "Novel low cost proton exchange membrane made from sulphonated biochar for application in microbial fuel cells," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 239, no. April 2019, p. 122025, 2020, doi: [10.1016/j.matchemphys.2019.122025](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122025).
- [47] A. S. Mathuriya and J. V. Yakhmi, "Microbial fuel cells - Applications for generation of electrical power and beyond," *Crit. Rev. Microbiol.*, vol. 42, no. 1, pp. 127–143, 2016, doi: [10.3109/1040841X.2014.905513](https://doi.org/10.3109/1040841X.2014.905513).
- [48] D.-B. Wang, T.-S. Song, T. Guo, Q. Zeng, and J. Xie, "Electricity generation from sediment microbial fuel cells with algae-assisted cathodes," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 25, pp. 13224–13230, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.06.141>.
- [49] S. Venkata Mohan, S. Srikanth, P. Chiranjeevi, S. Arora, and R. Chandra, "Algal biocathode for in situ terminal electron acceptor (TEA) production: Synergetic association of bacteria–microalgae metabolism for the functioning of biofuel cell," *Bioresour. Technol.*, vol. 166, pp. 566–574, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.081>.
- [50] L. De Schampelaire and W. Verstraete, "Revival of the biological sunlight-to-biogas energy conversion system," *Biotechnol. Bioeng.*, vol. 103, no. 2, pp. 296–304, Jun. 2009, doi: <https://doi.org/10.1002/bit.22257>.
- [51] E. E. Powell and G. A. Hill, "Economic assessment of an integrated bioethanol–biodiesel–microbial fuel cell facility utilizing yeast and photosynthetic algae," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 87, no. 9, pp. 1340–1348, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2009.06.018>.
- [52] J. Greenman, I. Gajda, and I. Ieropoulos, "Microbial fuel cells (MFC) and microalgae; photo microbial fuel cell (PMFC) as complete recycling machines," *Sustain. Energy Fuels*, vol. 3, no. 10, pp. 2546–2560, 2019, doi: [10.1039/C9SE00354A](https://doi.org/10.1039/C9SE00354A).
- [53] B. Taşkan, E. Taşkan, and H. Hasar, "Electricity generation potential of sewage sludge in sediment microbial fuel cell using Ti–TiO<sub>2</sub> electrode," *Environ. Prog. Sustain. Energy*, vol. 39, no. 5, p. e13407, Sep. 2020, doi: <https://doi.org/10.1002/ep.13407>.
- [54] E. Taskan and H. Hasar, "Comprehensive comparison of a new tin-coated copper mesh and a graphite plate electrode as an anode material in microbial fuel cell," *Appl. Biochem. Biotechnol.*, vol. 175, no. 4, pp. 2300–2308, Feb. 2015, doi: [10.1007/s12010-014-1439-4](https://doi.org/10.1007/s12010-014-1439-4).
- [55] S. Naina Mohamed, P. Ajit Hiranman, K. Muthukumar, and T. Jayabalan, "Bioelectricity production from kitchen wastewater using microbial fuel cell with photosynthetic algal cathode," *Bioresour. Technol.*, vol. 295, p. 122226, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122226>.
- [56] B. Taşkan, "Investigation of Electricity Generation Performance of Grape Marc in Membrane-less Microbial Fuel Cell," *Environ. Res. Technol.*, Mar. 2021, doi: [10.35208/ert.881517](https://doi.org/10.35208/ert.881517).
- [57] J. K. Nayak and U. K. Ghosh, "Microalgae Cultivation for Pretreatment of Pharmaceutical Wastewater Associated with Microbial Fuel Cell and Biomass Feed Stock Production BT - Frontiers in Water-Energy-Nexus—Nature-Based Solutions, Advanced Technologies and Best Practices for Environme," 2020, pp. 383–387, doi: [0.1007/978-3-030-13068-8\\_96](https://doi.org/10.1007/978-3-030-13068-8_96).
- [58] H. Jiang, S. Luo, X. Shi, M. Dai, and R. Guo, "A system combining microbial fuel cell with photobioreactor for continuous domestic wastewater treatment and bioelectricity generation," *J. Cent. South Univ.*, vol. 20, no. 2, pp. 488–494, 2013, doi: [10.1007/s11771-013-1510-2](https://doi.org/10.1007/s11771-013-1510-2).
- [59] N. Yang, G. Zhan, D. Li, X. Wang, X. He, and H. Liu, "Complete nitrogen removal and electricity production in Thauera-dominated air-cathode single chambered microbial fuel cell," *Chem. Eng. J.*, vol. 356, pp. 506–515, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.08.161>.
- [60] J. R. Kim, Y. Zuo, J. M. Regan, and B. E. Logan, "Analysis of ammonia loss mechanisms in microbial fuel cells treating

- animal wastewater,” *Biotechnol. Bioeng.*, vol. 99, no. 5, pp. 1120–1127, Apr. 2008, doi: <https://doi.org/10.1002/bit.21687>.
- [61] D. Li *et al.*, “Characterising and control of ammonia emission in microbial fuel cells,” *Chem. Eng. J.*, vol. 389, p. 124462, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124462>.
- [62] G. SİSMAN-AYDİN, “Mikroalg Teknolojisi ve Çevresel Kullanımı,” *Harran Üniversitesi Mühendislik Derg.*, vol. 4, no. 1, pp. 81–92, Apr. 2019, Accessed: Jan. 19, 2022. [Online]. Available: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/humder/issue/44912/494257>.
- [63] M. K. Lam and K. T. Lee, “Microalgae biofuels: A critical review of issues, problems and the way forward,” *Biotechnol. Adv.*, vol. 30, no. 3, pp. 673–690, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.11.008>.
- [64] J.-Y. Wu *et al.*, “Economic potential of bioremediation using immobilized microalgae-based microbial fuel cells,” *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 23, no. 8, pp. 2251–2264, 2021, doi: 10.1007/s10098-021-02131-x.
- [65] I. Gajda, J. Greenman, C. Melhuish, and I. Ieropoulos, “Self-sustainable electricity production from algae grown in a microbial fuel cell system,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 82, pp. 87–93, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.05.017>.
- [66] N. B., H. Pradhan, P. Sarkar, and M. M. Ghangrekar, “Application of ion exchange membranes in enhancing algal production alongside desalination of saline water in microbial fuel cell,” *MRS Adv.*, vol. 4, no. 19, pp. 1077–1085, 2019, doi: 10.1557/adv.2019.170.
- [67] V. R. V. Ashwaniy and M. Perumalsamy, “Reduction of organic compounds in petro-chemical industry effluent and desalination using *Scenedesmus abundans* algal microbial desalination cell,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 5, no. 6, pp. 5961–5967, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.11.017>.
- [68] B. Kokabian, U. Ghimire, and V. G. Gude, “Water deionization with renewable energy production in microalgae - microbial desalination process,” *Renew. Energy*, vol. 122, pp. 354–361, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.061>.
- [69] M. Khazraee Zamanpour, H.-R. Kariminia, and M. Vosoughi, “Electricity generation, desalination and microalgae cultivation in a biocathode-microbial desalination cell,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 843–848, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.12.045>.
- [70] B. Kokabian and V. G. Gude, “Sustainable photosynthetic biocathode in microbial desalination cells,” *Chem. Eng. J.*, vol. 262, pp. 958–965, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.10.048>.
- [71] B. Kokabian and V. G. Gude, “Photosynthetic microbial desalination cells (PMDCs) for clean energy, water and biomass production,” *Environ. Sci. Process. Impacts*, vol. 15, no. 12, pp. 2178–2185, 2013, doi: 10.1039/C3EM00415E.

## AZ91 Magnezyum Alaşımının PEO ve PVD Dublex Kaplama Yöntemleriyle CrN/NbN Kaplanarak Korozyon Özelliklerinin İyileştirilmesi

Oktay YİĞİT<sup>1\*</sup>, Taha Çağrı ŞENOCAK<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>2</sup> Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye

\*<sup>1</sup> oktayyigit2561@gmail.com, <sup>2</sup> tcsenocak@gmail.com

(Geliş/Received: 08/11/2021;

Kabul/Accepted: 01/01/2022)

**Öz:** Son yıllardaki çalışmalar, otomobil, havacılık ve uzay endüstrilerinde kullanılan geleneksel mühendislik malzemelerinin geliştirilmesine ve yeni fonksiyonel malzemeler üretilmesine odaklanmıştır. Yüksek özgül mukavemete sahip magnezyum alaşımları, özellikle ileri mühendislik uygulamalarında düşük ağırlıklı tasarımların üretilmesine imkan tanımıştır. Ancak magnezyum alaşımlarının kimyasal reaksiyon eğilimi, bu malzemelerin korozyon özelliklerini sınırlandırmaktadır. Fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve plazma elektrolitik oksidasyon (PEO) kaplama yöntemleriyle yapılan çalışmalar, metalik malzemelerin korozyon özelliklerini iyileştirme ve geliştirmeye yöneliktir. Bu çalışmada, PEO yöntemi ile AZ91 magnezyum alaşımlarının yüzeylerine MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> kaplama yapılmıştır. Daha sonra RF-PVD sisteminde iki farklı magnetron (niyobyum ve krom hedef) kullanılarak çok katmanlı CrN/NbN tabakaları büyütülmüştür. Taban malzeme yüzeyinde elde edilen PEO ve PEO+CrN/NbN kaplamalarının korozyon davranışları, % 3,5 NaCl çözeltisi içerisinde potansiyodinamik polarizasyon testiyle incelenmiştir. Elde edilen PEO kaplaması ve PEO kaplaması yüzeyinde büyütülen CrN/NbN çok katmanlı kaplamasının, AZ91 magnezyum alaşımına göre sırasıyla 17 ve 2 kat daha yüksek korozyon direncine sahip olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** AZ91 Magnezyum Alaşımı, Kaplamalar, Fiziksel Buhar Biriktirme, Plazma Elektrolitik Oksidasyon, Korozyon.

### Improving the Corrosion Properties of AZ91 Magnesium Alloy by Coating CrN/NbN with PEO and PVD Duplex Coating Methods

**Abstract:** Studies in recent years have focused on the development of traditional engineering materials used in the automobile, aerospace, and aeronautic industries and on the production of new functional materials. Magnesium alloys with high specific strength have allowed the production of low-weight designs, especially in advanced engineering applications. However, the chemical reaction tendency of magnesium alloys limits the corrosion properties of these materials. Studies with physical vapor deposition (PVD) and plasma electrolytic oxidation (PEO) coating methods are aimed at improving the corrosion properties of metallic materials. In this study, MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> coating was applied to the surfaces of AZ91 magnesium alloys with the PEO method. Then, multilayer CrN/NbN layers were grown using two different magnetrons (niobium and chromium target) in the RF-PVD system. The corrosion behavior of PEO and PEO+CrN/NbN coatings obtained on the substrate surface were investigated by a potentiodynamic polarization test in a 3.5% NaCl solution. It was determined that the obtained PEO coating and the CrN/NbN multilayer coating grown on the surface of the PEO coating had 17 and 2 times higher corrosion resistance than the AZ91 magnesium alloy, respectively.

**Key words:** AZ91 Magnesium Alloy, Coatings, Physical Vapor Deposition, Plasma Electrolytic Oxidation, Corrosion.

#### 1. Giriş

Son yıllarda, özellikle ileri mühendislik uygulamalarında düşük ağırlıklı tasarımlar üretmek amacıyla yüksek mukavemet-ağırlık oranına sahip malzemeler ön plana çıkmıştır. Magnezyum, bu malzemeler arasında mukavemet-ağırlık oranı açısından önemli bir yere sahiptir. Magnezyum (Mg), 1,74 g/cm<sup>3</sup> yoğunluğu ile tüm yapısal metallerin en hafif olanıdır. Mg, çoğunlukla mukavemet artırıcı ve korozyon direncini geliştirici bir alaşım elementi olarak birçok ticari uygulamada başarıyla kullanılmaktadır. 1940'lı yıllardan günümüze, uçak bileşenlerinden kara araçlarına kadar geniş bir askeri uygulama yelpazesi bulmuştur. Ancak magnezyumun düşük korozyon direnci ve alevlenebilirlik gibi bazı karakteristik özellikleri, günümüz teknolojisinde kullanım alanını sınırlandırmaktadır [1–3].

Magnezyum, otomotiv ve havacılık uygulamalarına özgü döküm ve dövme alaşımları olarak iki ayrı kategoride değerlendirilir. Döküm alaşımları arasında en çok kullanılan magnezyum alaşımı AZ91'dir. Bu alaşım,

\* Sorumlu yazar: [oktayyigit2561@gmail.com](mailto:oktayyigit2561@gmail.com). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-5904-5129, <sup>2</sup> 0000-0002-0043-5253



otomotiv ve havacılık uygulamalarında kullanılır ve çoğunlukla saf magnezyum ile karşılaştırıldığında mükemmel dökülebilirlik ve üstün korozyon direnci özelliklerine sahiptir. Diğer magnezyum alaşımlarına göre maliyeti düşük olduğu için otomotiv ve havacılık uygulamalarında tercih edilmektedir. Uzay endüstrisinde özel olarak kullanılan alaşımlar arasında AZ91 en çok tercih edilen Mg alaşımıdır. Bu alaşım askeri Falcon GAR-1 stabilizatör paletlerinde [1] kullanılmış, uçak bağlantılarında ise kullanılması planlanmıştır [4]. Ayrıca yolcu taşıma uçaklarından sıklıkla tercih edilen Boeing 727, yaklaşık 1200 adet magnezyum alaşımından elde edilmiş parçalardan (uçak şanzımanı, kanat parçaları, gövde kaplamaları, kapılar, tekerlekler, şasi, gösterge panelleri ve koltuk bileşenleri gibi) oluşmaktadır [4]. Günümüzde uzay endüstrisi, özellikle yapısal hafif malzemelerin yüzey özelliklerini iyileştirerek korozyona karşı direncini artırmaya yönelik çalışmaktadır [5]. Magnezyumun diğer yapı metallere göre anodik olması, korozyon problemleriyle karşı karşıya kalmasına neden olmaktadır. Yüksek saflıkta magnezyum alaşımlarının geliştirilmesi, yüzey korozyon direncini artırmış olsa da, özellikle otomotiv, havacılık ve savunma sanayii parçalarında daha fazla korumaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle ilgili alanlarda magnezyum ve alaşımlarının yüzey özelliklerini iyileştirmek için koruyucu kaplamaların geliştirilmesi için çalışmalar devam etmektedir [5,6].

Anodizasyon, plazma elektrolitik oksidasyon, termal-soğuk sprey kaplama ve fiziksel buhar biriktirme gibi çeşitli yöntemler sayesinde magnezyum ve alaşımlarının yüzey özellikleri iyileştirilmektedir [7]. Plazma elektrolitik oksidasyon yöntemi ile, bir elektrolit içerisinde yüksek voltaj altında ark oluşturarak hafif metallerin yüzeyinde oksit bileşiklerini oluşturmak mümkündür [8]. Bu yöntem, Al, Mg, Ti, Zr gibi çeşitli hafif metaller üzerine seramik oksit katmanlarının geliştirilmesi esasına dayanan bir kaplama işlemidir. PEO işlemi, CVD, PVD ve termal püskürtme işlemi ile karşılaştırıldığında; ucuz, çevre dostu ve karmaşık geometrili büyük boyutlu parçaların kaplanması için kullanışlı bir prosestir. PEO işlemi ile mükemmel yapışma, yüksek sertlik, iyi elektrik direnci, yüksek aşınma ve iyi korozyon direncine sahip yüksek kaliteli kaplamalar elde edilmektedir. Bu kaplamalar, esas olarak havacılık, biyomedikal, optoelektronik ve enerji endüstrisi uygulamaları gibi özel ürünler gerektiren endüstrilerde kullanılmaktadır [9–17].

Bir diğer kritik kaplama teknolojisi olan fiziksel buhar biriktirme (PVD) teknolojisiyle ise diğer geleneksel yüzey işleme yöntemleri ile ulaşılamayan stabil ve kaliteli kaplamalar elde edilmektedir [18]. Bu yöntem sayesinde metal, alaşım, seramik ve polimer kaplamalar kolaylıkla kaplanabilmektedir. İnce film kaplama işlemi olarak bilinen Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) işlemleri, katı veya sıvı kaynaklardan atomik veya moleküler biçimde buharlaştırılan veya püskürtülen maddelerin altlık üzerine atomik olarak biriktirilmesi olarak bilinmektedir [19]. PVD işlemlerinin tamamı çok yüksek vakum veya düşük gaz basıncı ortamında gerçekleştirilmektedir. Bu durum sayesinde, hedef ile altlık malzemesi arasındaki çarpışmanın ortalama serbest yolu artmaktadır. Çevresel kirlenmelerin azalmasıyla kaplamanın kalitesi de artmaktadır [20,21]. Fiziksel buhar biriktirme tekniği, çok çeşitli malzemelerin kullanım alanlarını artırmaktadır. PVD yöntemi ile altlık malzeme yüzeyine kolaylıkla kaplanabilen geçiş metallerinin (Ti, Cr, V, Ni vb.) nitrürleri, kaplamalara iyi mekanik özellikler, yüksek kaynama noktası, kimyasal ve termal kararlılık özelliklerini kazandırmaktadır. Bu kaplamalar, sert kaplamalardan elektromanyetik radyasyon dedektörlerine kadar geniş bir uygulamada yer bulmaktadır [22].

Bu çalışmada, AZ91 magnezyum alaşımının korozyon direncini artırmak için ilk olarak PEO yöntemi, ikinci olarak ise PVD sistemi kullanılmıştır. Taban malzeme olarak kullanılan AZ91 numunelerinin yüzeyinde, öncelikle PEO sistemi kullanılarak  $MgAl_2O_4$  içeren kaplamalar, ardından PVD sistemi kullanılarak çok katmanlı CrN/NbN ince filmler büyütülmüştür. Bu kaplamanın korozyon davranışı üzerindeki etkisi %3,5 NaCl çözeltisinde araştırılmıştır. Böyle kaplamalar literatürde genel olarak tek proses kullanılarak gerçekleştirilmektedir. İki farklı kaplama yöntemi kullanılarak büyütülen kaplamalar sayesinde her iki prosesin kendine özgü avantajlarından faydalanılması amaçlanmıştır. Bu bağlamda elde edilen veriler, yeni kompozit kaplamaların elde edilmesi ve incelenmesi açısından önem arz etmektedir.

## 2. 2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada AZ91 magnezyum alaşımının üzerine PEO+CrN/NbN çok katmanlı kaplamalar büyütülerek korozyon özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Yapılan işlemler ve analizler başlıklar halinde detaylarıyla verilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmanın adımları Şekil 1'de gösterilmiştir.

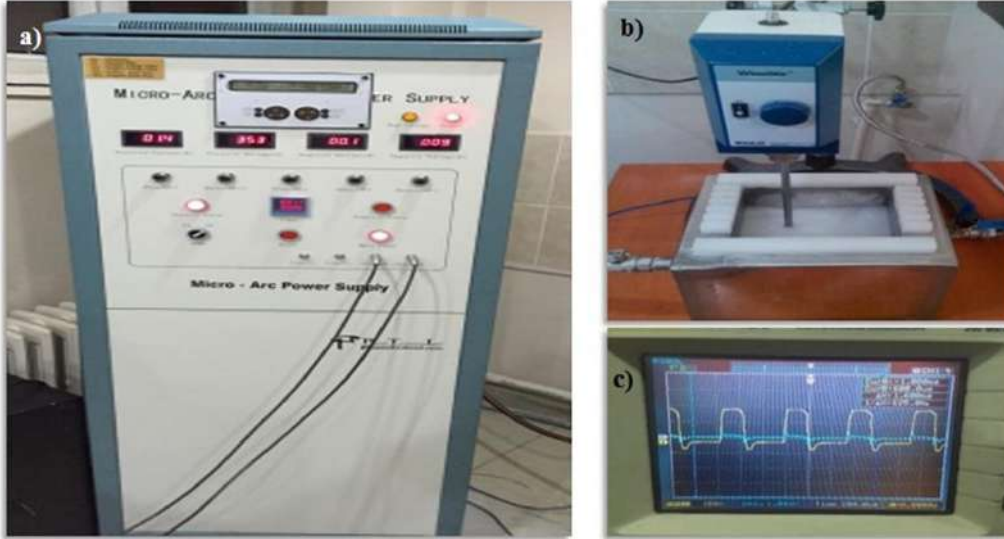


Şekil 1. Deneysel çalışma adımları

Bu çalışma kapsamında AZ91 (%8,35 Al, %0,68 Zn, %0,30 Mn, %0,015 Si, %0,001 Cu, %0,001 Fe) magnezyum alaşımı kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan AZ91 alaşımları 20x20x5 mm boyutlarına sahiptir. Kaplama işlemleri öncesinde numuneler 180, 240, 400, 600, 800 ve 1200 tane boyutlu SiC zımparalarda aşındırılmış ve elmas pasta ile parlatılmıştır. İşlem sonrası yüzey pürüzlülük değeri minimuma ( $R_a \cong 0,64 \mu\text{m}$ ) indirilen numuneler, ultrasonik temizleyici, saf su ve aseton ile oluşabilecek kirliliklerden arındırıldıktan sonra kaplama işlemine hazır hale getirilmiştir.

## 2.1. PEO – PVD Kaplanması

PEO ve PVD sistemlerinde kaplama işlemleri için kullanılacak parametreler, ön çalışmalarla optimize edildikten sonra, çalışma için belirlenen test parametreleri Tablo 1'de gösterilmiştir. PEO kaplama işleminde bipolar akım modu seçilmiştir. Sodyum alüminat ( $\text{NaAl}_2\text{O}_3$ ), sodyum hidroksit (NaOH) ve saf su kullanılarak pH değeri 11 olan bir elektrolit PEO kaplama işleminde kullanılmıştır. PEO kaplamalar, 420 V pozitif gerilim, -100 V negatif gerilimde, %30 görev döngüsünde, 1000 Hz frekansta, 10 dk sürede gerçekleştirilmiştir. PEO kaplama işlemi Şekil 2'de gösterilen sistemde gerçekleştirilmiştir. Kaplama sırasında elektrolit 20 dev/dk hızda karıştırılarak elektrolitin homojenizasyonu sağlanmıştır. İşlem sırasında oluşan arklar sebebiyle elektrolitin ısınması banyo cidarından şebeke suyu geçirilerek engellenmiştir.

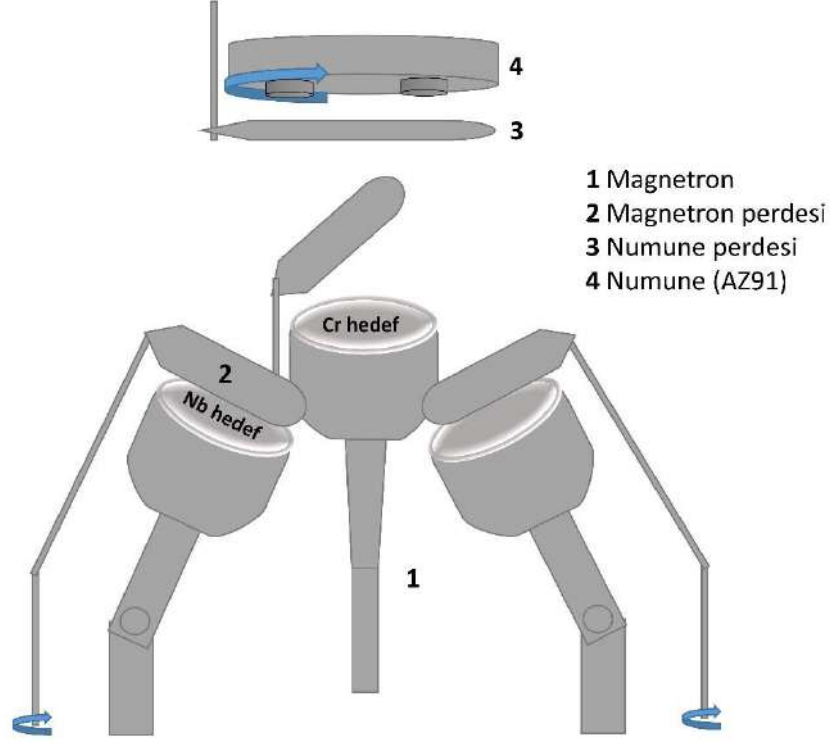


Şekil 2. PEO kaplama ünitesi a) güç kaynağı b) paslanmaz çelik banyo c) osiloskop

PVD kaplama işleminde ise iki farklı magnetron kullanılmış, magnetronlar  $30^\circ$  açıda 6 cm uzaklıkta numuneleri görece şekilde ayarlanmıştır. 1 nolu magnetrona %99,95 saflıkta niyobyum, 2 nolu magnetrona %99,95 saflıkta krom hedef takılmıştır. Kaplama sistemi  $5 \times 10^{-6}$  Torr basınca gelene kadar vakum işlemine tabi tutulmuş, ortamda bulunan diğer atomlar uzaklaştırılmıştır. Plazma oluşturabilmek için azot gazı 30 sccm, nitrür oluşturabilmek için 6 sccm azot gazı sisteme verilmiştir. Gaz basıncı 3 mTorr basınç değerinde, magnetronlara verilen güç 200 watt gerilimde sabitlenmiştir. Kaplamanın adezyonunun artırılması amacıyla alttaş sıcaklığı  $300^\circ\text{C}$ 'de tutulmuştur. Numunelerin tüm yüzeyinin homojen bir şekilde kaplanabilmesi için alttaş 10 dev/dk hızda kaplama süresince döndürülmüştür. Toplamda 120 dakika kaplama işlemi gerçekleştirilmiş, her bir magnetronun kapama perdesi 10'ar dakika açık kalarak CrN ve NbN kaplamaları katman katman büyütülmüştür. Kaplama işlemi sonrası numunelerin herhangi bir komplikasyona uğramaması için vakum ortamında soğuma sağlandıktan sonra çıkarılarak analiz işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kaplama işlemleri Şekil 3'de şematığı gösterilen kaplama cihazında gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 1.** PEO ve PVD kaplama yöntemleri için kaplama parametreleri.

Kaplama Türü	Malzemeler	Kaplama Şartları	Süre
Plasma Elektrolitik Oksidasyon (PEO)	NaAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , NaOH elektrolit	+420V, -100V, %30 D.C., 1000 Hz	10 dk.
Fiziksel Buhar Çöktürme (PVD)	Cr hedef, Nb hedef	3 mTorr, 200 Watt, 30 sccm Ar, 6 sccm N <sub>2</sub>	120 dk.



**Şekil 3.** Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) kaplama cihazının şematik çizimi.

## 2.2. Malzeme Karakterizasyonu

Üretilen kaplamalar Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Araştırma Merkezinde (DAYTAM) karakterize edilmiştir. Yapısal analizler, enerji dağılımlı spektroskopi (EDS, Inca sistemi) ile donatılmış alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (SEM, JSM-7001F, Jeol) kullanılarak 15 kV ile incelenmiştir. Kaplamaların faz incelemesi, X-ışını kırınımı (XRD, PANalytical Empyrean) 40 kV, 40 mA, Cu-K $\alpha$  radyasyonu ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ), 0,5° geliş açısı, ve 20 ila 90° arasında, 0,02°/s'de tarama hızı koşulları altında incelenmiştir. XRD tepe noktaları, X'Pert high score yazılımında JCPDS kartlarına göre analiz edilmiştir.

## 2.3. Potansiyodinamik Korozyon Testleri

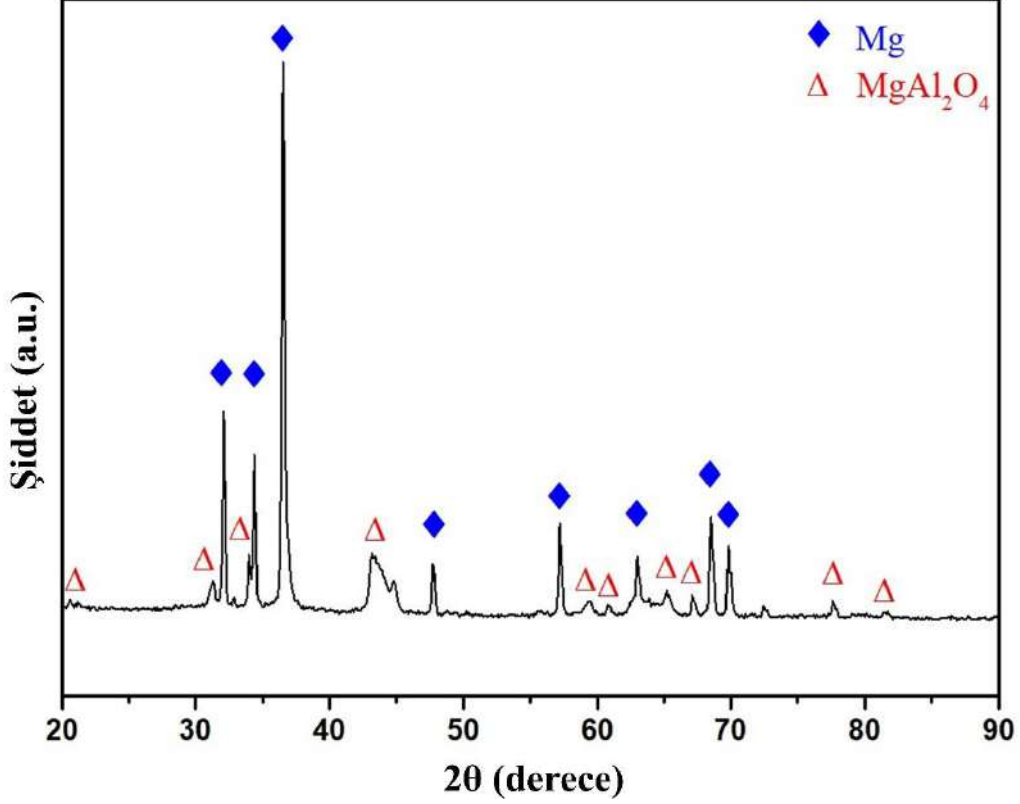
Numunelerin korozyon testleri, potansiyostat-galvanostat cihazı (AMETEK Versastat 3) ile referans elektrot (RE-0,222 Volt) olarak Ag/AgCl/KCl, karşıt elektrot (CE) olarak grafit ve çalışma elektrotu (WE) olarak ise taban malzeme ve kaplamalar kullanılarak üç elektrot tekniğine göre gerçekleştirilmiştir. Testler %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde 25°C sabit sıcaklıkta tamamlanmıştır.

## 3. Sonuçlar ve Tartışma

### 3.1. XRD Analizleri

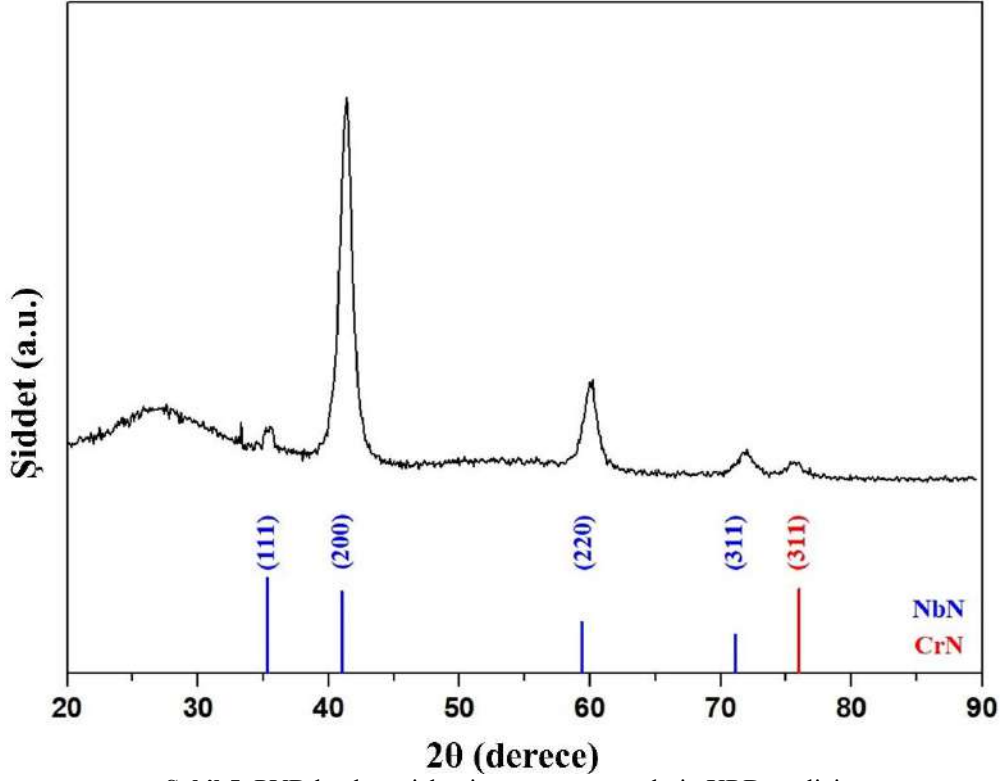
CrN ve NbN fazlarının kübik kristal yapıya sahip olması nedeniyle hegzagonal kristal sisteme sahip Mg'da meydana gelebilecek kristal kafes uyumsuzluğunu bertaraf etmek amacıyla PEO yöntemi ile kübik kristal sisteme

sahip  $MgAl_2O_4$  fazı AZ91 taban malzeme yüzeyinde büyütülmüştür. PEO işlemi sonrasında PVD yöntemi ile CrN/NbN çoklu tabakası büyütülmüştür. Şekil 4'te PEO yöntemi ile büyütülen kaplamanın XRD analizi sonuçları verilmiştir. Mg alaşımı üzerine sodyum alüminat elektrolit kullanılarak büyütülen kaplama içeriğinde  $MgAl_2O_4$  fazının başarılı bir şekilde oluştuğu XRD analizi ile gösterilmiştir. Taban malzeme olarak kullanılan AZ91'den gelen Mg'un pikleri XRD deseninde görülmektedir. XRD desenlerinin belirlenmesinde  $\alpha$ -Mg için JCPDS 35-0821 [23],  $MgAl_2O_4$  için JCPDS 01-073-2210 [24] PDF kartları kullanılmıştır.



Şekil 4. PEO kaplaması sonrası numunlerin XRD analizi

Şekil 5'te ise taban malzemeden gelebilecek tepe noktalarını bertaraf etmek amacıyla AZ91 taban malzemelerle aynı anda PVD sistemi içerisinde kaplanan Si wafer yüzeyinden XRD analizleri alınmıştır. XRD desenlerinin analiz edilmesinde NbN için JCPDS 38-1155 [25] CrN içinde JCPDS 11-0065 [26] PDF kartları kullanılmıştır.

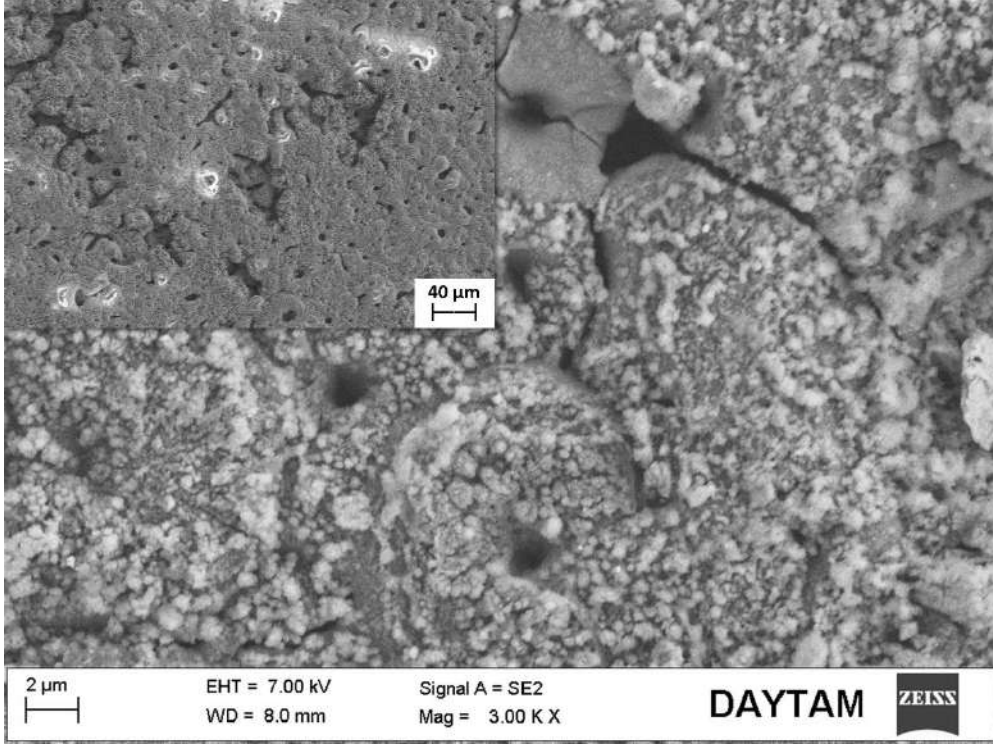


Şekil 5. PVD kaplama işlemi sonrası numunelerin XRD analizi

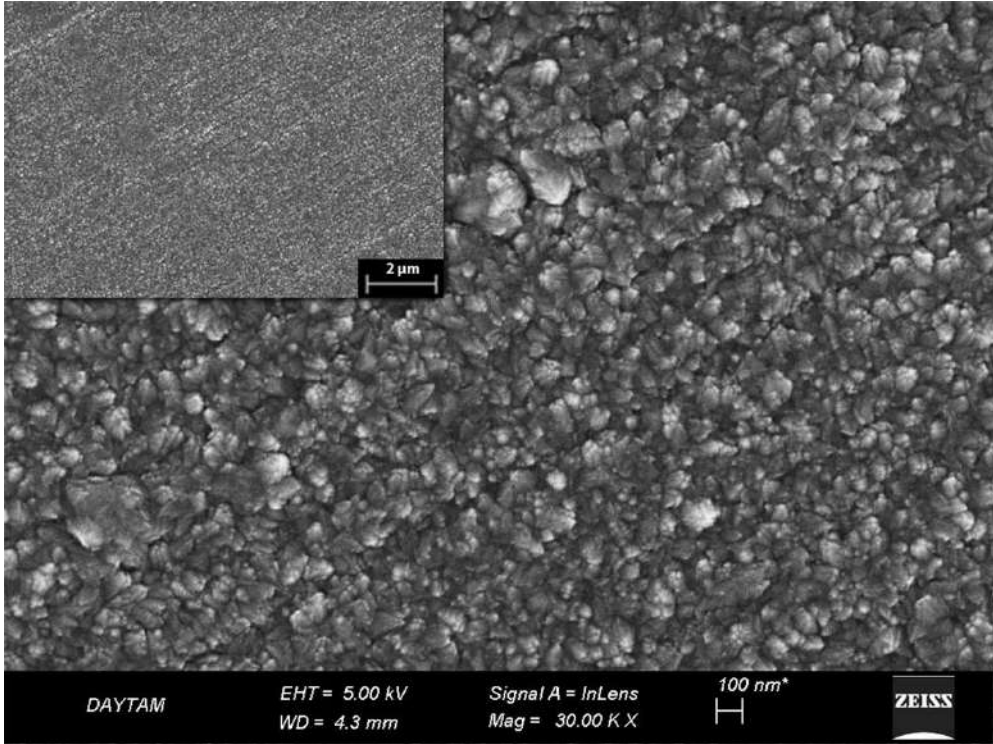
CrN ün sadece (311) piki gözlenmiştir. Düşük pik şiddetlerinin sebebi çoklu kaplamaların son kaplamasının NbN ile bitmesi ve XRD analizinin düşük açılı ince film modunda gerçekleştirilmiş olmasından kaynaklanmaktadır. Oluşan NbN kaplaması genel olarak (200) kristal yönelimine sahip olarak büyümüştür. 20°-30° aralığında kaplama yapısının amorf olarak büyüdüğü belirlenmiştir. MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>+CrN/NbN çok katmanlı kaplamalar, PEO ve PVD işlemleri kullanılarak kaplanmıştır. Taban malzemedan, kaplama yüzeyine kadar uyumlu kristal yapıya sahip olması, kaplamanın adezyonu açısından kritik öneme sahiptir. Çok katmanlı kaplamalar, kübik MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> ve kübik CrN/NbN yapılarından oluşmaktadır [27].

### 3.2. SEM-EDS Analizi

Üretilen malzemelerin yüzey morfolojileri ve elementel analizleri SEM ve SEM üzerine adapte edilmiş EDS sistemleri ile karakterize edilmiştir. PEO kaplı AZ91 numunesinin SEM görüntüsü Şekil 6, PEO+CrN/NbN kaplamasının SEM görüntüleri Şekil 7 ve CrN/NbN kaplamasının kesit görüntüsü ve EDS analizi ise Şekil 8'de gösterilmektedir.



Şekil 6. PEO kaplı AZ91 numunesinin SEM görüntüsü



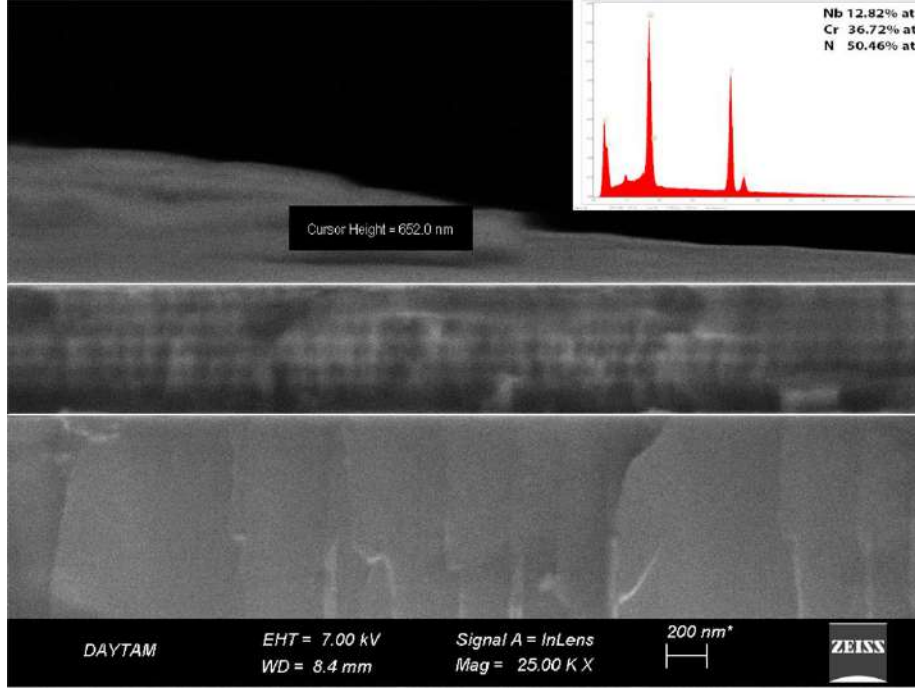
Şekil 7. PEO+CrN/NbN kaplamasının SEM görüntüleri

PEO işleminin doğası gereği meydana gelen gaz çıkışlarının ve arkların bir sonucu olarak gözenekli ve pürüzlü bir kaplama morfolojisi meydana gelmektedir. Şekil 6'da görülen yüzey PEO kaplamalarının genel yüzey



morfolojisini göstermektedir. Bu morfolojiye sıcaklık, basınç ve elektrolit bileşimi gibi parametreler etki etmektedir. Yüzey üzerinde görülen mikro çatlaklar belirtilen etkilerin sonucunda doğal olarak oluşmaktadır [13].

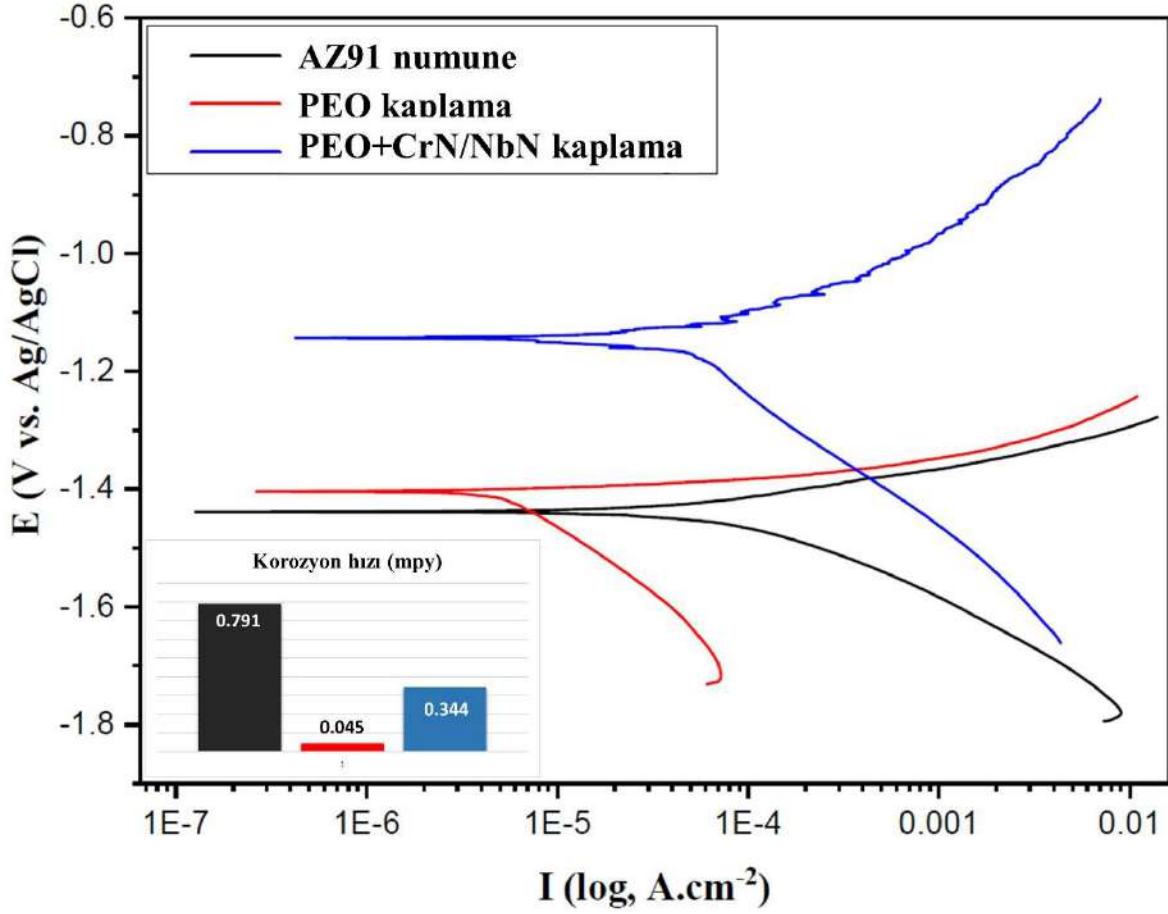
Şekil 8’de görüldüğü üzere kolonsal büyüyen CrN/NbN tabakası Şekil 7’de gösterilen yüzey morfolojisinin oluşmasını sağlamaktadır. Kaplamalar, Thornton bölge modeline göre 2. bölgede büyümüşür [19]. Thornton bölge modeline göre; Bölge 2,  $T/T_{erg} > 0,3$ ’te meydana gelmektedir. Bu sebeple yüzey difüzyonu etkin mekanizma olarak görülmektedir. Böylelikle tanelerin büyümesiyle kusurların ortadan kalktığı bir kaplama oluşmaktadır. Oluşan taneler daha büyük ve kolonsal yapıdadır.



Şekil 8. CrN/NbN kaplamasının kesit görüntüsü ve EDS analizi

Şekil 8’de verilen EDS analizine göre %12,82 at. Nb, %36,72 at. Cr ve %50,46 at. N oluşmuştur. Cr’nin atom ağırlığının Nb ye göre düşük olması sebebiyle Cr, Nb’ye göre yaklaşık 2 kat daha fazla sıçratma verimine sahiptir. Bu duruma bağlı olarak kaplama yapısına Cr elementi Nb’ye göre daha fazla katılmıştır. Şekil 8’deki kesit görüntüleri ayrıca incelendiğinde CrN tabakasının NbN tabakasına göre daha kalın olarak biriktiği görülmektedir. Kaplamalara NbN tabakası ile başlayıp yine aynı kaplama ile bitirilmiştir. Elde edilen kaplamalarda NbN/CrN kaplama kalınlığı 652 nm olarak bulunmuştur.

### 3.3. Korozyon Testleri



Şekil 9. AZ91, PEO ve PEO+CrN/NbN kaplamaların potansiyodinamik polarizasyon eğrisi

Taban malzeme olarak kullanılan kaplanmamış, PEO ile  $MgAl_2O_4$  kaplanmış ve PEO+PVD ile CrN/NbN kaplanmış AZ91 alaşımları için aynı şartlarda gerçekleştirilen korozyon testi potansiyodinamik polarizasyon eğrileri Şekil 9'da gösterilmiştir. Potansiyodinamik eğrilere göre, kaplamasız AZ91 ve sadece PEO ile işlem görmüş AZ91, herhangi bir kırılma potansiyeli göstermemektedir. PEO+CrN/NbN kaplamalar  $-1,3$  mV'luk bir kırılma potansiyeli göstermiştir. Bu numunelerin AZ91 alaşımına göre PEO kaplamalarda  $0,045$  mpy'lik oldukça düşük bir korozyon hızına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Yüzeyde büyütülen oksit tabakası, AZ91 alaşımının yüksek oranda korozyona karşı dirençli olmasını sağlamıştır. PEO+CrN/NbN kaplamalarda ise korozyon hızı  $0,344$  mpy olarak belirlenmiştir. Kaplama yapısı kompozisyonunda bulunan Cr ve Nb sebebiyle taneler arasında potansiyel fark meydana gelmiştir. Bu sebeple en üst katmanda bulunan yapının korozyon dayanımı oldukça azalmıştır. Ancak bu yapının korozyon direnci, kaplanmamış AZ91 alaşımına göre 2 kat daha yüksektir. Bu durumun nedeni, Cr ve Nb'nin hem saf formda hem de nitrür bileşiklerinde yüksek korozyon direncine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. [1,26,28,29].

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada, AZ91 magnezyum alaşımının korozyon direncini artırmak amacıyla PEO( $MgAl_2O_4$ )+PVD(CrN/NbN) kaplamalarının korozyon davranışına karşı etkisi %3,5'lik NaCl çözeltisinde araştırılmıştır. İlgili sonuçlar aşağıda verilmiştir;

- PEO kaplama yönteminde kullanılan elektrolitin  $NaAl_2O_3$  olması, Mg esaslı malzeme yüzeyinde  $MgAl_2O_4$  yapılarının kısa sürede büyümesini desteklemiştir.
- PVD kaplama yapıları çoğunlukla kristal olmasına rağmen, amorf fazların varlığı da tespit edilmiştir.
- PEO kaplama yüzeyinde oluşan  $MgAl_2O_4$  yapısı, CrN/NbN kaplamanın yüzeyde daha iyi bir performansla kaplanmasını desteklemiş, kafes uyumsuzluğunu ortadan kaldırmıştır.



- PEO ile kaplanan magnezyum alaşımlarının PVD gibi ikinci bir kaplama yöntemi ile üretilmesi, korozyon direncini artırmıştır.
- PEO kaplamaların yüzeyinde aynı kristal yapıya sahip PVD kaplamaları başarıyla uygulanabilmiştir. Ayrıca bu kaplamaların birçok uygulama alanında kullanılabilceği düşünölmektedir.
- PEO kaplamaların korozyon hızı 0,045 olarak bulunmuştur. PEO kaplamaları, korozyon hızı 0,791 olan kaplamasız AZ91 alaşımına göre yaklaşık on yedi kat daha yüksek korozyon direncine sahiptir.
- PEO+CrN/NbN kaplamaları için korozyon hızı 0,344 olarak belirlenmiştir. Ayrıca PEO+CrN/NbN kaplamalarının, kaplanmamış AZ91 numunesine göre yaklaşık 2 kat daha yüksek korozyon direncine sahip olduğu görölmüştür.

### Çıkar Çatışması Beyanı

Yazar(lar) herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

### Kaynaklar

- [1] Mathaudhu SN, Nyberg EA. Magnesium alloys in U.S. military applications: Past, current, and future solutions. *Magnesium Technology*, Springer, 2010; 27-32.
- [2] Luo AA. Magnesium casting technology for structural applications. *J. Magnes. Alloy*. 2013; 2-22.
- [3] Sillekens WH, Hort N. Magnesium and magnesium alloys. *Structural Materials and Processes in Transportation*. 2013; 113-150.
- [4] Dziubińska A, Gontarz A, Dziubiński M, Barszcz M. The forming of magnesium alloy forgings for aircraft and automotive applications, *Adv. Sci. Technol. Res. J.*, 2016; 158–168.
- [5] Danford MD, Mendrek MJ, Mitchell ML, Torres PD. The corrosion protection of magnesium alloy AZ31B. 1997.
- [6] Kutz M. *Mechanical engineers handbook*. Volume 1: Materials and engineering mechanics. 2015.
- [7] Dong H. *Surface engineering of light alloys: Aluminium, magnesium, and titanium alloys*. 2010.
- [8] Hussein RO, Nie X, Northwood DO. An investigation of ceramic coating growth mechanisms in plasma electrolytic oxidation (PEO) processing, *Electrochim. Acta.*, 2013; 111-119.
- [9] Cheng Y, Wu F, Matykina E, Skeldon P, Thompson GE. The influences of microdischarge types and silicate on the morphologies and phase compositions of plasma electrolytic oxidation coatings on Zircaloy-2, *Corros. Sci.* 2012; 307-315.
- [10] Dwivedi DK. Adhesive wear behaviour of cast aluminium–silicon alloys: Overview. *Materials & Design (1980-2015)* 2010; 2517-2531.
- [11] Dehnavi V, Luan BL, Shoesmith DW, Liu XY, Rohani S. Effect of duty cycle and applied current frequency on plasma electrolytic oxidation (PEO) coating growth behavior. *Surf. Coatings Technol.*, 2013; 100-107.
- [12] Dehnavi V, Prof S, Rohani-Prof S, Shoesmith DW. Surface modification of aluminum alloys by plasma electrolytic oxidation. *Chemical and Biochemical Engineering*. 2014.
- [13] Gupta P, Tenhundfeld G, Daigle EO, Ryabkov D. Electrolytic plasma technology: Science and engineering-An overview. *Surf. Coatings Technol.*, 2007; 8746–8760.
- [14] Blawert C, Bala Srinivasan P. Plasma electrolytic oxidation treatment of magnesium alloys. *Surf. Eng. Light Alloy. Alum. Magnes. Titan. Alloy*, 2010; 155–183.
- [15] Liang CJ. In-situ impedance spectroscopy studies of the plasma electrolytic oxidation coating process. 2013; 234.
- [16] Alshmiri F, Atkinson HV, Hainsworth SV, Haidon C, Lawes SDA. Dry sliding wear of aluminium-high silicon hypereutectic alloys. *Wear*, 2014; 106-116.
- [17] Xu F, Xia Y, Li G. The mechanism of PEO process on Al-Si alloys with the bulk primary silicon, *Appl. Surf. Sci.*, 2009; 9531-9538.
- [18] Hoche H, Groß S, Troşmann T, Schmidt J, Oechsner M. PVD coating and substrate pretreatment concepts for magnesium alloys by multinary coatings based on Ti(X)N. *Surf. Coatings Technol.*, 2013.
- [19] Mattox DMM. *Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing film formation, adhesion, surface preparation and contamination control*, 1998.
- [20] Gennardo D. Design, construction, and optimization of a magnetron sputtering system for urania deposition. 2010.
- [21] O'Hanlon JF. *A user's guide to vacuum technology*. John Wiley & Sons, 2005.
- [22] Alfonso JE, Buitrago J, Torres J, Santos B, Marco JF. Crystallographic structure and surface composition of NbN<sub>x</sub> thin films grown by RF magnetron sputtering. *Microelectronics J.*, 2008; 1327–1328.
- [23] Martin J, Nominé AV, Stef J, Nominé A, Zou JX, Henrion G, Grosdidier T. The influence of metallurgical state of substrate on the efficiency of plasma electrolytic oxidation (PEO) process on magnesium alloy. *Mater. Des.*, 2019; 107859.
- [24] Hafizi A, Rahimpour MR. Inhibiting Fe–Al spinel formation on a narrowed mesopore-sized MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> support as a novel catalyst for H<sub>2</sub> production in chemical looping technology. *Catalysts*, 2018; 27.

- [25] Nordin M, Larsson M, Hogmark S. Mechanical and tribological properties of multilayered PVD TiN/CrN, TiN/MoN, TiN/NbN and TiN/TaN coatings on cemented carbide. *Surf. Coatings Technol.*, 1998; 234-241.
- [26] Lamastra FR, Leonardi F, Montanari R, Casadei F, Valente T, Gusmano G. X-ray residual stress analysis on CrN/Cr/CrN multilayer PVD coatings deposited on different steel substrates. *Surf. Coatings Technol.*, 2006; 6172–6175.
- [27] Khlifi K, Ben Cheikh Larbi A. Investigation of adhesion of PVD coatings using various approaches, *Surf. Eng.*, 2013; 555-560.
- [28] Li XY, Akiyama E, Habazaki H, Kawashima A, Asami K, Hashimoto K. An XPS study of passive films on sputter-deposited Cr-Nb alloys in 12 M HCl solution. *Corros. Sci.*, 1998; 821-838.
- [29] Song G, Atrens A, Wu X, Zhang B. Corrosion behaviour of AZ21, AZ501 and AZ91 in Sodium Chloride. *Corros. Sci.*, 1998; 1769-1791.



## Reaktivite Kontrollü Sıkıştırma Ateşlemeli Bir Motorda Motor Devrinin Yanma ve Emisyon Karakteristikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması

Mutlu OKCU<sup>1\*</sup>, Müjdat FIRAT<sup>2</sup>, Yasin VAROL<sup>3</sup>, Şehmus ALTUN<sup>4</sup>, Okan ÇELİK<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ardahan Üniversitesi, Ardahan, Türkiye

<sup>2</sup> Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>3</sup> Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>4</sup> Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Batman Üniversitesi, Batman, Türkiye

<sup>5</sup> Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Tek. Bölümü, Teknik Bilimler MYO, Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep, Türkiye

\*<sup>1</sup> mutluokcu@gmail.com, <sup>2</sup> mujdatfirat@gmail.com, <sup>3</sup> yvarol@gmail.com, <sup>4</sup> altun.sehmus@gmail.com,

<sup>5</sup> mr.okancelik@gmail.com

(Geliş/Received: 09/11/2021;

Kabul/Accepted: 03/02/2022)

**Öz:** Yapılan çalışmada, Reaktivite kontrollü Sıkıştırma Ateşlemeli (RCCI) stratejiler altında çalışacak şekilde modifiye edilmiş tek silindirli bir dizel motorda, biyodizel/petrol bazlı dizel karışımı ve benzin kullanımının, yanma ve egzoz emisyon özelliklerine etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışmada dizel ve biyodizel karışımı yüksek reaktiviteli yakıt (HRF), benzin ise düşük reaktiviteli yakıt (LRF) olarak kullanılmıştır. Deneyler 1500, 2000, 2500 ve 3000 d/d olmak üzere dört farklı motor devrinde, %20 yük koşullarında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada dizel yakıtının yanında, %20 biyodizel ve %80 petrol kökenli dizel karışımından oluşturulan B20 yakıtı da kullanılmıştır. Dizel ve B20, doğrudan silindire püskürtülürken, benzin emme kanalına enjekte edilmiştir. Elde edilen verilere göre tüm motor devirlerinde RCCI koşullarında LRF kullanımı ile ortalama indike basınç (OİB) değerinin dizel ve B20'ye göre arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, OİB'deki en büyük artış dizelin HRF olarak kullanıldığı deneylerde elde edilmiştir. Öte yandan, LRF'nin kullanılmasıyla NOx emisyonu ve duman opaklığının azaldığı, CO ve HC emisyonunun ise arttığı belirlenmiştir. B20'nin HRF olarak kullanıldığı ve RCCI olmadan yapılan deneylerde HC emisyonu ve duman opaklığı seviyesinin dizele göre daha az olduğu görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** RCCI, B20, Emisyon, Dizel, Benzin.

### Investigation of the Effect of Engine Speed on Combustion and Emission Characteristics in a Reactivity-Controlled Compression Ignition Engine

**Abstract:** In this study, in a single cylinder diesel engine converted to operate in RCCI mode, the effect of using a biodiesel/petroleum-based diesel mixture and gasoline on combustion and emission characteristics was investigated experimentally. Also, diesel and biodiesel have been used as HRF, and gasoline as LRF. The experiments were carried out in four different engine speed as 1500, 2000, 2500 and 3000 rpm, and under at %20 load. In the study, B20 mixture fuel, which consists of 20% biodiesel and 80% petrol-based diesel mixture by volume, has been used. Diesel and B20 have been injected directly into the cylinder while gasoline was injected into the intake port. With the use of LRF under RCCI conditions at all engine speeds, the IMEP value increased compared to diesel and B20, according to the data obtained. In addition, experiments using diesel as HRF generated the greatest increase in IMEP. On the other hand, it has been determined that NOx emission and smoke opacity decreased, while CO and HC emission increased with the use of LRF at all experiments. In experiments with B20 as the HRF and no RCCI, HC emissions and smoke opacity levels were shown to be lower than with diesel.

**Keywords:** RCCI, B20, Emission, Diesel, Gasoline.

## 1. Giriş

Dizel motorlar yüksek verimleri nedeniyle günlük hayatımızda birçok alanda kullanılmaktadırlar. Bu avantajına rağmen dizel motorlardan kaynaklanan NOx ve is emisyonu salınımının yüksek olması, araştırmacıları bu emisyonları azaltmak için yeni yöntemler aramaya itmiştir. Yapılan araştırmalarda NOx ve is emisyonunun silindir içinde çözülmesi gereken bir problem olduğu görülmüştür. Düşük sıcaklıklı yanma konseptleri (LTC) olarak ifade edilen bu yöntemlerin dizel motorlarda temiz ve verimli yanmayı sağlayacağı ve zararlı emisyonları azaltacağı belirtilmiştir. LTC konseptleri yıllar içinde değişim göstermiştir. Günümüzde HCCI (homojen dolgu sıkıştırma ateşleme), PCCI (ön karışım dolgu sıkıştırma ateşleme ve RCCI ( reaktivite kontrollü sıkıştırma ateşleme) olarak tarif edilmektedir. Bu yöntemlerin kullanıldığı çalışmalar incelendiğinde, düşük NOx ve is emisyon seviyelerin elde edildiği belirlenmiştir [1-4]. Yapılan çalışmada bu yöntemlerden biri olan RCCI konseptli

\* Sorumlu yazar: [mutluokcu@gmail.com](mailto:mutluokcu@gmail.com). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup>0000-0002-8226-0994, <sup>2</sup>0000-0001-6978-9044, <sup>3</sup>0000-0003-2989-7125, <sup>4</sup>0000-0002-9017-2986, <sup>5</sup>0000-0003-2240-8069

dizel bir motor kullanılmıştır. RCCI konsepti en az iki farklı reaktiviteye sahip yakıtın silindirde dolgu oluşturduğu bir sistem olarak tanımlanmaktadır. RCCI’de kullanılan iki farklı yakıt silindire iki farklı yolla enjekte edilmektedir. HRF olarak ifade edilen yüksek reaktiviteli yakıt (yüksek setanlı yakıt) doğrudan silindire enjekte edilmekte iken, LRF olarak ifade edilen düşük reaktiviteli yakıt (düşük setanlı yakıt) ise emme portuna yerleştirilen bir enjektör vasıtasıyla enjekte edilmektedir. Farklı zamanlarda silindire enjekte edilen bu yakıtların yanması sonucunda çok düşük NO<sub>x</sub> ve is emisyonları ile kabul edilebilir oranlarda basınç artış oranı ve çok yüksek indike verim ile daha geniş bir yük aralığında çalışabilir olduğu görülmüştür [5-7]. Literatürde yapılan incelemelerde son zamanlarda RCCI konseptli motorların kullanıldığı çalışmaların arttığı görülmüştür [ 8, 9 ]. Bu bağlamda, Okcu ve ark. [10], RCCI konseptli dizel bir motorda dizel ve biyodizel yakıtının HRF, IBE’nin de LRF olarak kullanıldığı deneysel bir çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmada değişen motor yükü ve LRF ön karışım oranı etkisinin motor performans ve egzoz emisyonları üzerine olan etkisi incelenmişlerdir. Özellikle yüksek karışım oranlı LRF kullanımında NO<sub>x</sub> ve duman opaklığının önemli oranlarda azaldığı belirtilmiştir. RCCI alanında başka bir çalışmada Nazemi ve Shahbakhti [11] tarafından yapılmıştır. Yapılan çalışmada, RCCI konseptli bir motorda farklı enjeksiyon parametreleri denenmiş ve bunun ısı salınım ve yanma performansına etkisini incelemişlerdir. Çalışmada enjeksiyon parametreleri değiştirilerek CO ve yanmamış hidrokarbon emisyonlarının %23 ile %39 arasında azaldığını ve bu süreçte indike ve yanma veriminin arttığını gözlemişlerdir. Yapılan bazı çalışmalarda enjeksiyon zamanı ve hava fazlalık katsayısının RCCI konseptli motorlarda önemli olduğu vurgulanmıştır [12]. Yapılan araştırmalar neticesinde, giriş portuna ve silindire enjekte edilen yakıtın, ateşleme zamanlaması ve HRR’yi (ısı salınım oranı) başarıyla kontrol ettiği tespit edilmiştir. Bu sayede RCCI konseptli motorun yüksek ısı verime ulaşabildiği, düşük ve orta yükte herhangi bir aftertreatment sistemi olmaksızın emisyon değerlerinde iyileşme sağladığı belirtilmiştir [13].

Dizel motorlarda zararlı emisyonların azaltılması için farklı yanma teknolojilerinin kullanılmasının yanında, alternatif yakıt kullanımının da arttığı görülmüştür. Bu bağlamda, son zamanlarda yapılan çalışmalarda dizel yakıtı yerine alternatif olarak biyodizel kullanımının arttığı belirlenmiştir. Hayvansal ve bitkisel kaynaklı olarak transesterifikasyon yöntemi ile üretilen biyodizellerin genel olarak yüksek oksijen içeriği ve yenilenebilir olmasının dizel alternatif kullanımının artırdığı görülmüştür [14,15]. Kullanılan biyodizellerin %0’dan %100’e kadar farklı karışım oranlarında kullanımının motor performans ve emisyonlara etkisini araştırıldığı belirlenmiştir. Buna karşın biyodizel kullanımının sınırlayan yüksek viskozite ve düşük ısı değer gibi özelliklerinden dolayı genellikle düşük karışım oranlı biyodizellerin, dizel alternatif olarak kullanıldığı ve tüm dünyada büyük oranda B20 ve B35 karışımının yaygın olarak kullanıldığı belirlenmiştir [16].

RCCI konseptli motorlarda dizel ve biyodizelin HRF olarak kullanıldığı birçok çalışma olduğu görülmüştür. Bu çalışmalarda RCCI motorlarda temel problemlerden olan CO ve HC emisyonunun yüksek olması durumunu düzeltmek için sıklıkla biyodizel kullanıldığı belirlenmiştir. Yapılan bu çalışmalarda biyodizel kullanımı ile CO ve HC emisyonunda azalmalar olduğu görülmüştür [17-20]. Ayrıca, yine RCCI konseptli motorlarda LRF olarak birbirinden farklı alternatif yakıtlarında da kullanıldığı birçok çalışmanın olduğu ve bu yakıtlar arasında yüksek ısı değere sahip olması sebebiyle sıklıkla benzin kullanıldığı görülmüştür. Yapılan bu çalışmalarda deneysel yöntemlerin yaygın biçimde kullanıldığı görülmüştür. Ayrıca bu çalışmalarda benzin ön karışım oranı değişimi, motor yükü değişimi, benzin enjeksiyon zamanı değişimi gibi parametrelerin çalışıldığı ve bunların RCCI konseptli motorlarda emisyonların azaltılmasına katkı sağladığı vurgulanmıştır [21-23, 31].

Yukarıda bahsedilen tüm veriler göz önüne alındığında, dizel motorlarda NO<sub>x</sub> ve is emisyonunun azaltılması için RCCI konsepti kullanımının etkili olduğu değerlendirilmiştir. Ayrıca, RCCI konseptli motorlarda LRF olarak benzin kullanımının, benzinin yüksek ısı değere sahip olmasından dolayı bu konseptte alternatif yakıt olarak kullanıldığında etkili olduğu belirlenmiştir. Ancak yapılan araştırmalarda RCCI konseptinin CO ve HC emisyonu kontrol etmede bazı eksiklikleri olduğu belirlenmiştir. Bu aşamada LRF olarak özellikle biyodizel kullanımının HC ve CO emisyon oluşumunun azalmada yaygın olarak kullanıldığı ve etkili olduğu tespit edilmiştir. Ek olarak, yapılan RCCI konsepti araştırmalarında motor yükü değişiminin parametre olarak oldukça yağın olarak kullanıldığı, buna karşın motor devir değişimini esas alan çalışmaların yetersiz olduğu görülmüştür. Devir sayısı değişimi, HRF olarak B20 ve dizel ile birlikte LRF olarak benzin kullanımının literatürdeki bu eksikliği gidereceği ve RCCI konseptli çalışmaların gelişimine katkı sağlayacağı değerlendirilmiştir. Bu bağlamda yapılan çalışmada, temiz ve verimli bir yanma için dizel bir motor bazı tasarimsal değişiklikler yapılarak RCCI konseptli bir motora dönüştürülmüş, devir sayısı değişiminin %30 LRF ön karışım oranı ile birlikte kullanımının motor performans ve emisyonlara etkisi incelenmiştir.

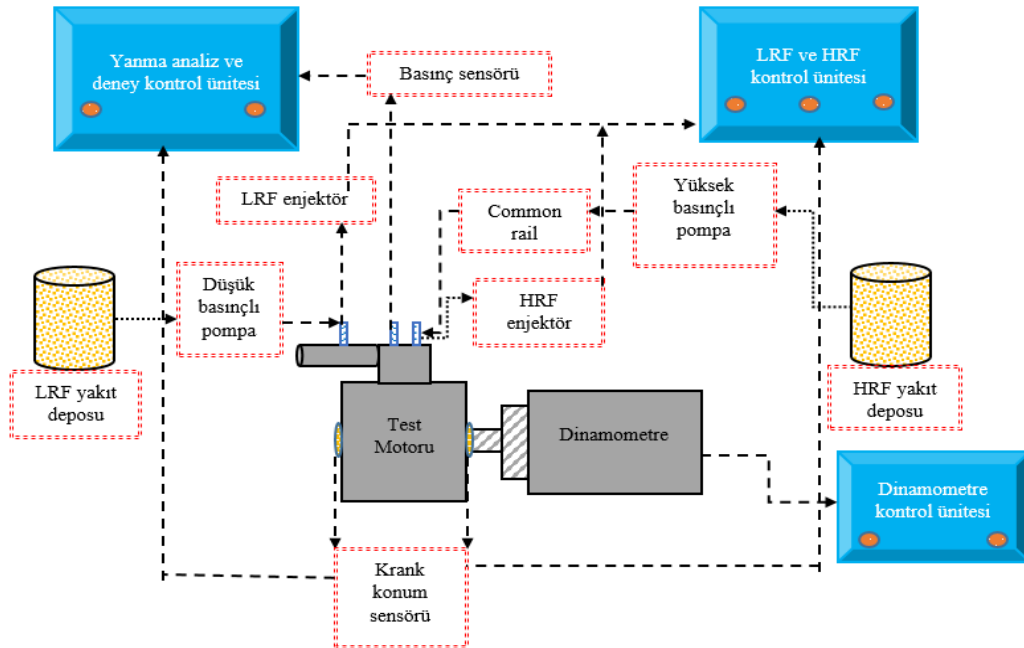
## 2. Materyal ve Yöntem

Yapılan çalışmada motor deneyleri Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü Motor Laboratuvarında bulunan deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde tek silindirli ve dört zamanlı Common-rail dizel motoru RCCI modunda çalışacak şekilde modifiye edilerek kullanılmıştır. Deneyde kullanılan motora ait teknik özellikler Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Motorun teknik özellikleri.

Motorun Markası ve Modeli	Kipor KM 186 F Dizel Motor
Motor tipi	Tek silindirli ve 4 zamanlı
Silindir Çapı x strok	86 mm x 70 mm
Silindir Hacmi	406 cm <sup>3</sup>
Sıkıştırma Oranı	18.1
Maksimum Tork	25.7 Nm @ 2400 d/d
Püskürtme Şekli	Common-Rail Direkt Püskürtme
Püskürtme Basıncı ve zamanı	300 bar/21 °KMA (krank mili açısı) ÜÖNÖ (üst ölü noktadan önce)

Motor Gensan GSA 271 S/4 model elektrikli dinamometreye bağlanarak yükleme gerçekleştirilmiştir. Yük miktarı Zemic L6W marka yük hücresi ile ölçülmüştür. Deneylerde motor yükü %20 ve LRF ön karışım oranı da %30 olarak sabitlenmiştir. Bu yükte motor devri 1500, 2000, 2500 ve 3000 d/d olarak değiştirilmiş, bu durumun performans ve emisyon değerleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Her bir deneyde ölçümler üç defa tekrar edilerek yapılmış ve sonuçların ortalaması alınmıştır. Deney setinin genel görünümü Şekil 1’de verilmiştir.



**Şekil 1.** Deney düzeneği şematik görünümü.

Bu çalışmada, RCCI şartlarında LRF (benzin) bir port yakıt püskürtme sistemi kullanarak 5 bar basınçta emme kanalına püskürtülmüştür. Püskürtme zamanlaması emme supabının açılmasından 15°KMA sonra olarak ayarlanmıştır. HRF’ler (Dizel ve B20) ise doğrudan CRDI ile ÜÖNÖ 21°KMA’da silindire 300 bar basınçla püskürtülmüştür. Yakıt miktarı kontrol paneli üzerinde yer alan yakıt kontrol sistemi kullanılarak ayarlanmıştır. Yakıt tüketimi hacimsel olarak ölçüklendirilmiş yakıt deposu yardımıyla ve hassas teraziler ile doğrulanmıştır.

yapılarak hesaplanmıştır. Deneyler boyunca yakıtın hacimsel olarak tüketimi zamana bağlı olarak hesaplanmış ve motorun hacimsel yakıt debisi bulunmuştur. Elde edilen bu hacimsel yakıt debisi, yakıtın yoğunluğu ile çarpılarak motorun kütleli debisi belirlenmiştir. Yüksek reaktiviteli yakıt olarak kullanılan B20, petrol kökenli ticari dizel yakıtı ile ticari biyodizel yakıtlarının hacimsel olarak %80 ve %20 oranlarında karıştırılması ile elde edilmiştir. Ticari olarak alımı yapılan biyodizel atık yemeklik yağlardan elde edilmiştir ve çalışma kapsamında satın alınmıştır. Petrol kökenli benzin ise yine ticari olarak temin edilmiştir. Deneylerde kullanılan yakıtlara ait bazı özellikler Tablo 2’de görülmektedir.

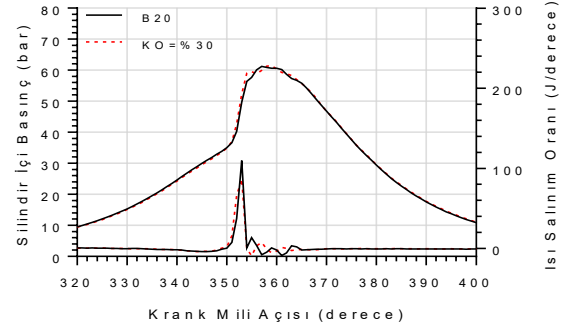
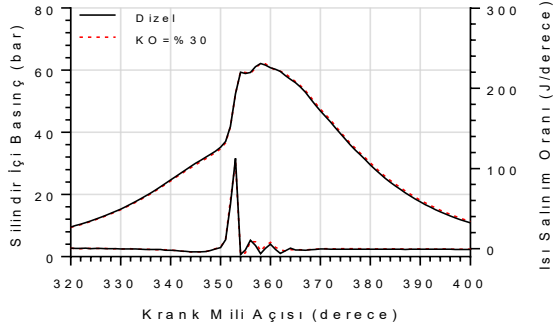
**Tablo 2.** Yakıt özellikleri.

Özellikler	Dizel	Biyodizel	Benzin
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	829.4	883.2	744.4
Kaynama Noktası (°C)	180-350	290-350	38-204
Parlama noktası (°C)	67	180	-45/-35
Kin. Viskozite (mm <sup>2</sup> /sn)	2.889	5.027	0.55
Alt Isıl Değer (MJ/kg)	43.14	38.71	44.1
Buharlaşma Gizli Isısı (kJ/kg )	358	---	---
Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı (°C)	210-250	180	228-470
Karbon İçeriği (%)	80.13	73.18	-
Hidrojen İçeriği (%)	12.86	11.39	-
Oksijen İçeriği (%)	6.35	14.75	-
Setan Sayısı	56	53	0-10
Oktan Sayısı	-	-	96

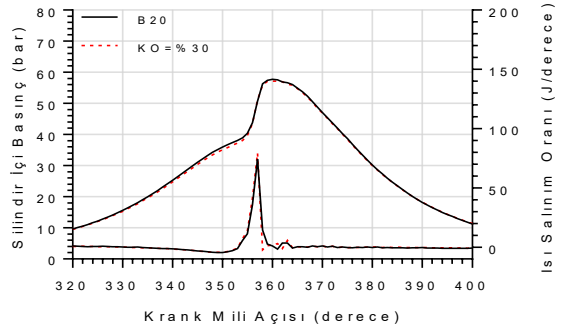
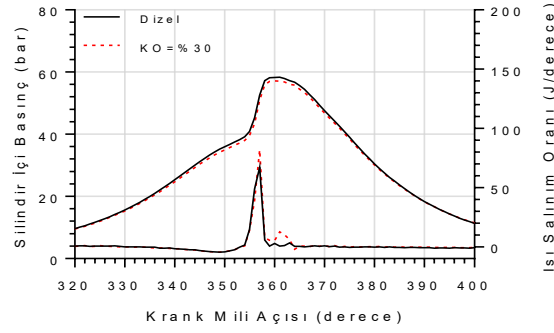
Basınç sensörü olarak Optrand marka sensör ve Kübler marka bir enkoder kullanılmıştır. Elde edilen veriler bir veri toplama kartına aktarılmış ve FebriS ile analiz edilmiştir. Silindir içi gaz basıncının her bir çalışma noktası için 200 ardışık döngü üzerinden ortalaması alınmıştır. Isı salınımı, silindir içi basınç ve hacim değerleri kullanılarak termodinamiğin birinci yasası ile yazılım tarafından hesaplanmıştır. Bu çalışmada RCCI durumunda belirli bir motor yükündeki enerji miktarı geleneksel dizel motorunun bu yükte tükettiği kütleli debiye bağlı oluşan toplam enerji miktarına göre belirlenmiştir. Ayrıca, düşük reaktiviteli yakıtın karışım oranı (KO) için çevrim başına motora verilen toplam enerji hesaplanarak belirlenmiştir. Çevrim başına motora verilen enerji sabit tutulup bu enerji üzerinden karışım oranı hesaplanmıştır. Bunun için düşük reaktiviteli yakıtın kütleli debisi ve alt ısıl değerinin çarpımı, düşük ve yüksek reaktiviteli yakıtların kütleli debisi ve alt ısıl değerlerinin çarpımlarının toplamına bölünmüştür. Deneyler için motor yükü %20 ve LRF ön karışım oranı %30 olarak belirlenmiştir.

### 3. Bulgular ve Tartışma

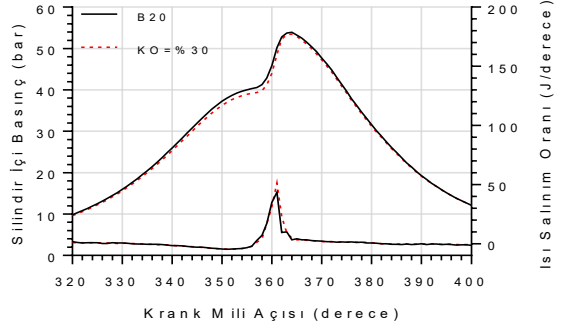
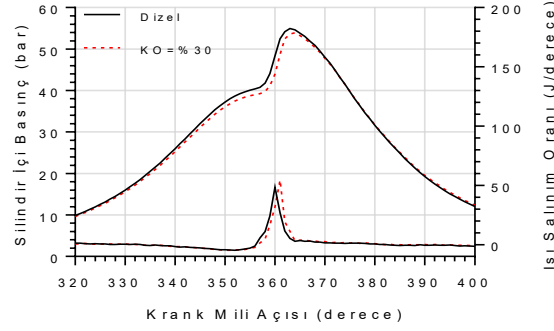
Yapılan çalışma %20 sabit motor yükünde, LRF karışım oranının %30 olduğu ve motor devri değişimi sonucunda elde edilen sonuçların motor performans ve emisyon karakteristiği hakkında bilgileri içermektedir. İlk olarak motor performansına hakkında bilgi veren silindir içi basınç, ısı salınım oranı, maksimum basınç artış oranı, OİB ve silindir içi sıcaklık değişimi bilgileri sunulmuştur. Daha sonra CO, HC NO<sub>x</sub> ve duman opaklığı emisyonlarına ait değişimlerin verildiği grafikler detaylı olarak anlatılmıştır.



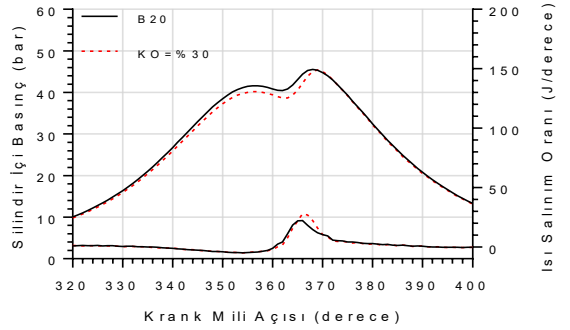
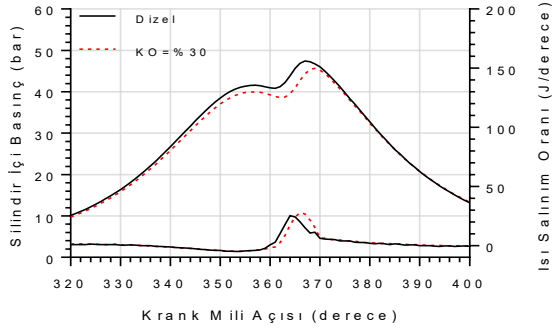
1500 d/d



2000 d/d

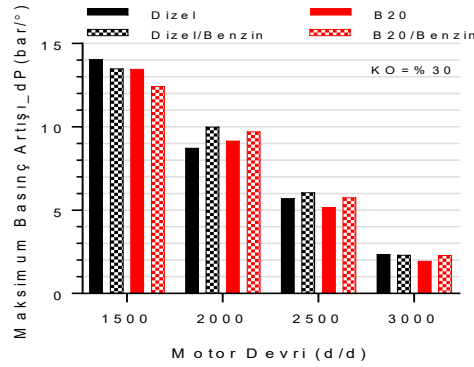


2500 d/d



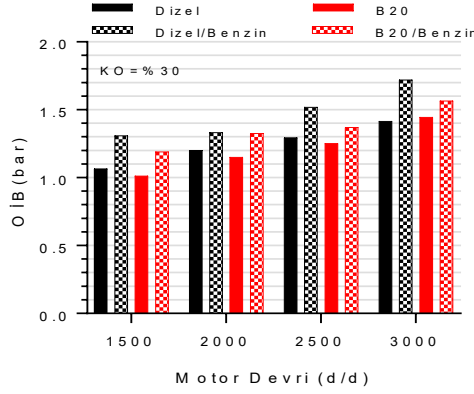
3000 d/d





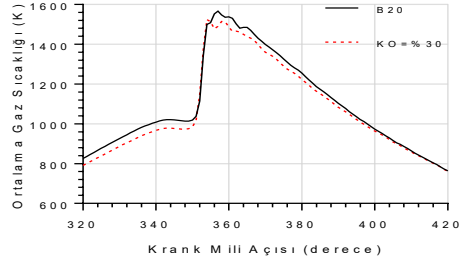
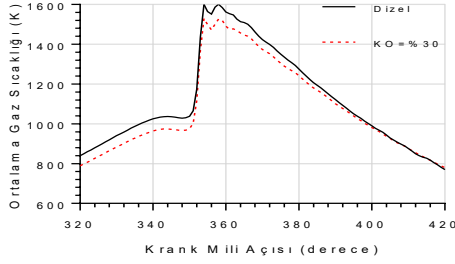
Şekil 2. Farklı motor devirlerinde dizel ve B20 yakıtları için silindir içi basınç, ısı salınım oranları ve silindir içi maksimum basınç artışının değişimi.

Şekil 2’de her iki HRF için %20 yük ve %30 LRF ön karışım oranında motor devrinin değişiminin silindir içi basınç değişimi, ısı salınım oranı ve maksimum basınç artışının değişimini içeren veriler grafik halinde sunulmuştur. Veriler incelendiğinde, motor devrinin 1500 olduğu, hem dizel hem de B20’nin kullanıldığı deneylerde LRF kullanımının silindir içi basınç ve ısı salınım oranı üzerindeki etkinin az olduğu, buna karşın devir sayısı arttıkça LRF kullanımının silindir içi basıncı bir miktar azalttığı, ısı salınımını ise artırdığı belirlenmiştir. Hem silindir içi basınç hem de ısı salınımında oluşan bu değişimlerin pik değerlerinin HRF’lere göre 1-3 krank açısı ötelendiği de ayrıca görülmüştür. Devir sayısı ilerledikçe oluşan bu azalma hızında artış belirlenmiştir. 1500 ve 2000 motor devrinde yanma için gerekenden fazla süre bulunmaktadır. Bu süreden dolayı, burada oluşan değişim üzerinde HRF ve LRF arasındaki termofiziksel özelliklerin ve karışım oranının farklı olmasının etkileri çok az olduğu görülmüştür. Yine süreden dolayı silindirde zengin reaktif bölgelerinin sayısı artmıştır. 1500 ve 2000 devir deneylerinde motor devir hızının az olması HRF yakıtlarının silindire püskürtülmesi ile birlikte başlayan ani yanmanın hem basınç hem de ısı salınımını hızlı bir şekilde yükselttiği daha sonra devam eden püskürtülen yakıtın etkisi ile de yanmanın verimsiz olsa da devam ettiği görülmektedir. 2500 d/d göz önüne alındığında ise, 2000 d/d’ye kıyasla her iki HRF için LRF kullanımının silindir içindeki basınç pik değerini azalttığı görülmüştür. Artan motor devrine bağlı olarak yanma için gereken süre azalmasına rağmen yanma süreci 2000 devre göre daha kontrollü oluşmuştur. Bu devirde LRF’nin buharlaşma ısısından ve yüksek oktan içerinden dolayı tutuşma gecikmesinin uzamasına etki etmiş, yanmanın düşük sıcaklıkta meydana gelmesini sağlamış ve buna bağlı olarak maksimum basınç değerlerini hem dizel hem de B20 için azaltmış, ısı salınım oranını ise artırmıştır [32]. 3000 devir deneylerinde bu durum daha da ilerlemiştir. Artan motor devri ile birlikte yanmanın gerçekleşebilmesi için gereken süre kısalmıştır. Bu yüzden yanma reaksiyonları kısmen gerçekleşmiş ve buna bağlı olarak silindir içi maksimum basınç noktası ÜÖN’den diğer devirlere kıyasla yaklaşık olarak 4-8 derece sonra oluşmuştur. Bu devirde LRF kullanımı ile tutuşma gecikmesi uzamış ve maksimum basınç değeri azalmıştır. Tüm devirlerde LRF kullanımı ile ısı salınımının artış gösterdiği belirlenmiştir. Özellikle ısı salınımında 2000 ve 2500 devirde LRF kullanımı ile %40 oranında bir artış olduğu tespit edilmiştir. Devir değişiminin ve LRF kullanımının maksimum basınç artışı üzerindeki etkisi de yine şekil 2’de verilen grafiklerinden açık bir şekilde görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi motor devir sayısı arttıkça silindir içinde oluşan maksimumum basınç artış değerleri azalmıştır. Gelişen bu durum basınç değişimi verileri ile uyum halindedir. Maksimum basınç artışının değişiminin 1500 devir deneylerinde LRF kullanıldığında HRF’lere kıyasla azaldığı görülmüştür. Bunun dışında tüm devir deneylerinde LRF kullanımı ile maksimum basınç artışında bir artış olduğu görülmüştür. Bu durumun LRF kullanımı ile tutuşma gecikmesinin uzamasından kaynaklandığı tespit edilmiş ve daha önceki veriler ile de uyumlu olduğu değerlendirilmiştir.

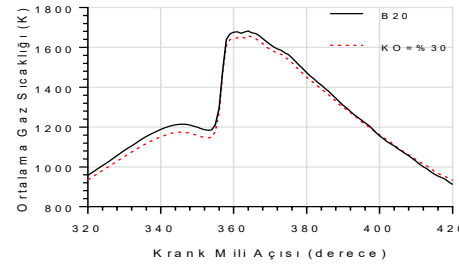
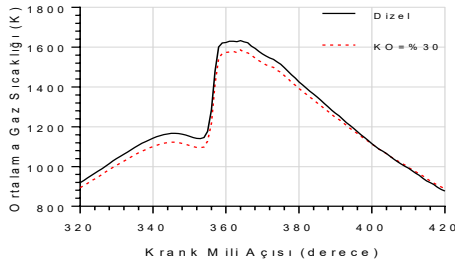


Şekil 3. Farklı motor devirleri ve LRF kullanımında OİB'nin değişimi.

Şekil 3'te farklı motor devirlerinde B20 ve dizel yakıtları için LRF kullanımının OİB değeri üzerindeki etkisinin incelendiği verileri grafik halinde sunulmuştur. Motor devrinin artması ile OİB değerin de kademeli olarak arttığı belirlenmiştir. LRF uygulanması sonucunda elde edilen OİB verileri her iki HRF'den elde edilen veriler kıyaslandığında, LRF kullanımı ile elde edilen OİB değerlerinde gözle görülür bir artışa sebep olduğu grafiklerde görülmektedir. Şekil 2'de verilen grafiklerde göz önüne alındığında, maksimum basınç ve basınç artışı değerinin hangi krank açısında elde edildiği motordan elde edilen OİB değerini doğrudan etkilediği değerlendirilmiştir [24]. Buradan hareketle, özellikle 1500 ve 2000 devirlerde HRF'ler kullanıldığında oluşan kararsız yanmaya rağmen bu devirler dâhil tüm devirlerde LRF kullanımının maksimum basınç değerlerini düşürdüğü görülmüştür. Burada LRF kullanımı ile oluşan daha düşük basınca rağmen yanma sürecinin HRF'lere göre optimum seviyede olması ve dolgu içindeki yüksek homojen yapı sebebiyle OİB değerinin artışı yönde etkilemiştir. Tüm bu durumlara ek olarak, silindir içi basınç değişimi ve maksimum basınç artışının oluştuğu krank açılarına göre, silindir içinde oluşan negatif iş-pozitif iş dengesinin OİB değerini belirlediği düşünülmektedir. Son olarak, dizel yakıtının genel olarak B20 yakıtına göre genel olarak tüm devirlerde büyük çoğunlukla daha yüksek bir OİB değerine ulaştığı görülmüştür. Bu durumun B20 yakıtının dizele göre oksijen içeriği fazlalığına sahip olmasına rağmen düşük ısı değere sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Ayrıca, kullanılan yöntem ile LRF kullanımının OİB'yi tüm devirlerde artırmasının RCCI konsepti adına önemli olduğu değerlendirilmiştir.

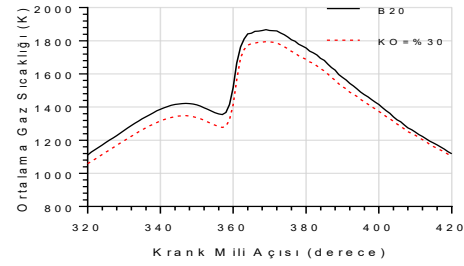
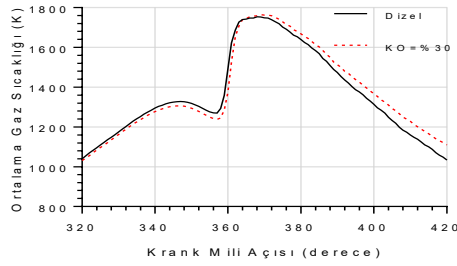


1500 d/d

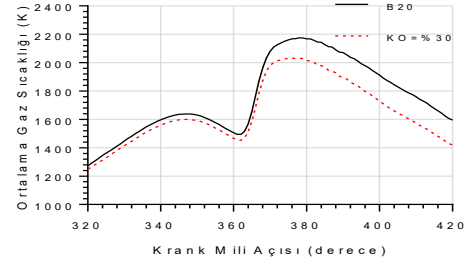
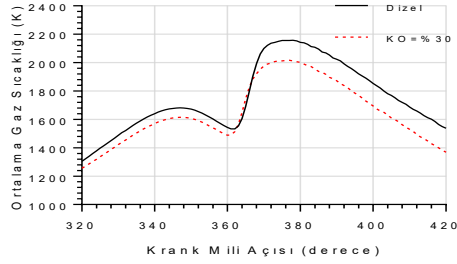


2000 d/d

Reaktivite Kontrollü Sıkıştırma Ateşlemeli Bir Motorda Motor Devrinin Yanma ve Emisyon Karakteristikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması



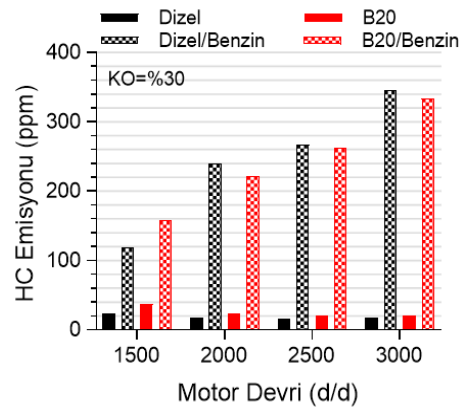
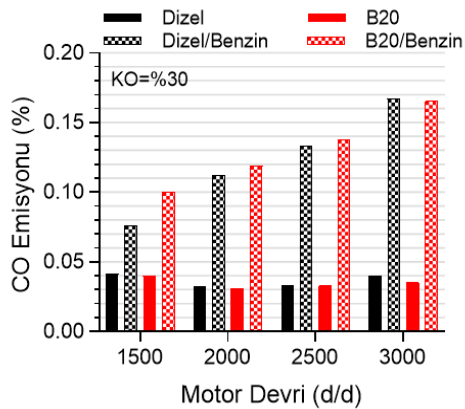
2500 d/d



3000 d/d

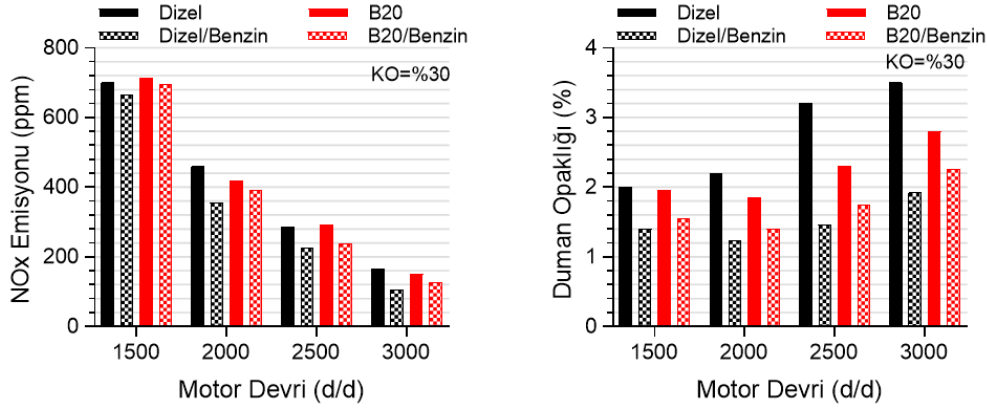
Şekil 4. Farklı motor devirlerinde LRF kullanımının silindir içi gaz sıcaklıkları üzerindeki etkisi.

Şekil 4'te RCCI konseptli motorda LRF kullanımının değişen motor devir sayısının silindir içi sıcaklık değerleri üzerindeki etkilerinin gösterildiği grafikleri içermektedir. Grafikler incelendiğinde, değişen motor devirlerine karşılık her iki HRF için kullanılan LRF etkisi ile sıcaklıklarda azalma olduğu görülmektedir. Özellikle her iki HRF için 1500 ve 2000 d/d durumlarında ani sıcaklık yükselmelerinin olduğu ve çok kısa krank açılarında maksimum sıcaklık devirlerine ulaşıldığı görülmüştür. Bu devirlerde LRF kullanımı ile bu ani yükselmeleri kısmen kontrol altına almıştır. Devir sayısının 2500 ve 3000'e ilerlemesi ile birlikte silindir içine alınan dolgu miktarı da artmış ve sıcaklık değerleri de buna bağlı olarak artmıştır. Oluşan bu artışın daha önceki devirlere göre ani bir şekilde yükselmediği görülmüştür. Bu devirlerde LRF kullanımının yine sıcaklıklarda düşüşe neden olduğu görülmüştür. Yüksek buharlaşma ısısının sıcaklığı azalttığı bilinen bir durumdur [33]. Ayrıca, önceki devirlere göre sıcaklık artışının ani yükselmeler göstermemiş olsa da motor devrinin yüksek olması içeride oluşan dolgunun tam olarak reaksiyona girememesine sebep olduğu görülmüştür. Özetle, LRF kullanımının silindir içi sıcaklık değerlerini tüm devir deneylerinde azalttığı tespit edilmiştir. Bu azalma seviyesinin değişen devire göre farklılık gösterdiği görülmüştür. Düşük devirlerde sıcaklık düşük olsa da ani artışlar olduğu ve sıcaklık artışının kontrolsüz geliştiği, yüksek devirlerde ise bu artışın kontrollü olarak gerçekleştiği tespit edilmiştir. Sıcaklıkta meydana gelen bu değişimin hem dizel hem de biyodizel sonuçlarında benzer seyir izlediği belirlenmiştir.



**Şekil 5.** Farklı motor devirlerinde LRF kullanımının CO ve HC emisyonları üzerindeki etkisi.

Şekil 5 farklı motor devirlerinde oluşan CO ve HC emisyonlarının, LRF kullanımı ile değişimini göstermektedir. CO emisyonunun LRF kullanımı ve devir değişimine göre gösterdiği tepki incelendiğinde, hem B20 hem de dizel yakıtlı duruma göre LRF kullanımının CO oranını kademeli artırdığı görülmektedir. Yine yapılan çalışmada yine tüm devirlerde LRF kullanımının HC emisyon seviyesini artırdığı görülmektedir. LRF kullanımının tüm devirlerde aynı etkiyi göstermesinin temel olarak bir sebepten olduğu düşünülmektedir. Tüm motor devir deneylerinde ve her iki HRF içinde LRF kullanımının doğrudan CO ve HC emisyonunu artırmasının temel sebebinin, silindir içi sıcaklık değeri ve dolgunun yanması için gerekli zamana bağlı olduğu düşünülmektedir. RCCI konseptli motorlarda emme zamanında silindire enjekte edilen LRF'nin tüm sıkıştırma zamanı boyunca silindirde ve cidarlarda soğuk bölgeler oluşturduğu, bunun değişen devir sayısına bağlı olarak CO ve özellikle HC emisyonu oluşturmada artırıcı bir etkiye sebep olduğu belirlenmiştir [25-28]. Sonuç olarak, yapılan çalışmada LRF olarak benzin kullanımının dizel ve B20'nin HRF olarak kullanıldığı tüm devir deneylerinde CO ve HC emisyonunu artırdığı belirlenmiştir. Dizel HRF deneyinde LRF kullanımında CO emisyonunun B20'ye göre daha fazla, HC emisyonunda ise B20 deneyinde oluşan HC emisyonunun dizele göre daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durumun B20'nin yapısındaki oksijen ve karbon oranına bağlı olduğu değerlendirilmiştir.

**Şekil 6.** Farklı motor devirlerinde LRF kullanımının NOx emisyonu ve duman opaklığı üzerindeki etkisi.

Şekil 6 farklı motor devirlerinde LRF kullanımının NOx ve duman opaklığı üzerine olan etkisini göstermektedir. Yapılan incelemede, devir sayısı arttıkça NOx emisyonunun azaldığı görülmüştür. Tüm devirlerdeki NOx emisyonu üzerindeki LRF etkisine bakıldığında, LRF kullanımının NOx emisyonunu azaltıcı bir etkide bulunduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, B20'nin HRF olarak kullanıldığı deneylerde dizele göre kısmen de olsa fazla oranda NOx emisyonu oluştuğu gözlenmiştir. Bu durumun doğrudan silindir içindeki oksijen oranı, ani yanma süreci ve en önemlisi silindir içi sıcaklık değişimi ile alakalı olduğu düşünülmektedir. NOx emisyonunun sıcaklık değerinin 1800 K civarına yükselmesi ile ortamda bulunan oksijen ve azot atomunun reaksiyona girmesiyle oluştuğu bilinmektedir [29, 30]. Bu bağlamda, B20 ve dizel yakıtları için silindir içindeki sıcaklık değeri ve hava fazlalığı göz önüne alındığında, NOx oluşumu için gereken değerlerin yakalandığı ve bu yakıtlar için NOx değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Daha sonra silindire gönderilen LRF ile tüm devirlerde HRF'lere göre NOx emisyonlarının azaldığı görülmüştür. LRF kullanımı ile silindirde soğuk bölgelerin arttığı ve bununda HRF'lere kıyasla daha az NOx emisyonu oluşturduğu değerlendirilmiştir. Şekil 6'da ayrıca duman opaklığına ait değişimde verilmiştir. Tüm motor devirlerinde LRF kullanımının duman opaklığı HRF'lere kıyasla önemli derecede azalttığı belirlenmiştir. Ayrıca devir sayısı arttıkça duman opaklığında arttığı belirlenmiştir. Burada da görüldüğü gibi motor devri arttıkça silindire alınan dolgu miktarı artmış fakat yanma için gereken süre azalmıştır. Yanma sürecinin çok kısa sürelerde gerçekleşmek zorunda olması ile silindirde bulunan karbon bileşikleri yanma reaksiyonlarına tam olarak katılamamış ve egzozdan atılmıştır. Bu karbon parçacıklarının da duman opaklığını artırdığı değerlendirilmiştir. Tüm veriler incelendiğinde B20 yakıtının kullanıldığı durumdaki duman opaklığı seviyesinin dizele kıyasla daha az olduğu belirlenmiştir. Bu durumun dolgu içindeki oksijen miktarına bağlı olduğu düşünülmektedir. B20 yakıtı içindeki oksijen miktarının fazlalığı karbon ve oksijenin silindirdeki yanma şartlarına bağlı olarak farklı emisyon türleri oluşturmasını sağlamış ve duman opaklığının azalmasını sağlamış olduğu düşünülmektedir. Sonuç olarak, kullanılan yöntem ile hem dizel hem de B20 yakıtlı

deneylerde LRF kullanımı ile NO<sub>x</sub> ve duman opaklığında azalmalar olduğu belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan B20'nin duman opaklığını azaltmada dizele göre daha başarılı olduğu belirlenmiştir. NO<sub>x</sub> emisyonunda ise dizel göre çok az oranda bir artış olduğu saptanmıştır.

#### 4. Sonuçlar

Yapılan deneysel çalışmada, RCCI konseptli dizel bir motorda HRF olarak dizel ve B20, LRF olarak da benzin kullanılmıştır. Çalışma %20 sabit motor yükünde, motor devir sayısının değiştiği ve bu değişimin performans ve emisyonlara etkisini içermektedir. Çalışmaya ait veriler yukarıda sunulmuştur. Aşağıda çalışmadan elde edilen önemli noktalar sunulmuştur.

- RCCI konseptli motorda yapılan deneylerde LRF uygulamasının silindir içi basıncı azalttığı ısı salınımını ise artırdığı belirlenmiştir. Yine tüm devirlerde LRF kullanımının OİB'yi artırdığı belirlenmiştir. Devir sayısı arttıkça LRF etkisinin de arttığı, bu artışta HRF olarak dizel kullanımının B20'ye göre kısmen daha başarılı olduğu saptanmıştır.
- Yapılan çalışmada LRF kullanımının silindir içi sıcaklığı hem dizel hem de biyodizel deneylerinde azalttığı devir sayısı arttıkça azalma oranının da arttığı belirlenmiştir.
- LRF kullanımı ile CO ve HC emisyonunu tüm devirlerde artırdığı belirlenmiştir. HRF olarak B20'nin kullanıldığı deneylerde HC emisyonunda dizele göre nispeten bir azalma olduğu gözlenmiştir. Ayrıca devir sayısı arttıkça CO ve HC emisyonunun arttığı belirlenmiştir.
- LRF kullanımı ile NO<sub>x</sub> ve duman opaklığının devir sayısına göre değişimi incelenmiştir. Burada, dizel ve B20 yakıtlı deneylerde LRF uygulaması ile NO<sub>x</sub> emisyonunun tüm devirlerde azaldığı, en büyük azalmanın dizelin HRF olarak kullanıldığı deneylerde ve LRF uygulanması ile oluştuğu görülmüştür. NO<sub>x</sub> emisyonunun özellikle devir sayısı arttıkça azaldığı tespit edilmiştir. Son olarak devir sayısı arttıkça LRF uygulaması ile duman opaklığında azalma oranının arttığı saptanmıştır. Ayrıca, duman opaklığının da yine LRF uygulaması ile azaldığı bu azalmada dizele uygulanan LRF ile daha büyük oranlarda bir azalma olduğu saptanmıştır.

#### Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 118M650 numaralı proje ile desteklenmiştir. Yazarlar, sağladığı destekten dolayı TÜBİTAK'a teşekkür eder.

#### Kaynaklar

- [1] Reitz RD, Duraisamy G. Review of high efficiency and clean reactivity controlled compression ignition (RCCI) combustion in internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science* 2015; 46: 12-71.
- [2] Li Y, Jia M., Chang Y, Xie M, Reitz RD. Towards a comprehensive understanding of the influence of fuel properties on the combustion characteristics of a RCCI (reactivity controlled compression ignition) engine. *Energy* 2016; 99: 69-82.
- [3] d'Ambrosio S, Iemmolo D, Mancarella A, Vitolo R. Preliminary optimization of the PCCI combustion mode in a diesel engine through a design of experiments. *Energy Procedia* 2016; 101: 909-916.
- [4] Krishnamoorthi M, Malayalamurthi R, He Z, Kandasamy S. A review on low temperature combustion engines: Performance, combustion and emission characteristics, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2019; 116: 109404.
- [5] Kokjohn SL, Hanson RM, Splitter DA, Reitz RD. Fuel reactivity controlled compression ignition (RCCI): A pathway to controlled high-efficiency clean combustion. *Int. J. Engine Res. Vol.* 2011; 12(3): 209-226.
- [6] Li J, Yang W, Zhou D. Review on the management of RCCI engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2017; 69: 65-79.
- [7] Kokjohn SL, Reitz RD. Reactivity controlled compression ignition and conventional diesel combustion: A comparison of methods to meet light-duty NO<sub>x</sub> and fuel economy targets. *Int. J. Engine Res.* 2013; 14(5): 452-468.
- [8] Zhong Y, Han W, Jin C, Tian X, Liu H. Study on effects of the hydroxyl group position and carbon chain length on combustion and emission characteristics of Reactivity Controlled Compression Ignition (RCCI) engine fueled with low-carbon straight chain alcohols. *Energy* 2021: 122259.
- [9] Zhao W, Zhang Y, Huang G, He Z, Qian Y, Lu X. Experimental investigation on combustion and emission characteristics of butanol/biodiesel under blend fuel mode, dual fuel RCCI and ICCI modes. *Fuel* 2021; 305: 121590.
- [10] Okcu M, Varol Y, Altun Ş, Fırat M. Effects of isopropanol-butanol-ethanol (IBE) on combustion characteristics of a RCCI engine fueled by biodiesel fuel. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 2021; 47: 101443.
- [11] Nazemi M, Shahbakhti M. Modeling and analysis of fuel injection parameters for combustion and performance of an

- RCCI engine. *Applied Energy* 2016; 165: 135-50.
- [12] Uyumaz A, Solmaz H. RCCI bir motorda enjeksiyon zamanlaması ve lamdanın yanma ve performans karakteristikleri üzerindeki etkilerinin deneysel incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part:C, Tasarım Ve Teknoloji* 2016; 4(4): 299-308.
- [13] Zhou DZ, Yang WM, An H, Li J. Application of CFD-chemical kinetics approach in detecting RCCI engine knocking fuelled with biyodisel/methanol. *Applied Energy* 2015; 145: 255-264.
- [14] Navaneeth PV, Suraj CK, Mehta PS, Anand K. Predicting the effect of biodiesel composition on the performance and emission of a compression ignition engine using a phenomenological model. *Fuel* 2021; 293: 120453.
- [15] Canakci M, Erdil A, Arcaklioğlu E. Performance and exhaust emissions of a biodiesel engine. *Applied energy* 2006; 83(6): 594-605.
- [16] Wang WG, Lyons DW, Clark NN, Gautam M, Norton PM. Emissions from nine heavy trucks fueled by diesel and biodiesel blend without engine modification. *Environ. Sci. Technol.* 2000; 34(6): 933-939.
- [17] Oni BA, Oluwatosin D. Emission characteristics and performance of neem seed (*Azadirachta indica*) and *Camelina* (*Camelina sativa*) based biodiesel in diesel engine. *Renewable Energy* 2020; 149: 725-734.
- [18] Ellappan S, Rajendran S. A comparative review of performance and emission characteristics of diesel engine using eucalyptus-biodiesel blend. *Fuel* 2021; 284: 118925.
- [19] Benajes J, García A, Monsalve-Serrano J, Sari RL. Fuel consumption and engine-out emissions estimations of a light-duty engine running in dual-mode RCCI/CDC with different fuels and driving cycles, *Energy* 2018; 157: 19-30.
- [20] Imtenan S, Varman M, Masjuki HH, Kalam MA, Sajjad H, Arbab MI, Rizwanul Fattah IM. Impact of low temperature combustion attaining strategies on diesel engine emissions for diesel and biodiesels: A review. *Energy Conversion and Management* 2014; 80: 329-356.
- [21] Li J, Yang, WM, An H, Zhao D. Effects of fuel ratio and injection timing on gasoline/biodiesel fueled RCCI engine: A modeling study. *Applied Energy* 2015; 155: 59-67.
- [22] Molina S, García A, Pastor JM, Belarte E, Balloul I. Operating range extension of RCCI combustion concept from low to full load in a heavy-duty engine. *Applied Energy* 2015; 143: 211-227.
- [23] Dempsey AB, Walker NR, Reitz RD. Effect of piston bowl geometry on dual fuel reactivity controlled compression ignition (RCCI) in a light-duty engine operated with gasoline/diesel and methanol/diesel. *SAE International Journal of Engines* 2013; 6(1): 78-100.
- [24] ANSYS Forte 17.0, ANSYS: San Diego, 2017.
- [25] Abdelaal MM, Rabee BA, Hegab AH. Effect of adding oxygen to the intake air on a dual-fuel engine performance, emissions, and knock tendency. *Energy* 2013; 61: 612-620.
- [26] Acharya SK, Jena SP. Performance and emission analysis of a CI engine in dual mode with LPG and Karanja oil methyl ester. *International Scholarly Research Notices* 2013.
- [27] Yao M, Chen Z, Zheng Z, Zhang B, Xing Y. Study on the controlling strategies of homogeneous charge compression ignition combustion with fuel of dimethyl ether and methanol. *Fuel* 2006; 85(14-15): 2046-2056.
- [28] Han J, Bao H, Somers LMT. Experimental investigation or reactivity controlled compression ignition with n-butanol/n-heptan in a heavy-duty diesel engine. *Applied Energy* 2021; 282: 116164.
- [29] Carlucci AP, de Risi AD, Laforgia D, Naccarato F. Experimental investigation and combustion analysis of a direct injection dual-fuel diesel-natural gas engine. *Energy* 2008; 33(2): 256-263.
- [30] Kannan S, Mahalingam S, Srinath S, Sivasankaran M. An experimental study in HCCI combustion of LPG in diesel engine. *Materials Today: Proceedings* 2021; 37: 3625-3629.
- [31] Chaudhari VD, Deshmukh D. Diesel and diesel-gasoline fuelled premixed low temperature combustion (LTC) engine mode for clean combustion. *Fuel* 2020; 266: 116982.
- [32] Wei L, Yao C, Han G, Pan W. Effects of methanol to diesel ratio and diesel injection timing on combustion, performance and emissions of a methanol port premixed diesel engine. *Energy* 2016; 95: 223-232.
- [33] Firat M, Altun S, Okcu M, Varol Y. Investigation of the effect of gasoline premixed ratio and engine load on the combustion and exhaust emission characteristics of an RCCI Engine. *Journal Of The Faculty Of Engineering And Architecture Of Gazi University* 2022; 37(1): 541-554.



## Kırkgeçit Formasyonu'nun Bartoniyen-Priyaboniyen İri Bentik Foraminifer Topluluğu ve Ortamsal Yorumu, Elazığ, Türkiye

Sibel KAYGILI<sup>1\*</sup>

<sup>\*1</sup> Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü

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

(Geliş/Received: 15/11/2021;

Kabul/Accepted: 29/12/2021)

**Öz:** Kırkgeçit Formasyonu'nun Elazığ kuzeybatısındaki yüzeylemelerinde gerçekleştirilen bu çalışmada *Nummulites* cf. *garganicus* Tellini, *Nummulites fabianii* (Prever in Fabiani), *Nummulites* ex. gr. *perforatus* (De Montfort), *Nummulites striatus* (Bruguière), *Operculina* ex. gr. *gomezi* Colom & Bauzá, *Orbitoclypeus zitteli* (Checchia-Rispoli), *Asterocyclina ferrandezii* Özcan & Less, *Sphaerogypsina globulus* (Reuss), *Gypsina* cf. *mastelensis* Bursch, *Asterigerina rotula* (Kaufmann), *Gyroidinella magna* (Le Calvez), *Halkyardia minima* (Liebus), *Fabiania cassis* (Oppenheim), *Chapmanina gassinensis* (Silvestri), *Linderina brugesii* Schlumberger, *Silvestriella tetraedra* (Gümbel), *Praerhapydionina delicata* Henson, *Penarchaias glynnjonesii* (Henson), *Planorbulina brönnimanni* Bignot & Decrouez, *Alveolina* sp., *Calcarina* sp., *Heterostegina?* sp., *Halkyardia* sp., *Spirolina* sp., *Haddonina* sp. gibi bentik foraminiferler belirlenmiştir. Retiküle nummulitlerin evrimsel gelişimi ve biyostratigrafisi bakımından önemli bir belirteç olarak kabul edilen ortalama prolokulus iç çapı değeri *Nummulites* cf. *garganicus* için 120-125 µm, *Nummulites fabianii* için ise 217-270 µm olarak belirlenmiştir. Bu değerlerin, Tetis bölgesi sığ denizel Eosen istiflerinden elde edilen değerlerle uyumluluk gösterdiği ortaya konulmuştur. Belirlenen iri bentik foraminifer içeriğine göre çalışma alanındaki istife Bartoniyen-Priyaboniyen yaşı verilmiştir. Porselenimsi bentik foraminiferler şelfin iç kısmında daha baskınken, hiyalin bentik foraminiferler ise şelfin orta bölümünde daha fazla bulunur.

**Anahtar kelimeler:** Kırkgeçit Formasyonu, Elazığ, İri Bentik Foraminifer, Retiküle Nummulit.

### Bartonian-Priabonian Larger Benthic Foraminifera Assemblages and Environmental Interpretation of Kırkgeçit Formation, Elazığ, Turkey

**Abstract:** Benthic foraminifera such as *Nummulites* cf. *garganicus* Tellini, *Nummulites fabianii* (Prever in Fabiani), *Nummulites* ex. gr. *perforatus* (De Montfort), *Nummulites striatus* (Bruguière), *Operculina* ex. gr. *gomezi* Colom & Bauzá, *Orbitoclypeus zitteli* (Checchia-Rispoli), *Asterocyclina ferrandezii* Özcan & Less, *Sphaerogypsina globulus* (Reuss), *Gypsina* cf. *mastelensis* Bursch, *Asterigerina rotula* (Kaufmann), *Gyroidinella magna* (Le Calvez), *Halkyardia minima* (Liebus), *Fabiania cassis* (Oppenheim), *Chapmanina gassinensis* (Silvestri), *Linderina brugesii* Schlumberger, *Silvestriella tetraedra* (Gümbel), *Praerhapydionina delicata* Henson, *Penarchaias glynnjonesii* (Henson), *Planorbulina brönnimanni* Bignot & Decrouez, *Alveolina* sp., *Calcarina* sp., *Heterostegina?* sp., *Halkyardia* sp., *Spirolina* sp., *Haddonina* sp. were determined in this study carried out in the outcrops of the Kırkgeçit Formation in the northwest of Elazığ. The mean proloculus inner diameter value, which has been considered as an important indicator for the evolution and biostratigraphy of reticulated nummulit, was determined as 120-125 µm for *Nummulites* cf. *garganicus* and 217-270 µm for *Nummulites fabianii*. These values are compatible with the values obtained from the shallow marine Eocene deposits of the Tethys region. Based on the larger benthic foraminifera assemblage, the Bartonian-Priabonian age was assigned to the succession in the study area. While porcelaneous benthic foraminifera are more dominant in the inner part of the shelf, hyaline ones are more common in the middle part of the shelf.

**Keywords:** Kırkgeçit Formation, Elazığ, Larger Benthic Foraminifera, Reticulate Nummulit.

### 1. Giriş

Bu çalışma Kırkgeçit Formasyonu'nun Elazığ'ın 15 km kuzeybatısındaki yüzeylemelerinin (Şekil 1), iri bentik foraminifer içeriğinin ve buna bağlı olarak depolanma ortamının güncel literatür ışığında ayrıntılı olarak belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanında yaşları Devoniyen-Jura'dan Pliyo-Kuvaterner'e kadar değişen metamorfik, magmatik ve sedimanter kayalar yüzeyler (Şekil 1B). İnceleme konusu olan Kırkgeçit Formasyonu'nun tabanında yer alan Devoniyen-Jura yaşlı Keban Metamorfitleri, kırıntılı ve karbonatlı sedimanter kayaların Geç Kretase'de Neotetis Okyanusu'nun güney kolunun kapanmasına neden olan yitim sırasında amfibolit-yeşil şist fasiyesinde bölgesel metamorfizmaya uğramasıyla oluşmuştur. Birimi oluşturan başlıca kayalar mermer, rekristalize kireçtaşı, metakonglomera, kalkşist ve fillit-klorit-serizit şistlerdir [1]. Birim,

\* Sorumlu yazar: [skaygili@firat.edu.tr](mailto:skaygili@firat.edu.tr). Yazarın ORCID numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-7124-1501



bölgesel jeodinamik gelişimin neden olduğu sıkışmaya bağlı olarak Geç Kretase sonu ve Erken Miyosen sonrasında güneye, Elazığ Magmatitleri ve inceleme konusu olan Kırkgeçit Formasyonu üzerine itilmiştir.

Elazığ Magmatitleri, güneydeki Arabistan ile kuzeydeki Avrasya levhaları arasında Geç Triyas'ta açılmaya başlayan Neotetis Okyanusu'nun güney kolunun Geç Kretase'de kuzeye eğimli bir yitimle kapanmasıyla ilişkili yay magmatizması ürünü olarak gelişmiştir. Birim genel olarak derinlik, yarı derinlik ve yüzey kayaçlarından oluşur [2, 3].

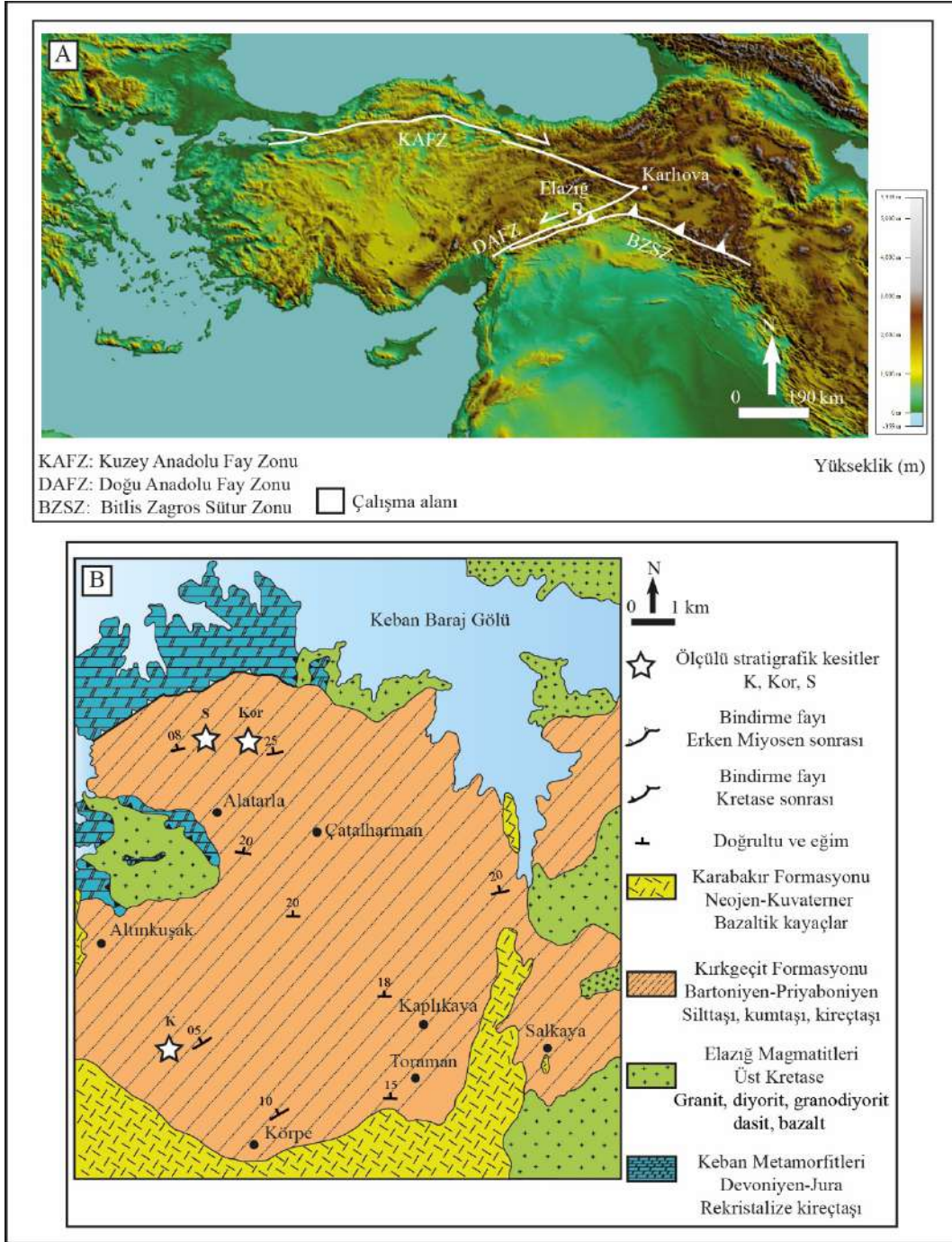
Bartoniye-Priyaboniye yaşlı Kırkgeçit Formasyonu çalışma alanında Geç Kretase yaşlı Elazığ Magmatitleri üzerinde nonkonformite ile yer alırken, Neojen-Kuvaterner yaşlı Karabakır Formasyonu'nun bazaltik kayaçları tarafından üzerlenir.

Tip kesiti Van'ın yaklaşık 25 km güneydoğusunda bulunan Kırkgeçit Formasyonu, Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı jeologları tarafından adlandırılmıştır [4]. Doğu Toroslar'da Van çevresinden güneybatıya, Kahramanmaraş'a kadar geniş bir alanda yüzeyleme veren birim, Elazığ çevresinde yaklaşık kuzeydoğu-güneybatı doğrultusunda uzanan geniş yüzeylemelere sahiptir. Elazığ çevresinde yapılan çalışmalarda, birimin Orta Eosen'de yay gerisinde, genişlemeli bir rejimde blok faylanmalarla kontrol edilen bir havzada çökelmiş olduğu görüşü benimsenir [5, 6]. Kırkgeçit Formasyonu'nun şelf ve derin deniz ortamlarını karakterize eden fasiyes özellikleri, havza tabanını kontrol eden blok faylanmalarla ilişkili olarak oldukça düzensiz topoğrafyaya sahip bir ortamda depolandığını gösterir [5, 7]. Birimin depolandığı havzanın kuzey kenarı boyunca sığ denizel fasiyeler depolanırken [8-10], güneye doğru gidildikçe derin deniz kırıntılıları baskın duruma geçer [5, 7, 11-14].

Çalışma alanı olarak seçilen Elazığ kuzeybatısındaki Kırkgeçit Formasyonu yüzeylemelerinin bentik foraminifer içeriğiyle ilgili paleontolojik çalışmalar son derece sınırlıdır [15-17]. Bu çalışmalarda birimin yaşı Geç Lütesiyen-Priyaboniye olarak belirlenmiştir (Tablo 1). Aynı bölgede Kaygılı [18] tarafından yapılan çalışmada, Geç Bartoniye-Priyaboniye'i temsil eden retiküle nummulitler, biyometreleri esas alınarak ayrıntılı olarak incelenmiştir (Tablo 1). Elazığ'ın batısında Baskil ilçesi çevresinde Özcan vd. [19] tarafından birimin Bartoniye'i karakterize eden bentik foraminifer içeriği incelenirken, Özcan vd. [20] tarafından ise kalkerli nannofosiller, planktonik foraminiferler, manyetostatigrafik özellikler ve bentik foraminifer içeriği esas alınarak birime Bartoniye-Erken Priyaboniye yaşı verilmiştir (Tablo 1).

Sirel vd. [21] Elazığ'ın yaklaşık 70 km doğusunda Palu çevresinde yaptıkları çalışmada birimi Gevla Çayı Formasyonu olarak adlandırmışlar ve Orta-Geç Oligosen yaşlı olduğunu belirtmişlerdir. Yine aynı bölgede Sirel [22, 23] ile Sirel ve Deveciler [24] tarafından yapılan çalışmalarda ise birime Bartoniye, Rupeliye-Erken Şattiyen ve Geç Şattiyen yaşları verilmiştir. Bu veriler baz alınarak Elazığ çevresinde Kırkgeçit Formasyonu'nun yaşı Orta Eosen-Oligosen olarak benimsenmiştir [7, 8, 11, 25-27].

Birimin Elazığ çevresindeki planktonik foraminifer ve ostrakod içeriğini esas alan İbilioğlu [28, 29] birim için İpresiyen-Priyaboniye yaşını önermiştir.



Şekil 1. (A) Sadeleştirilmiş Türkiye haritasında çalışma alanının yeri. (B) Çalışma alanının jeolojik haritası ([15]'den değiştirilmiştir) ve ölçülü stratigrafik kesit yerleri.

**Tablo 1.** Çalışma alanında önceki çalışmalarda ve bu çalışmada belirlenen bentik foraminiferler (Tür, cins ve familyalar kendi arasında alfabetik olarak sıralanmıştır).

Yazarlar ve Çalışma Alanı	Bentik Foraminifer Topluluğu	Yaş
Avşar [15] Elazığ kuzeybatısı	<i>Alveolina elongata</i> , <i>A. fusiformis</i> , <i>Assilina spira</i> , <i>Asterigerina rotula</i> , <i>Chapmanina gassinensis</i> , <i>Eorupertia magna</i> , <i>Fabiania cassis</i> , <i>Halkyardia minima</i> , <i>Linderina brugesi</i> , <i>Maslinella</i> aff. <i>chapmani</i> , <i>Nummulites fabianii</i> , <i>N. perforatus</i> , <i>N. striatus</i> , <i>Peneroplis damesini</i> , <i>P. dusenburyi</i> , <i>P.</i> aff. <i>laevigatus</i> , <i>Praebullalveolina afyonica</i> , <i>Praerhapydionina huberi</i> , <i>Silvestriella tetraedra</i> , <i>Sphaerogypsina globula</i> , <i>Spirolina</i> aff. <i>cylindracea</i> , <i>Austrotrillina</i> sp., <i>Peneroplis</i> sp., planorbulinidae, rotaliidae.	Geç Lütesiyen- Priyaboniyen
Avşar [16] Elazığ kuzeybatısı	<i>Alveolina elongata</i> , <i>A. fusiformis</i> , <i>Assilina spira</i> , <i>Asterigerina rotula</i> , <i>Chapmanina gassinensis</i> , <i>Eorupertia magna</i> , <i>Fabianii cassis</i> , <i>Halkyardia minima</i> , <i>Linderina brugesi</i> , <i>Nummulites fabianii</i> , <i>N. ex. gr. fabianii</i> , <i>N. perforatus</i> , <i>N. striatus</i> , <i>Praerhapydionina huberi</i> .	Geç Lütesiyen- Priyaboniyen
Avşar [17] Elazığ kuzeybatısı	<i>Asterigerina rotula</i> , <i>Gyroidinella magna</i> , <i>Halkyardia minima</i> , <i>Nummulites striatus</i> , <i>Peneroplis damesini</i> , <i>P.</i> aff. <i>laevigatus</i> , <i>Praebullalveolina afyonica</i> , <i>Praerhapydionina huberi</i> , <i>Spirolina</i> aff. <i>cylindracea</i> , miliolidae.	Geç Lütesiyen- Priyaboniyen
Özcan vd. [20] Baskil, Elazığ batısı	<i>Assilina exponens</i> , <i>A. schwageri</i> , <i>Asterigerina rotula</i> , <i>Asterocyclina alticostata</i> , <i>A. kecskemetii</i> , <i>A. sireli</i> , <i>A. stella</i> , <i>A. stellata</i> , <i>Chapmanina gassinensis</i> , <i>Discocyclina augustae</i> , <i>D. discus</i> , <i>D. dispansa</i> , <i>D. euaensis</i> , <i>D. pratti</i> , <i>D. pulcra</i> , <i>D. radians</i> , <i>D. trabayensis</i> , <i>Fabiania cassis</i> , <i>Heterostegina armenica</i> , <i>Nemkovella daguini</i> , <i>N. evae</i> , <i>N. strophiolata</i> , <i>Nummulites anomalus</i> , <i>N. biarritzensis</i> , <i>N. garganicus</i> , <i>N. gizehensis</i> , <i>N. hormoensis</i> , <i>N. maximus</i> , <i>N. perforatus</i> , <i>N. ptukhiani</i> , <i>N. striatus</i> , <i>Operculina</i> ex. gr. <i>gomezi</i> , <i>Orbitoclypeus douvillei</i> , <i>O. haynesi</i> , <i>O. varians</i> , <i>O. zitteli</i> , <i>Silvestriella tetraedra</i> , <i>Sphaerogypsina globulus</i> , <i>Calcarina</i> sp., <i>Gyroidinella</i> sp., <i>Linderina</i> sp., <i>Orbitoclypeus</i> n. sp. A.	Bartoniyen- Erken Priyaboniyen
Kaygılı [18] Elazığ kuzeybatısı	<i>Asterigerina rotula</i> , <i>Chapmanina elongata</i> , <i>C. gassinensis</i> , <i>Gyroidinella magna</i> , <i>Halkyardia minima</i> , <i>Nummulites fabianii</i> , <i>Nummulites</i> cf. <i>fabianii</i> , <i>Nummulites hormoensis</i> , <i>Nummulites</i> cf. <i>hormoensis</i> , <i>Nummulites</i> ex. interc. <i>hormoensis-fabianii</i> , <i>Nummulites striatus</i> , <i>Operculina</i> ex. gr. <i>gomezi</i> , <i>Penarchaias glynnjonesi</i> , <i>Silvestriella tetraedra</i> , <i>Sphaerogypsina globulus</i> , <i>Gypsina</i> sp., <i>Linderina</i> sp., <i>Nummulites</i> sp., <i>Peneroplis</i> sp., <i>Planorbulina</i> sp., <i>Spirolina</i> sp., miliolidae, rotaliids, stomatorbinid forms, textulariids.	Geç Bartoniyen- Priyaboniyen
Bu çalışma Elazığ kuzeybatısı	<i>Asterigerina rotula</i> , <i>Asterocyclina ferrandesi</i> , <i>Chapmanina gassinensis</i> , <i>Fabiania cassis</i> , <i>Gypsina</i> cf. <i>mastelensis</i> , <i>Gyroidinella magna</i> , <i>Halkyardia minima</i> , <i>Linderina brugesi</i> , <i>Nummulites</i> cf. <i>garganicus</i> , <i>N. ex. gr. perforatus</i> , <i>N. fabianii</i> , <i>N. striatus</i> , <i>Operculina</i> ex. gr. <i>gomezi</i> , <i>Orbitoclypeus zitteli</i> , <i>Penarchaias glynnjonesi</i> , <i>Planorbulina brönnimanni</i> , <i>Praerhapydionina delicata</i> , <i>Silvestriella tetraedra</i> , <i>Sphaerogypsina globulus</i> , <i>Alveolina</i> sp., <i>Calcarina</i> sp., <i>Haddonina</i> sp., <i>Halkyardia</i> sp., <i>Heterostegina?</i> sp., <i>Spirolina</i> sp., miliolidae, orthophragminid, rotaliidae, stomatorbinid form, textulariidae.	Bartoniyen- Priyaboniyen

## 2. Materyal ve Metod

Kırkgeçit Formasyonu’nda ölçülen 3 stratigrafik kesit (Şekil 1B) boyunca alınan tane örneklerden 100 adet yönlü ince kesit, sert kayaç örneklerinden ise 111 adet ince kesit hazırlanmış ve bu kesitlerdeki megalosferik bireyler çalışılmıştır. Bu çalışmalarla tanımlanan bentik foraminifer içeriği esas alınarak sığ bentik zonlar (SBZ) belirlenmiştir.

SBZ’lerin belirlenmesi Serra-Kiel vd. [30], Less ve Özcan [31] ile Papazzoni vd. [32] tarafından yapılan çalışmalara dayandırılırken, karbonatlı kayaçların dokusal sınıflandırılmasında Dunham’ın [33] çalışması esas alınmıştır. Depolanma ortamları ise Hottinger [34], Beavington-Penney ve Racey [35], Flügel [36], Nebelsick vd. [37] tarafından yapılan çalışma sonuçlarına göre yorumlanmıştır.

## 3. Ölçülü Kesitlerin Tanımlamaları

Bu çalışmada ölçülen Kızaz Tepe (K), Korantaşı Tepe (Kor) ve Sarıkaya Tepe (S) olarak isimlendirilen kesitlerde (Şekil 2-7) belirlenen özellikler aşağıdaki paragraflarda verilmiştir.

### 3.1. Kızaz Tepe kesiti (K)

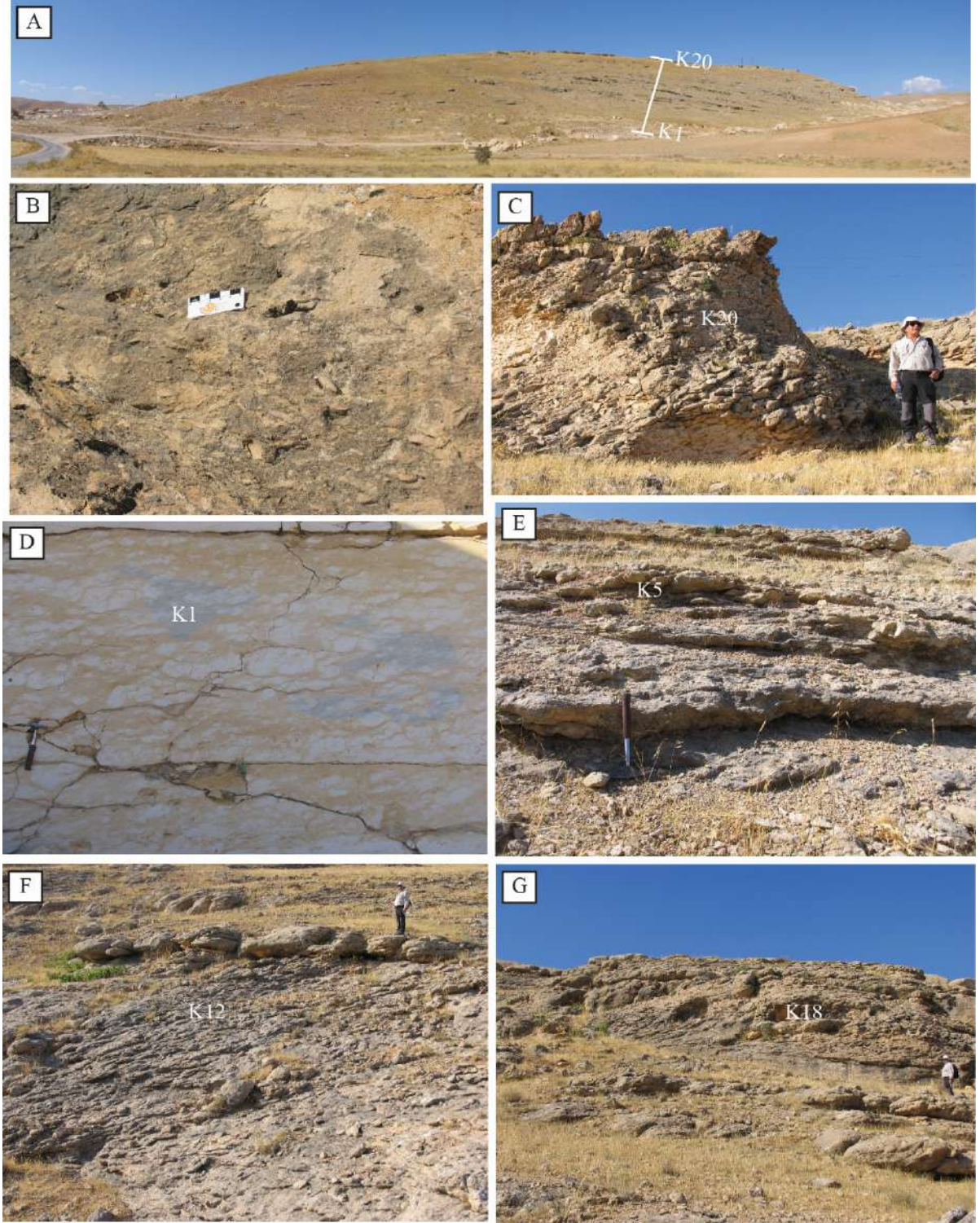
Başlangıç ve bitiş noktalarının koordinatları 38° 46’ 30,2’’ K, 39° 5’ 51,1’’ D; 38° 46’ 38,27’’K, 39° 5’ 52,23’’ D olan kesit 93 m kalınlığındadır.

Kesit; nodüler yapılı ince (5-10 cm), orta (10-30 cm) ve kalın (30-70 cm) tabakalı ile masif (3 m) ve nodüler sarımsı bej renkli, radyal *Nummulites*’lerin baskın olduğu, gastropod ve bivalv içeren kireçtaşlarından oluşur. Nadir olarak orthophragminid ve daha az olarak da *Alveolina* bulunduran kesitte dalgalı ve çapraz tabakalı kireçtaşları da gözlenmiştir (Şekil 2, 3).

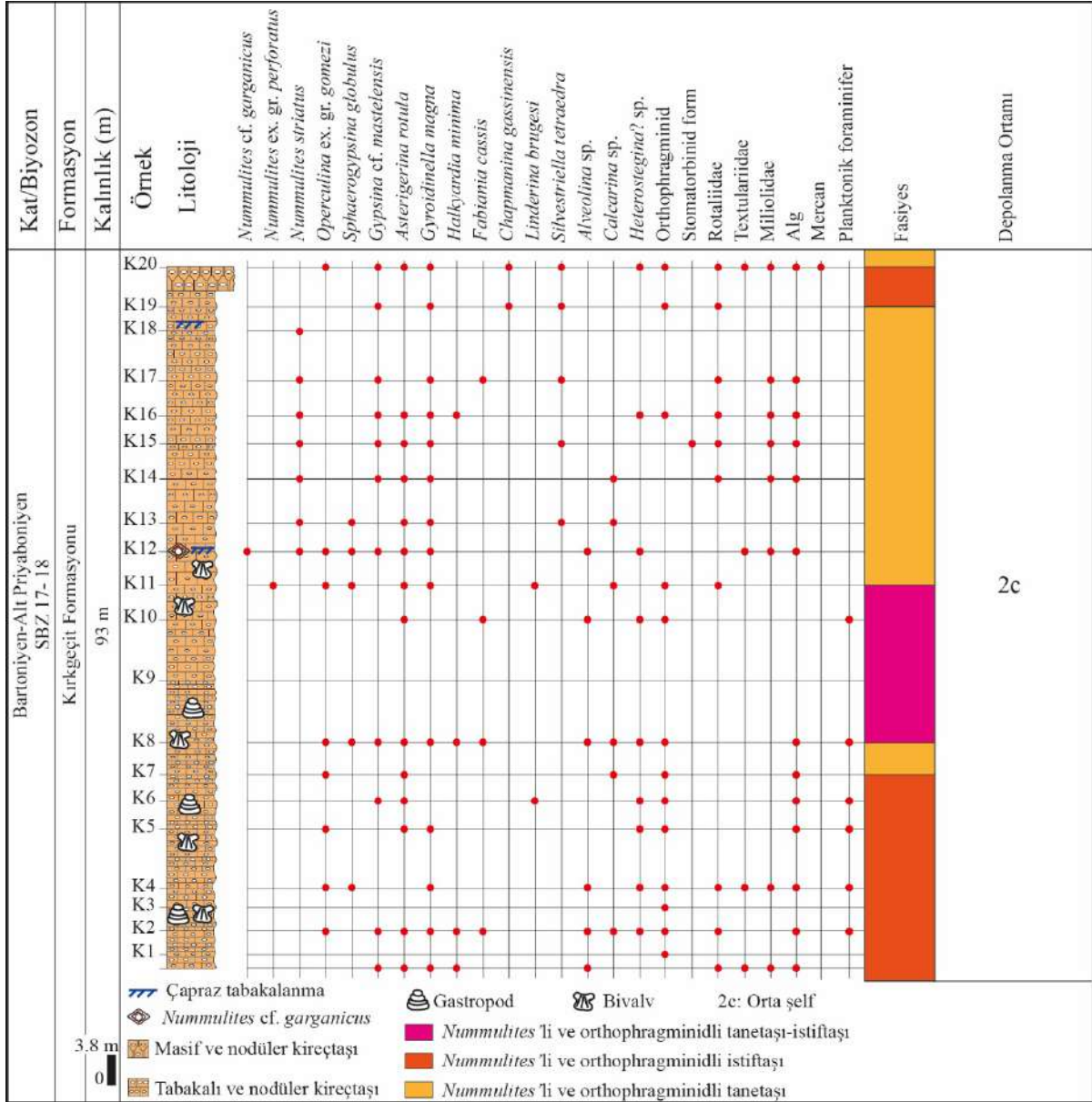
Kesit boyunca alınan örneklerden hazırlanan ince kesitlerde: *Nummulites* cf. *garganicus* Tellini, *Nummulites* ex. gr. *perforatus* (De Montfort), *Nummulites striatus* (Bruguière), *Operculina* ex. gr. *gomezi* Colom & Bauzá, *Sphaerogypsina globulus* (Reuss), *Gypsina* cf. *mastelensis* Bursch, *Asterigerina rotula* (Kaufmann), *Gyroidinella magna* (Le Calvez), *Halkyardia minima* (Liebus), *Fabiania cassis* (Oppenheim), *Chapmanina gassinensis* (Silvestri), *Linderina brugesii* Schlumberger, *Silvestriella tetraedra* (Gümbel), *Alveolina* sp., *Calcarina* sp., *Heterostegina?* sp., orthophragminid, stomatorbinid form, rotaliidae, textulariidae, miliolidae, alg, mercan ve planktonik foraminiferler belirlenmiştir (Şekil 2, 3). Bentik foraminifer içeriğine göre Bartoniye- Erken Priyaboniyen (SBZ 17- 18) yaşı verilmiştir.

Bu kesitten elde edilen verilerden yararlanarak *Nummulites*’li ve orthophragminidli tanetaşı fasiyesi; *Nummulites*’li ve orthophragminidli istiftaşı fasiyesi; *Nummulites*’li ve orthophragminidli tanetaşı-istiftaşı fasiyesi olmak üzere 3 fasiyes tanımlanmıştır. Bu fasiyeslerin bentik foraminifer içeriği sığ deniz ortamının orta şelf (2c) bölümünü işaret etmektedir (Şekil 3).





**Şekil 2.** Kızaz Tepe kesitine ait arazi fotoğrafları. (A) Kesitin genel görünümü. (B) Nummülitik kireçtaşı. (C) İstifin üst bölümünü oluşturan masif ve nodüler kireçtaşı. (D) Nodüler kireçtaşı. (E) Sığ ortamın belirteci olan dalgali tabakalı kireçtaşı. (F, G) Sığ ortamı temsil eden çapraz tabakalı kireçtaşı. K1-K20: Örnek numaraları.



Şekil 3. Kızaz Tepe ölçülü stratigrafik kesiti.

### 3.2. Korantaşı Tepe kesiti (Kor)

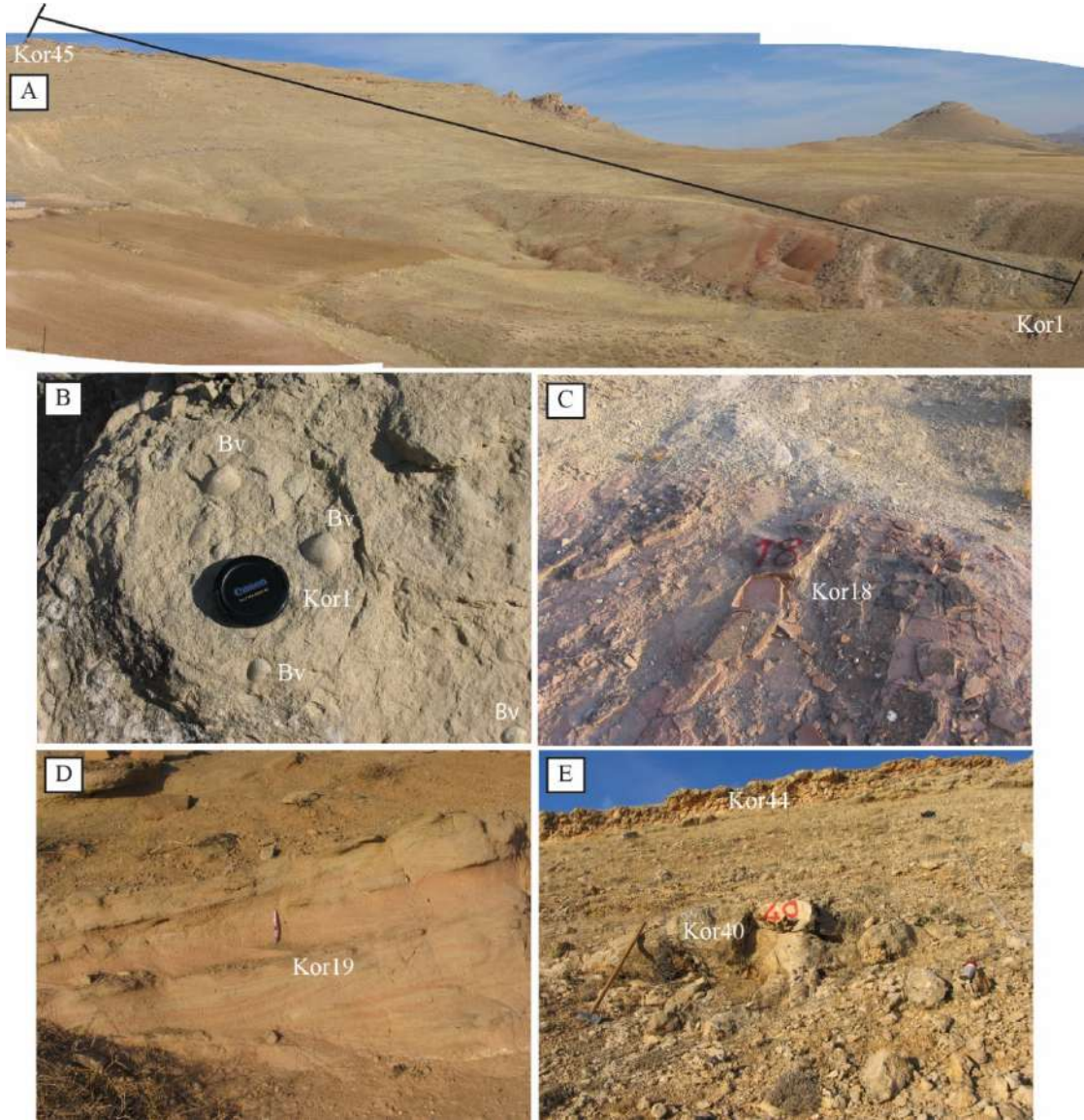
Başlangıç ve bitiş noktalarının koordinatları 39° 49' 27,6" K, 39° 7' 32,25" D; 38° 49' 48,48" K, 39° 7' 41,66" D olan kesitin kalınlığı 353 m'dir.

İstif; ince (1-10 cm), orta (10-30 cm) ve kalın (30-80 cm) tabakalı, açık yeşil renkli, biyotürbasyon, bivalv, gastropod ve ekinitli, silttaşı ara katmanları içeren kumtaşlarıyla başlar. Bu kumtaşlarının bazı seviyeleri çapraz tabakalı ve kırmızı renklidir. İstifin orta bölümüne yakın, boyutları 15 cm'ye ulaşan, iyi yuvarlaklaşmış, kötü boylanmış ve hemen tamamı Keban Metamorfiteri'nden türemiş bileşenlerden oluşan bir konglomera seviyesi yer alır. Ayrışmaya bağlı olarak bu bileşenler büyük ölçüde serbest kalmışlardır. Bu bölümün üstüne ince (5-10 cm), orta (10-30 cm), kalın (30-50 cm) tabakalı, tabakalı ve nodüler, masif ve nodüler (1- 3.7 m) sarımsı renkli kireçtaşları gelir (Şekil 4, 5). Kesit boyunca alınan örneklerden hazırlanan ince kesitlerde: *Nummulites cf. gerganicus* Tellini, *Nummulites fabianii* (Prever in Fabiani), *Nummulites ex. gr. perforatus* (De Montfort), *Nummulites striatus* (Bruguière), *Operculina ex. gr. gomezi* Colom & Bauzà, *Orbitoclypeus zitteli* (Checchia-



Rispoli), *Asterocyclina ferrandesi* Özcan & Less, *Sphaerogypsina globulus* (Reuss), *Asterigerina rotula* (Kaufmann), *Gyroidinella magna* (Le Calvez), *Halkyardia minima* (Liebus), *Fabiania cassis* (Oppenheim), *Chapmanina gassinensis* (Silvestri), *Praerhapydionina delicata* Henson, *Penarchaias glynnjonesi* (Henson), *Planorbulina brönnimanni* Bignot & Decrouez, *Spirolina* sp., stomatorbinid form, rotaliidae, textulariidae, miliolidae, alg, mercan, ekinit, bivalv, gastropod ve planktonik foraminiferlerin varlığı belirlenmiştir (Şekil 4, 5). Bentik foraminifer içeriğine göre istife Bartoniyen-Erken Priyaboniyen (SBZ 17-18) ve Orta-Geç Priyaboniyen (SBZ 19-20) yaşı verilmiştir.

Kesitteki örneklerin incelenmesiyle tanımlanan 9 fasiyes şunlardır: Konglomera fasiyesi, silttaşı fasiyesi, bentik foraminiferli kumtaşı fasiyesi, *Nummulites*'li ve orthophragminidli kumtaşı fasiyesi, kumtaşı fasiyesi, bağlamtaşı fasiyesi, bentik foraminiferli tanetaşı fasiyesi, porselenimsi foraminiferli tanetaşı fasiyesi ve porselenimsi foraminiferli tanetaşı-istiftaşı fasiyesi. Bu fasiyeslerin bentik foraminifer içeriği sığ deniz ortamının iç şelf (1a, 1b) ve orta şelf (2a, 2b, 2c) bölümünü işaret etmektedir (Şekil 5).



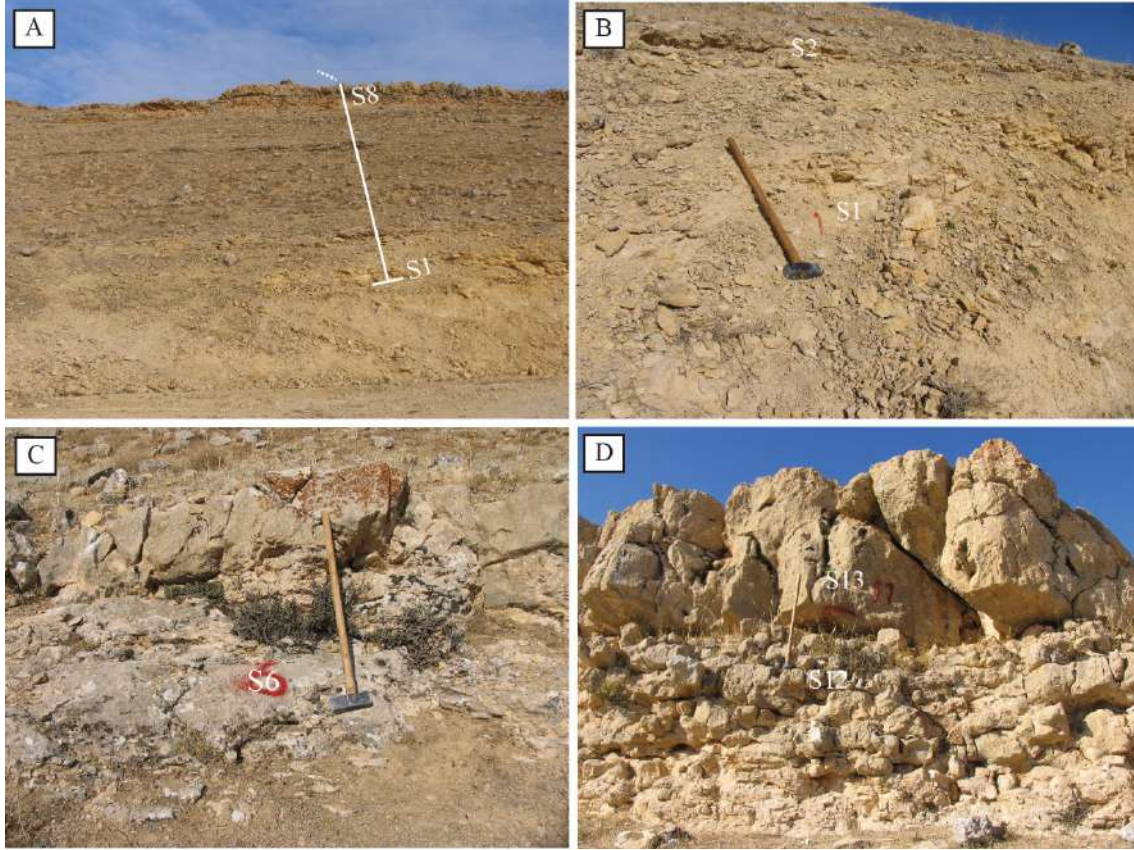
**Şekil 4.** Korantaşı Tepe kesitine ait arazi fotoğrafları. (A) Kesitin genel görünümü. (B) Bivalv (Bv) içeren kumtaşı. (C) Kırmızı renkli silttaşı. (D) Kırmızı renkli çapraz tabakalı kumtaşı. (E) Tabakalı ve masif kireçtaşları. Kor1-Kor44: Örnek numaraları.





*magna* (Le Calvez), *Halkyardia minima* (Liebus), *Halkyardia* sp., *Praerhapydionina delicata* Henson, *Penarchaias glynnjonesi* (Henson), *Planorbulina brönnimanni* Bignot & Decrouez, *Spirolina* sp., *Haddonina* sp., rotaliidae, textulariidae, miliolidae, alg, mercan, ekinit, bivalv ve gastropod belirlenmiştir (Şekil 6, 7). Bentik foraminifer içeriğine göre istife Orta-Geç Priyaboniyen (SBZ 19-20) yaşı verilmiştir.

Bu kesitte tanımlanan 4 fasiyesi şunlardır: *Nummulites*'li tanetaşı fasiyesi, porselenimsi foraminiferli tanetaşı fasiyesi, porselenimsi foraminiferli istifitashi fasiyesi ve bağlamtaşı fasiyesi. Bu fasiyeslerin bentik foraminifer içeriği sığ deniz ortamının iç şelf (1a, 1b) ve orta şelf (2a) bölümünü işaret etmektedir (Şekil 7).



Şekil 6. Sarcıkaya Tepe kesitine ait arazi fotoğrafları. (A) Kesitin genel görünümü. (B) Tabakalı kireçtaşı. (C) Kalın tabakalı kireçtaşı. (D) Nodüler ve masif kireçtaşı. S1-S13: Örnek numaraları.



#### 4. Sistematik

Bu araştırmada Loeblich ve Tappan [38] sınıflaması kullanılmış olup, türlerin sinonim listelerinde ilk ve son bir kaç referansı belirtilmiştir.

**Takım:** Foraminiferida Eichwald, 1830  
**Familiya:** Nummulitidae de Blainville, 1827  
**Cins:** *Nummulites* Lamarck, 1801  
***Nummulites cf. garganicus* Tellini, 1890**  
**Şekil 8 (A-C)**

2011 *Nummulites garganicus* Tellini, Less vd., s. 821, şek. 37a-e, i.

2019a *Nummulites garganicus* Tellini, Özcan vd., s. 80, şek. 17a-e.

*N. fabianii* soyuna ait bu retiküle türün kavkı yüzeyi yoğun granüllü ve çok az retikülasyona sahip olup prolökulus ortalama iç çapı 100-140 µm arasındadır [20, 39- 41]. *N. garganicus* çoğunlukla SBZ 17'yi karakterize etmekle birlikte Less vd. [39] tarafından SBZ 18B'de bulunabileceği de belirtilmiştir. Bu çalışmada, yoğun granüllü olan *N. cf. garganicus*'un ortalama prolökulus iç çapı 120-125 µm arasında olup SBZ 17-18 biyozonları birlikte tanımlandığı için Bartoniye-Erken Priyaboniye'i temsil ettiği sonucuna varılmıştır.

***Nummulites fabianii* (Prever in Fabiani, 1905)**  
**Şekil 8 (D-G)**

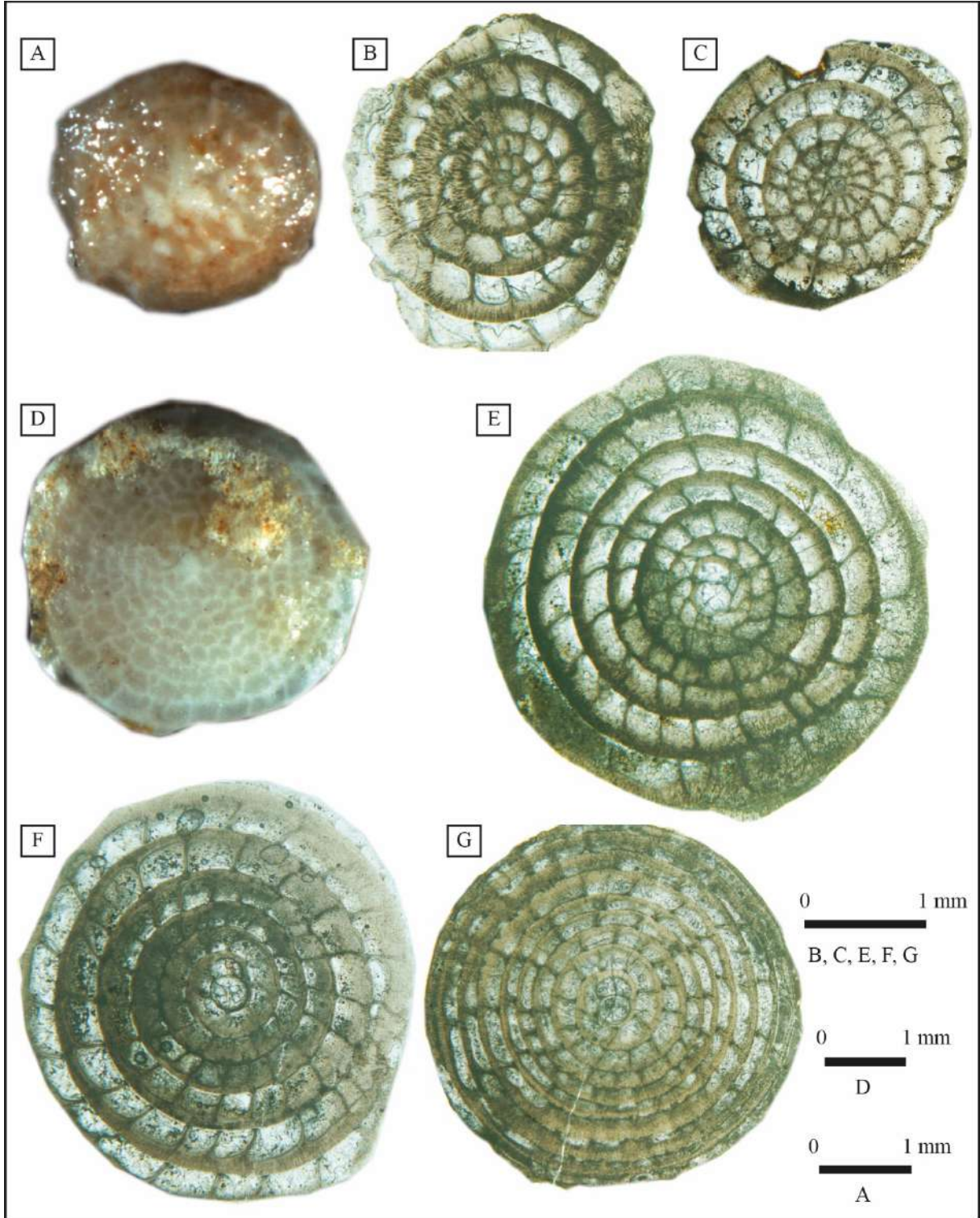
1905 *Brugueirea fabianii* n. sp., Prever in Fabiani, s. 1805, 1811.

1998 *Nummulites fabianii* (Prever in Fabiani), Papazzoni, s. 165, 168, lev. 1, şek. 1-15, lev. 2, şek. 1-15 (Sinonim).

2021 *Nummulites fabianii* (Prever in Fabiani), Kaygılı, s. 592, şek. 10A-I.

Zayıf granüllü, umbo ve yoğun retikülasyon özelliğine sahip *N. fabianii*'nin [18, 41] ortalama prolökulus çapının 200 µm üzerinde olduğu kabul edilir [18, 41, 42]. Bu çalışmada türün kavkı dış yüzeyi yoğun retikülasyon ve umboya sahip olup ortalama prolökulus iç çapı 217-270 µm arasındadır. *N. fabianii* ile ilgili farklı araştırmacılar tarafından farklı yaklaşımlarla (tipolojik, morfometrik) değişik stratigrafik aralıklar (SBZ 19'dan SBZ 19-SBZ 21'e kadar) önerilmiştir [18, 30, 39, 41-47]. Bu çalışmada Korantaşı Tepe ve Sarıkaya Tepe kesitlerinde belirlenen bu tür, SBZ 19-20 biyozonunu yani Orta-Geç Priyaboniye'i temsil etmektedir.





**Şekil 8.** (A-C) *Nummulites cf. garganicus* Tellini, K12-2, Kor16-6. (D, G) *Nummulites fabianii* (Prever in Fabiani), Kor30-1, Kor30-2, S7-1, S10-1. (A, D) Dış görünüm. (B, C, E, F, G) Ekvatorial kesitler. K12-2: Kızaz Tepe ölçülü stratigrafik kesiti örnek numarası; Kor16-6, Kor30-1, Kor30-2: Korantaşı Tepe ölçülü stratigrafik kesiti örnek numaraları; S7-1, S10-1: Sarıkaya Tepe ölçülü stratigrafik kesiti örnek numaraları.

***Nummulites striatus* (Bruguière 1792)**

**Şekil 9 (A-C)**

1792 *Camerina striata* n. sp., Bruguière, s. 399.

1981 *Nummulites striatus* (Bruguière 1792), Schaub, s. 153-154, lev. 53, şek. 26-31 (Sinonim).

2021 *Nummulites striatus* (Bruguière 1792), Kaygılı, s. 594, şek. 11.

Kavkı dış yüzeyi çok belirgin radyal düz septal izlerle kaplıdır. Sıkı sarımlı sivri, hafif kavisli, yoğun aralıklı septa bu türün belirgin iç özelliğidir. Ortalama prolokulus iç çapı 200-400 µm arasında değişmektedir [42]. Bu çalışmada ise kavkı dış yüzeyi düz radyal özelliktedir. Sıkı sarımlı, hafif kavisli olan türün ortalama prolokulus iç çapı 209 µm olarak belirlenmiştir.

Bu takson SBZ 18 ve SBZ 19A ile karakteristiktir [20, 30, 43]. Bu türün Ermenistan ve Türkiye'de SBZ 20'ye kadar uzandığı belirtilir [18, 42]. Bu çalışmada ise SBZ 17-18 biyozonu birlikte tanımlandığı için bu tür, bu biyozonda belirlenmiştir.

***Nummulites ex. gr. perforatus* (De Montfort, 1808)**

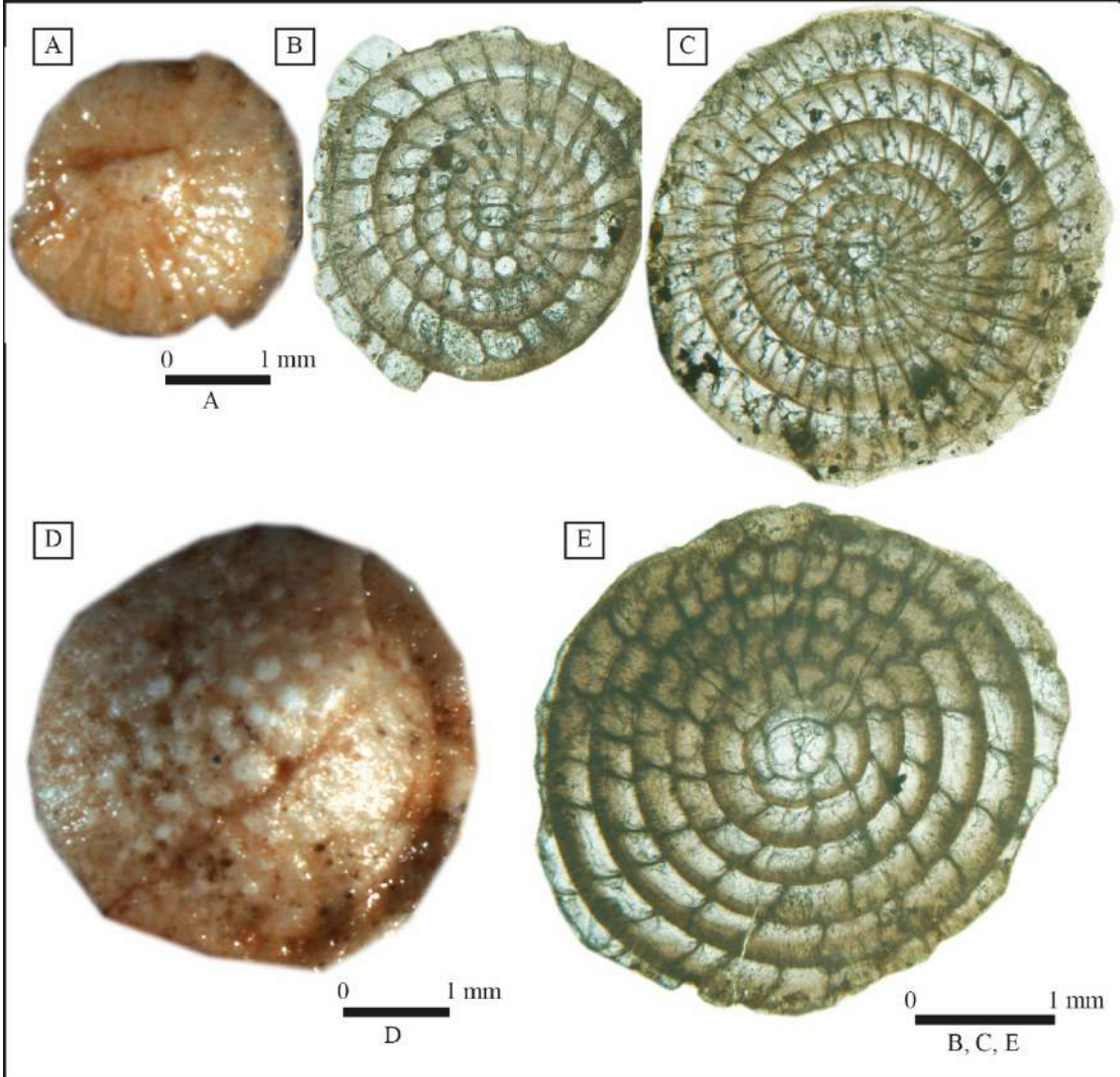
**Şekil 9 (D-E)**

1808 *Egeon perforatus* De Montfort, s. 166, şek. 2.

1995 *Nummulites perforatus* (De Montfort, 1808), Papazzoni ve Sirotti, s. 73, lev. 1, şek. 7-8.

2020 *Nummulites perforatus* (De Montfort, 1808), Zakrevskaya vd., s. 920, şek. 15g-h

Kavkı yuvarlak, şişkin ve merceksi bir şekle sahip olup yoğun ve düzensiz bir şekilde dağılmış granüller görülmektedir [45]. Elazığ çevresinde *N. perforatus* ile ilgili yapılan bazı çalışmalarda Geç Lütisiyen'de bulunduğu belirtilirken [15, 16], Bartoniye-Erken Priyaboniye'de bulunduğu da belirtilmiştir [20]. Ankara, Yozgat, Sivas, Çorum ve Malatya bölgelerinde yapılan çalışmalarda Bartoniye'de belirlenmiştir [48-53]. Bartoniye'de belirlendiği başka çalışmalarda da ifade edilir [30, 42]. *N. perforatus* grubu SBZ 16'dan SBZ 18B'ye kadar görülebilir [31]. Bu çalışmada ise SBZ 17-18 zonu birlikte tanımlandığı için Bartoniye-Erken Priyaboniye'de bulunur, kavkı yüzeyi yoğun granüllü, prolokulus çapları 405-668 µm arasında olup istifin her seviyesinde düzenli olarak görülmediği ve tane sayısı az olduğu için prolokulus iç çapı ortalaması hesaplanamadığından *N. ex. gr. perforatus* olarak tanımlanmıştır.



**Şekil 9.** (A-C) *Nummulites striatus* (Bruguière), K9-4, Kor8-1. (D, E) *Nummulites* ex. gr. *perforatus* (De Montfort), K11-1, Kor7-2. (A, D) Dış görünüm. (B, C, E) Ekvatorial kesitler. K9-4, K11-1: Kızaz Tepe ölçülü stratigrafik kesiti örnek numaraları; Kor7-2, Kor8-1: Korantaşı Tepe ölçülü stratigrafik kesiti örnek numaraları.

**Cins: Operculina d'Orbigny, 1826**  
**Operculina ex. gr. gomezi Colom ve Bauzá, 1950**

**Şekil 10 (A-C)**

2010 *Operculina ex. gr. gomezi* Colom ve Bauzá, Özcan vd., s. 66, şek. 32x.

2021 *Operculina ex. gr. gomezi* Colom ve Bauzá, Kaygılı, s. 595, şek. 12A-B.

Stolonlar tarafından kesilen katlanmış septalı bu cins, Eosen'de, involüt *O. ex. gr. gomezi* Colom ve Bauzá, 1950 ile temsil edilirken, Oligosen'de ise evolut *O. complanata* (Defrance, 1822) ile temsil edilir. *O. gomezi* grubunun ilk görünümü hemen hemen Lütesiyen/Bartoniye sınırına karşılık gelir [19, 31].

Bu çalışmada Bartoniye-Erken Priyaboniye (SBZ 17-18) ve Orta-Geç Priyaboniye'de (SBZ19-20) bulunan, involüt ve stolonların belirgin olduğu bu türün ortalama prolokulus iç çapı 102 µm olarak belirlenmiştir.

*O. gomezi* grubunun temsilcileri tek bir evrimsel soy olarak düzenlenmiştir ve bu soy, belirgin sınırlamalar olmamakla birlikte *O. bericensis* ile başlar ve bunu *O. roselli* ve *O. gomezi* takip eder [54]. Bu çalışmada ise *O. ex. gr. gomezi* olarak tanımlanmıştır.

**Familiya: Orbitoclypeidae Brönnimann, 1946**

**Cins: Orbitoclypeus Silvestri, 1907**

**Orbitoclypeus zitteli (Checchia-Rispoli, 1908)**

**Şekil 10D**

1908 *Orbitoides* (Orthopragmina) *zitteli* n. sp., Checchia-Rispoli, s. 7, 14.

1909 *Orthopragmina zitteli* Checchia-Rispoli, s. 133-134, lev. 7, şek. 3, 4, 19-22, lev. 5, şek. 14.

2010 *Orbitoclypeus zitteli* (Checchia-Rispoli, 1908), Özcan vd., s. 62, şek. 29f-h.

2020 *Orbitoclypeus zitteli* (Checchia-Rispoli, 1908), Zakrevskaya vd., s. 938, şek. 27b.

Megalosferik embriyo excentrilepidin, adauxiliary locacıkları varians tip ve ekvatorial annuli büyümesi ise varians tiptir [55].

İç ve dış özellikleri bakımından *O. zitteli* ve *O. varians* birbirine çok bezerdir. *O. varians*'da ilk localarda annuli çok dalgalıdır [55].

*O. zitteli* yalnızca Korantaşı Tepe kesitinde belirlenmiş olup, döterokonk dış çapı 434-530 µm arasında değişmekte olup ortalaması ise 493 µm'dur. Embriyosu excentrilepidin, adauxiliary locacıkları varians tip ve annuli büyümesi de varians tiptir. SBZ 17-18 birlikte tanımlandığı için bu tür, Bartoniye-Erken Priyaboniye'de görülmüştür.

**Cins: Asterocyclina Gümbel, 1870**

**Asterocyclina ferrandesi Özcan ve Less, 2006**

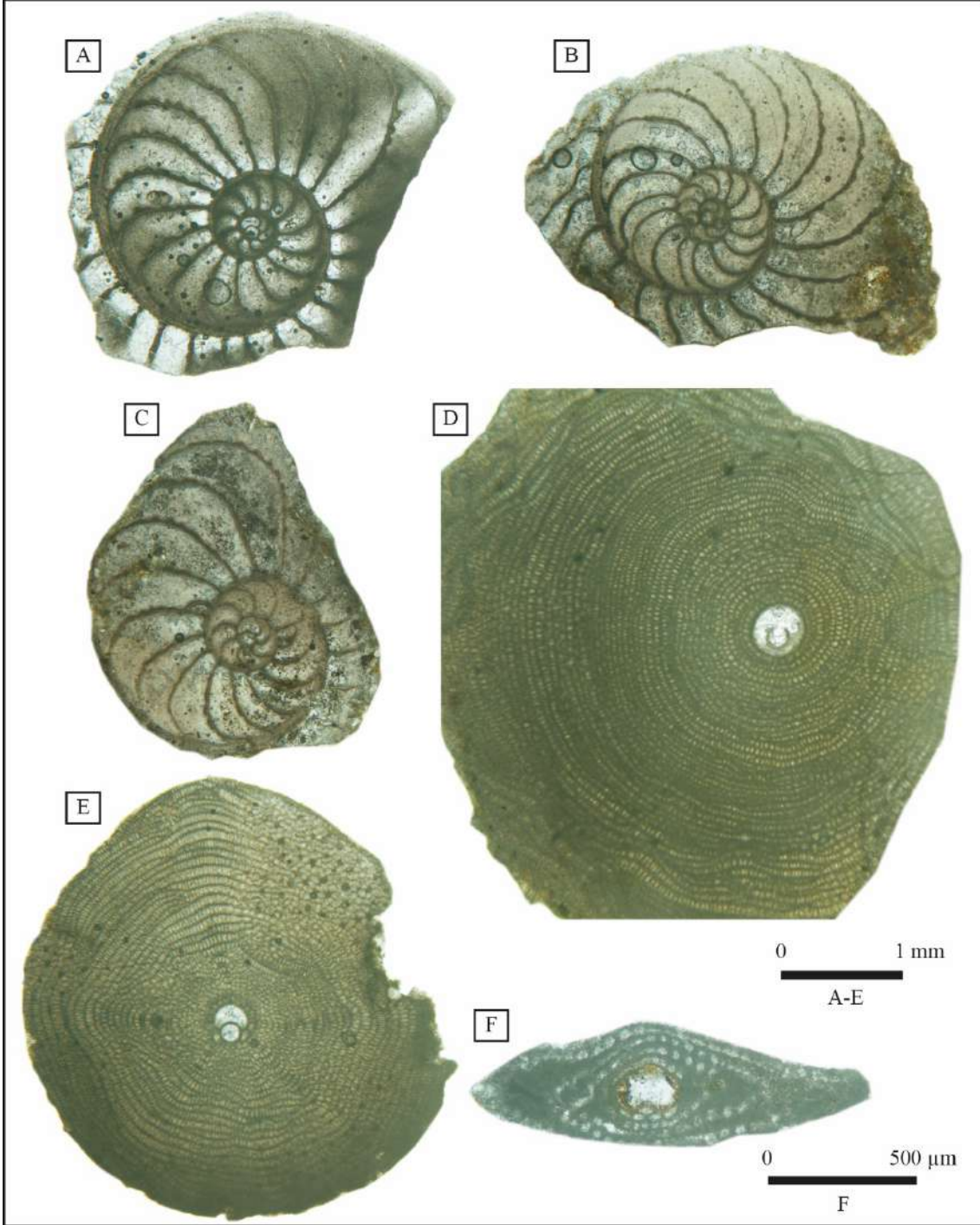
**Şekil 10E**

2006 *Asterocyclina ferrandesi* n. sp., Özcan ve Less, s. 510, lev. 3, şek. 29-31, lev. 5, şek. 13-14, metin şek. 13.

2020 *Asterocyclina ferrandesi* Özcan ve Less, Yücel vd., s. 26, şek. 18L.

Megalosferik embriyo genelde semi-isolepidin (iso-nephrolepidine kadar değişim göstermektedir) tip olup, varians tip adauxiliary locacıklar bulunmaktadır. Ekvatorial annuli ise asteroidal özelliكتedir. Varians tip annuli büyümesi görülür [19, 55]. Geç Bartoniye'den Priyaboniye'ye kadar görülebilir [19]. Bu çalışmada döterokonk boyutu 280 µm olup, SBZ 17-18 biyozonları birlikte tanımlandığı için, Bartoniye-Erken Priyaboniye'de belirlenmiştir.





**Şekil 10.** (A-C) *Operculina* ex. gr. *gomezi* Colom & Bauzà, S7-1, Kor31-1, Kor31-2. (D) *Orbitoclypeus zitteli* (Checchia-Rispoli), Kor24-1. (E) *Asterocyclina ferrandesi* Özcan & Less, Kor16-1. (F) *Alveolina* sp., K12-8. (A-E) Ekvatorial kesitler. (F) Aksiyal kesit. K12-8: Kızaz Tepe ölçülü stratigrafik kesiti örnek numarası; Kor16-1, Kor24-1, Kor31-1, Kor31-2: Korantaşı Tepe ölçülü stratigrafik kesiti örnek numaraları; S7-1: Sarıkaya Tepe ölçülü stratigrafik kesiti örnek numarası.



## 5. Ortamsal Yorum ve Tartışma

İri bentik foraminiferler taksonomik olarak heterojen, karmaşık iç yapılarıyla karakteristik tek hücreli, büyük boyutlu organizma grubu olup ısı sıcak, tropikal ve subtropikal denizlerde yaşarlar [32, 56].

Tetis sığ denizel ekosisteminde iri bentik foraminifer içeriği genel olarak Geç Bartoniye-Priyaboniyen'de iklimdeki soğumaya bağlı olarak değişmekte olup, Bartoniye-Priyaboniyen geçişinde, çalışma alanında da olduğu gibi büyük bir faunal değişimin ortaya çıktığı kabul edilir [18, 31, 41, 57]. Bu değişim çerçevesinde *Heterostegina*, *Pellatispira*, *Silvestriella* gibi bazı yeni foraminifer taksonları ilk kez ortaya çıkarken, *Nummulites*, *Assilina* gibi iri nummulitler, *Alveolina* cinsleri ve bazı orthophragminid soyları Bartoniye ve Erken Priyaboniyen'de yok olurlar, eş zamanlı olarak *Nummulites fabianii* soyu ve *Heterostegina*, *Spiroclypeus* gibi ikincil locacıklı nummulitler ortaya çıkarlar [18, 20, 31, 41, 58, 59]. Bununla ilişkili olarak çalışma alanında sadece Kızaz Tepe ve Korantaşı Tepe kesitlerinde, çok az oranda *Nummulites* ex. gr. *perforatus* (De Montfort) görülmüştür. Aynı zamanda Kızaz Tepe kesitinde çok az oranda *Alveolina* da görülmektedir. Bartoniye-Priyaboniyen geçişinde söz konusu formlar yok olup yerini *N. cf. garganicus* Tellini ve *N. fabianii* (Prever in Fabiani) gibi retiküle türlere bırakmaktadır (Şekil 8, 9). Bunların yanı sıra kesitlerde: *N. striatus* (Bruguière), *Operculina* ex. gr. *gomezi* Colom & Bauzà, *Orbitoclypeus zitteli* (Cecchia-Rispoli), *Asterocyclina ferrandesi* Özcan & Less, *Sphaerogypsina globulus* (Reuss), *Gypsina* cf. *mastelensis* Bursch, *Asterigerina rotula* (Kaufmann), *Gyroidinella magna* (Le Calvez), *Halkyardia minima* (Liebus), *Fabiania cassis* (Oppenheim), *Chapmanina gassinensis* (Silvestri), *Linderina brugesii* Schlumberger, *Silvestriella tetraedra* (Gümbel), *Praerhapydionina delicata* Henson, *Penarchaias glynnjonesii* (Henson), *Planorbulina brönnimanni* Bignot & Decrouez, *Alveolina* sp., *Calcarina* sp., *Heterostegina?* sp., *Halkyardia* sp., *Spirolina* sp., *Haddonina* sp., rotaliidae, textulariidae, miliolidae, orthophragminid, stomatorbinid form, alg, ekinit, bivalv, gastropod, mercan ve planktonik foraminiferler belirlenmiştir (Şekil 10-12).

Dış süsüne göre nummulitler genel olarak radyal, retiküle ve granüllü tiplerle karakterize edilir [42] ve çalışma alanında belirlenen nummulit türleri de bu kapsamda değerlendirilmiştir. *N. cf. garganicus* ve *N. fabianii* retiküle, *N. striatus* (Bruguière) radyal ve *N. ex. gr. perforatus* ise granüllü formlara örneklerdir.

Retiküle nummulitler ve *Heterostegina*, *Spiroclypeus* cinsi gibi bazı gruplar Akdeniz kuşağındaki sığ denizel çökellerin biyostratigrafik ayrımının daha ayrıntılı yapılmasında önemli bir role sahiptir. Bu ayırmada söz konusu türlerin kavkılarının iç bölümünde korunmuş olan morfolojik değişiklikleri ve morfometrik karakterizasyonu kullanılır [41, 60, 61]. Retiküle nummulitler Tetis bölgesinin sığ denizel depolanmalarında oldukça yaygın olup Türkiye [18, 20, 41, 62]; İtalya, İspanya, Romanya [46]; Tanzanya [63]; Pakistan [20]; Ermenistan [42, 57]; Hindistan [40, 64, 65] gibi ülkelerde bu konuda yapılmış evrimsel ve biyostratigrafik açıdan önemli çalışmalar bulunmaktadır. Kavkı yüzeylerinin karakteristik özelliklerine dayanan tür tanımlaması karışık olmasına rağmen, bu grubun nummulitler arasında tanınması oldukça kolaydır [31, 46, 63]. Retiküle nummulitler (*Nummulites fabianii* soyu), Tetis depolanmalarında Geç Lütesiyen'den-Erken Şattiyen'e kadar görülür [40, 41]. Ayırt edici ve bol bulunan bu nummulit grubunun evrimi iyi anlaşılammış olmakla birlikte biyostratigrafide yaygın olarak kullanılmaktadır [18, 41, 63]. Retiküle türlerin megalosferik formlarının ortalama iç prolokulus çapı Batı Tetis'de *Nummulites fabianii*-*Nummulites fichteli* soyunun tanımlanmasında kullanılmıştır [41, 47]. Üçüncü turdaki locaların ortalama uzunluğu ise ekolojik faktörler tarafından da etkilendiği için, retiküle nummulitlerin evriminin anlaşılmasında ikinci derecede önemlidir [18, 41].

Sığ bentik zonların (SBZ) belirlenmesinde, ölçülen kesitler boyunca iri bentik foraminiferlerin ortaya çıkışı ve yok oluşu ana kriter olarak kullanılır [30, 31]. Bu çalışmada ölçülen kesitler SBZ 17-18 ve SBZ 19-20 ile karakterize edilir.

Yoğun granüllü, retiküle, prolokulus iç çapı ortalama 100-140 µm arasında değişen *N. cf. garganicus* SBZ 17-SBZ 18B'nin karakteristiği olarak belirtilmiştir [40]. Bu çalışmada da benzer özelliklere sahip olan bu tür, Kızaz Tepe ve Korantaşı Tepe kesitlerinde bulunmuş olup ortalama prolokulus iç çapı 120-125 µm arasında değişmektedir. Kızaz Tepe kesitinde bu türün yanında, istifin alt bölümünde alveolinlerin bulunması, *Chapmanina gassinensis* ve *Silvestriella tetraedra*'lerin ise istifin sadece üst bölümünde bulunması dikkate alınarak bu kesitteki fosil içeriğinin SBZ 17-SBZ 18'i karakterize ettiği sonucuna varılmıştır. Korantaşı Tepe kesitinin alt-orta bölümünde bu tür ve bununla birlikte bulunan diğer bentik foraminiferlerin de SBZ 17-SBZ 18'i karakterize ettiği belirlenmiştir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda [31, 32, 61, 66] yeniden sınıflandırılmış olan sığ bentik biyozonlar bu çalışmada da esas alınmıştır.

Özcan vd. [41] tarafından zayıf granüllü, umbo ve yoğun retikülasyona sahip, prolokulus ortalama iç çapının 200-300 µm arasında değiştiği öne sürülen *N. fabianii* için Zakrevskaya vd. [42] ve Kaygılı [18] ise prolokulus ortalama iç çapının 200 µm üzerinde olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada belirlenen örnekler de benzer

özelliklere sahip olup prolokulus ortalama iç çapı 217-270 µm'dır.

*N. fabianii* için değişik çalışmalarda SBZ 19'dan SBZ 19-SBZ 21'e kadar değişen stratigrafik aralık önerilmiştir [18, 30, 39, 41-47]. Bu çalışmada Sarıkaya Tepe ve Korantaşı Tepe kesitlerinde varlığı saptanan bu türün SBZ 19-20'yi (Orta- Geç Priyaboniyen) temsil ettiği sonucuna varılmıştır. Korantaşı Tepe kesitinin üst seviyelerinde *Chapmanina gassinensis* görülmesi ve Oligosen'i temsil eden bentik foraminiferlerin bulunmaması nedeniyle bu istiflerin üst seviyeleri Orta-Geç Priyaboniyen olarak yaşlandırılmıştır.

İlk kez Bartoniye-Priyaboniyen sınırına yakın olarak ve SBZ 18A'nın alt seviyelerinde görülmeye başlayan *Chapmanina gassinensis* ve *Silvestriella tetraedra*, varlığını SBZ 20'nin sonuna kadar devam ettirir [20, 31, 41, 59]. SBZ 17-18 biyozonlarının birlikte tanımlandığı Kızaz Tepe kesitinin üst seviyelerinde SBZ 18'i temsil eden bu türler ilk kez görülmektedir. Korantaşı Tepe kesitinin üst bölümünde görülen *Chapmanina gassinensis* SBZ 19-20'yi temsil etmektedir.

*N. fabianii* soyu üyeleri, prolokulus iç çaplarında zamanla ortaya çıkan artışa bağlı olarak biyostratigrafi ve evrim çalışmalarında belirteç olarak kullanılırlar [18, 31, 41, 43, 46, 47, 57, 62]. Bununla birlikte Drooger [67], Zakrevskaya vd. [42] ve Kaygılı [18], prolokulus iç çapında düzensizlikler görülebileceğine vurgu yaparlar. Bu çalışmada *N. cf. garganicus* 120-125 µm ile en küçük ortalama prolokulus iç çapına sahipken, *N. fabianii* ise en büyük değere (217-270 µm) sahiptir. Dolayısıyla bu çalışmadan elde edilen prolokulus iç çapı değerlerinin literatürde belirtilenlerle [20, 39, 41, 42, 47] uyumlu olduğu görülür.

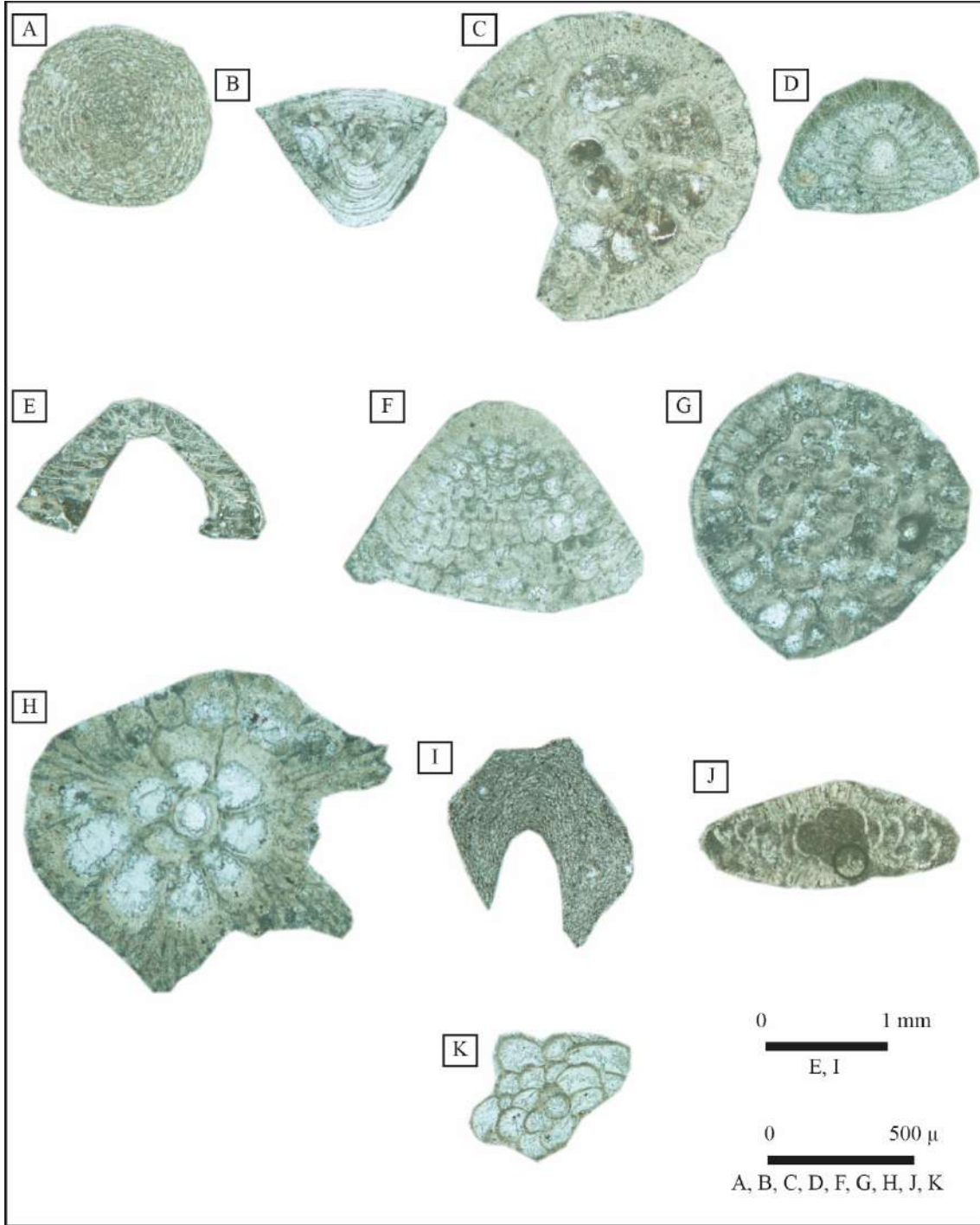
Foraminiferlerin dağılımı ve kavkı morfolojisi üzerinde depolanma ortamının su derinliği, basınç, sıcaklık, tuzluluk, su enerjisi, ışık seviyesi, oksijen konsantrasyonu, taban topoğrafyası, besin, iri bentik foraminiferler ile fotosentetik algler arasındaki simbiyotik ilişki gibi faktörlerin önemli rol oynadığı kabul edilir ve bu verilerle paleoekolojik yorumlar yapılabilir [34, 35, 45, 46, 68-74]. Diğer faktörlerin sonuçlarını da etkileme potansiyeline sahip olmasından dolayı denizel ortamlarda derinlik, önemli ve karmaşık bir değişkendir [75]. Hiyalin kalker, porselen kalker ve aglütine kavkılı foraminiferlerin oranlarının ortamsal yorumlamalarda kullanılabileceği belirtilirken [76], hiyalin türlerin oranının derinlikle arttığını vurgulayan çalışmalar da vardır [77]. Korantaşı Tepe ve Sarıkaya Tepe kesitlerinde çok az oranda belirlenen robust ve kalın kavkılı *N. fabianii*, depolanma ortamının derinliğinin göreceli olarak daha sığ olduğunu, dolayısıyla orta şelfin 2a/1b bölümüne karşılık geldiğini göstermektedir. Robust, kalın kavkılı *N. fabianii*'nin varlığı orta şelfin daha sığ olan 2a bölümüne karşılık geldiği; yassı, daha ince kavkılı *N. hormoensis* ise depolanma ortamının göreceli olarak nispeten daha derin olduğu, dolayısıyla orta şelfin 2b bölümüne karşılık geldiği şeklinde yorumlanmıştır [18]. Kızaz Tepe ve Korantaşı Tepe kesitlerinde orthophragminidlerle birlikte görülen *N. cf. garganicus*'lar depolanma ortamının göreceli olarak daha derin, yani orta şelfin 2c bölümünü işaret ederken, orthophragminidlerin ise göreceli olarak şelfin daha derin kısımlarını işaret ettiği başka çalışmalarda da belirtilmiştir [20, 51].

Neotetis'in tropikal/yarı tropikal sığ denizel ortamlarında depolanmış olan Eosen istiflerinin nummulit içeriğinin oldukça zengin olduğu bilinmektedir [78]. Bu nummulit içeriğini esas alan mikrofasies analizleri şelfin iç, orta ve dış bölümlerini temsil eder ve şelfin iç bölümünde porselenimsi bentik foraminiferler hakimken, hiyalin foraminiferler ise şelfin orta ve dış bölümünde baskındır [51, 53, 69, 79-86]. Bununla birlikte iri bentik foraminiferlerin nisbi bolluk dağılım modelinin, mutlak derinlikten çok göreceli derinlik hakkında fikir verdiği de tartışılır [18, 67].

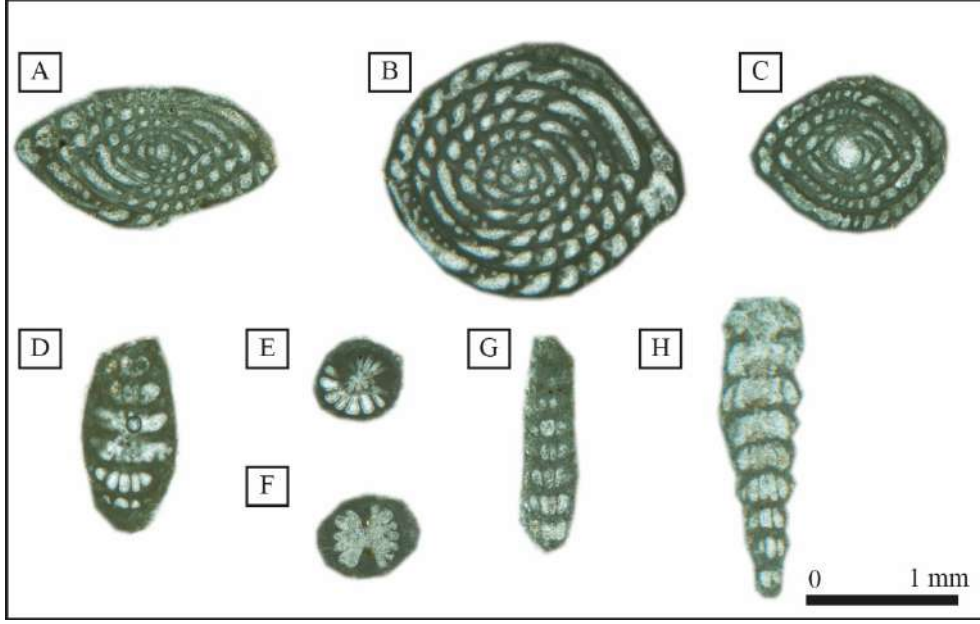
Bu çalışmada fasiyes analizi sonuçlarına bağlı olarak *Praerhapydionina delicata* Henson, *Penarchaias glynnjonesi* (Henson), *Peneroplis* sp., *Spirolina* sp., miliolidae gibi porselenimsi bentik foraminiferler şelfin iç kısmının (1a, 1b) belirlenmesinde; *N. cf. garganicus*, *N. fabianii* gibi hiyalin bentik foraminiferlerden ise şelfin orta kısmının (2a, 2b, 2c) belirlenmesinde yararlanılmıştır (Şekil 13, 14). İç şelf ortamının 1a kısmı 1b kısmına göre porselenimsi bentik foraminiferler bakımından daha zenginken, 1b kısmında ise porselenimsi bentik foraminiferlerle birlikte az oranda nummulit ve rotaliidae görülmektedir (Şekil 14).

Kırkgeçit Formasyonu'nun Elazığ çevresindeki yüzeylemelerini inceleyen Aksoy vd. [6] birimin kuzey bölümünde şelf karbonatları ile güney kısmında ise kırıntılı kayalarla temsil edildiğini belirtirler. Çalışma alanından elde edilen bulgular da bu verilerle uyumluluk gösterir. Arazi gözlemleri ve kesitlerde yapılan fasiyes analizi sonuçlarına göre de depolanma ortamında yanal ve düşey yönde çok fazla fasiyes değişimleri gözlenmektedir. Bu durumun, havzanın tektonik kontrollü olmasından kaynaklandığı belirtilir [5, 6].

Çalışma alanındaki Kırkgeçit Formasyonu istifi önceki çalışmalarda, bentik foraminifer içeriğine göre Geç Lütesiyen-Priyaboniyen olarak yaşlandırılmıştır [15-17]. Birimin Elazığ'ın batısında, Baskil ilçesi çevresindeki yüzeylemeleri ise Özcan vd. [20] tarafından yapılan ayrıntılı paleontolojik ve manyetostatigrafik çalışmalara göre Bartoniye-Erken Priyaboniyen olarak yaşlandırılmıştır. Kaygılı [18] tarafından yapılan çalışmada ise çalışma alanındaki istifin Geç Bartoniye-Priyaboniyen yaşlı kısmındaki retiküle nummulitler incelenmiştir.

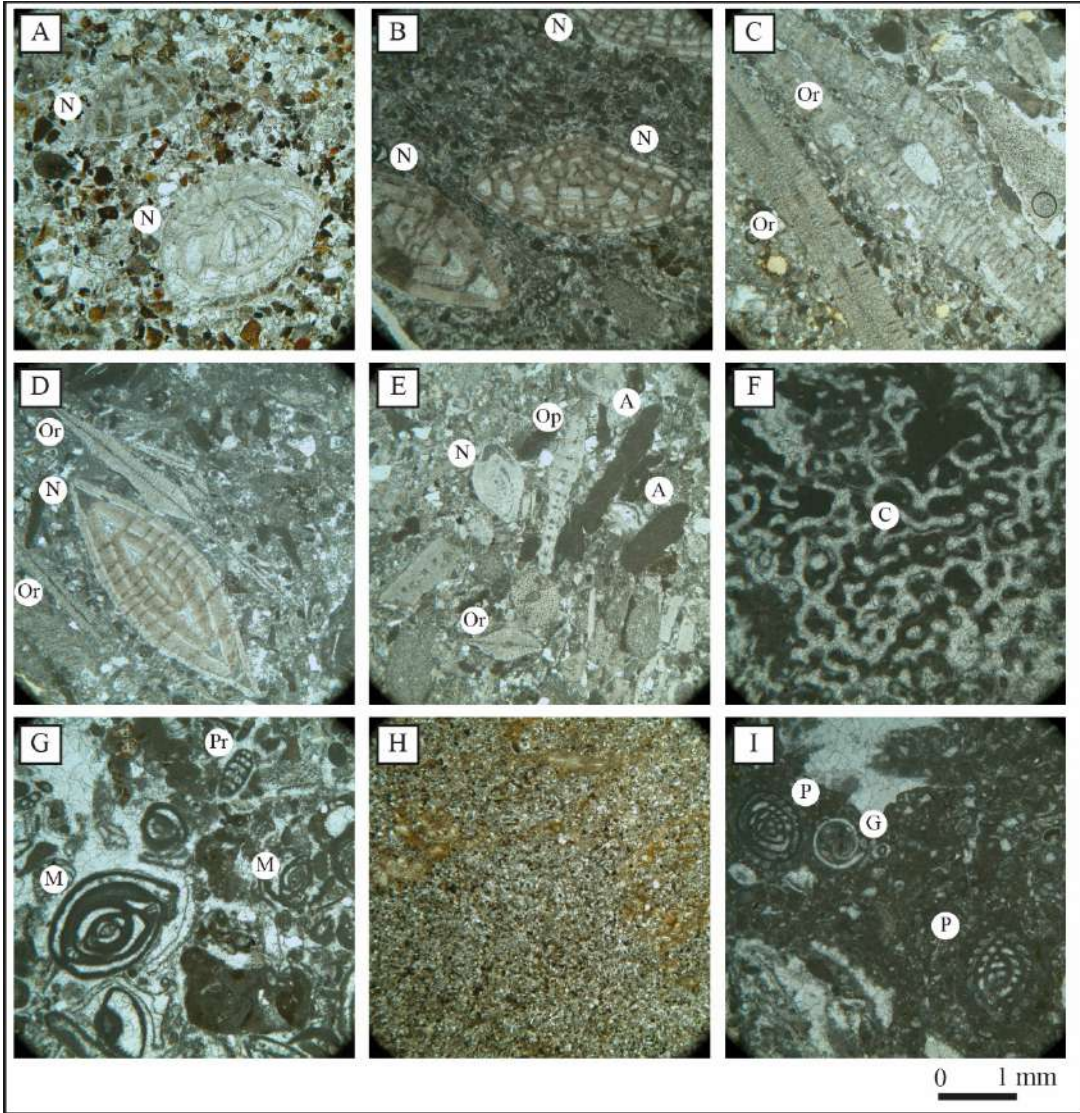


**Şekil 11.** (A) *Sphaerogypsina globulus* (Reuss), K8-15. (B) *Asterigerina rotula* (Kaufmann), K15-6. (C) *Gyroidinella magna* (Le Calvez), K11-15. (D) *Halkyardia minima* (Liebus), K2-6. (E) *Fabiania cassis* (Oppenheim), K2-14. (F, G) *Chapmanina gassinensis* (Silvestri), K19-2, K20-4. (H) *Silvestriella tetraedra* (Gümbel), K17-7. (I) *Gypsina* cf. *mastelensis* Bursch, K16-4. (J) *Linderina brugesii* Schlumberger, K6-9. (K) *Planorbulina brönnimanni* Bignot & Decrouez, Kor30-1. K2-6, K2-14, K6-9, K8-15, K11-15, K15-6, K16-4, K17-7, K19-2, K20-4: Kızaz Tepe ölçülü stratigrafik kesiti örnek numaraları; Kor30-1: Korantaşı Tepe ölçülü stratigrafik kesiti örnek numarası.

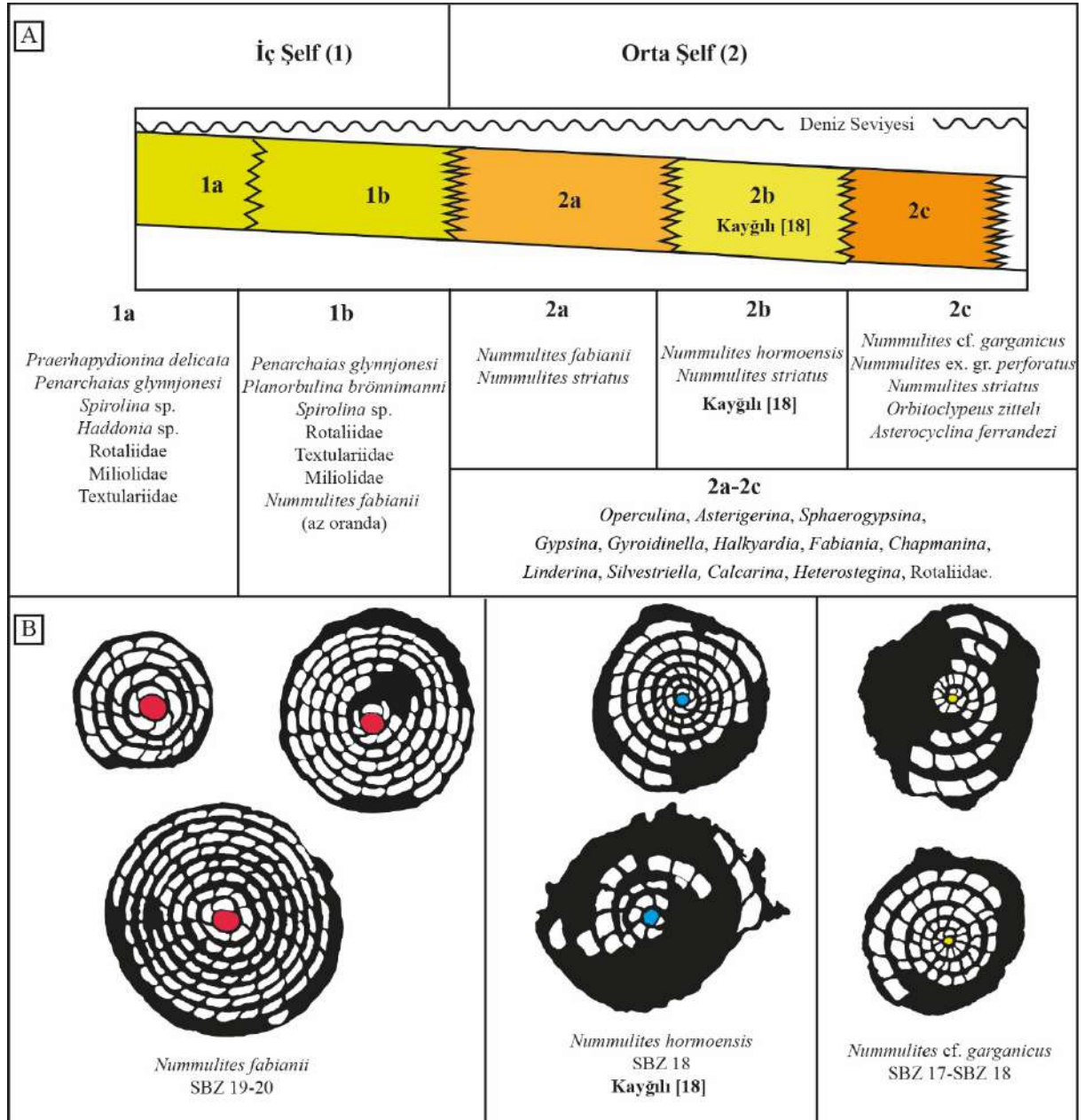


**Şekil 12.** (A-C) *Penarchaias glynnjonesi* (Henson), S5-16, S2-14, S2-12. (D-H) *Praerhapydionina delicata* Henson, Kor42-8, Kor42-14, Kor45-2, Kor45-11. (A, C) Aksiyal kesitler. (B) Ekvatorial kesit. (D, G, H) Oblik boyuna kesitler. (E, F) Uzun eksene dik kesit. Kor42-8, Kor42-14, Kor45-2, Kor45-11: Korantaşı Tepe ölçülü stratigrafik kesiti örnek numaraları; S2-12, S2-14, S5-16: Sarıkaya Tepe ölçülü stratigrafik kesiti örnek numaraları.





**Şekil 13.** (A) *Nummulites*'li kumtaşı fasiyesi, Kor1-3. (B) *Nummulites*'li tanetaşı fasiyesi, S10-5. (C) *Nummulites*'li ve orthoherminidli tanetaşı fasiyesi, K7-1. (D) *Nummulites*'li ve orthoherminidli istiftaş fasiyesi, K4-4. (E) *Nummulites*'li ve orthoherminidli istiftaş-tanetaşı fasiyesi, K8-4. (F) Bağlantı fasiyesi, S9-2. (G) Porselenimsi foraminiferli tanetaşı fasiyesi, Kor36-7. (H) Siltaşı fasiyesi, Kor27-1. (I) Porselenimsi foraminiferli istiftaş fasiyesi, S2-6. A: Alg. C: Mercan. G: Gastropod. M: Miliolidae. N: *Nummulites* sp. P: *Penarchaias glynnjonesi* (Henson). Pr: *Praerhapydionina delicata* Henson. Op: *Operculina* sp. Or: Orthoherminid. K4-4, K7-1, K8-4: Kızaz Tepe ölçülü stratigrafik kesiti örnek numaraları; Kor1-3, Kor27-1, Kor36-7: Korantaşı Tepe ölçülü stratigrafik kesiti örnek numaraları; S2-6, S9-2, S10-5: Sarıkaya Tepe ölçülü stratigrafik kesiti örnek numaraları.



**Şekil 14.** A) Bentik foraminifer topluluğuna göre Kırkgeçit Formasyonu'nun depolanma ortamı modeli. B) Çalışma alanındaki retiküle nummulitlerin evrimsel gelişimi. SBZ'lerin belirlenmesinde Serra-Kiel vd. [30], alt zonların (18A, 18B, 18C, 19A, 19B) belirlenmesinde ise Less vd. [61] ve Less ve Özcan [31] esas alınmıştır. B) Sarı renkli embriyolar SBZ 17-SBZ 18'i, mavi renkli embriyolar SBZ 18'i ve pembe renkli embriyolar ise SBZ 19-20'yi temsil etmektedir. Bu çalışmada tespit edilemeyen *Nummulites hormoensis* [18]'den alınmıştır.

## 6. Sonuçlar

Kırkgeçit Formasyonu'nun Elazığ kuzeybatısındaki sığ denizel istifinin Bartoniye-Priyaboniye iri bentik foraminifer topluluğu belirlenmiş ve bu topluluk Neotetis'de depolanmış istiflerin bentik foraminifer içeriği ile karşılaştırılmıştır.

Nummulit türleri, özellikle de *N. cf. garganicus* ve *N. fabianii* gibi retiküle nummulitler ve *Chapmanina*, *Silvestriella* gibi belirteç formlar tayin edilmiştir. Çalışma alanında, *N. fabianii*'in bulunduğu seviyelerin, *N. cf.*

*garganicus*'un bulunduğu seviyelere göre daha üstte olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada belirlenen ve retiküle nummulitlerin evrimsel gelişimi ve biyostratigrafisi bakımından önemli bir belirteç olarak kabul edilen ortalama prolökulus iç çapı değerlerinin, Tetis bölgesi sığ denizel Eosen istiflerinden elde edilen değerlerle uyumluluk gösterdiği ortaya konulmuştur.

Bentik foraminifer içeriği esas alınarak çalışma alanındaki istifin yaşı Bartoniyen-Priyaboniyen olarak belirlenirken, depolanma ortamının da şelfin iç (1a, 1b) ve orta bölümleri (2a, 2b, 2c) olduğu sonucuna varılmıştır.

## Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesindeki katkılarından dolayı Prof. Dr. Ercan AKSOY (Fırat Üniversitesi) ve Prof. Dr. Mehmet ÖZKUL'a (Pamukkale Üniversitesi) teşekkürü borç bilirim. Makalenin daha iyi hale gelmesini sağlayan yapıcı eleştirilerinden dolayı isimlerini bilemediğim hakemlere de teşekkür ederim.

## Kaynaklar

- [1] Kaya A. Tectono-stratigraphic reconstruction of the Keban metamorphites based on new fossil findings, eastern Turkey. *J. Afr. Earth Sci.* 2016; 124: 245-257.
- [2] Arslan G, Beyarslan M. Çolaklı (Elazığ) çevresindeki plütonik kayaların mineralojik, petrografik ve jeokimyasal özellikleri. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 2016; 31 (1): 345-361.
- [3] Beyarslan M, Bingöl AF. Zircon U-Pb age and geochemical constraints on the origin and tectonic implications of late Cretaceous intra-oceanic arc magmatites in the southeast Anatolian orogenic belt (SE-Turkey). *J. Afr. Earth Sci.* 2018; 147: 477-497.
- [4] Perinçek D. The Geology of Hazro-Korudağ, Çüngüş-Maden-Ergani-Hazar-Elazığ-Malatya area. Ankara: The Geological Society of Turkey, 1979.
- [5] Cronin BT, Hurst A, Çelik H, Türkmen İ. Superb exposure of a channel, levee and overbank complex in an ancient deep-water slope environment. *Sediment. Geol.* 2000a; 132: 205-216.
- [6] Aksoy E, Türkmen İ, Turan M. Tectonics and sedimentation in convergent margin basins: an example from the Tertiary Elazığ basin, eastern Turkey. *J. Asian Earth Sci.* 2005; 25: 459-472.
- [7] Özkul M, Kerey İE. Şelf, derin deniz kompleksinde fasiyes analizleri: Kırkgeçit Formasyonu (Orta Eosen-Oligosen), Baskil, Elazığ. *Tübitak J. Earth Sci.* 1996; 5: 57-70.
- [8] Türkmen İ, İnceöz M, Kerey E. Kırkgeçit Formasyonu (Orta Eosen-Oligosen) gel-git düzlüğü ve fırtınalı şelf kompleksine bir örnek (Elazığ KKB'sı). *Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Bülteni* 1999; 21: 125-142.
- [9] Türkmen İ, İnceöz M, Aksoy E, Kaya M. Elazığ yöresinin Eosen stratigrafisi ve paleocoğrafyası ile ilgili yeni bulgular. *Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Bülteni* 2001; 24: 81-95.
- [10] Türkmen İ, Ertürk Y. Kırkgeçit Formasyonunun (Orta Eosen-Oligosen) Akuşığı köyü (Baskil-Elazığ) dolaylarındaki yüzeylemelerinin sedimentolojik özellikleri. *Türkiye Petrol Jeologları Derneği Bülteni* 2002; 14: 1-16.
- [11] Özkul M. Elazığ batısında Kırkgeçit Formasyonu üzerinde sedimentolojik incelemeler. Doktora tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 1988.
- [12] Aksoy E. Elazığ batı ve güneyinin genel jeolojik özellikleri. *Tübitak Doğa Türk Yerbilimleri Dergisi* 1993; 2: 113-123.
- [13] Cronin BT, Hartley AJ, Çelik H, Hurst A, Türkmen İ, Kerey E. Equilibrium profile development in graded deep-water slopes: Eocene, eastern Turkey. *J. Geol. Soc.* 2000b; 157: 943-955.
- [14] Cronin BT, Çelik H, Hurst A. Sinuous channels in late stages of entrenched deep-water channel complexes, Hasret Mountain main channel, Turkey. In: Nilsen TH, Shew RD, Steffens GS, Studlick JRJ, editors. *Atlas of deep-water outcrops*. England: Geological Society Publishing House, 2007; pp. 368-372.
- [15] Avcı N. Elazığ yakın kuzeybatısında stratigrafik ve mikropaleontolojik araştırmalar. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 1983.
- [16] Avcı N. Presence of *Nummulites fabianii* (prever) group (*Nummulites* ex. gr. *fabianii*) and associated foraminifers in the Elazığ region. *Mineral Research and Exploration Bulletin* 1991; 112: 71-76.
- [17] Avcı N. Inner platform sediments with *Praebullalveolina afyonica* Sirel and Acar around Elazığ region (Eastern Turkey). *Bulletin of the Mineral Research and Exploration* 1996; 118: 9-14.
- [18] Kaygılı S. Reassessment of the age and depositional environment of the Kırkgeçit Formation based on larger benthic foraminifera, NW Elazığ, eastern Turkey. *Turk. J. Earth Sci.* 2021; 45: 580-600.
- [19] Özcan E, Less Gy, Bıldı Beke M, Kollányi K, Kertész B. Biometric analysis of middle and upper Eocene discocyclinidae and orbitoclypeidae (Foraminifera) from Turkey and updated orthophragmine zonation in the Western Tethys. *Micropaleontol.* 2006; 52 (6): 485-520.
- [20] Özcan E, Less Gy, Jovane L, Catanzariti R, Frontalini F, Coccioni R, Giorgioni M, Rodelli D ve diğerleri. Integrated biostratigraphy of the middle to upper Eocene Kırkgeçit Formation (Baskil Section, Elazığ, Eastern Turkey): larger benthic foraminiferal perspective. *Mediterranean Geoscience Reviews* 2019a; 1: 55-90.
- [21] Sirel E, Metin S, Sözeri B. Palu (KD Elazığ) denizel Oligosen'in stratigrafisi ve mikropaleontolojisi. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni* 1975; 18: 175-180.

- [22] Sirel E. Biostratigraphy of the middle/upper Eocene/Oligocene boundaries at the eastern Turkey. *Ann. Mus. Civ. St. Ferrara* 2000; 3: 61-70.
- [23] Sirel E. Foraminiferal description and biostratigraphy of the Bartonian, Priabonian and Oligocene shallow water sediments of the Southern and Eastern Turkey. *Rev. Paléobiol.* 2003; 22 (1): 269-339.
- [24] Sirel E, Deveciler A. Description and some revision of *Ranikothalia caudri*, *Nummulites Lamarck* and *Assilina D'Orbigny* species from Thanetian-early Chattian of Turkey. Ankara: Ankara Üniversitesi Yayınevi, 2018.
- [25] Taşgın CK, Altun F. Soft-sediment deformation: deep-water slope deposits of a back-arc basin (Middle Eocene-Oligocene Kırkgeçit Formation, Elazığ basin), eastern Turkey. *Arabian J. Geosci.* 2019; 12: 773.
- [26] Alkaç O. Kırkgeçit Formasyonu (Orta Eosen-Oligosen) derin deniz tortullarının sedimantolojisi, Baskil (Elazığ) güneybatısı. Doktora tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2020.
- [27] Çelik H, Cronin BT. Controls on deep-water slope channel complex fill, propagation, stacking, and orientation in the middle Eocene-Oligocene Kırkgeçit Formation, Elazığ, eastern Turkey. *Turk. J. Earth Sci.* 2020; 29: 976-1003.
- [28] İbilioğlu D. Elazığ havzası Paleojen istifinin mikropaleontolojik (Planktonik foraminifer ve ostrakodlarının) incelenmesi ve ortamsal yorumu. Doktora tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, 2008.
- [29] İbilioğlu D. Bağlarca (Elazığ GB'sı) yöresindeki Eosen istifinin ostrakod içeriği ve ortamsal yorumu. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2010; 23: 59-70.
- [30] Serra Kiel J, Hottinger L, Caus E, Drobne K, Ferrández C, Jauhri AK, Less Gy, Pavlovec R ve diğerleri. Larger foraminiferal biostratigraphy of the Tetyan Paleocene and Eocene. *Bull. Soc. Géol. Fr.* 1998; 169 (2): 281-299.
- [31] Less Gy, Özcan E. Bartonian-Priabonian larger benthic foraminiferal events in the Western Tethys. *Austrian J. Earth Sci.* 2012; 105 (1): 129-140.
- [32] Papazzoni CA, Cosovic V, Briguglio A, Drobne K. Towards a calibrated larger foraminifera biostratigraphic zonation: Celebrating 18 years of the application of shallow benthic zones. *Palaios* 2017; 32: 1-5.
- [33] Dunham RJ. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: Ham WE, editor. *Classification of carbonate rocks. A symposium. Mem. Am. Assoc. Pet. Geol.* 1962; 1: 108-121.
- [34] Hottinger L. Shallow benthic foraminiferal assemblages as signals for depth of their deposition and their limitations. *Bull. Soc. Géol. Fr.* 1997; 168 (4): 491-505.
- [35] Beavington Penney SJ, Racey A. Ecology of extant nummulitids and other larger benthic foraminifera: Applications in palaeoenvironmental analysis. *Earth Science Reviews* 2004; 67: 219-265.
- [36] Flügel E. *Microfacies of carbonate rocks.* Germany: Springer, 2004.
- [37] Nebelsick JH, Rasser MW, Bassi D. Facies dynamics in Eocene to Oligocene circumalpine carbonates. *Facies* 2005; 51: 197-216.
- [38] Loeblich AR JR, Tappan H. *Foraminiferal genera and their classification.* New York: Springer, 1988.
- [39] Less Gy, Özcan E, Okay AI. Stratigraphy and larger foraminifera of the middle Eocene to lower Oligocene shallow marine units in the northern and eastern parts of the Thrace Basin, NW Turkey. *Turk. J. Earth Sci.* 2011; 20: 793-845.
- [40] Less Gy, Frijia G, Özcan E, Saraswati PK, Parente M, Kumar P. Nummulitids, lepidocyclinids and Sr-isotope data from the Oligocene of Kutch (western India) with chronostratigraphic and paleobiogeographic evaluations. *Geodin. Acta* 2018; 30 (1): 183-211.
- [41] Özcan E, Yücel AO, Erbay S, Less Gy, Kaygılı S, Ali N, Hanif M. Reticulate Nummulites (*N. fabianii* lineage) and age of the *Pellatispira* beds of the Drazinda Formation, Sulaiman Range, Pakistan. *International Journal of Paleobiology & Paleontology* 2019b; 2 (1): 1-10.
- [42] Zakrevskaya E, Less Gy, Bugrova E, Shcherbinina E, Grigoryan T, Sahakyan L. Integrated biostratigraphy and benthic foraminifera of the middle-upper Eocene deposits of Urtsadzor section (Southern Armenia). *Turk. J. Earth Sci.* 2020; 29: 896-945.
- [43] Schaub H. Nummulites et Assilines de la Téthys Paléogène. Taxinomie, phylogénese et biostratigraphie. *Memoires Suisses de Paleontologie* 1981; 104-106.
- [44] Racey A. Biostratigraphy and palaeobiogeographic significance of Tertiary nummulitids (Foraminifera) from Northern Oman. In: Simmons MD, editor. *Micropalaeontology and Hydrocarbon Exploration in the Middle East.* London: Chapman-Hall, 1994; 343-370.
- [45] Racey A. Lithostratigraphy and larger foraminiferal (Nummulitid) biostratigraphy of the Tertiary of northern Oman. *Micropalaeontology* 1995; 41: 1-123.
- [46] Papazzoni CA. Biometric analyses of Nummulites *ptukhiani* Z. D. Kacharava, 1969 and Nummulites *fabianii* (Prever in Fabiani, 1905). *J. Foraminiferal Res.* 1998; 28 (3): 161-176.
- [47] Özcan E, Less Gy, Okay AI, Baldi Beke M, Kollanyi K, Yılmaz İÖ. Stratigraphy and larger foraminifera of the Eocene shallow marine and olistostromal units of the southern part of the Thrace Basin, NW Turkey. *Turk. J. Earth Sci.* 2010; 19: 27-77.
- [48] Deveciler A. The first appearance of the Bartonian benthic foraminifera at the Çayraz Section (North of Haymana, south Ankara, central Turkey). *Journal of the Earth Sciences Application and Research Centre of Hacettepe University* 2010; 31 (3): 191-203.
- [49] Dinçer F, Ayşar N. Darendeli Havzası (KB Malatya) Üst Lütésiyan-Bartoniyan birimlerinin bentik foraminifer biyostratigrafisi ve ortamsal yorumu. *Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bulteni* 2012; 33 (1), 31-58.



- [50] Özce FS, Serttaş E, Sürmeli ME, Eğdemir S, Erdem NÖ. Ağcakışla (Sivas-Şarkışla) yöresi Alt-Orta Eosen çökellerinin bentik foraminifer biyostratigrafisi. *Türkiye Jeoloji Bülteni* 2013; 56 (3): 189-202.
- [51] Kaygılı S, Aksoy E. Interpretation of sea level change using paleobiodiversity analysis: the Darende Formation of the Eocene (Malatya Basin, East Turkey). *Turk. J. Earth Sci.* 2019; 28: 146-170.
- [52] Kaygılı S, Aksoy E, Jones B, Acar Ş. The use of *Microcodium* to identify a paraconformity: An example from the Paleogene sequence of Malatya Basin (Eastern Turkey). *Sediment. Geol.* 2019; 380: 83-93.
- [53] Gürsoy M, Görmüş M. Characteristic mollusc, larger foraminifera findings and environmental interpretations of the middle Eocene Kocaçay Formation deposits around Ayvalıca (Bayat, Çorum). *Bulletin of the Mineral Research and Exploration* 2020; 162: 253-285.
- [54] Hottinger L. Distribution of larger peneroplidae, Borelis and nummulitidae in the Gulf of Elat, Red Sea: *Utrecht Micropaleontological Bulletins* 1977; 15: 35-109.
- [55] Yücel AO, Özcan E, Erbil Ü. Latest Priabonian larger benthic foraminiferal assemblages at the demise of the Soğucak carbonate platform (Thrace basin and Black Sea shelf, NW Turkey): Implications for the shallow marine biostratigraphy. *Turk. J. Earth Sci.* 2020; 29: 85-114.
- [56] Langer MR, Hottinger L. Biogeography of selected "larger" foraminifera. *Micropaleontology* 2000; 46 (1): 105-126.
- [57] Cotton LJ, Zakrevskaya EY, Van der Boon A, Asatryan G, Hayrapetyan F, Israyelyan A, Krijgsman W, Less Gy ve diğerleri. Integrated stratigraphy of the Priabonian (Upper Eocene) Urtsadzor section, Armenia. *Newsl. Stratigr.* 2017; 50 (3): 269-295.
- [58] Serra Kiel J, Gallardo Garcia A, Razin Ph, Robinet J, Roger J, Grelaud C, Leroy S, Robin C. Middle Eocene-early Miocene larger foraminifera from Dhofar (Oman) and Socotra Island (Yemen). *Arabian J. Geosci.* 2016; 9: 344.
- [59] Özcan E, Okay AI, Bürkan KA, Yücel AO, Özcan Z. Middle-late Eocene marine record of the Biga Peninsula, NW Anatolia, Turkey. *Geologica Acta* 2018; 16 (2): 163-187.
- [60] Less Gy, Özcan E. The late Eocene evolution of nummulitid foraminifer *Spiroclypeus* in the Western Tethys. *Acta Palaeontol. Polonica* 2008; 53 (2): 303-316.
- [61] Less Gy, Özcan E, Papazzoni CA, Stockar R. The middle to late Eocene evolution of nummulitid foraminifer *Heterostegina* in the Western Tethys. *Acta Palaeontol. Polonica* 2008; 53 (2): 317-350.
- [62] Özcan E, Less Gy, Báldi Beke M, Kollányi K, Acar F. Oligo-Miocene foraminiferal record (Miogypsinidae, lepidocyclinidae and nummulitidae) from the Western Taurides (SW, Turkey): biometry and implications for the regional geology. *J. Asian Earth Sci.* 2009; 34: 740-760.
- [63] Cotton LJ, Pearson PN, Renema W. A new Eocene lineage of reticulate *Nummulites* (Foraminifera) from Kilwa district, Tanzania; a place for *Nummulites ptukhiani*? *J. Syst. Palaeontol.* 2015; 14 (7): 569-579.
- [64] Sengupta S, Sarkar S, Mukhopadhyay S. Saddle-shaped reticulate *Nummulites* from Early Oligocene rocks of Khari area, SW Kutch, India. *J. Earth Syst. Sci.* 2011; 120 (2): 263-268.
- [65] Saraswati PK, Anwar D, Lahiri A. Bartonian reticulate *Nummulites* of Kutch. *Geodin. Acta* 2017; 29 (2): 14-23.
- [66] Costa E, Garcés M, López Blanco M, Serra Kiel J, Bernaola G, Cabrera L, Beamud E. The Bartonian-Priabonian marine record of the eastern south Pyrenean Foreland basin (NE Spain): A new calibration of the larger foraminifers and calcareous nannofossil biozonation. *Geologica Acta* 2013; 11 (2): 177-193.
- [67] Drooger CW. Environmental gradients and evolutionary events in some larger foraminifera. In: Meulenkamp JE, editor. *Utrecht Micropaleontological Bulletins* 1983; 30: 255-271.
- [68] Hottinger L. Functional morphology of benthic foraminiferal shells, envelopes of cells beyond measure. *Micropaleontology* 2000; 46 (1): 57-86.
- [69] Racey A. A review of Eocene nummulite accumulations: structure, formation and reservoir potential. *J. Pet. Geol.* 2001; 24 (1): 79-100.
- [70] Hohenegger J. Depth coenoclines and environmental considerations of western Pacific larger foraminifera. *J. Foraminiferal Res.* 2004; 34 (1): 9-33.
- [71] Hohenegger J. Estimation of environmental paleogradient values based on presence/absence data: A case study using benthic foraminifera for paleodepth estimation. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 2005; 217: 115-130.
- [72] Jorri SJ, Hasler CA, Davaud E. Hydrodynamic behaviour of *Nummulites*, implications for depositional models. *Facies* 2006; 52: 221-235.
- [73] Briguglio A, Hohenegger J. Nummulitids hydrodynamics: An example using *Nummulites globulus* Leymerie, 1846. *Bollettino della Società Paleontologica Italiana* 2009; 48 (2): 105-111.
- [74] Renema W. Terrestrial influence as a key driver of spatial variability in large benthic foraminiferal assemblage composition in the Central Indo-Pacific. *Earth Sci. Rev.* 2018; 177, 514-544.
- [75] Hohenegger J. Coenoclines of larger foraminifer. *Micropaleontology* 2000; 46: 127-151.
- [76] Jorissen F, Fontanier C, Thomas E. Paleocyanographical proxies based on deep-sea benthic foraminiferal assemblage characteristics. In: Hillaire Marcel C, Vernal A de, editors. *In Proxies in late Cenozoic paleoceanography*. Amsterdam: Elsevier Science, 2007; pp. 263-326.
- [77] Debenay JP. A guide to 1000 foraminifera from southwestern Pacific: New Caledonia. Paris: Publications Scientifiques du Muséum, Muséum National d'Histoire Naturelle, 2012.
- [78] Pleş G, Kövecsi SA, Haitonic RB, Silye L. Microfacies analysis and diagenetic features of the Eocene nummulitic accumulations from northwestern Transylvanian Basin (Romania). *Facies* 2020; 66: 20.

- [79] Romero J, Caus E, Rosell J. A model for the palaeoenvironmental distribution of larger foraminifera based on late middle Eocene deposits on the margin of the south Pyrenean basin (NE Spain). *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 2002; 179: 43-56.
- [80] Colombié C, Strasser A. Facies, cycles, and controls on the evolution of a keep-up carbonate platform (Kimmeridgian, Swiss Jura). *Sedimentology* 2005; 52: 1207-1227.
- [81] Vecchio E, Baratolo F, Hottinger L. Alveolina horizons in the Trentinara Formation (Southern Apennins, Italy): Stratigraphic and paleontologic implications. *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia* 2007; 113 (1): 21-42.
- [82] Adabi MH, Zohdi A, Ghabeishavi A, Amiri Bakhtiyar H. Applications of nummulitids and other larger benthic foraminifera in depositional environment and sequence stratigraphy: An example from the Eocene deposits in Zagros Basin, SW Iran. *Facies* 2008; 54: 499-512.
- [83] Banerjee S, Khanolkar S, Saraswati PK. Facies and depositional settings of the middle Eocene-Oligocene carbonates in Kutch. *Geodin. Acta* 2018; 30 (1): 119-136.
- [84] Özgen Erdem N, Koç Taşgın C. Microfacies and depositional environment of the ilerdian carbonates in the north-western Tosya (SE Kastamonu) region, northern Turkey. *Journal Geological Society of India* 2019; 93: 704-712.
- [85] Sarkar S. Alveolina dominated assemblages in the early Eocene carbonates of Jaintia Hills, NE India: Biostratigraphic and palaeoenvironmental implications. *C. R. Palevol* 2019; 18: 949-966.
- [86] Bozkurt A, Görmüş M. Isparta büklümünün kuzey kesiminde (Keçiborlu, Isparta, GB Türkiye) Erken İpresiyen Alveolina topluluklarının sistematığı, biyostratigrafisi ve paleoortamsal incelemesi. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi* 2021; 164: 189-235.



## Arşimet Optimizasyon Algoritması ile Trafo Tabanlı Evrimsel Sinir Ağı Modelini Kullanarak Yazılım Tanımlı Ağ Teknolojisi Verilerinde Saldırı Tespiti

Mesut TOĞAÇAR<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye  
<sup>\*1</sup> mtogacar@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 21/11/2021;

Kabul/Accepted: 12/01/2022)

**Öz:** Son zamanlarda insanların teknoloji cihazları kullanarak günlük işlerini idame etmesindeki oran artmıştır. Akıllı cihazların birbirleriyle iletişim sağlayabildiği şu zamanda nesnelerin interneti kavramı ortaya çıkmıştır. Bütün bu gelişmeler insan hayatını daha da kolaylaştırırken diğer taraftan verilerin güvenli bir şekilde aktarılmasını sağlayabilen sistemlerin tasarlanmasını zorunlu hale getirmiştir. Bu çalışmada yazılım tanımlı ağ verilerinde saldırı tespitini gerçekleştirebilen yapay zekâ tabanlı hibrit bir yaklaşım geliştirilmiştir. Veri kümesi normal, dağıtılmış hizmet reddi, kaba kuvvet saldırıları, siteler arası betik çalıştırma ve SQL enjeksiyon ağ saldırı türlerini içermektedir. Önerilen yaklaşımda ön işlem adımı olarak Arşimet optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Arşimet optimizasyon algoritması sayesinde veri kümesindeki verimli özelliklerin seçimi gerçekleştirilmiştir. Ardından trafo tabanlı evrimsel sinir ağı modeli kullanılarak veri kümesi eğitilmiştir. Ağ trafiğinin normal veya saldırı tespitinde softmax yöntemi sınıflandırıcı olarak kullanılmıştır. Bu çalışmanın deneysel analizinde %98,94 genel doğruluk başarısı elde edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Derin Öğrenme, Karar Destek Sistemi, Nesnelerin İnterneti, Veri Güvenliği, Yazılım Tabanlı Ağ.

### Attack Detection in Software-Defined Network Technology Data Using A Transformer-Based Convolutional Neural Network Model with An Archimedean Optimization Algorithm

**Abstract:** Recently, there has been an increase in the number of people who do their daily work with the help of technological devices. During this time, the concept of the Internet of Things has emerged, where smart devices can communicate with each other. While all these developments make people's lives easier, on the other hand, they make it necessary to develop systems that can ensure secure transmission of data. In this study, a hybrid approach based on artificial intelligence was developed to detect attacks on software-defined network data. The dataset includes normal, denial of service, brute force, cross-site scripting and SQL injection network attacks. Archimedes optimization algorithm has been used as a preprocessing step in the proposed approach. Thanks to Archimedes optimization algorithm, the selection of efficient features in the dataset was done. Then, the dataset was trained using the transformer-based convolutional neural network model. The softmax method was used as a classifier for detecting normal or attack network traffic. The overall accuracy achieved in the experimental analysis of this study was 98.94%.

**Key words:** Deep Learning, Decision Support System, Internet of Things, Data Security, Software Defined Network.

#### 1. Giriş

Nesnelerin interneti (IoT) ve yazılım tabanlı ağlar (SDN) kavramı son zamanlarda adından söz ettiren iki teknolojidir. IoT teknolojileri insanların geleneksel olarak gerçekleştirdiği iş veya eylemleri, dijital ortamda gerçekleştirilmesine olanak sağlar. Bunu gerçekleştirirken zamandan kazanç ve maliyetten tasarrufu ön planda tutar. IoT teknolojisindeki amaç akıllı cihazları internet üzerinden iletişimlerini sağlayabilmektir [1,2]. SDN, ağdaki verilerin daha hızlı bir şekilde aktarılmasını sağlar ve mevcut ağı merkezi bir sistem ile izlenmesini gerçekleştirir. Böylece ağ trafiğinde meydana gelen saldırıların tespiti daha kolay bir şekilde tespit edilir. Fakat SDN'ler ağda gerçekleşen dağıtılmış hizmet reddi saldırıları (DDoS) gibi türleri tespit etmede ise yetersizdir [3]. Bu tür durumlarda ağdaki veri güvenliğini koruyabilmek için birçok yöntem ve model geliştirilmiştir.

Milyarlarca akıllı cihazın internet ortamında kontrolü problem olabilmektedir. Ağ trafiğinin güvenliğini sağlayabilmek te bu problemlerden birisidir [4]. Karmaşık ağ yapılarında milyarlarca verinin eş zamanlı kontrolünü sağlayabilmek zor bir süreçtir. Son zamanlarda kötü amaçlı yazılımcılar saldırı yoğunluğunu IoT ve SDN teknolojilerini kullanan cihazlara yönlendirmiştir [5]. Bu teknolojileri kullanan cihazların heterojen bir

\* Sorumlu yazar: [mtogacar@firat.edu.tr](mailto:mtogacar@firat.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-8264-3899

yapıya sahip olması, kullanıcılar tarafından ilgi görmesi, geleneksel ağ yapılarının sistem tarafından kullanılması gibi nedenler kötü amaçlı yazılımcıların yoğunlaşmasındaki faktörler arasındadır [6]. Bütün bunlara rağmen ağ saldırılarının güvenliğini sağlayabilecek teknolojiler de gelişmektedir. Son zamanlarda yapay zekâ tabanlı birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalardan bazıları incelenirse;

Nugraha ve ark. [7] SDN verilerinde oluşabilecek ağ saldırılarının tespiti için evrimsel sinir ağı (ESA) ve uzun kısa süreli bellek (LSTM) modellerini birleştiren bir model tasarladılar. Nugraha ve ark. [7] tasarladıkları model ile %99 genel doğruluk başarıları elde ettiler. Ahuja ve ark. [3] SDN ağlarında DDoS saldırılarının tespiti için hibrit bir makine öğrenme yöntemi tasarladılar. Önerdikleri yaklaşımda rastgele orman (RO) ile destek vektör makinelerini (DVM) birleştirdiler. Ahuja ve ark. [3] önerdikleri yaklaşım ile %98,8 genel doğruluk başarıları elde ettiler. Abdallah ve ark. [8] ağ saldırılarının tespiti için ESA-LSTM hibrit bir model tasarladılar. Ön işlem adımı olarak  $L_2$  düzenleme tekniğini kullandılar. Ön işlem adımı ile aşırı öğrenme probleminin oluşmasını engellediler. Analiz sonuçlarında elde ettikleri genel doğruluk başarıları %96,32'di. Polat ve ark. [9] SDN verilerinde ağ saldırılarının tespiti için makine öğrenme yöntemlerini kullandılar. SDN veri kümesini daha etkili kullanabilmek için özellik seçim yöntemi kullandılar. Ardından yapay sinir ağı (YSA), naif bayes (NB), DVM ve en yakın komşu (EYK) yöntemlerini kullanarak sınıflandırma işlemini gerçekleştirdiler. Sınıflandırma sürecinde en iyi performansı EYK yöntemi verdi ve elde ettikleri genel doğruluk başarıları %98,3'tü. Revathi ve ark. [10] SDN verilerinde gerçekleştirilen ağ saldırılarının tespiti için ayırık ölçeklenebilir bellek tabanlı DVM yöntemini kullandılar. DDoS saldırılarında elde ettiği genel doğruluk başarıları %99,7'di.

Bu çalışmada trafo tabanlı-ESA modeli mimarisini tasarlayarak SDN verilerindeki ağ saldırılarının tespitini başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Ön işlem adımında arşimet optimizasyon algoritması (AOA) kullanılacaktır. AOA yöntemi ile SDN veri kümesinde verimli özelliklerin yer aldığı parametrelerin seçimi gerçekleştirilecektir. Bu çalışmanın diğer bölümleri hakkındaki bilgiler şu şekilde özetlenmiştir. SDN veri kümesi hakkında detaylı bilgiler Bölüm 2'de verilmiştir. Önerilen yaklaşımda kullanılan yöntemler ve model hakkındaki bilgiler Bölüm 3'te verilmiştir. Deneysel analizler ve bulgular Bölüm 4'te yer almıştır. Değerlendirme ve sonuç hakkındaki bilgiler Bölüm 5'te verilmiştir.

## 2. SDN Veri Kümesi

SDN veri kümesinde gerçekleştirilen ağ saldırıları trafik izleme kullanılarak tespit edilmesi mümkündür. Bu veri kümesi günlük olarak gerçekleştirilmiş gerçek zamanlı trafik kayıtlarını içermektedir. Veri kümesindeki kayıtlar paket yakalama arabirimlerinden elde edilmiştir ve ardından bir tablo formatına dönüştürülmüştür. Veri kümesinde 80 özellik yer almaktadır. Bu özelliklerin bir tanesi nitel özellik taşırken, diğer özellikler niceldir. Nicel özelliklerin 24 adedi "float/ondalık" veri tipi ve 55 adedi "int/tamsayı" veri tipidir. Veri kümesinin oluşturulma amacı, ağa gerçekleştirilen saldırıların tespitini gerçekleştirmek içindir. Ayrıca veri kayıtları çeşitli ağ türlerini içererek oluşturulmuştur ve erişime açıktır. Ağ trafiği verilerinde DDoS, sql enjeksiyon, kaba kuvvet, siteler arası betik saldırı türlerini ve normal trafik verilerini içermektedir. Veri kümesi türleri ve kayıt sayısı hakkında detaylı bilgiler Tablo 1'de verildi. Toplam 798.322 kayıt normal ağ trafiğini oluştururken, 390.011 kayıt ağ saldırısı trafiğini oluşturmaktadır [11].

**Tablo 1.** Veri kümesinin trafik türleri ve kayıt sayısı.

Ağ trafik türleri	Kayıt sayısı
Normal	798.322
DDoS	383.439
Sql enjeksiyon	60
Kaba kuvvet	4.550
Siteler arası betik	1.962
Toplam	1.188.333

### 3. Yöntem ve Önerilen Yaklaşım

#### 3.1. Arşimet Optimizasyon Algoritması

AOA yöntemi gerçek hayatta karşılaşılan problemlerin üstesinden gelebilen popülasyon temelli bir optimizasyon algoritmasıdır. AOA yöntemi Arşimet prensibine dayanmaktadır ve bir cismin sıvı içerisine daldırılması ile oluşan kuvvetin gösterdiği eylemden yola çıkarak optimizasyon algoritması geliştirilmiştir. Algoritma için gerçekleştirilen işlem adımları şu şekildedir;

- Cisimlerin/Nesnelerin başlangıç konumu rastgele belirlenir.
- Her bir cismin iterasyon esnasında güncellenen hacim, yoğunluk ve ivmesi vardır. Yoğunluk ve hacim güncellemesi gerçekleşir.
- Nesnelerin hareketleri esnasında birbiriyle çarpışması sonucu oluşan ivme değerleri, her bir iterasyonda güncellenir.
- Nesnelerin hareketsiz kabul edildiği durumlarda da ivme değerleri her bir iterasyonda güncellenir.
- Hareketli ve hareketsiz kabul edilen durumlar için değişim yüzdesi işlemi gerçekleşir ve hızlanma normalleşir.
- Son adımda konum güncellemesi gerçekleştirilir [12].

AOA yönteminin sözde kodu Tablo 2’de belirtildiği gibidir.

**Tablo 2.** AOA yönteminin sözde kodu [13].

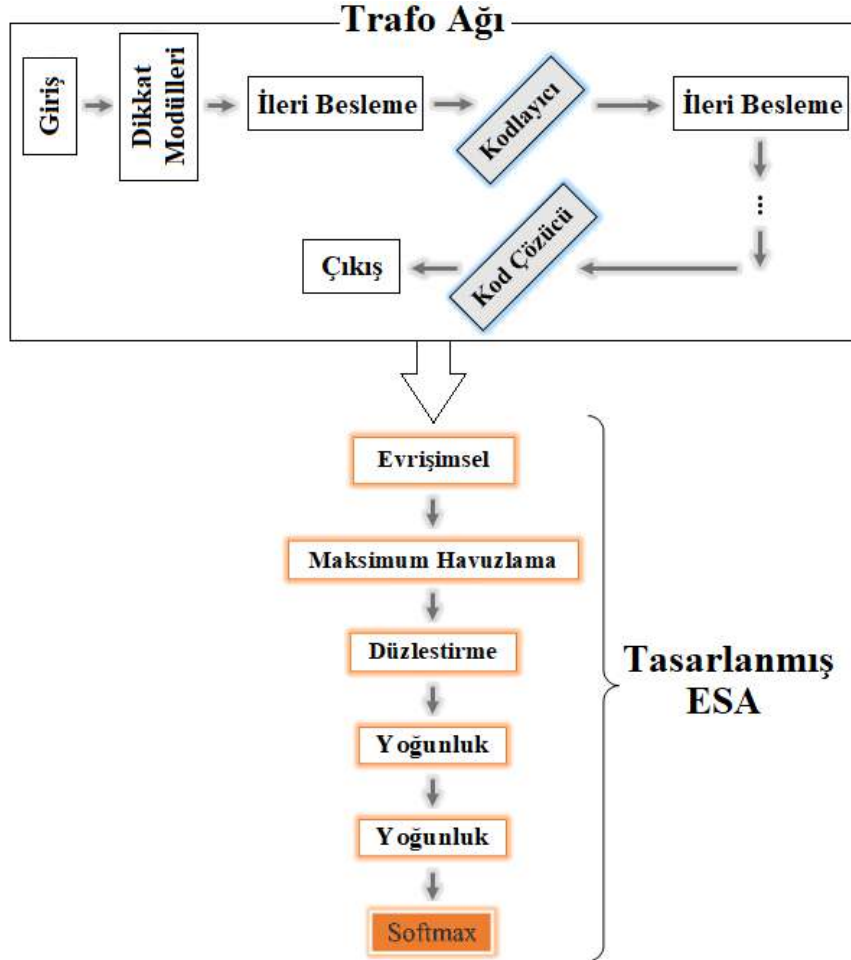
Sözde kod-AOA(popülasyon boyutu, maksimum iterasyon, sabitler, değişkenler)
<pre> Başlangıç değerlerin rastgele seçimi (nesnelere, hacim, yoğunluk, konum, uygunluk fonksiyonu) iterasyon=1 while (iterasyon &lt;= maksimum iterasyon)   for each nesne do     güncelle (nesne_yoğunluk, nesne_hacim)     hesapla (değişim_yüzdesi_faktörü)     if (yüzde_faktörü&lt;=0,5)       normalizasyon (hız-ivme)       güncelle (konum)     else       normalizasyon (hız-ivme)       güncelle (hareket yönü)       güncelle (konum)     end if   end for   hesapla (en iyi uygunluk değeri)   iterasyon=iterasyon+1 end while </pre>

Bu çalışmada AOA yöntemi ön işlem adımı olarak kullanılmıştır ve SDN veri kümesinin tamsayı parametrelerini içeren değerleri işleyerek en iyi niteliklerin seçimi gerçekleştirilmiştir. Böylece daha az ama daha etkili nitelikler seçilerek önerilen yaklaşımın performansına katkı sunması amaçlanmıştır. AOA yönteminin analiz kodları Python dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir [14]. AOA yöntemi için tercih edilen önemli parametre değerleri şunlardır; iterasyon sayısı 1000, popülasyon boyutu 100, minimum hızlandırma parametre değeri 0,1 ve maksimum hızlandırma parametre değeri 0,95 tercih edilmiştir.

#### 3.2. Trafo Tabanlı Evrimsel Sinir Ağı Modeli ve Önerilen Yaklaşım

Trafo ağ mimarisi dikkat mekanizmasına dayalı bir modeldir ve doğal dil işleme uygulamalarında tercih edilmektedir. Trafo ağ mimarisi iki kısımdan oluşmaktadır. Bunlar, kodlayıcı ve kod çözücüdür. Her bir kodlayıcı

blok iki katmandan oluşmaktadır. Bunlar, dikkat modülü katmanı ve ileri besleme katmanıdır. Kod çözücü blok ise üç katmandan oluşmaktadır ve bunlar; kodlayıcı dikkat modülü, kod çözücü dikkat modülü ve ileri besleme katmanıdır. Burada dikkat modülleri benzerlik farkını hesaplayarak daha belirgin özelliklerin seçimine yardımcı olmaktadır ve bir kodlayıcı bloğundan çıkan girdiler ileri besleme katmanı sayesinde kod çözücüsüne aktarılmaktadır [15]. Trafo ağ mimarilerinin performansını artırabilmek için ESA yapılarındaki katmanlar ile hibrit bir model oluşturmak mümkündür. Bu çalışmada Trafo ağ mimarilerinden elde edilmiş veriler, tasarlanmış ESA modeline girdi olarak verilmektedir. Tasarlanan ESA modeli sırasıyla evrişimsel katman [16], havuzlama katmanı [17], düzleştirme katmanı ve yoğunluk katmanlarından [18] oluşmaktadır. ESA modelinin sınıflandırma işlemini gerçekleştirmek için son katmanda Softmax yöntemi [19] tercih edildi. Trafo Tabanlı Evrişimsel Sinir Ağı Modeli (TT-ESA) modelinin genel tasarımı Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. TT-ESA modelinin genel tasarımı.

Önerilen yaklaşım ön işlem adımı (AOA yöntemi) ve TT-ESA modelinin birleştirilmesi ile tasarlanmıştır. AOA yöntemi ile verimli özelliklerin seçimi gerçekleştirilirken, trafo ağı mimarisi ile seçilen veriler dikkat modüllerinden geçirilmiştir. Son işlem adımında ESA modeli ile eğitim-test verileri eğitilerek sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla SDN verilerinde gerçekleştirilen web tabanlı saldırıların tespiti başarılı bir şekilde gerçekleştirilecektir. Önerilen yaklaşımın işlem adımlarını gösteren tasarım Şekil 2'de belirtilmiştir.



Şekil 2. Önerilen yaklaşım ve işlem adımları.

#### 4. Bulgular

Çalışmanın deneysel analizleri Google Colab sunucuları kullanılarak gerçekleştirildi. Önerilen yaklaşımdaki tüm yöntem ve modeller (AOA, trafo ağı, ESA) Python dilinde tasarlandı. Kodların derlenmesinde Jupyter Notebook arayüz yazılımı kullanıldı. Analiz ölçümlerinde karmaşıklık matrisinin metrikleri kullanıldı ve tercih edilen metrikler ve hesaplama formülleri Denklem 1-4 arasında gösterilmiştir. Metrik değerlerinin hesaplanmasında kullanılan kısaltmalar; pozitif (P), negatif (N), doğru (D) ve yanlış (Y) ile temsil edilir [20,21].

$$\text{Duyarlılık} = \frac{DP}{DP+YN} \quad (1)$$

$$\text{Özgünlük} = \frac{DN}{DN+YP} \quad (2)$$

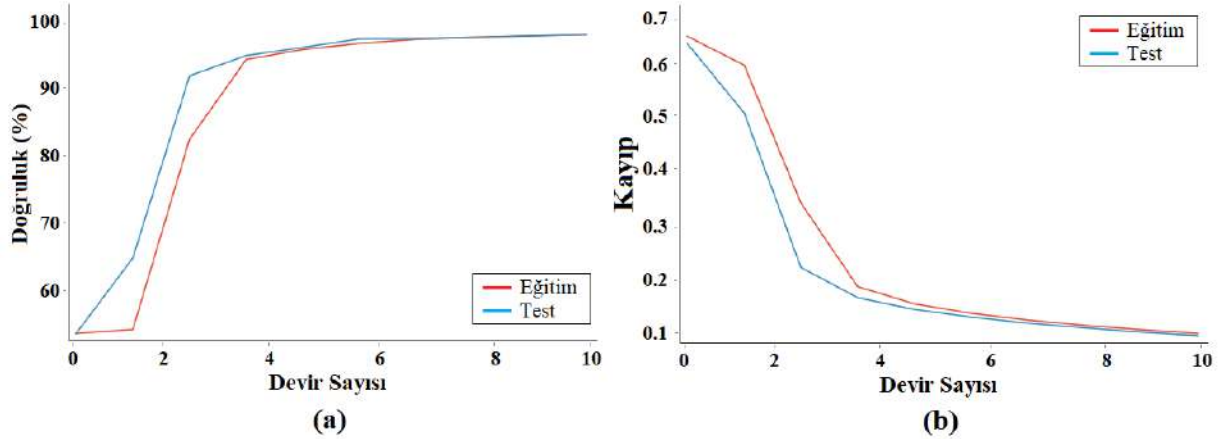
$$\text{F-skor} = \frac{2 \times DP}{2 \times DP + YP + YN} \quad (3)$$

$$\text{Doğruluk} = \frac{DP+DN}{DP+DN+YP+YN} \quad (4)$$

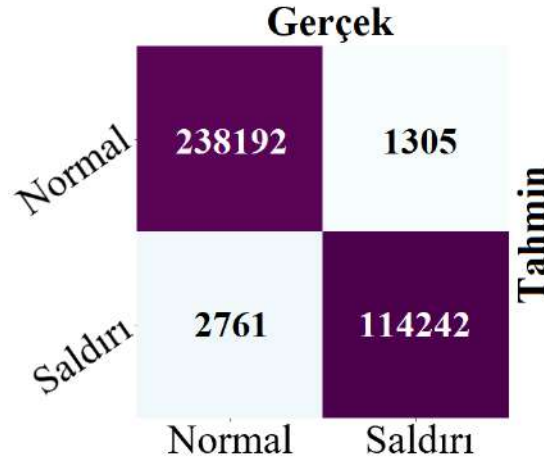
Deney iki bölümden oluşmuştur ve tüm analizlerde veri kümesinin %70'i eğitim verisi olarak kullanılmıştır, %30'u test verisi olarak kullanılmıştır. Modelin eğitimi için tüm analizlerde devir sayısı 10 ve öğrenme oranı  $1e - 4$  tercih edilmiştir. Ayrıca derlenme esnasında aşırı öğrenmeyi engellemek için Keras kütüphanesinden erken durma (early stopping) parametresi [22] kullanılmıştır ve optimizasyon yöntemi için Adamax [23] tercih edilmiştir.

Deneyin birinci bölümünde veri kümesinin 55 özellik parametresi (integer değerler) kullanılarak analiz gerçekleştirilmiştir. Veri kümesinin 24 özellik parametresi (float değerler) önerilen yaklaşımın işlem süresini olumsuz etkileyeceğinden deney analizlerinde kullanılmamıştır. Birinci bölümde 55 özellik sütunu TT-ESA yaklaşım tarafından eğitilmiştir ve eğitim-test başarı grafikleri Şekil 3(a)'da, eğitim-test kayıp grafikleri Şekil 3(b)'de gösterilmiştir. Eğitim esnasında önerilen yaklaşımda AOA yöntemi kullanılmamıştır ve eğitim süresi yaklaşık 2097 saniye sürmüştür. Birinci bölümde elde edilen karmaşıklık matrisi Şekil 4'te gösterildi ve analiz sonuçları ise Tablo 3'te verilmiştir. TT-ESA modeli ile elde edilen genel doğruluk başarısı %98,86'ydı.





Şekil 3. TT-ESA modeli ile gerçekleştirilen analiz grafikleri; a) eğitim-test doğruluk başarıları grafiği, b) eğitim-test kayıp grafiği.



Şekil 4. TT-ESA modeli ile gerçekleştirilen analizin karmaşıklık matrisi.

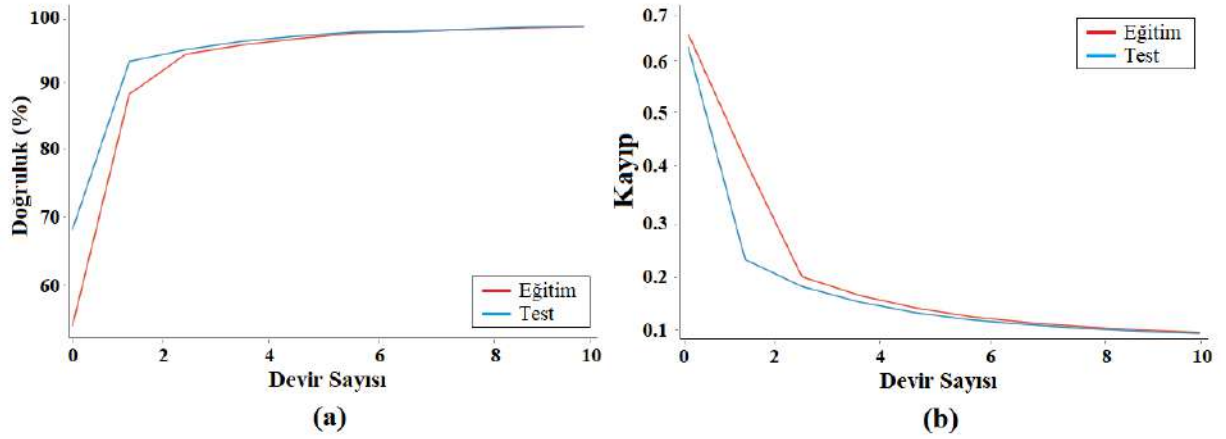
Tablo 3. TT-ESA modeli ile gerçekleştirilen analiz sonuçları (%).

Sınıf	Duyarlılık	Özgünlük	F-skor	Doğruluk
Normal & Saldırı	98,85	98,87	99,15	98,86

Deneyin ikinci bölümünde önerilen yaklaşım kullanılarak analizler gerçekleştirildi. Ön işlem adımı olarak verimli özellik seçimi gerçekleştirildi ve birinci bölümde kullanılmış 55 özellik sütunu arasından en iyi 18 özellik sütunu AOA yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. AOA yöntemi ile seçilmiş özellikler Tablo 4'te gösterilmiştir. Ardından veri kümesindeki 18 özellik sütunu ile TT-ESA modeli eğitilmiştir. Eğitim süresi yaklaşık 834 saniye sürmüştür. İkinci bölümün eğitim-test doğruluk başarı grafikleri Şekil 5(a)'da ve eğitim-test kayıp grafikleri Şekil 5(b)'de gösterilmiştir. Bu bölümden elde edilmiş karmaşıklık matrisi Şekil 6'da gösterilmiştir ve analiz sonuçları Tablo 5'te verilmiştir. Önerilen yaklaşım ile gerçekleştirilen analiz sonucunda %98,94 genel doğruluk başarıları elde edilmiştir. İkinci bölümde AOA yönteminin katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak birinci bölümdeki analiz sonuçlarına göre eğitim süresindeki tasarruf ve performans başarılarındaki artış ikinci bölüm analizlerinde gerçekleşmiştir.

**Tablo 4.** AOA yöntemi kullanılarak seçilmiş verimli özellikler.

No	Özellik	No	Özellik
1	Destination Port	10	Idle Max
2	Fwd PSH Flags	11	Idle Min
3	Bwd PSH Flags	12	act_data_pkt_fwd
4	FIN Flag Count	13	min_seg_size_forward
5	RST Flag Count	14	Flow Duration
6	ECE Flag Count	15	Fwd IAT Max
7	Down/Up Ratio	16	Fwd IAT Min
8	Init_Win_bytes_forward	17	SYN Flag Count
9	Init_Win_bytes_backward	18	Fwd Avg Bulk Rate



**Şekil 5.** Önerilen yaklaşım ile gerçekleştirilen analiz grafikleri;  
a) eğitim-test doğruluk başarıları grafiği, b) eğitim-test kayıp grafiği.

		Gerçek			
		Normal	Saldırı		
Tahmin	Normal	238213	1284		
	Saldırı	2498	114505		
		Normal	Saldırı		

**Şekil 6.** Önerilen yaklaşım ile gerçekleştirilen analizin karmaşıklık matrisi.

**Tablo 5.** Önerilen yaklaşım ile gerçekleştirilen analiz sonuçları (%).

Sınıf	Duyarlılık	Özgünlük	F-skor	Doğruluk
Normal & Saldırı	98,96	98,89	99,21	98,94

## 5. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada SDN paradigmasına dayalı verileri kullanarak yapay zekâ tabanlı bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yaklaşımda ESA modeli ile birlikte Trafo Ağı kullanılmıştır. Ön işlem adımı olarak popülasyon tabanlı AOA yöntemi tercih edilmiştir. AOA yöntemi bu çalışmada sürekli optimizasyon yaklaşımı ile probleme çözüm üretti ve SDN veri kümesindeki verimli özelliklerin seçilmesinde etkin bir rol aldı. Veri kümesi birkaç saldırı türlerini (SQL enjeksiyon, dağıtılmış hizmet reddi, kaba kuvvet vb.) içermektedir. Bu çalışmada saldırı türleri "saldırı" sınıfı olarak adlandırılmıştır ve ağ trafiğindeki diğer eylemler ise "normal" olarak sınıflandırılmıştır. İkili sınıflandırma ile gerçekleşen analizlerde %98,94 genel doğruluk başarısı elde edilmiştir. Sınıf türlerindeki dengesiz dağılımdan dolayı F1-skor başarıları da ölçülmüştür. Deney analizlerinde F1-skor değeri %99,15'ten %99,21'e arttığı gözlemlenmiştir.

Önerilen yaklaşımın avantajları;

- Yapay zekâ tabanlı bir yaklaşıma sahip olması,
- SDN, IoT teknolojilerinde ağ saldırılarının tespitinde başarılı bir model olması,
- AOA yönteminin web saldırıları tespitinde etkin bir özellik seçimine sahip olması,
- Önerilen yaklaşımın AOA yöntemi sayesinde zamandan tasarruf sağlayabilmesi,

Önerilen yaklaşımın dezavantajları;

- Uçtan uca bir model olmaması,
- Önerilen yaklaşımdaki yöntem veya modellerin el ile çalıştırılması (otomatik başla-bitiş olmaması).

Gelecek çalışmada, önerilen yaklaşıma alternatif olarak farklı meta-sezgisel optimizasyon yöntemleri ve diğer derin öğrenme yaklaşımları sisteme dahil edilerek uçtan uca bir model tasarlanacaktır. Ayrıca, IoT ve SDN paradigmalarından oluşmuş gerçek zamanlı veri kümeleri kullanarak analizler gerçekleştirilecektir.

## Kaynaklar

- [1] S.K. Tayyaba, M.A. Shah, O.A. Khan, A.W. Ahmed, Software Defined Network (SDN) Based Internet of Things (IoT), in: Proc. Int. Conf. Futur. Networks Distrib. Syst., ACM, New York, NY, USA, 2017: pp. 1–8. doi:10.1145/3102304.3102319.
- [2] H. Polat, M. Turkoglu, O. Polat, Deep network approach with stacked sparse autoencoders in detection of DDoS attacks on SDN-based VANET, IET Commun. 14 (2020) 4089–4100. doi:10.1049/iet-com.2020.0477.
- [3] N. Ahuja, G. Singal, D. Mukhopadhyay, N. Kumar, Automated DDOS attack detection in software defined networking, J. Netw. Comput. Appl. 187 (2021) 103108. doi:10.1016/j.jnca.2021.103108.
- [4] I. Haque, D. Saha, SoftIoT: A resource-aware SDN/NFV-based IoT network, J. Netw. Comput. Appl. 193 (2021) 103208. doi:10.1016/j.jnca.2021.103208.
- [5] S. Javanmardi, M. Shojafar, R. Mohammadi, A. Nazari, V. Persico, A. Pescapè, FUPE: A security driven task scheduling approach for SDN-based IoT–Fog networks, J. Inf. Secur. Appl. 60 (2021) 102853. doi:10.1016/j.jisa.2021.102853.
- [6] M.V.O. de Assis, L.F. Carvalho, J.J.P.C. Rodrigues, J. Lloret, M.L. Proença Jr, Near real-time security system applied to SDN environments in IoT networks using convolutional neural network, Comput. Electr. Eng. 86 (2020) 106738. doi:10.1016/j.compeleceng.2020.106738.
- [7] B. Nugraha, R.N. Murthy, Deep Learning-based Slow DDoS Attack Detection in SDN-based Networks, in: 2020 IEEE Conf. Netw. Funct. Virtualization Softw. Defin. Networks, IEEE, 2020: pp. 51–56. doi:10.1109/NFV-SDN50289.2020.9289894.
- [8] M. Abdallah, N. An Le Khac, H. Jahromi, A. Delia Jurcut, A Hybrid CNN-LSTM Based Approach for Anomaly Detection Systems in SDNs, in: 16th Int. Conf. Availability, Reliab. Secur., ACM, New York, NY, USA, 2021: pp. 1–7. doi:10.1145/3465481.3469190.
- [9] H. Polat, O. Polat, A. Cetin, Detecting DDoS Attacks in Software-Defined Networks Through Feature Selection Methods and Machine Learning Models, Sustainability. 12 (2020) 1035. doi:10.3390/su12031035.
- [10] M. Revathi, V. V. Ramalingam, B. Amutha, A Machine Learning Based Detection and Mitigation of the DDOS Attack

- by Using SDN Controller Framework, *Wirel. Pers. Commun.* (2021). doi:10.1007/s11277-021-09071-1.
- [11] S. Chakraborty, SDN Intrusion Detection, 2021. (2021). <https://www.kaggle.com/subhajournal/sdn-intrusion-detection> (accessed November 16, 2021).
- [12] F.A. Hashim, K. Hussain, E.H. Houssein, M.S. Mabrouk, W. Al-Atabany, Archimedes optimization algorithm: a new metaheuristic algorithm for solving optimization problems, *Appl. Intell.* 51 (2021) 1531–1551. doi:10.1007/s10489-020-01893-z.
- [13] E.H. Houssein, B.E. Helmy, H. Rezk, A.M. Nassef, An enhanced Archimedes optimization algorithm based on Local escaping operator and Orthogonal learning for PEM fuel cell parameter identification, *Eng. Appl. Artif. Intell.* 103 (2021) 104309. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2021.104309>.
- [14] N. Van Thieu, Archimedes optimization algorithm code, 2021. (2021). [https://github.com/thieu1995/mealpy/blob/master/mealpy/math\\_based/AOA.py](https://github.com/thieu1995/mealpy/blob/master/mealpy/math_based/AOA.py) (accessed November 19, 2021).
- [15] H. Wang, W. Li, DDosTC: A Transformer-Based Network Attack Detection Hybrid Mechanism in SDN, *Sensors.* 21 (2021) 5047. doi:10.3390/s21155047.
- [16] V. Tümen, B. Ergen, Intersections and crosswalk detection using deep learning and image processing techniques, *Phys. A Stat. Mech. Its Appl.* 543 (2020) 123510. doi:10.1016/j.physa.2019.123510.
- [17] E. Başaran, Z. Cömert, A. Şengür, Ü. Budak, Y. Çelik, M. Toğaçar, Chronic Tympanic Membrane Diagnosis based on Deep Convolutional Neural Network, in: 2019 4th Int. Conf. Comput. Sci. Eng., 2019: pp. 1–4. doi:10.1109/ubmk.2019.8907070.
- [18] M. Liu, F. Li, H. Yan, K. Wang, Y. Ma, L. Shen, M. Xu, A multi-model deep convolutional neural network for automatic hippocampus segmentation and classification in Alzheimer’s disease, *Neuroimage.* 208 (2020) 116459. doi:<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.116459>.
- [19] A. Ahmed, K. Shaalan, S. Toral, Y. Hifny, A Multimodal Approach to Improve Performance Evaluation of Call Center Agent, *Sensors (Basel).* 21 (2021) 2720. doi:10.3390/s21082720.
- [20] N. Tötsch, D. Hoffmann, Classifier uncertainty: evidence, potential impact, and probabilistic treatment, *PeerJ Comput. Sci.* 7 (2021) e398. doi:10.7717/peerj-cs.398.
- [21] A. Arı, Ö.F. Alçın, D. Hanbay, Brain MR Image Classification Based on Deep Features by Using Extreme Learning Machines, *Biomed. J. Sci. Tech. Res.* 25 (2020). doi:10.26717/bjstr.2020.25.004201.
- [22] Y. Bai, E. Yang, B. Han, Y. Yang, J. Li, Y. Mao, G. Niu, T. Liu, Understanding and Improving Early Stopping for Learning with Noisy Labels, (2021). <http://arxiv.org/abs/2106.15853>.
- [23] M.K. Bohmrah, H. Kaur, Classification of Covid-19 patients using efficient fine-tuned deep learning DenseNet model, *Glob. Transitions Proc.* 2 (2021) 476–483. doi:10.1016/j.glt.2021.08.003.



## Sürü İnsansız Hava Araçlarının Görev Paylaşımı için Genetik Algoritma Tabanlı Bir Yaklaşım

Ebru KARAKÖSE<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Havacılık Elektrik ve Elektronik Bölümü, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye  
<sup>1</sup> eozbay@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 21/11/2021;

Kabul/Accepted: 22/12/2021)

**Öz:** İnsansız Hava Aracı (İHA) öncelikle savunma ve kamusal alanlarda kullanılmaya başlamış daha sonra kullanım alanları giderek artmıştır. İHA'ların teknolojik gelişimleri ve otonom bir şekilde görevlerini gerçekleştirmeleri açısından büyük önem taşıyan optimizasyon çalışmaları, yapılan bilimsel uygulamalarda önemli bir yere sahiptir. Askeri ve diğer tüm kullanım alanlarında büyük etkileri olan İHA'ların görev planlamalarının, görev icraları sırasında ortaya çıkan yüksek maliyet nedeniyle verimli bir şekilde hazırlanması gerekmektedir. Bu çalışmada, İHA'ların hedeflerine görevlendirilirken farklı koşullara ve parametrelere göre hedef dağılımlarının en uygun şekilde yapılabilmesi için bir inceleme yapılmış ve genetik algoritma kullanılarak çözümler sunulmuştur. Birden çok İHA'nın hedeflere ulaşmak için izleyeceği yol, yoldaki engeller hesaba katılarak seçilmiştir. Aynı zamanda, hedeflerdeki düşman sayısına göre o hedefe kaç İHA'nın görevlendirileceğini belirlemek bu çalışmanın temel amaçlarından birisidir. Hedeflerde bulunan düşman sayısına göre görev dağılımı gerçekleştirilirken İHA'ların hedeflere olan uzaklığı da dikkate alınmıştır. Ek olarak, güzergâhı takip ederken düşmanlar ile karşılaşacak olan İHA'ların harcadıkları enerjinin en aza indirilmesi de hedeflenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** İnsansız Hava Araçları, Sürü İHA, Görev Planlama, Genetik Algoritma.

### A Genetic Algorithm-Based Approach for Mission Sharing of Unmanned Aerial Vehicles Swarm

**Abstract:** Unmanned aerial vehicle (UAV) has started to be used primarily in defense and public areas then their usage areas have gradually increased. Optimization studies, which are of great importance in terms of the technological development of UAVs and their autonomous missions, have an important place in scientific applications. The mission planning of UAVs, which have great effects on military and all other usage fields, must be prepared efficiently due to the high cost incurred during mission execution. In this study, an investigation has been made in order to make optimum target distributions according to different conditions and parameters while the UAVs have been deployed to their targets and solutions have been presented using genetic algorithm. The path that multiple UAVs will follow to reach their targets has been chosen by taking into account the obstacles on the path. At the same time, one of the main purposes of this study is to determine how many UAVs will be deployed to that target according to the number of enemies on the targets. The distance of the UAVs to the targets has been also taken into account while performing the distribution of missions according to the number of enemies on the targets. Moreover, it has been aimed to minimize the energy consumed by the UAVs that will encounter the enemies while following the route.

**Key words:** Unmanned Aerial Vehicles, Swarm UAV, Mission Planning, Genetic Algorithm.

#### 1. Giriş

İnsansız Hava Aracı (İHA), keşif, gözlem, afet ya da kaza durumlarında arama-kurtarma, hedef takibi, trafik denetimi, lojistik gibi birçok alanda etkin bir biçimde kullanılmaktadır. Uzaktan operatör kontrolü ile ya da otonom olarak hareket ederek görev yapan İHA'lar açısından teknolojilerinin hızla gelişmesine rağmen hala üzerinde durulması ve çalışılması gereken birçok alan bulunmaktadır. İHA'lar ile daha önce yapılması zor, karmaşık veya imkansız olan, hayati risk taşıyan görevler daha az tehlike ve risk ile başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Özellikle uzun süreli ve yorucu görevlerde insan faktöründen kaynaklanan hatalar daha azalmakta ve hayati risk taşıyan görevler sorunsuz bir şekilde yerine getirilmektedir. Farklı özelliklerde, yapılarda ve çeşitlerde olan İHA'lar farklı görevler için kullanılabilir. Sahip oldukları yetenekleri her geçen gün arttırılan İHA'ların buna paralel olarak kullanım alanları da giderek genişlemektedir. Üzerlerine yerleştirilen sensörlerin sayısının ve türünün artmasıyla gerçekleştirdikleri görevler de değişmekte ve artmaktadır. Bir görev ya da görevin farklı aşamaları için bir İHA yerine birden çok İHA'yı aynı anda görevlendirmenin hem görevin başarısı hem de süresi açısından büyük avantajlar sağlayacağı açıktır. Bir İHA kullanarak oluşabilecek olan faydalı yük taşıma, enerji,

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

boyut, süre, performans, kaza ve İHA kaybı ile ilgili sınırlamalar çoklu ya da sürü İHA'ların kullanımı ile önemli ölçüde azalmaktadır [1-4].

Birden fazla İHA'nın bir araya gelerek aynı anda aynı görevi veya aynı görevin farklı kısımlarını yerine getirmesi ile İHA sürüleri oluşturulmaktadır. Sürü İHA uygulamalarında, görev planlamasını, karar verme sürecini ve bu sürecin aşamalarını iyi belirlemek büyük önem arz etmektedir. Ayrıca, bu çok sayıdaki farklı İHA'lar arasındaki etkileşimi, iletişimi ve uyumu sağlamak gerekmektedir. Sürü İHA'lar görevlerini yerine getirirken birbirleri ile iletişimleri sorunsuz gerçekleşirse ve iyi bir koordinasyon sağlanırsa, işbirliği içinde verimli bir görev paylaşımı sunabilirler. Bu nedenle, sürü İHA'larda, görev dağılımı, karar verme mekanizması, yol planlaması, koordinasyon ve bu durumların denetlenebilirliği üzerinde durulması gereken başlıca alanlardır [5-8].

Farklı algoritmaların kullanıldığı sürü İHA uygulamalarına ilişkin literatürde birçok çalışma mevcuttur [9-12]. Brust vd. [13], farklı görevler için kullanılabilir olan İHA sürüleri ile belirli bir uçuş bölgesinde bulunmaması gereken İHA'ların çıkarılması ve uzaklaştırılması için güvenlik sistemi oluşturmuşlardır. Bir simülasyon tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntem bu simülasyon ile birçok açıdan değerlendirilmiş özellikle iletişim kayıplarının azalması açısından başarılı sonuçlar elde edildiği vurgulanmıştır. Braga vd. [14] sürü İHA'larda birlikte hareket kabiliyetini sağlayabilmek ve gaz sızıntısını tespit etmek için önerilen kontrol algoritması olarak parçacık sürü optimizasyonu algoritmasını kullanmışlardır. Sürü halinde hareketi ve çarpışmayı önlemek için gerekli olan kurallardan bahsedilmiş ve sistem bunlara uygun tasarlanmıştır. Algoritmayı gerçekleştirmek için C++ kullanılmış ve gerçekleştirilen simülasyonda İHA'lar gaz kaçağının olduğu noktaya yönelerek başarı göstermişlerdir.

Ayrıca, literatürde İHA'lar için farklı algoritmalar kullanılarak yol planlaması ve görev dağılımının gerçekleştirildiği çalışmalar da bulunmaktadır [15-20]. Galvez vd. [21] genetik algoritmayı, dört rotorlu bir İHA için belirlenen başlangıç ve varış noktası arasında engellerinde bulunduğu yollar içerisinde en kısa yolu bulma amacıyla kullanmışlardır. Elde edilen simülasyon sonuçları incelendiğinde İHA en iyi yolu bularak engellere takılmadan hedefe varmıştır. Bagherian ve Alos [22], engellerden kaçınmak için üç boyutlu arazi modelini, coğrafi bilgi sistemi ve dijital arazi modeli kullanarak oluşturmuşlardır. Genetik algoritma ve parçacık sürü optimizasyonu için Matlab ve C++ kullanılarak algoritmalar gerçekleştirilmiş ve simülasyon sonuçları elde edilerek karşılaştırılmıştır. Engellerin ve düşmanların bulunduğu ortamlarda bir İHA için yol planlamaları yapılarak en uygun çözüm bulunmaya çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre her iki algoritma ile çok iyi sonuçlara varıldığı ancak parçacık sürü optimizasyonunun daha az hesaplama yaptığı ve genetik algoritmanın da daha iyi çözümler sunduğu belirtilmiştir. İlerde daha iyi sonuçlar elde etmek için algoritmaların genişletilebileceğinden ve başka algoritmalar ile birlikte kullanılacaklarından bahsedilmiştir.

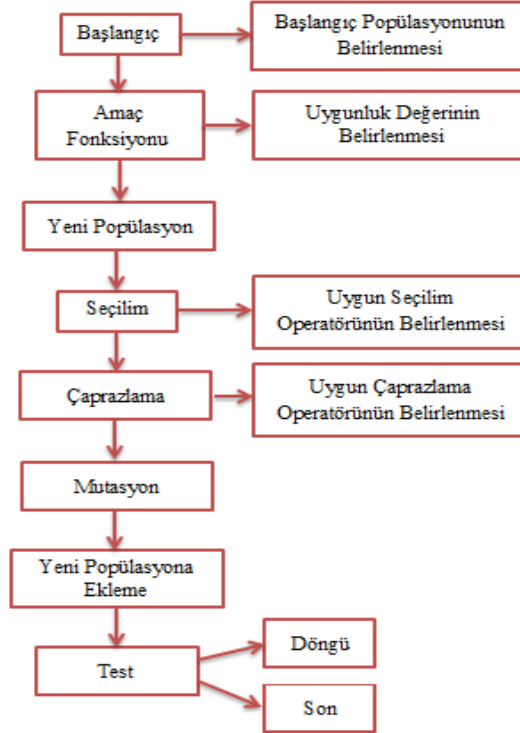
İHA'larda görev planlaması yapılırken belirlenen birden çok hedefe, çok sayıda İHA belirli amaçlar dikkate alınarak dağıtılmaktadır. Her İHA için hedef seçimi yapılırken ortamda bulunan engeller, düşman sayısı, hava koşulları ve çevresel faktörler de göz önüne alınmalıdır.

Bu çalışmada birden çok İHA hedeflere gideceği yolu, yoldaki engelleri hesaba katarak seçeceği gibi aynı zamanda hedeflerin önemini belirten bir etmene göre belirleyecektir. Hedeflerin önemi düşmanlar olarak belirlenmiştir. Hedeflerdeki düşman sayısına göre o hedefe kaç İHA'nın görevlendirileceğini belirlemek bu çalışmanın temel amaçlarından birisidir. Hedeflerde olan düşman sayısına göre görev dağılımı yapılırken İHA'ların hedeflere olan uzaklığı da göz önüne alınmalıdır. Kısacası hedeflerdeki düşmanlarla karşılaşacak İHA grupları seçilirken İHA'ların güzergahı takip etmek için harcadığı enerji en az seviyede olmalıdır. Belirtilen optimizasyon probleminin çözümü için Genetik Algoritma (GA) önerilmiştir. GA, doğadaki evrim sürecinin doğal seçim evresini taklit eden bir optimizasyon yöntemidir. Daha iyi çözümlerin üretilmesi için GA'da amaç fonksiyonun önemi büyüktür. Üretilen yeni sonuçlar uygunluk değerine göre değerlendirilmekte ve bu üretilen yeni çözümlerden daha iyi çözümler üretmek hedeflenmektedir. Amaç fonksiyonu uygulanırken iki faktöre önem verilmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi hedeflerdeki düşman sayısına göre o hedefe atanacak İHA sayısı ve İHA'ların hedeflere olan uzaklığı hesaba katılarak amaç fonksiyonu oluşturulmuştur.

## 2. Genetik Algoritma (GA)

Optimizasyon, bir sorunu çözmek için var olan çözümlerin iyileştirilmesi, geliştirilmesi ya da daha üstün olanını bulmak için işlemler yapılması olarak ifade edilebilir. GA, 1970'li yıllarda geliştirilen, zorlu ve karmaşık sorunları çözmek amacıyla kullanılan, yapay zeka tekniklerinden faydalanan modern bir optimizasyon algoritmasıdır. Temeli gerçek hayatta canlıların doğal seçim ilkesine ve genetik aşamalarına dayanmaktadır. GA çalışmalarında gen, kromozom ve popülasyon gibi terimler önemli rol oynamaktadır. Dünya üzerindeki bütün canlıların tüm özelliklerini belirleyen moleküle DNA denilmektedir. DNA'nın belirli bir kısmı geni, genlerin birleşimi kromozomları ve kromozomların birleşimi popülasyonları oluşturmaktadır. Adaptasyon problemi

olmayan ve daha güçlü olan bireyler doğal seçim ve en iyinin hayatta kalma prensiplerine daha çok uyarlar. Böylece en iyi ebeveynlerden oluşan popülasyondaki bireylerde daha uyumlu ve kaliteli olurken kötü ve uyumsuz bireyler ise popülasyondan uzaklaştırılmış olurlar. Nesiller ilerledikçe kalitenin artması ve sonunda en iyiye ulaşılması beklenmektedir. En iyilerin hayatta kalma ilkesine dayanan GA'da, doğru kodlanmış bireylerin oluşturduğu popülasyonlar söz konusudur ve bir başlangıç fonksiyonu seçilerek işe başlanır. GA, temel olarak seçim, çaprazlama ve mutasyon adında üç adımdan oluşmaktadır. GA işlem aşamaları Şekil 1'de verilmiştir. Popülasyondaki her bir birey kendisine ait bir çözüm barındırmaktadır ve bu çözüm taşıyan her birey belirli bir amaç (uygunluk) fonksiyonundan geçirilerek puanlandırılmaktadır. Amaç fonksiyonunun GA için önemi büyüktür. Çünkü bu sayede hangi bireyin daha iyi, hangi bireyin daha kötü sonuç taşıdığı belirlenmektedir. Amaç fonksiyonlarının ürettiği değere uygunluk değeri adı verilmektedir [23, 24].



Şekil 1. GA işlem adımları.

## 2.1. Seçim

Seçim, uygunluk değeri hesaplanan bireylerin belirli bir seçim operatöründen geçirilerek en iyi sonuç veren bireylerin hayatta kalmasına dayanır. Uygunluk değeri yüksek olan bireyler ebeveynler olarak eşleştirilirler böylece yeni neslin bireylerinin hayatta kalma ve ileriki nesilleri oluşturma ihtimalleri artmaktadır. Popülasyondaki bireylerin uygun bir şekilde seçilmesi için çeşitli seçim yöntemleri geliştirilmiştir. Seçim operatörünün büyük öneme sahip olduğu GA'da turnuva, rulet çemberi, sıralı, elitizm, sabit durum seçimi gibi seçim yöntemleri örnek olarak verilebilmektedir. Turnuva seçiminde uygunluk değerleri hesaplanmış bir popülasyondan k adet birey rastgele bir biçimde seçilir ve bu k adet bireylerden en iyi sonuç vermiş olan birey ebeveyn olarak seçilir. Bu işlem bir kez daha tekrarlanarak ikinci bir ebeveyn seçilir. Literatürde k-turnuva seçilimi olarak geçer. Buradaki k parametresi, ebeveyn seçiliminin kaç birey arasında yapılacağını belirler. Rulet tekerleği seçiminde popülasyondaki bireylerin uygunluk değerleri hesaplandıktan sonra tüm bireylerin uygunluk değerlerine göre oranları belirlenir ve bu oran kadar tekerlek üzerinde seçilme olasılıkları vardır. Uygunluk değeri arttıkça kapladıkları alan artmaktadır böylece seçilme olasılıkları da aynı oranda artmaktadır. Elitizm (seçkinlik) seçiminde diğer seçimlerden farklı olarak iyi çözüm veren bireylerin çocuklarının da iyi çözüm barındırma ihtimali yüksek olduğundan bu iyi çözüm veren bireyler hayatta kalarak bir sonraki nesle aktarılmaktadır. Böylece gelecek nesillerde zayıf bireyler yer almazken daha güçlü nesiller elde edilmektedir.



## 2.2. Çaprazlama

GA'da farklılığı oluşturan en önemli adımlardan biri çaprazlama aşamasıdır. Seçim yöntemleri yardımıyla belirlenen bireylerden yeni bireyler oluşturmak amacıyla çaprazlama operatörlerinden faydalanılmaktadır. Çaprazlama ile daha önce seçilen uygunluk değeri yüksek olan güçlü bireylerden daha güçlü bireyler elde edilmesi amaçlanmaktadır ancak her zaman oluşan yeni bireyin ebeveyn bireylerden daha güçlü ve uyumlu olma garantisi yoktur. Çaprazlama aşamasında da tek nokta, iki nokta, çok nokta ve tekdüze (uniform) çaprazlama gibi farklı yöntemler bulunmaktadır. Tek nokta çaprazlama ile rastgele belirlenen bir noktadan bireylerin genleri ayrılmakta ve bireylerden birinde sınırdan önceki diğerinde ise sınırdan sonraki genler kullanılarak yeni birey oluşturulmaktadır. Tek nokta çaprazlama için bir örnek Şekil 2'de verilmiştir.

$$\begin{array}{l} 1. \text{ Birey} \rightarrow 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \\ 2. \text{ Birey} \rightarrow 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \\ \text{Yeni Birey} \rightarrow 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \end{array}$$

Şekil 2. Tek nokta çaprazlama.

İki nokta çaprazlamada genler iki noktadan ayrılarak her iki bireyden de belirli miktarda genler alınmakta yeni birey oluşturulmaktadır. Çok nokta çaprazlamada ise ebeveynlerin genleri birçok noktadan ayrılmakta ve karşılıklı değişim ile yeni bireyler oluşturulmaktadır. Tekdüze çaprazlamada her iki bireyden eşit miktarda gen alınarak yeni birey oluşturulmaktadır. Tekdüze çaprazlama için Şekil 3'te bir örnek verilmiştir. Rastgele tekdüze çaprazlama tekdüze çaprazlamanın bir çeşididir, öncelikle birinci bireyden rastgele bir gen alınarak işleme başlanır daha sonra ikinci bireyden rastgele bir gen alınır, belirlenen gen sayısına ulaşıncaya kadar sıra ile her bir bireyden gen alınarak işleme devam edilir ve sonuçta yeni birey oluşturulur.

$$\begin{array}{l} 1. \text{ Birey} \rightarrow 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \\ 2. \text{ Birey} \rightarrow 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \\ \text{Yeni Birey} \rightarrow 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \end{array}$$

Şekil 3. Tekdüze çaprazlama.

## 2.3. Mutasyon

Mutasyon aşamasında çaprazlama işleminden sonra oluşan yeni birey belirli bir olasılıkla mutasyon işlemine tabi tutulur. Burada amaç hem ileriki nesillerde benzer bireylerin oluşmasını engelleyerek çeşitlilik oluşturmak hem de arama uzayını genişletip daha detaylı bir arama ile en iyi ve güçlü bireylerin ortaya çıkmasını sağlamaktır. Mutasyon işlemi bireylerdeki genler üzerinde yapılır ve mutasyon oranı kadar gen değiştirilerek sona erdirilir. Şekil 4'te verilen bireyde bitlerden rastgele biri seçilerek mutasyon işlemine tabi tutulmuş ve yeni bir birey oluşması sağlanmıştır [25, 28].

$$\begin{array}{l} \text{Yeni Birey} \rightarrow 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \\ \text{Mutasyon Sonrası Yeni Birey} \rightarrow 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \end{array}$$

Şekil 4. GA'da mutasyon.

## 3. Materyal ve Yöntem

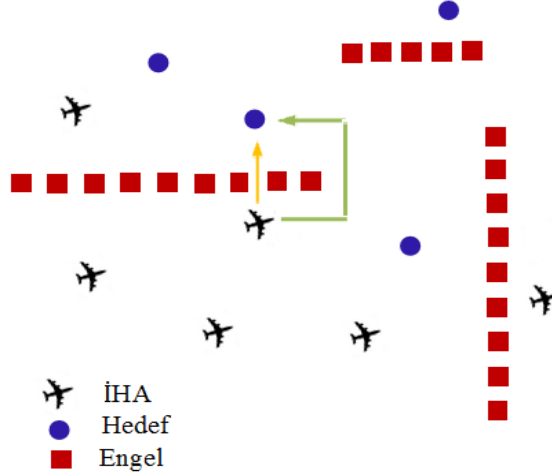
Bu çalışmada, önerilen yöntem için İHA'ların hedeflere olan uzaklığı önemli bir parametredir. İHA'larda görev planlaması yapılırken enerji tasarrufu ve görev süresinin kısalması açısından istenen hedefe en kısa yoldan erişimin sağlanması önem arz etmektedir. Hedeflenen yöntemde, gerekli mesafeleri hesaplamak amacıyla ortamda bulunan engellerin de dikkate alınacağı Dijkstra algoritması kullanılmıştır. Dijkstra algoritması başlangıç pozisyonundan hedef pozisyona olan en kısa yolu bulmak amacıyla kullanılan bir arama yöntemidir. İHA'lar hedeflerine ulaşmak için ilerlerken yolda engellerle karşılaşmaktadır. Dijkstra algoritması İHA açısından en kısa yolu, yolda bulunan bu engelleri dikkate alarak bulmaktadır.

Dijkstra algoritması, bir matematikçi olan Hollandalı Edsger Wybe Dijkstra tarafından geliştirilen, graf teorisine dayanan ve bu graf üzerindeki en kısa yolu bulma amacıyla kullanılan bir algoritmadır. Bir grafi, 2 boyutlu düzlemde ziyaret edilebilecek olan noktaların düğüm (node), düğümler arasındaki yolların kenar (edge) olarak ifade edildiği bir şekil olarak düşünebiliriz. Dijkstra algoritması ile düğümler arasındaki yolların (kenarların) değerleri belirtilir. Başlangıç düğümünden diğer düğümlere olan yolların değerleri belirlendikten sonra diğer düğümler arasında da aynı işlem tekrarlanır ve algoritma bu şekilde devam eder. Bütün değerler hesaplandıktan sonra istenen iki nokta arasındaki en kısa yolu Dijkstra algoritması düğümler arasındaki kenar uzunluklarını dikkate alarak hesaplamaktadır.

Bu çalışmada, öncelikle GA çalıştırılarak üzerine düşeni yapacak daha sonra İHA'ların görev dağılımı yapılacak ve İHA'lar hedeflerine giderken yol olarak Dijkstra algoritmasının bulunduğu güzergahı takip edeceklerdir. İHA'lara belirlenen düzlemlerde engellere takılmadan sorunsuz bir uçuş sağlamak için engellerin bulunduğu noktalar düzlemden çıkarılacaktır.

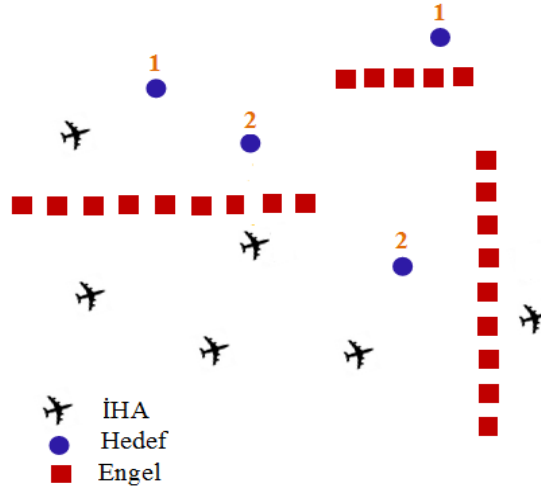
#### 4. Uygulama ve Başarımlar

Bu çalışmada, farklı şekilde konumlandırılmış birden çok İHA'nın düşman koruması altındaki hedeflere olan uzaklıkları temel alınarak en iyi çözümlerle nasıl görevlendirileceği üzerine uygulamalar yapılmıştır. İHA'larda görev dağılımı yapılırken hedeflere olan uzaklıkları dikkate alınmış ve uzayımızda engellerde söz konusu olduğu için bu işlemde öklit bağıntısı kullanmak yerine engellerin de dikkate alındığı Dijkstra algoritması kullanılmıştır. Uzaydaki engellerin kapsama alanındaki çizgiler çıkarılarak geriye kalan çizgilerle bir en kısa yol hesabı yapılmaktadır. Şekil 5'te, İHA görev planlaması için örnek bir uzay gösterilmiştir.



Şekil 5. Bir İHA'nın örnek uzayda izlemesi gereken yol.

İHA'ların, hedeflerin ve engellerin açıkça belirtildiği Şekil 5'de her bir İHA için öklit uzaklığı dikkate alınarak görev ataması yapılacak olursa, belirlenen İHA sarı ile gösterilen yolu tercih edecektir. Ancak örnek uzayda engeller bulunduğundan dolayı belirlenen İHA'nın gösterilen hedefe yeşil ile belirtilen güzergah üzerinden gitmesi gerekmektedir. Bu şekilde öklit bağıntısından farklı olarak yol güzergahı ve uzunluğu değişecek, bu da sonuçları etkileyecektir. İHA'larda görev paylaşımı başarılı bir şekilde yapıldığında İHA'lar görevlendirildikleri hedeflere doğru yol almaya başlayacaklardır. İHA'lar kendi hedeflerine doğru hareket ederken hedeflerde bazı değişiklikler meydana gelebilir. Örneğin bir hedefteki düşman sayısı değişiklik gösterdiğinde veya düşmanlardan biri hedef değiştirmek üzere başka bir hedefi korumaya gittiğinde, bu olay sistem tarafından gözlemlenip İHA'ların o anki yeni pozisyonuna göre GA çalıştırılacak ve yeni bir görev dağılımı yapılacaktır. Tekrar hedeflerdeki düşman sayılarını dengelemek adına farklı hedefler seçilecek ve İHA'lar kaldıkları yerden farklı hedeflere yönelerek hareketlerine devam edeceklerdir. Hedeflerdeki düşman sayısı değişken olduğu için hangi hedefe kaç İHA gideceği hesaplanmalıdır. Örneğin, bir hedefte iki düşman gözlemlenirse, o hedefe en az iki adet İHA görevlendirilmesi planlanmaktadır. Hedefler için belirlenen düşman sayısı, örnek uzay için hedefler üzerindeki rakamlarla Şekil 6'da belirtilmiştir. Tasarlanan sistemde, İHA'lar düşman sayıları önceden bilinen hedeflere öyle dağıtılmalıdır ki hem hedeflerdeki düşman sayısı kadar İHA görevlendirilmeli hem de bu görevlendirilen İHA'ların kat ettiği mesafeler minimum olmalıdır. Bu nedenle, 6 adet İHA, 6 adet düşmanın farklı sayılarda yerleştirildikleri hedeflere, düşman sayılarına göre görevlendirilmişlerdir. Bu sayede, hem enerjiden hem de zamandan tasarruf sağlanması amaçlanmaktadır.



Şekil 6. Örnek uzay için hedeflerdeki düşman sayısı.

Bu çalışmada, bahsedilen optimizasyon problemlerini çözmek amacıyla GA önerilmiştir. Bunun için GA'da bireylerin sahip olduğu kromozom bilgisi dizi şeklinde tutulmuştur.

[ 0 1 2 2 3 0 ]

Görüldüğü gibi 6 adet elemanı bulunan dizi, bir bireyin sahip olduğu görev dağılımını içermektedir. Dizinin 0. indisindeki eleman olan 0 değeri, İHA listesindeki ilk İHA'nın 0. indisteki hedefe gitmesi gerektiğini göstermektedir. Listenin 4. indisindeki 3 elemanı ise, İHA listesinde 4. indisteki İHA'nın 3. indisteki hedefe gitmesi gerektiği göstermektedir.

Popülasyondaki herhangi bir bireyin uygunluk değeri, görevlendirilen İHA'ların hedeflere olan uzaklıkları ve hedeflerin İHA ihtiyacı dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Bir birey için bir çözüm oluşturulduktan sonra her İHA'nın görevlendirildiği hedefe olan uzaklığı Dijkstra algoritması ile hesaplanmaktadır. Daha önce bahsedildiği gibi engeller olduğu için İHA'ların hedeflere olan uzaklığının öklit ile hesaplanması iyi bir sonuç vermeyecektir. Bunun yerine Dijkstra algoritmasıyla bulunan en kısa yolun uzunluğu belirlenerek uygunluk değeri hesaplanmıştır.

Uygunluk değeri hesaplanan bireyler arasında elitizm seçilimi uygulanmıştır. Elitizm faktörü olarak %50 ayarlanmış yani popülasyon uygunluk değerine göre sıralanmış ve popülasyonun yarısı popülasyondan çıkarılmıştır. Elitizm seçilimi ile hayatta kalan bireylerden çaprazlama safhasında yeni bireyler elde edilmiş ve çaprazlama safhasında rastgele tekdüze çaprazlama kullanılmıştır.

Sürü İHA görev planlaması için GA'da oluşturulan çaprazlama safhası Şekil 7'de gösterilmiştir. Her bir bireyden rastgele seçilmiş olan genler ile yeni bir birey oluşturulmuştur. Bu birey popülasyona katılmadan önce belirli bir olasılıkla mutasyona uğratılmıştır. Bu problem için GA'da mutasyon olasılığı %5 olarak ayarlanmıştır. Bu kurala göre çaprazlanma sonucu yeni birey oluşturulduktan sonra %5 olasılıkla rastgele bir sayı oluşturulmuş ve şart sağlanırsa bireydeki 6 dizilik çözümün içerisinde herhangi bir gen değiştirilmiştir.

1	3	4	5
0	1	1	2
2	1	0	3
0	0	1	2

Şekil 7. İHA görev planlaması için çaprazlama işlemi.

Popülasyondaki iki birey çaprazlandıktan sonra GA'nın son safhası olan mutasyon işlemi yapılmıştır. Bu işlem için Şekil 8'de görüldüğü gibi herhangi bir gen rastgele bir biçimde değiştirilmiştir. Şekil 8'de 1. indisteki 1 verisi, rastgele bir biçimde 3 olarak değiştirilmiştir. Bu şekilde çaprazlama sonucu oluşan bireyden daha farklı sonuç veren bir birey meydana gelmiştir.

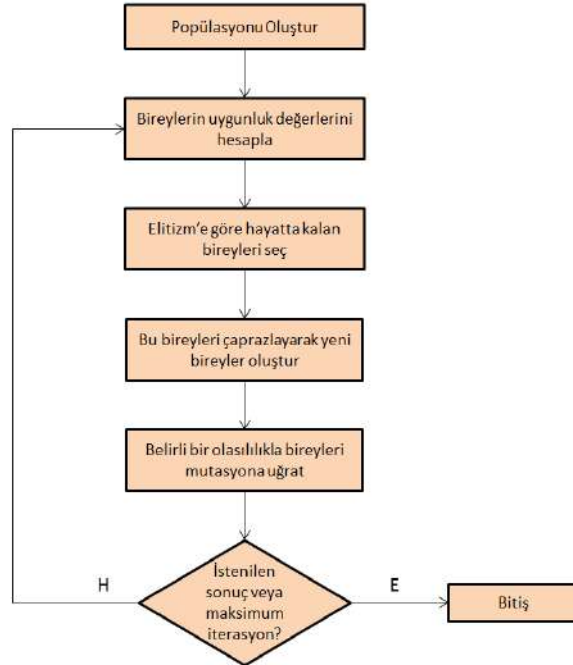
0 1 1 2 3 2  
 ↓  
 0 3 1 2 3 2

Şekil 8. İHA görev planlaması için mutasyon işlemi.

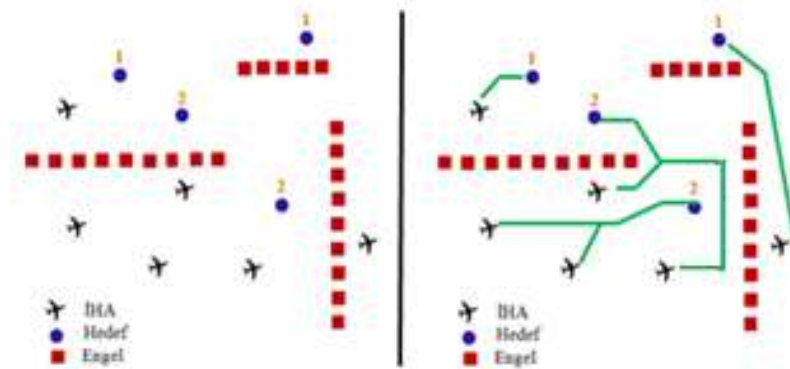
Mutasyon faktörü %10, çaprazlama yöntemi olarak rastgele tekdüze çaprazlama, popülasyon sayısı 10 ve seçilim algoritması olarak ise elitizm yöntemi seçilmiştir. Algoritmanın verilen probleme göre denemesi sonucu bulunan en iyi sonuç aşağıdaki dizide gösterilmiştir. Bulunan en iyi sonuca göre listedeki ilk İHA, listedeki ilk hedefe gidecektir.

[ 0 1 2 2 3 1 ]

Görev dağılımları tek bir dizide bu şekilde oluşturulmuştur. GA'nın farklı sonuçlar vermesi açısından daha önce bahsedilen seçilim yöntemleri ve çaprazlama yöntemleri denenmiştir ve en uygun olarak elitizm seçilimi ve tekdüze çaprazlama bulunmuştur. GA için akış diyagramı Şekil 9'da verilmiştir. Tasarlanan yaklaşım için bahsedilen yöntemlerle sistemdeki İHA'lar görevlendirildikten sonra harekete başlayacaktır. GA'nın bulunduğu en iyi sonuç Şekil 10'da gösterilmiştir.

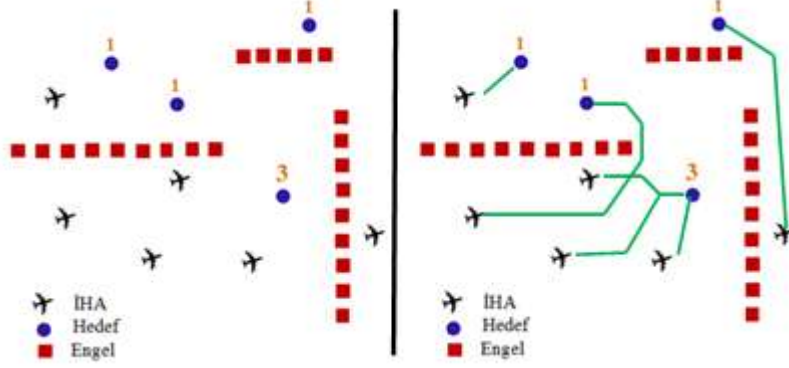


Şekil 9. Sürü İHA görev planlaması için GA'nın akış diyagramı.



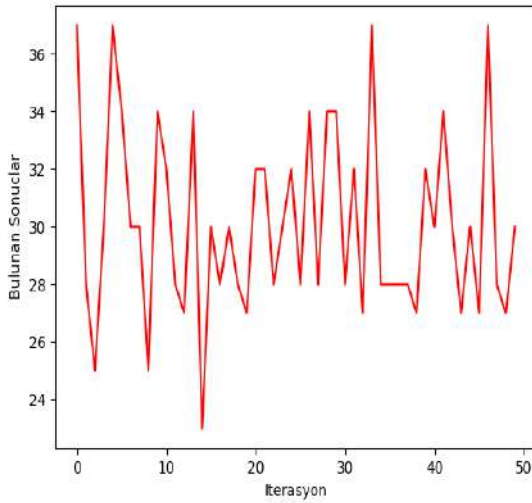
Şekil 10. GA'nın örnek uzay için bulduğu en iyi sonuç.

Düşman sayısı dinamik bir etken olduğu için İHA'lar görevlendirildikleri hedeflere hareket ederken hedeflerdeki düşman sayısı değişiklik gösterebilir. Bu değişiklik gözlemlendiğinde İHA'ların o anki konumları hesaba katılacak ve yeni bir görev dağılımı yapılacaktır. Hedeflerdeki düşman sayısı değişiklik gösterdiğinde yeni oluşacak örnek bir görev dağılımı Şekil 11'de gösterilmiştir.

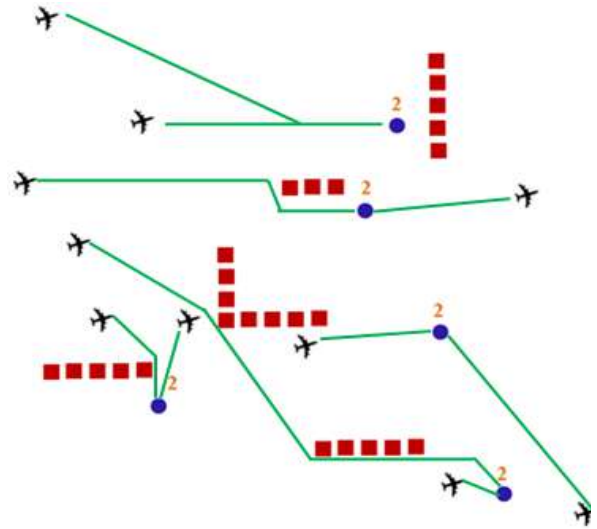


Şekil 11. Düşman sayısı değiştiği zaman oluşan yeni görev dağılımı.

Şekil 11'de görüldüğü üzere GA'nın bulduğu çözümün yeterli bir çözüm olduğu açıkça anlaşılmaktadır. Her bir İHA, mantıklı bir şekilde hedeflere görevlendirilmiş ve her hedefteki düşman sayısına göre İHA'ların dağılımı sağlanarak aynı zamanda uzaklık dağılımları da en aza indirgenmiştir. Şekil 6'daki örnek uzay için en iyi sonuç, Şekil 10'daki gibidir. GA'nın 50 iterasyon sonrası bulduğu en iyi sonuçlar Şekil 12'de gösterilmiştir. Şekil 12'deki grafikte y-eksenindeki değerler GA'nın amaç fonksiyonunun ürettiği uygunluk değerleridir. Şekil 10'daki çözümün uygunluk değeri 37 olarak hesaplanmıştır. Aynı parametrelerle GA, yeni bir senaryo ile 50x50 boyutunda bir uzayda toplam 10 İHA ve 5 hedef için uygulanmıştır. 5 hedefin her birinde 2 tane düşman olacak şekilde kurulan algoritmanın 50 iterasyon sonucunda oluşan görev dağılımı Şekil 13'te verilmiştir.



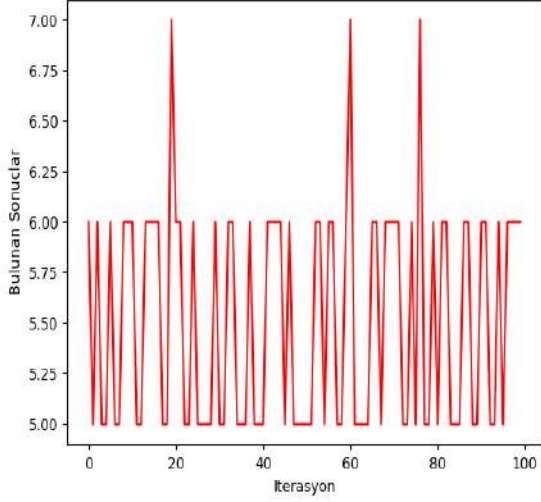
Şekil 12. GA'nın 50 iterasyonda bulduğu en iyi sonuçlar.



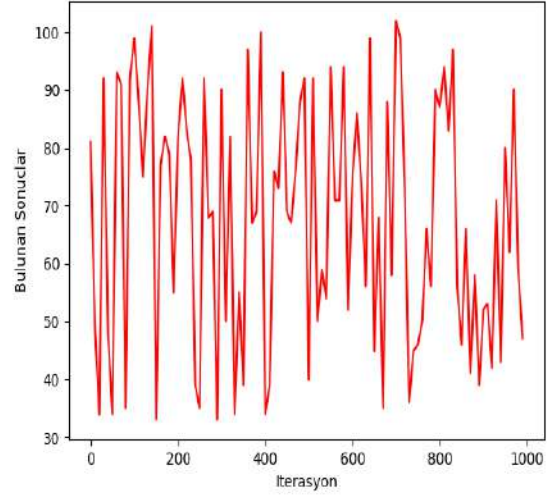
Şekil 13. Farklı bir senaryo için görev dağılımı.

Şekil 13'de verilen senaryo için 100 iterasyonda çalışan GA'nın her bir iterasyonda bulduğu en iyi sonuçlar Şekil 14'te gösterilmiştir. GA aynı parametrelerle daha farklı bir uzayda denenmiştir. Toplam 20 İHA ve 30 hedef bulunan 100x100 boyutunda bir uzayda, 1000 iterasyon sonucu bulunan en iyi sonuçlar Şekil 15'te gösterilmiştir. Uygulanan GA için sürekli artan bir grafikten önce değişken bir grafik olarak Şekil 15'te görülmektedir. Bunun sebeplerinden biri mutasyon faktörünün normalden yüksek bir değer olarak alınmasıdır. Mutasyon faktörü yüksek

tutulursa her oluşturulan yeni bireyin mutasyona uğrama şansı artar ve daha farklı bireyler oluşur. Bu oluşan farklı bireylerin sürekli daha iyi sonuç verme garantisi yoktur.



Şekil 14. 100 iterasyon için bulunan en iyi sonuçlar.



Şekil 15. 1000 iterasyon için bulunan en iyi sonuçlar.

## 5. Sonuçlar

Bir İHA'nın komuta ve kontrol işlemi gerçekleşirken, aslında birçok farklı teknoloji ve farklı uzmanlık alanı bir arada kullanılmaktadır. Uçuşun nasıl gerçekleştiği ve uçuşu nelerin etkilediği bilinmezse kumandadan ne tür bir bilgi gönderilmesi gerektiğini bilmek de mümkün değildir. Aynı zamanda kumandadan giden bilginin İHA tarafından nasıl algılandığı, yorumlandığı, İHA'nın bu komutlara karşı nasıl tepki verdiği (verdiği tepkilerin nasıl olduğu), farklı ortam ve meteorolojik şartlardan nasıl etkilendiği, pozisyonunu nasıl bulduğu, konum bilgisini nasıl gönderdiği, görevi nasıl icra ettiği gibi soruların hepsi farklı uzmanlık alanlarının konusudur. Her birinde farklı yöntemler ve teknolojik uygulamalar kullanılmaktadır. Tüm bu belirttiğimiz durumlar aslında İHA kullanımının ve kontrolünün ne kadar zor olduğunu göstermektedir. Tek bir İHA'yı kontrol etmek bile bu kadar karmaşıkken sürü İHA kontrolünün ne kadar zor ve karmaşık olacağı yadsınamaz bir gerçektir.

Bu çalışmada, sürü İHA görev dağılımı için genetik algoritma tabanlı bir yaklaşım önerilmiştir. Gerçekleştirilen uygulamada, görev planlaması başarılı bir şekilde yapılmış ve İHA'lar görevlendirildikleri hedeflere yönelmişlerdir. Her bir hedefin uzaklığı, hedeflerdeki düşman sayısı ve örnek uzaylardaki engeller de dikkate alınarak optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. İHA'ların hedeflere olan uzaklığının öklit ile hesaplanmasının iyi sonuç vermeyeceği düşünülmüş, bunun yerine Djisktra algoritmasıyla bulunan en kısa yolun uzunluğu belirlenerek uygunluk değeri hesaplanmıştır. İHA'lar hedeflerine doğru hareket ederken hedeflerde düşman sayısı değişikliği gibi bazı değişiklikler meydana gelmesi durumunda bu olaylar sistem tarafından gözlemlenip İHA'ların o anki bir pozisyonuna göre GA çalıştırılmış ve yeni bir görev dağılımı yapılmıştır. Hedeflerdeki düşman sayısı değiştiğinde, dengeli bir görev dağılımı gerçekleştirmek amacıyla İHA'lar farklı hedeflere yönecek şekilde hesaplamalar yapılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

## Kaynaklar

- [1] Eaton CM, Chong EKP, Maciejewski AA. Multiple-Scenario Unmanned Aerial System Control: A Systems Engineering Approach and Review of Existing Control Methods. 2016; Aerospace, 3(1): 1-26.
- [2] Zhou X, Wang W, Wang T, Li X, Li Z. A Research Framework on Mission Planning of the UAV Swarm. In: 12th System of Systems Engineering Conference; 18-21 June 2017.
- [3] Weia Y, Blake MB, Madey GR. An Operation-time Simulation Framework for UAV Swarm Configuration and Mission Planning. Procedia Computer Science 2013; 18: 1949-1958.
- [4] Yilmazer M, Karakose E, Karakose M. Multi-Package Delivery Optimization with Drone. International Conference on Data Analytics for Business and Industry; 25-26 October 2021.
- [5] Arnold R, Jablonski J, Abruzzo B. Heterogeneous UAV Multi-Role Swarming Behaviors for Search and Rescue. In: IEEE Conference on Cognitive and Computational Aspects of Situation Management; 24-29 Aug 2020.



- [6] Hong L, Guo H, Liu J, Zhang Y. Toward Swarm Coordination: Topology-Aware Inter-UAV Routing Optimization. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, September 2020; 69(9).
- [7] Li R, Ma H. Research on UAV Swarm Cooperative Reconnaissance and Combat Technology. In: 3rd International Conference on Unmanned Systems (ICUS); 27-28 Nov 2020; pp. 996-999.
- [8] Mian S, Hill J, Mao ZH. Optimal Control Techniques for Heterogeneous UAV Swarms. In: AIAA/IEEE 39th Digital Avionics Systems Conference (DASC); 11-15 Oct. 2020.
- [9] Yang F, Ji X, Yang C, Li J, Li B. Cooperative Search of UAV Swarm Based on Improved Ant Colony Algorithm in Uncertain Environment. In: IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS), 27-29 Oct. 2017; pp. 231-236.
- [10] Ghamry KA, Kamel MA, Zhang Y. Multiple UAVs in Forest Fire Fighting Mission Using Particle Swarm Optimization. In: International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 13-16 June 2017; Miami, FL, USA: pp.1404-1409.
- [11] Agarwala S, Pape LE, Dagli CH. A Hybrid Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization with Type-2 Fuzzy Sets for Generating Systems of Systems Architectures. *Procedia Computer Science* 2014; 36: 57 – 64.
- [12] Karakose E. Coordination of Multi UAV's Equipped with IoT. In: 7th International Conference on Advanced Technologies; April 28-May 1 2018; Antalya/TURKEY: pp. 169-172.
- [13] Brust MR, Danoy G, Bouvry P, Gashi D, Pathak H, Goncalves M. P. Defending Against Intrusion of Malicious UAVs with Networked UAV Defense Swarms. In: IEEE 42nd Conference on Local Computer Networks Workshops (LCN Workshops); 9-9 Oct. 2017, pp. 103-111.
- [14] Braga RG, Silva RC, Ramos ACB, Mora-Camino F. UAV Swarm Control Strategies: a Case Study for Leak Detection. In: Proceedings of the 18th International Conference on Advanced Robotics (ICAR), July 2017; Hong Kong China: pp. 173-178.
- [15] Zhang X, Chen J, Xin B, Fang H. Online Path Planning for UAV Using an Improved Differential Evolution Algorithm. *IFAC Proceedings Volumes* January 2011; 44(1): 6349-6354.
- [16] Roberge V, Tarbouchi M, Labonte G. Comparison of Parallel Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization for Real-Time UAV Path Planning. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* February 2013; 9(1).
- [17] Liu J, Wang W, Wang T, Shu Z, Li X. A Motif-Based Rescue Mission Planning Method for UAV Swarms Using an Improved PICEA. *IEEE Access* 2018; 6: 40778 - 40791.
- [18] Karakose E. A Comparative Study For Cooperative Mission Planning Of UAV Swarm. In: 5th International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT'17); 09-12 May 2017; İstanbul, Türkiye: pp. 540-544.
- [19] Karakose E. A Cooperative Mission Planning of UAV Swarms Based on Fuzzy Decision Making. In: The 5th International Fuzzy Systems, Symposium (FUZZYSS'17); Abstract, 14-15 October 2017; Ankara, Turkey: pp. 44.
- [20] Cardoso A, Barreto C, Lamounier E, Andrade I, Yamanaka K, Miranda M. Technique for the Visualization of Information for Refueling a Swarm of UAVs Using Genetic Algorithms in a Virtual Environment. *International Journal of Systems Applications, Engineering & Development* 2017; 11: 191-194.
- [21] Galvez RL, Dadios EP, Bandala AA. Path Planning for Quadrotor UAV Using Genetic Algorithm. In: 7th IEEE International Conference Humanoid, Nanotechnology, Information Technology Communication and Control, Environment and Management (HNICEM) (IEEE); 12-16 Nov. 2014; Palawan, Philippines.
- [22] Bagherian M, Alos A. 3D UAV trajectory planning using evolutionary algorithms: A comparison study. *The Aeronautical Journal* 2016; 119(1220).
- [23] Holland JH. Genetic Algorithms, *Scientific American* 1992; 267(1): 66-73.
- [24] Sriniva M, Patnaik LM. Genetic algorithms: a survey. *Computer* June 1994, 27(6).
- [25] Roberge V, Tarbouchi M, Labonte G. Fast Genetic Algorithm Path Planner for Fixed-Wing Military UAV Using GPU. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* October 2018; 54(5): 2105-2117.
- [26] Yang T, Hu Y, Yuan X, Mathar R. Genetic Algorithm based UAV Trajectory Design in Wireless Power Transfer Systems. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*; 2019; Marrakesh, Morocco.
- [27] Altundogan TG, Yildiz A, Karakose E. Genetic Algorithm Approach based on Graph Theory for Location Optimization of Electric Vehicle Charging Stations. 2021 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU); 6-8 Oct. 2021; Elazig, Turkey.
- [28] Wu X, Yin Y, Xu L, Wu X, Meng F, Zhen R. Multi-UAV Task Allocation Based on Improved Genetic Algorithm. *IEEE Access* 2021; 9: 100369-100379.

## Nehir Tipi Hidroelektrik Santrallerinde Rampa Olayları: Türkiye Örneği

İsrafil Karadöl<sup>1\*</sup>, Mustafa Şekkeli<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Elektrik ve Enerji Bölümü, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Kilis, Türkiye

<sup>2</sup> Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş, Türkiye

\*<sup>1</sup> israfilkaradol@kilis.edu.tr, <sup>2</sup> msekkeli@ksu.edu.tr

(Geliş/Received: 29/11/2021;

Kabul/Accepted: 17/01/2022)

**Öz:** Yenilenebilir enerji kaynaklarının tahmin edilemeyen üretim yapısından dolayı bu kaynakların geleneksel şebeke sistemlerine entegrasyonları, şebeke esnekliği ve güvenliği açısından birçok soruna neden olmaktadır. Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarının üretim değişiminin yönünü, büyüklüğünü, zamanını ve frekansını öngörebilmek amacıyla Türkiye Nehir tipi Hidroelektrik santral (NHES) üretimlerinin rampa olayları incelenmiştir. Bu amaçla, ilk olarak Türkiye’de kurulu 483 adet NHES’in 2017 ve 2018 yıllarına ait reel üretimleri elde edilmiştir. Elde edilen verilerin aylık rampa olaylarını araştırmak için NHES üretimleri, Matlab ortamında kontrol edilerek aylık zaman dilimlerine bölünmüştür. Aylık NHES üretimlerinin 1, 3, 6 ve 9 saatlik periyotlardaki rampa olayları, üretim değişimlerinin histogram alanlarına göre incelenmiştir. 1 saatlik periyottaki NHES üretim rampalarının istatistiksel özelliklerini değerlendirdiğimizde maksimum ve minimum rampa olaylarının oluşum zamanlarının aylık periyotlarda tahmin edilemeyeceği sonucuna ulaşılmıştır. Fakat aynı zamansal periyottaki rampaların ortalamalarını ve standart sapmalarını incelediğimizde ise en fazla rampa olaylarının kış aylarında (Aralık, Ocak, Şubat) gerçekleştiği sonucuna ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre rampaların büyüklüğüne, frekansına ve zamanına göre önlemler alınması durumunda yenilenebilir enerji kaynaklarının geleneksel şebeke sistemine entegrasyon sorunlarının en aza indirilebileceği öngörülmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Rampa Olayları, Yenilenebilir Enerji, Nehir Tipi Hidroelektrik Santralleri, Histogram Alan.

### Ramp Events in River Type Hydroelectric Power Plants: The Case of Turkey

**Abstract:** Due to the unpredictable production structure of renewable energy resources, integrating these resources into traditional grid systems causes many grid flexibilities and security problems. In this study, ramp events of Turkey's river-type hydroelectric power plant (RHPP) generations were investigated to predict the direction, size, time and frequency of the generation change of renewable energy resources. For this purpose, firstly, the real production of 483 RHPP installed in Turkey for 2017 and 2018 was obtained. To investigate monthly ramp events of the data obtained, the RHPP productions were divided into monthly periods. RHPP productions were separated into monthly periods by the checkout in a Matlab environment to investigate the monthly ramp events of the obtained data. Ramp events of monthly RHPP generations in 1, 3, 6 and 9 hour periods were examined according to histogram areas of generation changes. When we evaluated the statistical properties of the RHPP generation ramps in the 1-hour period, it was concluded that the generation times of the maximum and minimum ramp events could not be predicted in monthly periods. However, when we examine the averages and standard deviations of the ramps in the same temporal period, it was precipitated that most ramp events occur in the winter months (December, January, February). According to the results obtained, it is predicted that the integration problems of renewable energy sources into the traditional grid system can be minimized if measures are taken according to the size, frequency and time of the ramps.

**Keywords:** Ramp Events, Renewable Energy, River Type Hydroelectric Power Plants, Histogram Field.

### 1. Giriş

Gelişen sanayi ve teknolojiyle beraber enerji talebi her geçen gün artmaktadır[1], [2]. Artan enerji talebinin geleneksel enerji kaynaklarından karşılanması küresel ısınma ve çevre kirliliği gibi birçok soruna neden olmaktadır[3], [4]. Bu nedenlerle, devletler son yıllarda artan enerji talebini yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılamaya yönelmişlerdir. 2010 yılında dünya genelindeki yenilenebilir enerji santrallerinin (YES) toplam kurulu gücü 1226,85 GW iken, 2020 yılında 2536,85 GW olmuştur[5]. 2012 ve sonrasındaki yıllarda dünya genelinde kurulan enerji santrallerinin %50’sini YES’ler oluşturmaktadır. Bu oran zamanla paralel olarak artış göstermiş ve 2020 yılında yeni kurulan tesislerin %83’ünü YES’ler oluşturmuştur[6].

\* Sorumlu yazar: [israfilkaradol@kilis.edu.tr](mailto:israfilkaradol@kilis.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: \*<sup>1</sup> 0000-0002-9239-0565, <sup>2</sup> 0000-0002-1641-3243



Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynakları açısından gelişimini incelediğimizde 2010 yılındaki YES kümülatif gücü 17369 MW iken 2020 yılında bu güç 48537 MW olmuştur. 2020 yılı sonunda Türkiye kümülatif gücünün %51,2'sini yenilenebilir enerji kaynakları oluşturmuştur[7]. Fakat yenilenebilir enerji kaynak kullanımındaki hızlı büyüme sistem operatörleri için büyük zorluklar ( arz-talep ilişkisinin minimum maliyetlerle karşılanması ) oluşturmaktadır[8]–[10]. Çünkü nehir tipi hidroelektrik, rüzgâr ve güneş santralleri gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının belirsiz ve tahmin edilemeyen üretim karakteristiği bu kaynakların şebeke entegrasyonunu olumsuz etkilemektedir. Yapılan bu çalışmada NHES üretimlerinin aylık olarak 1, 3, 6 ve 9 saatlik periyotlardaki rampa olayları (üretim değişimleri) incelenmiştir. NHES üretim kısıtlamalarının ve şebeke işletim sorunlarının üstesinden gelmek amacıyla enerji üretimindeki pozitif ve negatif yönlü ani değişimlerin (rampa) hesaplanması büyük önem arz etmektedir. Çünkü enerji üretimlerinde görülen negatif yönlü rampalar sonucunda, işletim sistemindeki enerji açığını kapatmak amacıyla oluşan rampanın büyüklüğüne ve süresine göre ya çevrim içi santral üretimleri arttırılmakta ya da çevrim dışı santraller devre alınmaktadır[11]. Enerji üretimlerinde pozitif yönlü rampalar oluşması durumunda ise ya çevrim içi santral üretimleri azaltılmakta ya da tesislerin yük atması veya kapatılması sağlanmaktadır[12]–[14]. Bu nedenlerle NHES üretimlerindeki rampa olaylarının büyüklüğünün, zamanın ve süresinin önceden bilinmesi büyük önem arz etmektedir. Almanya 2016'da toplam YES gücünün %2.3'nü ve İrlanda 2018 yılında rüzgâr enerjisinin %6'sının kullanımını kısıtlamıştır[15], [16]. Çin'de ise 2009-2017 yılları arasındaki yıllık toplam rüzgâr enerjisinin %8'den fazlası kısıtlanmıştır[17], [18].

Yenilenebilir enerji kaynaklarındaki üretim rampalamasına ait literatür taraması incelendiğinde; Misha ve ark. hareketli bir ortalama filtresi kullanarak rüzgâr enerjisi rampalarının ön işleme tekniğini araştıran, gürültü çıkarımı ve güç salınımlarını ayıran veri analizi odaklı bir yaklaşım önermişlerdir[19]. Zheng ve Kusiak yaptıkları çalışmada bir rüzgâr çiftliğinin güç rampa oranlarını tahmin etmek için çok değişkenli zaman serisi modelleri oluşturmuşlardır[20]. Zhao ve Du yaptıkları çalışmada rüzgâr enerjisi rampa özelliklerini incelemek için aşırı değer teorisi uygulanmışlardır[21]. Dihiman ve arkadaşları yaptıkları çalışmada destek vektör regresyonu ve dalgacık dönüşümü değişkenlerine dayanan rüzgâr tahmin modeli önermişlerdir. Bu modelle ayrıca rüzgâr rampalarının büyüklüklerini ve sıklıklarını incelemişlerdir[22].

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde rampa olaylarını inceleyen çalışmaların rüzgâr enerjisi odaklı olduğu görülmüştür. Yapılan literatür taramasında nehir tipi hidroelektrik santral üretimlerindeki rampaların incelenmesi konusundaki eksiklikler fark edilmiştir. Literatürdeki bu eksikliği gidermek amacıyla yapılan çalışmada NHES üretimlerindeki rampalar incelenmiştir.

Bu çalışmayı ilgili alanda yapılmış diğer çalışmalardan farklı kılan en belirgin özellikler;

- İlk defa NHES üretim rampaları incelenmiştir.
- NHES üretim rampa analizleri Türkiye ölçeğinde incelenmiş ve tamamen reel datalar kullanılmıştır.
- Farklı zamansal periyotlardaki (1, 3, 6 ve 9 saatlik), aylık NHES üretim rampaları hesaplanmıştır.

Aylık periyotlardaki rampaların karakteristik özellikleri (süresi, büyüklüğü, yönü ve oluşum zamanı) incelenmiştir.

Yapılan çalışma 4 bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde Türkiye ve Dünya ölçeğinde yenilenebilir enerji santrallerinin kümülatif güçleri hakkında genel bilgiler verilmiş. Ayrıca bu bölümde NHES rampa olayları tanımlanmış ve rampa olayları hakkındaki literatür taraması verilmiştir. İkinci bölümde Türkiye'deki NHES hakkında genel bilgiler, kurulu güç haritası ve 2017-2018 saatlik toplam üretimler verilmiştir. Üçüncü bölümde NHES üretimlerine ait rampa olaylarını hesaplamak için kullanılan yamuk kuralı açıklanmıştır. Dördüncü bölümde NHES üretim rampalarına ait istatistiksel özellikler ve rampaları gösteren histogram grafikleri verilmiştir. Beşinci bölümde, bulgular bölümünde elde edilen tablolar ve grafikler yorumlanmıştır.

## 2. Türkiye Nehir Tipi Hidroelektrik Santralleri

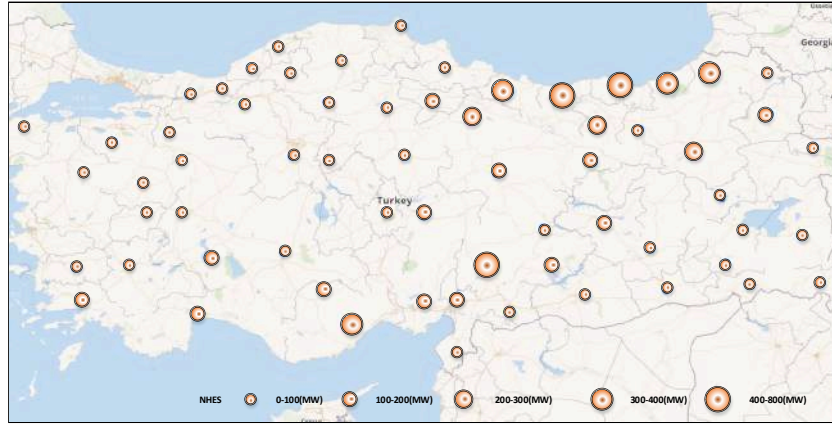
Dünya genelinde enerji üretim ve tüketimi arasındaki, arz-talep ilişkisi karşılamak amacıyla devletler yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmişlerdir[23], [24]. Yenilenebilir enerji alanındaki son yıllardaki HES kapasite genişlemesi dikkat çekmektedir. 2010 yılında dünyanın HES kümülatif gücü 926,38 MW iken, 2020 yılında 1211,69 MW olmuştur[25]. 10 yıllık periyotta dünyanın kümülatif gücü %30,8 genişlemiştir. Aynı zamansal periyotlardaki Türkiye'nin HES kümülatif gelişimini incelediğimizde ise 10 periyotta %51,09 büyüdüğü görülmüştür. Türkiye'nin bu alanda göstermiş olduğu bu gelişim aynı zamanda şebeke işletim sorunlarını da arttırmıştır. Şebeke işletimlerinde görülen başlıca sorun ise NHES üretimlerinden kaynaklanan rampalama olaylarıdır.

NHES üretimlerine ait rampalama olaylarının süresini, büyüklüğünü, yönünü ve oluşum zamanını incelemek amacıyla bu çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan tesis üretim verileri Türkiye Elektrik İletim AŞ. (TEİAŞ)'den elde edilmiştir. Üretim verileri 2017 ve 2019 tarihleri arasında ve 1'er saatlik periyotlardadır. Ayrıca bu veriler Türkiye'de kurulmuş ve çalışmakta olan 483 tesise aittir. Çalışmada kullanılan verilerin bazı genel ve istatistiksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** NHES üretimlerinin istatistiksel ve genel özellikleri

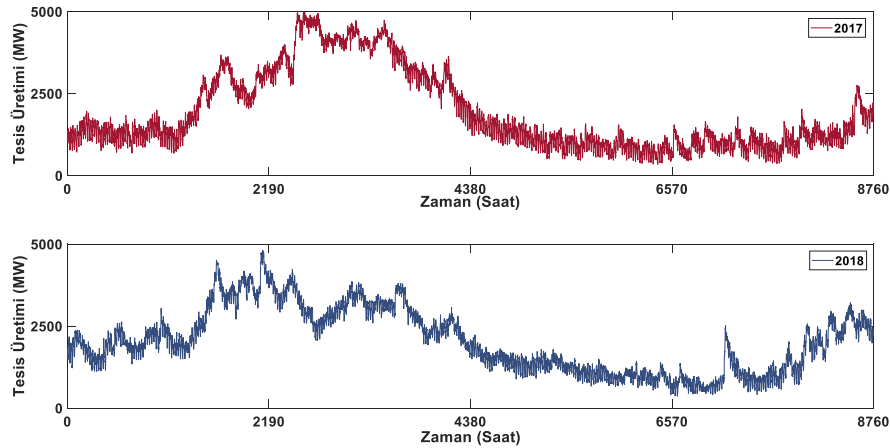
Özellikler	Değerler
Tesis Sayısı	483
Toplam Veri Sayısı	17520x483
Tesis Üretim Zaman Aralığı	01/01/2017-01/01/2019
Toplam Kurulu Güç (MW)	7026,28
Ortalama üretim (MW)	3943,46
Standart sapma (MW)	2072,60

Kurulmuş ve aktif olarak çalışan tesislerin illere göre kurulu güç dağılımları Şekil 1'de verilmiştir. İllerdeki toplam kurulu güç 5 farklı yarıçapa sahip daire ile gösterilmiştir. Daire yarıçapları küçükten büyüğe göre 0-100, 100-200, 200-300, 300-400 ve 400-800 MW'lık büyüklükleri tanımlamaktadır.



**Şekil.1.** İllere göre NHES toplam güçleri

Ayrıca çalışmada kullanılan 483 adet tesisin, 2017 ve 2018 yıllarına saatlik toplam üretim profilleri Şekil 2 de verilmiştir. 2017 ve 2018 yıllarına ait saatlik toplam NHES üretimleri sırasıyla bordo ve lacivert renkler ile gösterilmiştir.



**Şekil 2.** Yıllara göre saatlik toplam NHES üretimi

### 3. Histogram alan hesaplaması

Yapılan çalışmada, tesis üretim değişimlerini görebilmek amacıyla 1, 3, 6 ve 9 saatlik periyotlardaki histogram grafikleri elde edilmiştir. Bu grafikler ile x ekseninde kalan alanı bulmak amacıyla yamuk kuralı kullanılmıştır. Yamuk kuralı, matematikte alan hesaplamaları için kullanılan sayısal entegrasyon metodudur[26]. Bu metod, fonksiyon ile x-ekseni arasında kalan alanı daha kolay hesaplanabilir alanlara sahip yamuklara bölerek, bir aralık üzerinden entegrasyona yaklaşmaktadır[27]–[29]. Bir başka ifadeyle x-ekseni ile fonksiyon arasında kalan alanın, yamuk alanlarına bölünerek yaklaşık olarak hesaplanması yöntemidir. Yamuk kuralının matematiksel ifadesi Eşitlik 1 ve Eşitlik 2 de verilmiştir.

$$\int_z^y f(x)dx \quad (1)$$

$$\int_z^y f(x)dx \approx \frac{y-z}{2} \{f(y) + f(z)\} \quad (2)$$

Eşitlik 2’de verilen z ve y, f(x) fonksiyonunun integral alan sınırlarıdır. y ve z integral sınırlandırma değerleri Eşitlik 3’te ayrıntılı olarak verilmiştir. Eşitlik 2’de verilen matematiksel denklem tek bir yamuk alanını hesaplamak için kullanılmaktadır. f(x) fonksiyonu ile x-ekseni arasında kalan alanı hesaplamak için birden çok yamuk kullanılması durumunda kullanılan matematiksel ifade Eşitlik 4’te verilmiştir.

$$[y z] = \{z = x_{k-1} < x_k < \dots < x_{K-1} < x_K = y\} \quad (3)$$

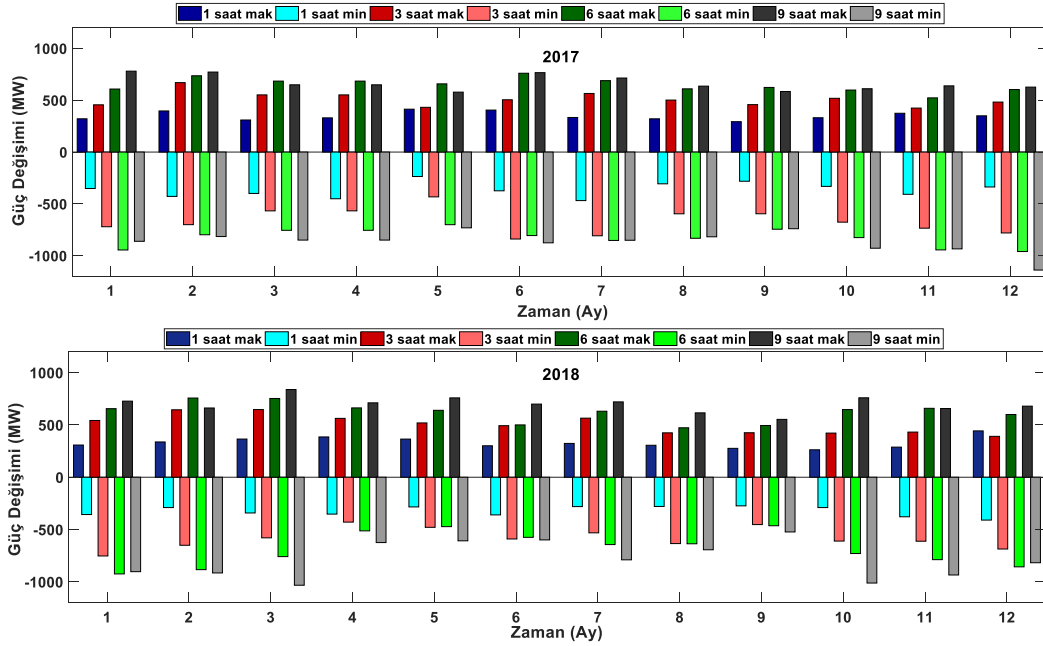
$$\int_z^y f(x)dx \approx \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K (x_k - x_{k-1}) [f(x_k) + f(x_{k-1})] \quad (4)$$

Eşitlik 4’te verilen matematiksel ifade kullanılarak aylık NHES üretim değişimlerinin histogram grafik alanları hesaplanmıştır.

### 4. Bulgular

Rampa olayı, NHES üretimlerinin zamansal periyotlardaki üretim değişimleridir. Diğer bir ifadeyle rampa olayları, art arda iki saat arasındaki güç değişimi olarak tanımlanmaktadır. Enerji üretimlerinde görülen değişimlerin, saniyelik veya dakikalık periyotlar da olması durumunda şebeke işletim operatörleri bu üretim değişimlerini dengeleyebilmektedir. Fakat bir saat ve üzerindeki rampa olaylarının dengelenebilmesi şebeke işletim operatörleri için zorluk olarak kabul edilmektedir[30]–[34]. Şebeke işletim operasyonlarında, günlük yük profillerine uyacak şekilde farklı üretim birimleri planlanarak ve taahhüt edilmektedir. Fakat iklimsel etkilerden dolayı NHES üretimleri, planlanarak ve taahhüt edilen günlük yük profilleriyle büyük farklılıklar gösterebilmektedir. NHES üretimlerinin de görülen uzun süreli ve büyük rampaların şebeke üzerindeki etkisinin dengelenebilmesi bazı durumlarda çok zaman almaktadır. Çünkü bazı üretim tesislerinin devreye alınmasından, yük ile senkronizasyona kadar uzun zamana ihtiyaç duyulmaktadır.

Tüm bu sonuçlar NHES üretim değişkenliğinin sistem operasyonlarını etkilediği göstermektedir. NHES üretimlerinin 1, 3, 6 ve 9 saatlik adım değişimlerinin istatistiksel özellikleri (standart sapma, ortalama, maksimum ve minimum değerler) rampa olaylarının birinci derecede göstergesi olarak kabul edilmektedir[11], [12]. Bu nedenle yapılan çalışmada 2017 ve 2018 aylık NHES üretimlerinin 1, 3, 6 ve 9 saatlik periyotlardaki değişimleri (rampa olayları) incelenmiştir. Saatlik toplam üretime ait rampa olaylarının maksimum ve minimum değerleri Şekil 3’te verilmiştir. Şekil 3’te verilen koyu mavi, koyu kırmızı, koyu yeşil ve koyu gri renkleri sırasıyla 1, 3, 6 ve 9 saatlik periyotlardaki maksimum rampa büyüklüklerini göstermektedir. Açık mavi, açık kırmızı, açık yeşil ve açık gri renkleri ise sırasıyla 1, 3, 6 ve 9 saatlik periyotlardaki minimum rampa büyüklüklerini göstermektedir.



Şekil 3. 1, 3, 6 ve 9 saatlik periyotlardaki aylık minimum ve maksimum rampa büyüklükleri

Oluşan maksimum ve minimum rampaların tesis kurulu güce oranla yüzdesel büyüklükleri Tablo 2’de verilmiştir. 2017 yılında oluşan en büyük (maksimum) rampa %11,11 ile 9 saatlik zamansal periyotta Ocak ayında görülmüştür. En küçük (minimum) rampa olayı ise %-16,20 ile 9 saatlik zamansal periyotta Aralık ayında gerçekleşmiştir. 2018 yılına baktığımızda ise oluşan en büyük ve en küçük rampa olayları sırasıyla %11,93 ve %-14,69 ile 9 saatlik zamansal periyotta Mart ayında gerçekleşmiştir.

Tablo 2. Toplam güce oranla rampaların yüzdesel büyüklükleri

	1 Saat		3 Saat		6 Saat		9 Saat		
	maks.	min.	maks.	min.	maks.	min.	maks.	min.	
2017	Ocak	4,57%	-5,00%	6,49%	-10,25%	8,66%	-13,44%	11,11%	-12,25%
	Şubat	5,65%	-6,09%	9,53%	-9,97%	10,47%	-11,35%	10,99%	-11,60%
	Mart	4,40%	-5,68%	7,85%	-8,07%	9,74%	-10,74%	9,24%	-12,08%
	Nisan	4,70%	-6,41%	7,85%	-8,07%	9,74%	-10,74%	9,24%	-12,08%
	Mayıs	5,89%	-3,36%	6,14%	%-6,15%	9,36%	-9,97%	8,23%	-10,40%
	Haziran	5,77%	-5,32%	7,18%	-11,94%	10,82%	-11,47%	10,90%	-12,46%
	Temmuz	4,75%	-6,66%	8,05%	-11,49%	9,81%	-12,13%	10,17%	-12,11%
	Ağustos	4,57%	-4,36%	7,14%	-8,48%	8,68%	-11,84%	9,05%	-11,63%
	Eylül	4,17%	-4,01%	6,50%	-8,47%	8,88%	-10,59%	8,32%	-10,52%
	Ekim	4,71%	-4,71%	7,38%	-9,62%	8,52%	-11,74%	8,70%	-13,20%
	Kasım	5,33%	-5,80%	6,04%	-10,45%	7,44%	-13,43%	9,09%	-13,29%
	Aralık	4,98%	-4,79%	6,87%	-11,11%	8,58%	-13,66%	8,92%	-16,20%
2018	Ocak	4,38%	-5,08%	7,72%	-10,71%	9,33%	-13,16%	10,35%	-12,85%
	Şubat	4,80%	-4,13%	9,18%	-9,26%	10,78%	-12,57%	9,42%	-13,02%
	Mart	5,20%	-4,86%	9,21%	-8,25%	10,72%	-10,80%	11,93%	-14,69%
	Nisan	5,48%	-5,02%	8,01%	-6,11%	9,43%	-7,30%	10,12%	-8,89%
	Mayıs	5,19%	-4,04%	7,39%	-6,81%	9,11%	-6,72%	10,80%	-8,65%
	Haziran	4,28%	-5,12%	7,01%	-8,40%	7,12%	-8,18%	9,95%	-8,53%
	Temmuz	4,60%	-4,00%	8,04%	-7,57%	8,98%	-9,16%	10,25%	-11,24%
	Ağustos	4,35%	-3,98%	6,04%	-9,03%	6,73%	-9,05%	8,76%	-9,87%
	Eylül	3,93%	-3,89%	6,05%	-6,44%	7,04%	-6,60%	7,87%	-7,44%
	Ekim	3,73%	-4,13%	6,01%	-8,69%	9,21%	-10,38%	10,81%	-14,40%
	Kasım	4,10%	-5,38%	6,15%	-8,70%	9,38%	-11,21%	9,35%	-13,30%
	Aralık	6,31%	-5,83%	5,56%	-9,77%	8,53%	-12,19%	9,67%	-11,63%

NHES rampaları pozitif ve negatif yönlü olmasından dolayı aylık rampa olaylarının ortalama değeri sıfır (veya küçük bir değer) olma eğilimindedir. Bu nedenle tesis üretim rampalarının ortalamaları ve standart sapmaları hesaplanırken rampa büyüklüklerinin mutlak değeri alınmıştır. Bu sayede negatif ve pozitif rampaların ortalama ve standart sapma hesaplamalarında sıfır (veya küçük bir değer) olma ihtimalinin önüne geçilmiştir. Ayrıca tesis üretimlerine ait rampaların standart sapmaları ve ortalamaları hesaplanırken tüm değişimler dikkate alınmıştır. Bir başka ifadeyle kurulu güce oranla %5 ve altındaki değişimler bu hesaplamalara dahil edilmiştir. Reel uygulamalar da geleneksel şebeke sistemlerinde %5 ve üzerindeki değişimler rampa olarak tanımlanmaktadır. Çünkü geleneksel şebeke sistemlerinde kontrol edilebilir enerji üretim kaynakları ( Termik santraller ve barajlar vs.) bulunmaktadır. Aylık NHES üretimlerindeki rampaların 1, 3, 6 ve 9 saatlik periyotlardaki ortalama güçleri ve kurulu güce oranla yüzdesel büyüklükleri Tablo 3'te verilmiştir.

**Tablo 3.** NHES üretimlerinin 1, 3, 6 ve 9 saatlik periyotlardaki rampa olaylarının ortalama güçleri ve kurulu güce oranla yüzdesel büyüklükleri

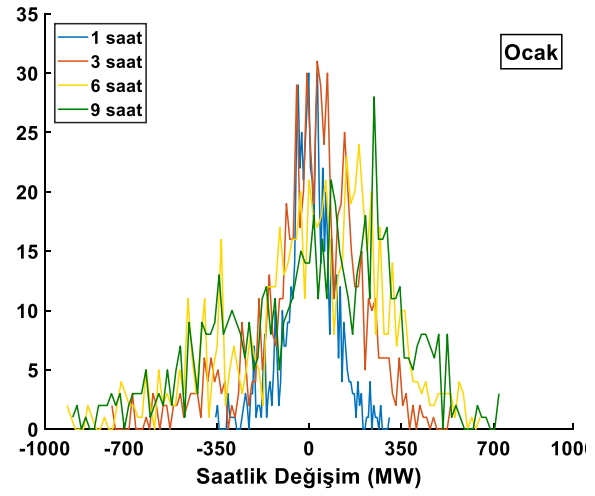
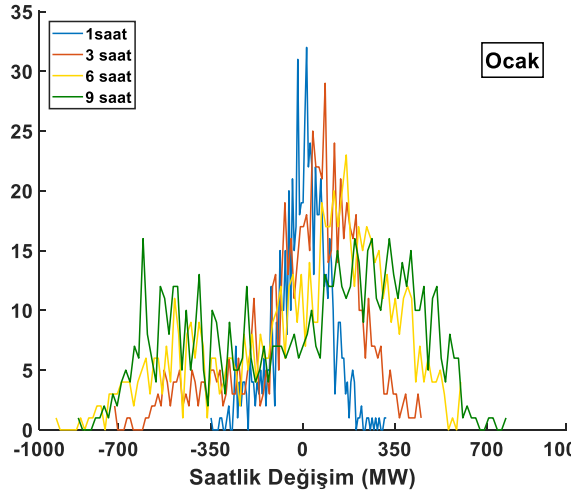
	1 Saat		3 saat		6 Saat		9 Saat		
	Ortalama (MW)	Yüzdesel Pay	Ortalama (MW)	Yüzdesel Pay	Ortalama (MW)	Yüzdesel Pay	Ortalama (MW)	Yüzdesel Pay	
2017	Ocak	78,75	1,12%	168,5	2,40%	269,14	3,83%	329,66	4,69%
	Şubat	79,19	1,13%	170,93	2,43%	262,86	3,74%	296,74	4,22%
	Mart	73,27	1,04%	140,62	2,00%	202,47	2,88%	235,05	3,35%
	Nisan	71,86	1,02%	136,58	1,94%	183,99	2,62%	207,56	2,95%
	Mayıs	62,53	0,89%	105,05	1,50%	140,24	2,00%	158,3	2,25%
	Haziran	77,36	1,10%	162,4	2,31%	246,35	3,51%	296,98	4,23%
	Temmuz	78,05	1,11%	165,75	2,36%	278,23	3,96%	352,48	5,02%
	Ağustos	71,9	1,02%	156,12	2,22%	248,63	3,54%	307,63	4,38%
	Eylül	64,59	0,92%	133,46	1,90%	220,49	3,14%	283,89	4,04%
	Ekim	67,19	0,96%	134,9	1,92%	205,15	2,92%	237,71	3,38%
	Kasım	78,96	1,12%	164,6	2,34%	249,09	3,55%	301,01	4,28%
	Aralık	82,02	1,17%	155,18	2,21%	226,05	3,22%	275,35	3,92%
2018	Ocak	72,87	1,04%	149,1	2,12%	226,42	3,22%	259,04	3,69%
	Şubat	74,12	1,05%	156,09	2,22%	217,39	3,09%	243,74	3,47%
	Mart	68,74	0,98%	134,21	1,91%	200,27	2,85%	239,39	3,41%
	Nisan	68,35	0,97%	134,83	1,92%	204,46	2,91%	236,14	3,36%
	Mayıs	65,26	0,93%	127,76	1,82%	196,19	2,79%	240,96	3,43%
	Haziran	66,42	0,95%	119,14	1,70%	157,35	2,24%	185,73	2,64%
	Temmuz	63,17	0,90%	127,14	1,81%	213,65	3,04%	274,09	3,90%
	Ağustos	62,14	0,88%	118,93	1,69%	178,56	2,54%	224,68	3,20%
	Eylül	54,52	0,78%	102,2	1,45%	157,33	2,24%	197,05	2,80%
	Ekim	58,64	0,83%	115,87	1,65%	168,99	2,41%	190,67	2,71%
	Kasım	67,76	0,96%	143,17	2,04%	234,71	3,34%	296,24	4,22%
	Aralık	69,76	0,99%	138,93	1,98%	196,15	2,79%	245,04	3,49%

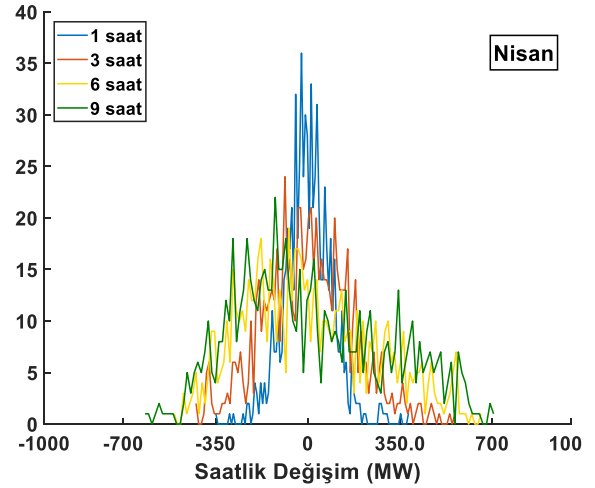
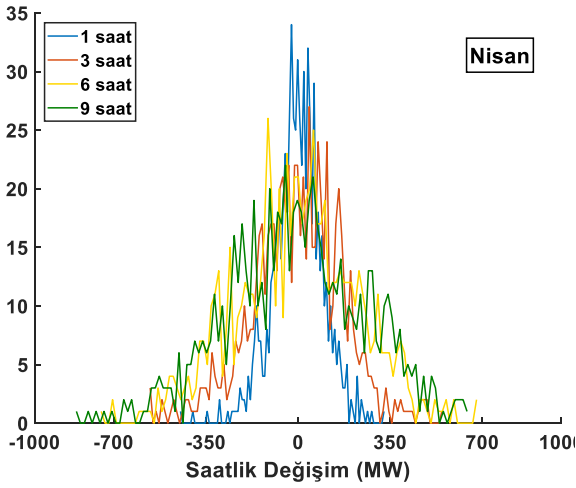
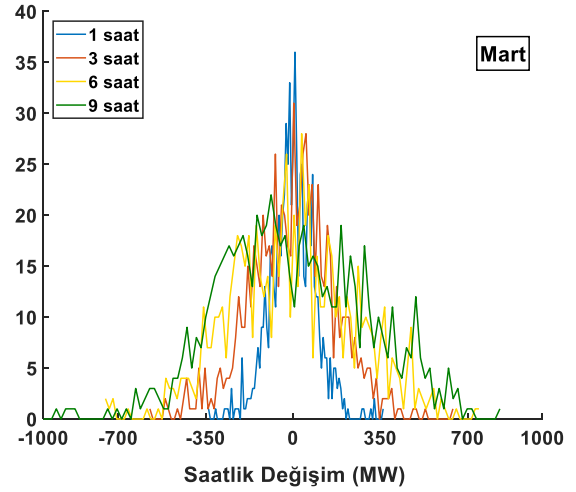
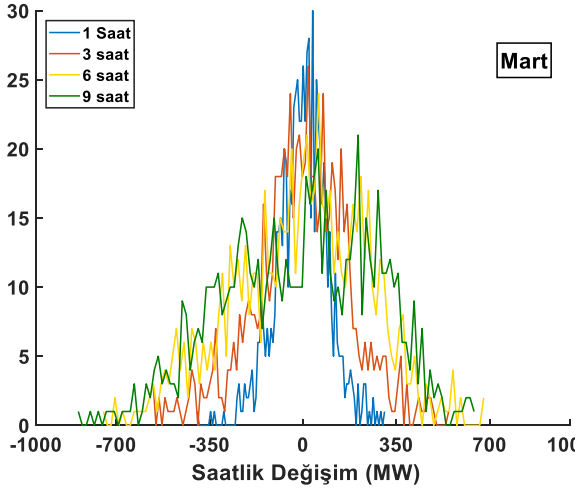
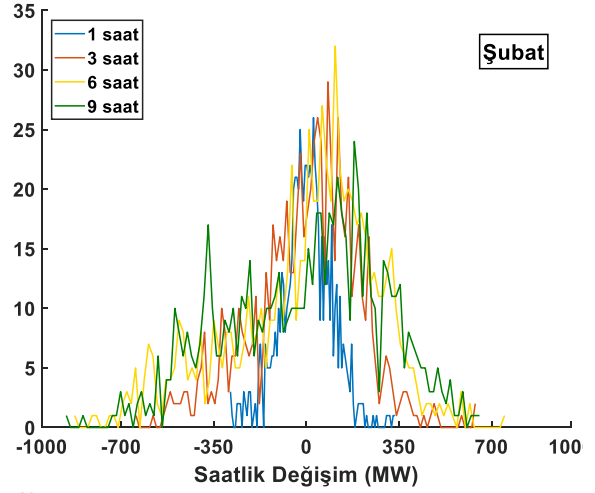
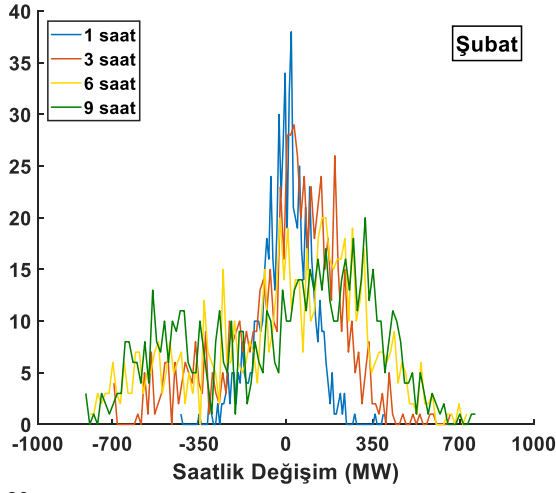
NHES üretim rampalarının farklı zamansal periyotlardaki standart sapmaları Tablo 4'te verilmiştir. Zaman periyotların büyümesiyle paralel olarak rampa olaylarının standart sapmaları da büyümüştür. 2017 yılında en küçük standart sapma Mayıs ayında görülmüştür. Mayıs ayının 1 ve 9 saatlik periyotlardaki standart sapmaları sırasıyla 49,46 MW ve 120,21 MW olarak hesaplanmıştır. Bu değişimi yüzdesel olarak değerlendirdiğimizde ise 9 saatlik periyotta, 1 saatlik periyota kıyasla rampaların standart sapmaları %1,01 artmıştır. 2018 yılı üretimlerini incelediğimizde rampaların standart sapmaları en küçük Eylül ayında görülmüştür. Eylül ayında 1, 3, 6 ve 9 saatlik periyotlardaki rampaların standart sapmaları sırasıyla 47,47 MW, 81,49 MW, 108,37 MW ve 121,56 MW hesaplanmıştır.

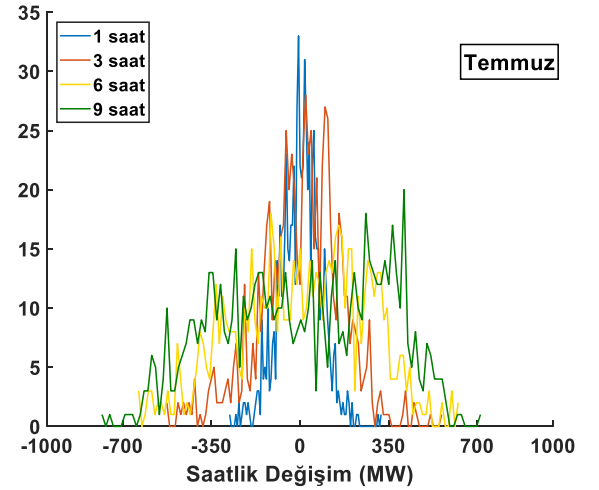
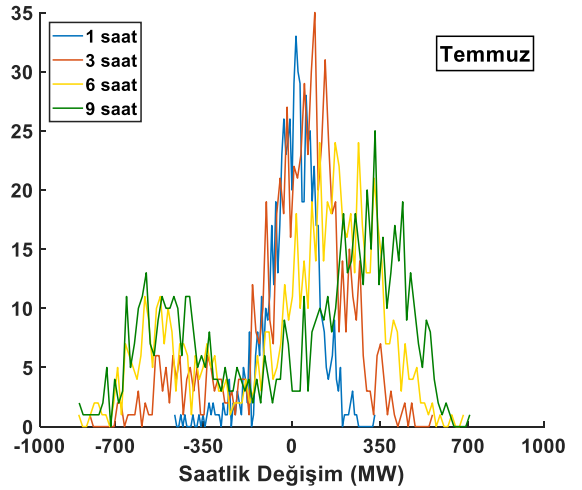
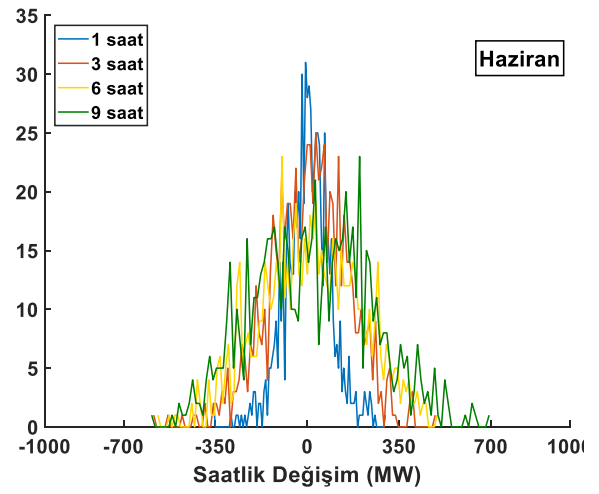
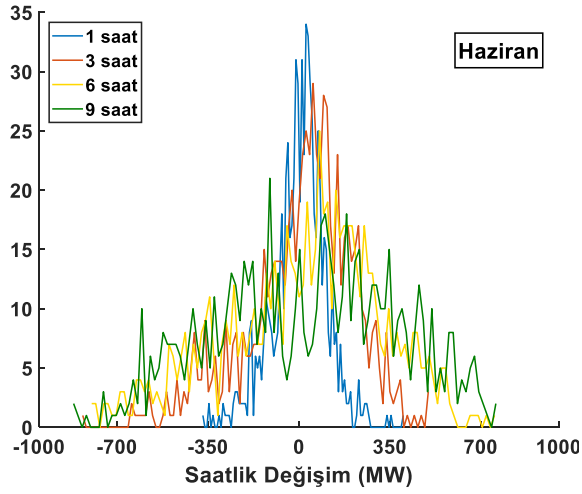
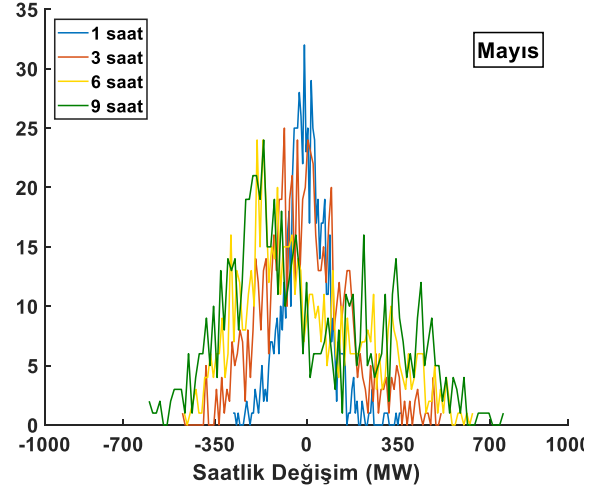
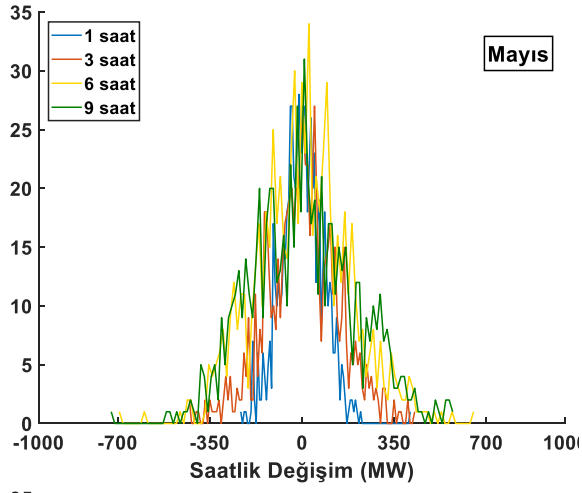
NHES üretim rampalarının aylık frekansları ve büyüklükleri Şekil 3'te verilmiştir. Şekillerin x-ekseni; oluşan rampa büyüklüklerini (saatlik değişimi), y-ekseni; rampaların sayılarını göstermektedir. Şekil 3'te verilen mavi, kırmızı, sarı ve yeşil renkler ise sırasıyla 1, 3, 6 ve 9 saatlik periyotlardaki rampaları tanımlamaktadır. Ayrıca verilen şeklin sol ve sağ sütunları sırasıyla 2017 ve 2018 yıllarına NHES üretimlerindeki rampaları göstermektedir.

**Tablo 4.** NHES üretim rampalarının farklı zamansal periyotlardaki standart sapmaları ve standart sapmaların yüzdesel büyüklükleri

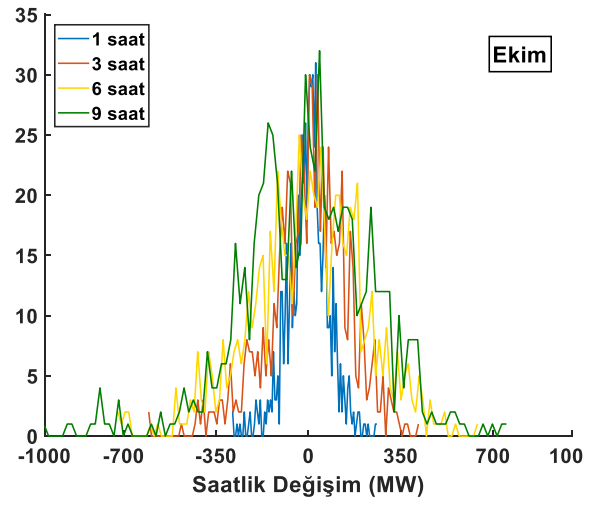
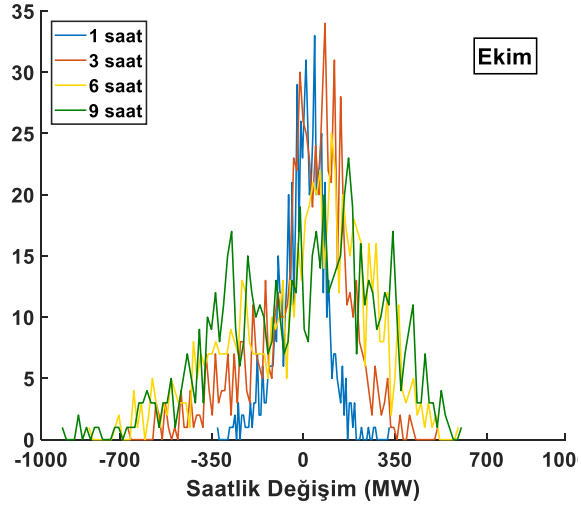
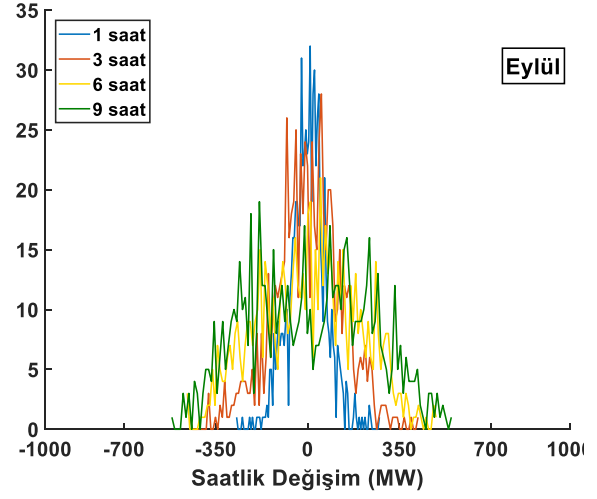
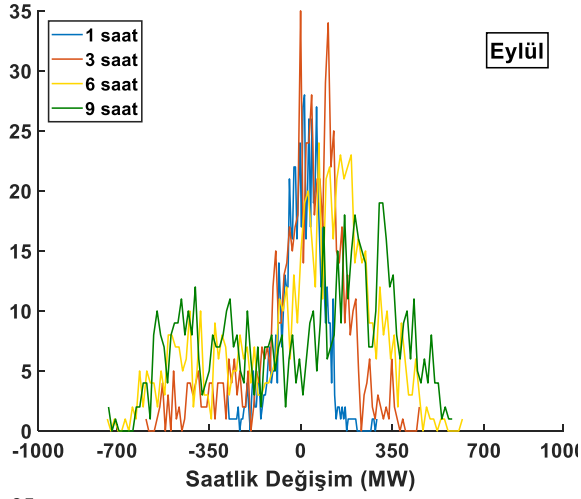
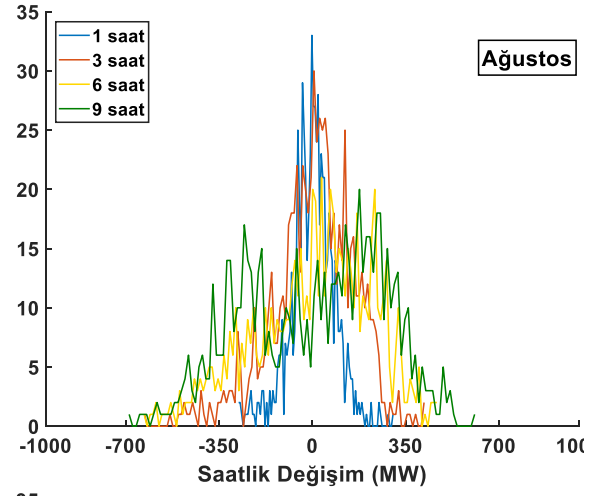
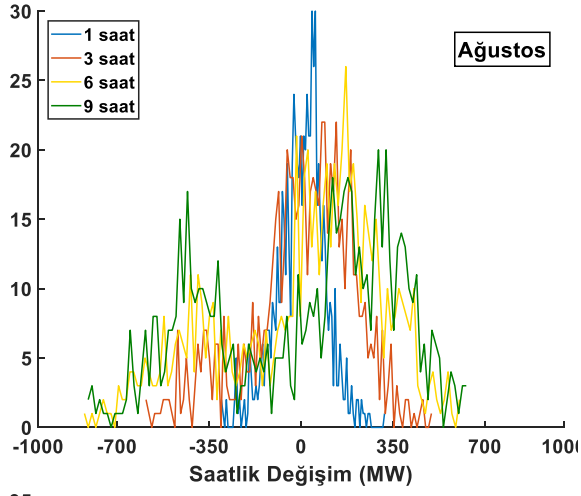
	1 Saat		3 saat		6 Saat		9 Saat		
	Standart Sapma (MW)	Yüzdesel Pay	Standart Sapma (MW)	Yüzdesel Pay	Standart Sapma (MW)	Yüzdesel Pay	Standart Sapma (MW)	Yüzdesel Pay	
2017	Ocak	66,98	0,95%	139,41	1,98%	185,75	2,64%	187,23	2,66%
	Şubat	66,69	0,95%	143,54	2,04%	190,46	2,71%	187,48	2,67%
	Mart	61,32	0,87%	117,46	1,67%	151,35	2,15%	159,38	2,27%
	Nisan	61,29	0,87%	111,71	1,59%	142,43	2,03%	158,31	2,25%
	Mayıs	49,46	0,70%	86,67	1,23%	112,09	1,60%	120,21	1,71%
	Haziran	67,57	0,96%	131,77	1,88%	178,82	2,55%	190,6	2,71%
	Temmuz	70,25	1,00%	147,22	2,10%	185,41	2,64%	178,69	2,54%
	Ağustos	59,17	0,84%	125,8	1,79%	176,35	2,51%	173,92	2,48%
	Eylül	54,92	0,78%	119,45	1,70%	159,17	2,27%	155,78	2,22%
	Ekim	56,75	0,81%	116,28	1,66%	151,04	2,15%	161,17	2,29%
	Kasım	71,25	1,01%	138,02	1,96%	185,42	2,64%	175,3	2,50%
	Aralık	66,05	0,94%	131,2	1,87%	173,75	2,47%	178,68	2,54%
2018	Ocak	65,69	0,94%	135,21	1,92%	177,94	2,53%	183,69	2,61%
	Şubat	62,51	0,89%	124,64	1,77%	170,76	2,43%	165,3	2,35%
	Mart	58,68	0,84%	107,18	1,53%	150,46	2,14%	171,82	2,45%
	Nisan	58,34	0,83%	104,32	1,48%	142,06	2,02%	157,51	2,24%
	Mayıs	57,68	0,82%	102,43	1,46%	129,62	1,84%	148,63	2,12%
	Haziran	57,5	0,82%	92,4	1,32%	112,44	1,60%	129,19	1,84%
	Temmuz	51,89	0,74%	103,56	1,47%	143,78	2,05%	159,75	2,27%
	Ağustos	55,75	0,79%	99,99	1,42%	129,07	1,84%	133,69	1,90%
	Eylül	46,47	0,66%	81,49	1,16%	108,37	1,54%	121,56	1,73%
	Ekim	51,62	0,73%	97,29	1,38%	135,02	1,92%	159,61	2,27%
	Kasım	58,09	0,83%	118,02	1,68%	167,79	2,39%	183,29	2,61%
	Aralık	61,21	0,87%	109,12	1,55%	155,41	2,21%	173,69	2,47%

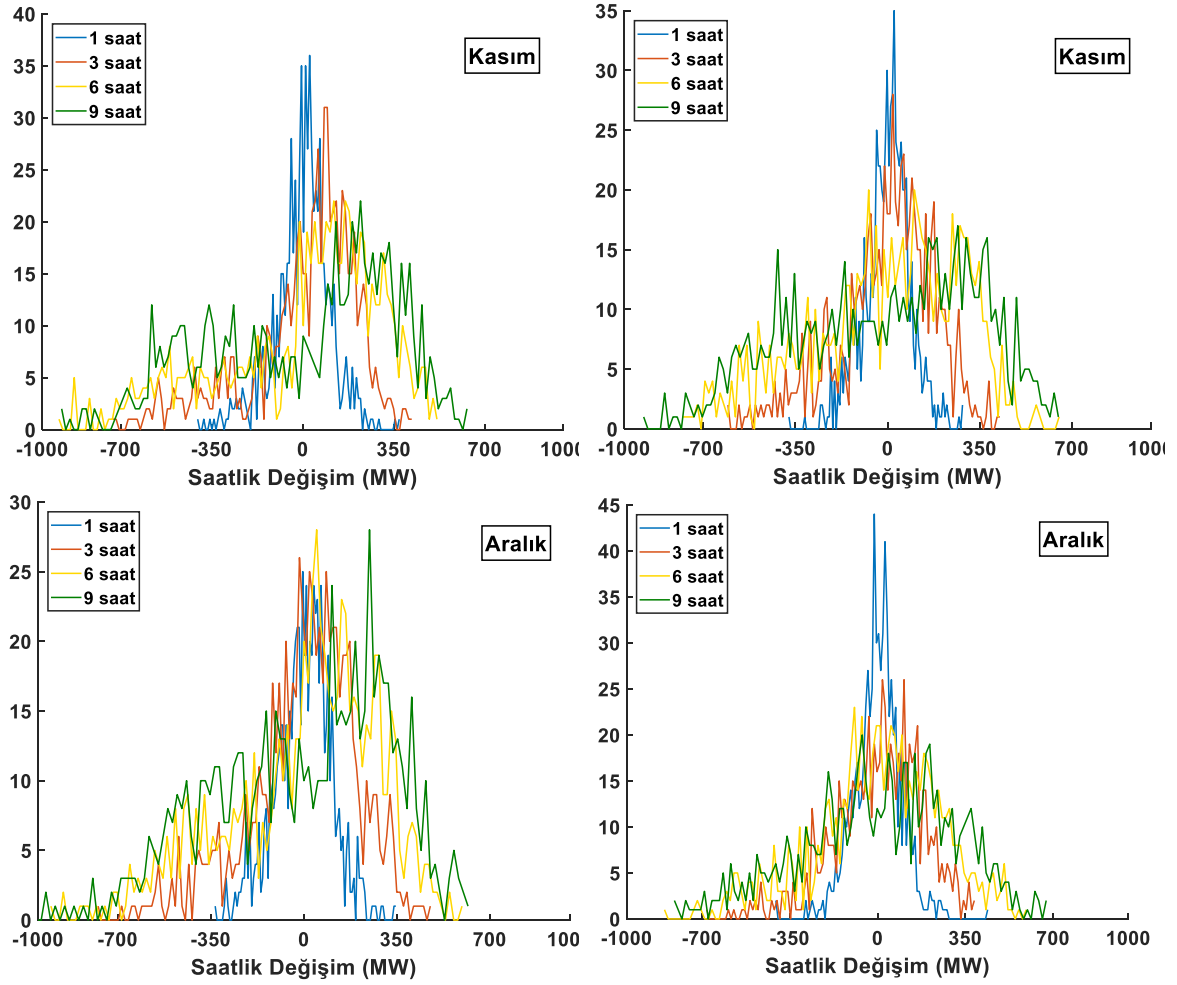












Şekil 4. 2017 ve 2018 NHES üretimleri rampa olayları ( sol sütun 2017 ve sağ sütun 2018) histogram grafikleri

Yapılan literatür incelemelerinde, reel şebeke işletmelerinde kurulu gücün; %5'i ve üzerindeki üretim değişimleri rampa olarak tanımlanmıştır[35]. Bu alanda yapılan reel uygulamaları incelediğimizde ise Nordic Grid Code [36] ve Porto Riko Elektrik Enerjisi Kurumu [36] toplam güç kapasitesinin %10'u ve üzerindeki varyasyonları rampa olarak tanımlamışlardır. Bu nedenle yapılan çalışmada tüm üretim değişimlerinin incelenmesine ek olarak Türkiye NHES toplam güç kapasitesinin %5'i ve %10'nun üzerindeki rampa olayları incelenmiştir. Bu sayede NHES üretimlerindeki rampa olayları her açıdan değerlendirilmiştir.

Şekil 4'te verilen NHES üretimlerinin 1, 3, 6 ve 9 saatlik periyotlardaki üretimlere ait aylık rampa histogram grafiklerini incelediğimizde negatif yönlü değişimlerin pozitif yönlü değişimlere oranla daha fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca 1 saatlik periyotlarda oluşan rampalar genel olarak kurulu gücün %5'ini geçememiştir. Bu nedenle 1 saatlik periyotlardaki üretim değişimleri rampa olarak tanımlanamamaktadır. NHES üretimlerinin reel uygulamalardaki aylık rampa olaylarının daha net görülebilmesi amacıyla yapılan çalışmada histogram grafiklerinin alanları incelenmiştir. Şekil 4'te verilen histogram grafiklerindeki 350 MW ve üzerindeki değişimler rampa olarak tanımlanmıştır. NHES üretimlerinde görülen rampa büyüklüklerinin frekanslara göre daha net görülebilmesi amacıyla 350 MW ve 700 MW üzerindeki kümülatif histogram alanları hesaplanmıştır.

2017 ve 2018 yıllarındaki aylık NHES üretimlerinin 1, 3, 6 ve 9 saatlik periyotlardaki histogram grafik alanları sırasıyla Tablo 5 ve Tablo 6 verilmiştir. Tablolarda verilen %5 ve %10 yüzdelik dilimler sırasıyla 350 MW ve 700 MW üzerindeki rampa histogram alanlarını göstermektedir. Burada yer alan Negatif ifadesi, üretim azalmalarıyla oluşan rampaları tanımlarken pozitif ifadesi ise üretim artmalarıyla oluşan rampaları tanımlamaktadır.

**Tablo 5.** 2017 yılı rampa olayları kümülatif histogram grafik alanları

		1 saat		3 saat		6 saat		9 saat	
		%5	%10	%5	%10	%5	%10	%5	%10
Ocak	Negatif	0,0	0,0	764,6	11,7	2080,8	232,9	2831,5	155,9
	Pozitif	0,0	0,0	164,6	0,0	1358,7	0,0	2363,7	32,8
Şubat	Negatif	8,2	0,0	972,6	0,0	1909,4	168,7	2522,9	126,9
	Pozitif	12,4	0,0	226,0	0,0	1173,2	7,7	1634,3	31,7
Mart	Negatif	7,0	0,0	307,6	0,0	1029,1	21,5	1295,8	74,8
	Pozitif	0,0	0,0	223,7	0,0	597,3	0,0	898,7	0,0
Nisan	Negatif	11,1	0,0	246,1	0,0	690,8	21,5	958,7	59,9
	Pozitif	0,0	0,0	184,6	0,0	575,7	0,0	868,8	0,0
Mayıs	Negatif	0,0	0,0	51,8	0,0	135,8	0,0	236,6	6,5
	Pozitif	3,3	0,0	38,8	0,0	319,2	0,0	353,4	0,0
Haziran	Negatif	3,8	0,0	698,5	6,7	1542,5	133,1	1928,8	123,1
	Pozitif	7,7	0,0	201,5	0,0	1323,3	23,4	2134,0	49,2
Temmuz	Negatif	36,0	0,0	974,7	6,8	2327,8	131,0	3083,5	234,7
	Pozitif	0,0	0,0	247,1	0,0	1083,8	0,0	2386,9	0,0
Ağustos	Negatif	0,0	0,0	576,0	0,0	1773,1	93,7	1449,1	138,0
	Pozitif	0,0	0,0	137,1	0,0	1037,9	0,0	1715,1	0,0
Eylül	Negatif	0,0	0,0	468,5	0,0	1477,4	13,6	1827,0	19,8
	Pozitif	0,0	0,0	42,1	0,0	581,3	0,0	1271,0	0,0
Ekim	Negatif	0,0	0,0	424,1	0,0	1081,9	35,5	1369,3	107,6
	Pozitif	0,0	0,0	65,2	0,0	484,0	0,0	976,0	0,0
Kasım	Negatif	19,5	0,0	758,9	17,3	1745,0	241,9	2311,7	172,9
	Pozitif	11,7	0,0	63,7	0,0	843,2	0,0	1596,2	0,0
Aralık	Negatif	0,0	0,0	625,0	6,3	1648,6	164,0	2259,1	229,4
	Pozitif	0,0	0,0	107,3	0,0	656,3	0,0	1535,5	0,0

2017 yılı NHES üretimlerinin histogram rampa alanlarını incelediğimizde 1, 3, 6 ve 9 saatlik periyotlarda 350MW (%5) ve üzerindeki toplam alanlar sırasıyla 121, 8570, 27477 ve 39808 olarak hesaplanmıştır. 2017 yılının 700MW (%10) ve üzerindeki rampaların 1, 3, 6 ve 9 saatlik periyotlardaki toplam alanları ise 0, 49, 1289,14 ve 1563,9'dur. 2017 yılında 1, 3, 6 ve 9 saatlik periyotlardaki %5 ve üzerindeki negatif ve pozitif yönlü rampaların toplam alanı sırasıyla 46471,5 ve 29506,2 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca %10 ve üzerindeki tüm zamansal periyotlardaki negatif ve pozitif yönlü rampaların toplam alanları ise sırasıyla 2757,1 ve 144,5 olarak bulunmuştur.

**Tablo 6.** 2018 yılı rampa olayları kümülatif histogram grafik alanları

		1 saat		3 saat		6 saat		9 saat	
		5%	10%	5%	10%	5%	10%	5%	10%
Ocak	Negatif	0,0	0,0	673,6	0,0	1445,6	158,0	1777,0	160,9
	Pozitif	0,0	0,0	155,4	0,0	813,6	0,0	1230,9	24,5
Şubat	Negatif	0,0	0,0	544,0	0,0	1607,9	73,8	1821,7	78,9
	Pozitif	0,0	0,0	233,1	0,0	656,2	8,2	1096,2	0,0
Mart	Negatif	0,0	0,0	269,8	0,0	703,0	60,4	1178,7	112,3
	Pozitif	3,5	0,0	165,6	0,0	975,1	22,7	1637,1	18,9
Nisan	Negatif	0,0	0,0	153,7	0,0	470,2	0,0	781,5	0,0
	Pozitif	7,4	0,0	182,5	0,0	934,6	0,0	1462,7	0,0
Mayıs	Negatif	0,0	0,0	54,9	0,0	272,5	0,0	806,2	0,0
	Pozitif	6,4	0,0	184,6	0,0	723,0	0,0	1380,2	6,4
Haziran	Negatif	6,6	0,0	81,2	0,0	182,7	0,0	307,1	0,0
	Pozitif	0,0	0,0	59,6	0,0	263,3	0,0	675,1	0,0
Temmuz	Negatif	0,0	0,0	230,3	0,0	822,4	0,0	1661,1	22,7
	Pozitif	0,0	0,0	89,7	0,0	586,5	0,0	1849,8	0,0
Ağustos	Negatif	0,0	0,0	195,9	0,0	593,2	0,0	870,4	0,0
	Pozitif	0,0	0,0	37,1	0,0	232,9	0,0	582,5	0,0
Eylül	Negatif	0,0	0,0	35,1	0,0	139,0	0,0	387,8	0,0
	Pozitif	0,0	0,0	31,9	0,0	153,3	0,0	505,8	0,0
Ekim	Negatif	0,0	0,0	154,9	0,0	619,3	20,6	770,3	239,0
	Pozitif	0,0	0,0	25,8	0,0	481,7	0,0	770,3	26,6
Kasım	Negatif	3,3	0,0	401,7	0,0	1504,8	79,6	2419,0	222,8
	Pozitif	0,0	0,0	73,0	0,0	665,6	0,0	1718,7	0,0
Aralık	Negatif	8,5	0,0	301,6	0,0	997,6	58,5	1399,7	112,3
	Pozitif	4,3	0,0	70,0	0,0	633,5	0,0	1294,9	0,0

2018 yılı NHES üretim rampalarına ait histogram grafik alanlarını incelediğimizde 1, 3, 6 ve 9 saatlik periyotlardaki 350MW (%5) ve üzerindeki kümülatif alanlar sırasıyla 39, 4404, 16477 ve 28384 olarak hesaplanmıştır. 1, 3, 6 ve 9 saatlik periyotlarda 700 MW (%10) ve üzerindeki kümülatif alanlar ise sırasıyla 0, 0, 481 ve 1024 bulunmuştur. 1 ve 3 saatlik periyotlar da 700 MW ve üzerindeki alanların 0 olması bu zamansal periyotlarda 700 MW ve üzerinde negatif veya pozitif yönlü herhangi bir rampanın meydana gelmediğini göstermektedir. 2018 yılında 1, 3, 6 ve 9 saatlik periyotlardaki %5 ve üzerindeki negatif ve pozitif yönlü rampaların toplam alanı sırasıyla 22653,2 ve 226653,7 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca %10 ve üzerindeki tüm zamansal periyotlardaki negatif ve pozitif yönlü rampaların toplam alanları ise sırasıyla 107,16 ve 1399,63 olarak bulunmuştur.

## 5. Sonuç

Dünyadaki, teknoloji ve sanayi alandaki büyümeyle beraber enerji talebi de paralel olarak artış göstermektedir. Artan enerji talebinin, küresel ısınma ve çevresel sorunlardan dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması bu yüzyılda büyük önem kazanmıştır. Fakat yenilenebilir enerji kaynaklarının tahmin edilemeyen üretim yapısından dolayı bu kaynakların geleneksel şebeke sistemlerine entegrasyonları şebeke esnekliği ve güvenliği açısından birçok soruna neden olmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının üretim değişiminin yönünü, büyüklüğünü, zamanını ve frekansını öngörebilmek amacıyla Türkiye NHES üretimlerinin rampa olayları incelenmiştir. İncelemeler sonucunda 2017-2018 yıllarına ait aylık NHES toplam üretimlerinin 1, 3, 6 ve 9 saatlik periyottaki rampa olaylarının ortalaması, standart sapması, maksimum ve minimum değerleri elde edilmiştir. Ayrıca farklı zamansal periyotlardaki bu değerler, kurulu toplam kapasiteye göre aylık olarak değerlendirilmiştir. 2017 yılında 1 saatlik periyottaki rampaların oluşum zamanlarına göre en yüksek standart sapma, ortalama, maksimum ve minimum değerleri sırasıyla Ocak 66,98MW, Aralık 82,02 MW, Mayıs 4138,31 MW ve Temmuz 4679,82 MW olarak hesaplanmıştır. 2018 yılında 1 saatlik periyottaki rampaların oluşum zamanlarına göre en yüksek standart sapma, ortalama, maksimum ve minimum değerleri ise sırasıyla Ocak 65,69 MW, Aralık 69,76 MW, Aralık 4433,67 MW ve Aralık 4096,15 MW olarak hesaplanmıştır. 1 saatlik periyottaki NHES üretim rampalarının istatistiksel özelliklerini değerlendirdiğimizde maksimum ve minimum rampa olaylarının aylık olarak oluşum zamanlarının tahmin edilemeyeceği sonucuna ulaşılmıştır. Fakat aynı zamansal periyottaki rampaların ortalamalarını ve standart sapmalarını incelediğimizde en fazla rampa olaylarının kış aylarında (Aralık, Ocak, Şubat) gerçekleştiği görülmüştür. Ayrıca farklı zamansal periyotlardaki rampa olaylarını değerlendirdiğimizde rampa olaylarının yoğunluk gösterdiği zamanlar çok fazla değişkenlik göstermediği sonucuna ulaşılmıştır. Bu sonuçlardan istisna olarak 2017 ve 2018 NHES üretim rampaların Temmuz aylarında yükseldiği görülmüştür. Bu durum küresel ısınmaya bağlı olarak artan buharlaşma ve tarımsal amaçlı su kullanımlarından kaynaklanmaktadır[37]–[39].

NHES üretimlerinde görülen rampa olaylarının kurulu kapasitenin %5 ve %10 sınırlarına göre değerlendirdiğimizde 2017 ve 2018 yıllarında 1 saatlik ve 3 saatlik periyotlarda %10 ve üzerinde rampa olayları histogram alanlarının çok az veya 0 olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu durum bu 1 ve 3 saatlik zamansal periyotlarda toplam NHES üretimlerinde 700 MW ve üzerinde değişimler meydana gelmediğini göstermektedir. Ayrıca Tablo 5 ve Tablo 6 da verilen rampa olayları histogram alanları incelendiğinde negatif yönlü rampa alanlarının daha fazla olduğu görülmüştür. Tesis üretimlerinde görülen rampa olaylarının ağırlıklı olarak negatif yönlü olması, Türkiye'deki NHES rampalarının daha çok üretim azalmalarından kaynaklandığını göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre rampaların büyüklüğüne, frekansına ve zamanına göre önlemler alınması durumunda yenilenebilir enerji kaynaklarının geleneksel şebeke sistemine entegrasyon sorunlarının minimize edileceği ön görülmektedir. Bu nedenle gelecekte yapılacak çalışmalar da mevcut veriler değerlendirilerek derin öğrenme metodları kullanılarak rampa tahminlerinin yapılması veya planlamaya yönelik minimum rampa olaylarına sahip optimum tesis kümelerinin belirlenmesi alanında çalışmalar yapılması önerilmektedir.

## Kaynaklar

- [1] C. Yıldız ve H. Acikgoz, "A kernel extreme learning machine-based neural network to forecast very short-term power output of an on-grid photovoltaic power plant," *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 00, no. 00, pp. 1–18, 2020.
- [2] İ. Karadöl, C. Yıldız, H. Açıkgoz, ve M. Şekkeli, "Yenilenebilir Enerji Kaynaklarında Sürekliliği Sağlamak için Optimum Enerji Karışımının Belirlenmesi : Kahramanmaraş Bölgesinde Bir Uygulama," *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimar. Fakültesi Derg.*, vol. 35, no. March, pp. 173–182, 2020.

- [3] İ. Çelik, C. Yıldız ve M. Şekkeli, “Wind Power Plant Layout Optimization Using Particle Swarm Optimization,” *Turkish J. Eng.*, vol. 5, no. 2, pp. 1–6, 2021.
- [4] İ. Çelik, C. Yıldız, M. Şekkeli ve H. Y. Hasirci, “1 kW Rüzgâr Türbini için Enerji Üretim ve Gelir Hesabı : Kahramanmaraş Bölgesi Örnek Çalışması,” 2020.
- [5] Irena, “Renewable capacity statistics 2020 International Renewable Energy Agency,” 2020.
- [6] REN21, *Renewables 2021 Global Status Report*. 2021.
- [7] TMMOB, “Türkiye’de Elektrik Enerjisi İstatistikleri,” 2020.
- [8] R. P. Gallardo, A. M. Ríos ve J. S. Ramirez, “Analysis of the solar and wind energetic complementarity in Mexico,” *J. Clean. Prod.*, vol. 268, 2020.
- [9] O. Aslantürk ve G. Kıprızlı, “The role of renewable energy in ensuring energy security of supply and reducing energy-related import,” *Int. J. Energy Econ. Policy*, vol. 10, no. 2, pp. 354–359, 2020.
- [10] L. De Rosa ve R. Castro, “Forecasting and assessment of the 2030 Australian electricity mix paths towards energy transition,” *Energy*, vol. 205, p. 118020, 2020.
- [11] K. İsrail, C. Yıldız ve M. Şekkeli, “Türkiye’de RES Üretimlerindeki Rampa Olaylarının Minimize Edilmesi için Bölgesel Tesis Konumu Belirleyen Yeni Bir Optimizasyon Modeli,” *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.*, vol. 8, no. 4, pp. 959–971, 2020.
- [12] Y. Wan, “Analysis of Wind Power Ramping Behavior in ERCOT,” NREL, no. March, 2011.
- [13] E. Ela ve J. Kemper, “Wind Plant Ramping Behavior,” *Contract*, no. December, 2009.
- [14] J. Yan, T. Qu, S. Han, Y. Liu, X. Lei ve H. Wang, “Reviews on characteristic of renewables: Evaluating the variability and complementarity,” *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, no. September 2019, pp. 1–21, 2020.
- [15] E. SONI, “Annual Renewable Energy Constraint and Curtailment Report 2018,” no. May, 2019.
- [16] Bundeskartellamt, “Monitoring report 2017 Monitoring Report 2017,” 2017.
- [17] G. Li ve C. Gu, “Economic Dispatch of Combined Heat and Power Energy Systems Using Electric Boiler to Accommodate Wind Power,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 41288–41297, 2020.
- [18] F. Xia, X. Lu ve F. Song, “The role of feed-in tariff in the curtailment of wind power in China,” *Energy Econ.*, vol. 86, 2020.
- [19] S. Mishra, M. Leinakse ve I. Palu, “Wind power variation identification using ramping behavior analysis,” *Energy Procedia*, vol. 141, pp. 565–571, 2017.
- [20] H. Zheng ve A. Kusiak, “Prediction of wind farm power ramp rates: A data-mining approach,” *J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME*, vol. 131, no. 3, pp. 0310111–0310118, 2009.
- [21] J. Zhao, S. Abedi, M. He, P. Du, S. Sharma ve B. Blevins, “Quantifying Risk of Wind Power Ramps in ERCOT,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 6, pp. 4970–4971, 2017.
- [22] H. S. Dhiman, D. Deb ve J. M. Guerrero, “Hybrid machine intelligent SVR variants for wind forecasting and ramp events,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 108, no. April, pp. 369–379, 2019.
- [23] M. Wierzbowski, I. Filipiak ve W. Lyzwa, “Polish energy policy 2050 – An instrument to develop a diversified and sustainable electricity generation mix in coal-based energy system,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 74, no. May 2016, pp. 51–70, 2017.
- [24] C. De Oliveira Costa Souza Rosa, K. A. Costa, E. Da Silva Christo ve P. B. Bertahone, “Complementarity of hydro, photovoltaic, and wind power in Rio de Janeiro State,” *Sustain.*, vol. 9, no. 7, pp. 1–12, 2017.
- [25] “Hydropower.” [Online]. Available: <https://www.irena.org/hydropower>. [Accessed: 01-Oct-2021].
- [26] S. Rules, “Area under a Curve : Trapezoidal and Simpson ’ s Rules Simpson ’ s rule is a method for evaluating the area under a curve from values of,” no. X, pp. 77–81, 1987.
- [27] S.-T. Yeh, “Using Trapezoidal Rule for the Area under a Curve Calculation,” *Proc. 27th Annu. SAS® User Gr. Int.*, vol. SUGI’02, pp. 1–5, 2002.
- [28] K. C. Yeh ve K. C. Kwan, “A comparison of numerical integrating algorithms by trapezoidal, Lagrange, and spline approximation,” *J. Pharmacokinet. Biopharm.*, vol. 6, no. 1, pp. 79–98, 1978.
- [29] K. Roushangar, R. Khoshkanar ve J. Shiri, “Predicting trapezoidal and rectangular side weirs discharge coefficient using machine learning methods,” *ISH J. Hydraul. Eng.*, vol. 22, no. 3, pp. 254–261, 2016.
- [30] A. Couto, P. Costa, L. Rodrigues, V. V. Lopes ve A. Estanqueiro, “Impact of Weather Regimes on the Wind Power Ramp Forecast in Portugal,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 6, no. 3, pp. 934–942, 2015.
- [31] H. Li, J. Wang, H. Lu ve Z. Guo, “Research and application of a combined model based on variable weight for short term wind speed forecasting,” *Renew. Energy*, vol. 116, pp. 669–684, 2018.
- [32] D. Radu ve diğ., “Complementarity assessment of south Greenland katabatic flows and West Europe wind regimes,” *Energy*, vol. 175, pp. 393–401, 2019.
- [33] F. Weschenfelder ve diğ., “A review on the complementarity between grid-connected solar and wind power systems,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 257. Elsevier Ltd, 01-Jun-2020.
- [34] S. Becker ve diğ., “Features of a fully renewable US electricity system: Optimized mixes of wind and solar PV and transmission grid extensions,” *Energy*, vol. 72, pp. 443–458, 2014.
- [35] G. F. Frate, P. Cherubini, C. Tacconelli, A. Micangeli, L. Ferrari ve U. Desideri, “Ramp rate abatement for wind power plants: A techno-economic analysis,” *Appl. Energy*, vol. 254, no. August, p. 113600, 2019.
- [36] G. Vahan ve S. Booth, “Review of PREPA technical requirements for interconnecting wind and solar generation,” *Natl. Renew. Energy Lab. (NREL), Tech. Rep. NREL/TP-5D00-57089.*, no. November, p. 72, 2013.

- [37] Y. Z. Kaya, "Bulanık Mantık Yöntemi ile Mevsimsel Verilere Dayalı Buharlaşma Tahmini," 2016.
- [38] P. G. Kargı, "Ergene Havzası Yağış – Akış İlişkilerinin Hidrolojik ve Hidrolik Modelleme ile Belirlenmesi," 2019.
- [39] B. Çakmak ve Z. Gökalp, "İklim Değişikliği ve Etkin Su Kullanımı," Tarım Bilim. Araştırma Derg., vol. 4, no. 1, pp. 87–95, 2011.



## Bağdere Tufası'nın Jeolojik, Jeokimyasal ve Jeokronolojik Özellikleri (Elazığ, D Türkiye)

Serap ÇOLAK EROL<sup>1\*</sup>, Ercan AKSOY<sup>1</sup>, Mehmet ÖZKUL<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>2</sup> Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye

\*<sup>1</sup>serapcolak@firat.edu.tr, <sup>1</sup>eaksoy@firat.edu.tr, <sup>2</sup>mozkul.mehmet@gmail.com

(Geliş/Received: 07/12/2021;

Kabul/Accepted: 10/01/2022)

**Öz:** Çalışmaya konu olan tufa yüzleği, Türkiye'nin ikinci büyüklükteki neotektonik yapısı olan sol yanal doğrultu atımlı Doğu Anadolu Fay Sistemi'nin önemli zonlarından biri olan Elazığ Fay Zonu üstünde, Elazığ şehir merkezinin yaklaşık 20 km güneybatısında bulunur. Tufaların yanal-düşey ilişkili olduğu Kuvaterner yaşlı Palu Formasyonu, karasal kökenli kırıntılı çökellerle karakterize edilir. Tufa oluşumunda kaynak kaya rolü oynayan Devoniyen-Jura yaşlı Keban Metamorfitleri'nin Elazığ çevresindeki yüzlekleri, çoğunlukla mermerlerle karakterize edilir. Keban Metamorfitleri'nin litolojisi ve sol yanal doğrultu atımlı Elazığ Fay Zonu'nun meydana getirdiği kırıklı yapı, akışkan dolaşımında ve bundan dolayı tufanın oluşmasında önemli bir görev almıştır. Tufa örneklerinde belirlenen element miktarları, Ca: 384719-390151 ppm, Mg: 3498-4764 ppm, Sr: 112-338 ppm düzeyindedir.  $\delta^{13}\text{C}$  değerleri, 0.4 ila 2.6 (‰ PDP),  $\delta^{18}\text{O}$  değerleri ise -9.9 ila -11.4 (‰PDB) arasındadır. Çalışmadan elde edilen veriler birlikte değerlendirildiğinde, Bağdere tufasının, sığ göl ortamında oluştuğu düşünülmektedir. Örneklerden elde edilen U-Th yaş verileri, tufa çökeliiminin günümüzden en azından 524,597 yıl önce başlamış olduğuna işaret etmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Doğu Anadolu Fay Sistemi, Elazığ, Tufa, U-Th Yaş Analizi, Jeokimya.

### Geological, Geochemical and Geochronological Characteristics of the Bağdere Tufa (Elazığ, E. Turkey)

**Abstract:** The tufa outcrop which is the subject of the study, is located on the Elazığ Fault Zone, which is one of the important zones of the left lateral strike slip East Anatolian Fault System, which is Turkey's second largest neotectonic structure, approximately 20 km southwest of the city center of Elazığ. Quaternary aged Palu Formation to which tufas are related vertically and laterally is characterized by clastic deposits of terrestrial origin. The outcrops of Devonian-Jurassic Keban Metamorphics, which played the role of source rock in the tufa occurrence, around Elazığ are mostly characterized by marbles. The lithology of the Keban Metamorphics and the fractured structure formed by the left lateral strike slip Elazığ Fault Zone played an important role in the fluid circulation and thus in the occurrence of the tufa. Element amounts determined in tufa samples are at the level of Ca: 384719-390151 ppm, Mg: 3498-4764 ppm, Sr: 112-338 ppm.  $\delta^{13}\text{C}$  values range from 0.4 to 2.6 (‰ PDP), and  $\delta^{18}\text{O}$  values range from -9.9 to -11.4 (‰PDB). When the data obtained from the study are evaluated together, it is thought that the Bağdere tufa was formed in a shallow lake environment. U-Th age data obtained from the samples indicate that tufa deposition started at least 524,597 years ago.

**Key Words:** The East Anatolian Fault System, Elazığ, Tufa, U-Th Age Analysis, Geochemistry.

#### 1. Giriş

Ford ve Pedley [1]'e göre tufa terimi, Eski Roma devirlerinde ince tanelere ufalanabilen kayacı (günümüzde tufa olarak adlandırılır) ve ince taneli beyazımsı volkanik tozları (günümüzde tuf olarak adlandırılır) içeren beyaz kayalara verilen bir ad olan "tophus" 'dan türetilmiştir. Bates ve Jackson [2] ise tufayı, bir gölde, suyu karbonatlı olan bir ırmak kenarında ya da sıcak ve soğuk kaynak çıkışlarında çökelen kalın soğansı biçimde ve yığışım şeklinde, bazen ince kabuksu yapıda, ge<sup>f</sup>vrek ve süngerimsi, poroziteli olan kimyasal kökenli tortul kaya olarak tanımlamışlar; algler ve bakteriler tarafından çökeltildiğini belirtmişlerdir. Challinor'un Jeoloji Sözlüğü [3] tufayı, kaynak veya süzülen sulardan oluşan yumuşak ve gözenekli (poröz) bir çeşit kireçtaşı olarak tanımlar. Pedley [4] tufayı, ılık ve soğuk su kaynakları etrafında çökelen aşırı poroziteli ve süngerimsi yapılı, yaprağımsı ve odunsu dokulu karbonat oluşumu şeklinde nitelerken, Ford ve Pedley [1] ise terimin, İngilizce konuşulan ABD dışındaki ülkelerde, Kuvaterner ve günümüzde yaygın olan kalkerli tatlı su çökellerini tanımlamak için kullanıldığını belirtirler. Bunlar; serin, ılıman ve yarı kurak yerlerdeki şelaleler ve kaynaklarda oluşmaktadır. ABD, İspanyolca konuşulan ülkeler ve günümüz Avrupa'sındaysa çoğunlukla tufa tabirine karşılık traverten

\* Sorumlu yazar: [serapcolak@firat.edu.tr](mailto:serapcolak@firat.edu.tr). Yazarların ORCID Numaraları: 1\* 0000-0003-1957-3012, 1 0000-0001-5078-7217, 2 0000-0002-0949-4225



kullanılmaktadır [5]. Çoğunlukla tufa, bütün soğuk ya da ılık tatlı su ortamında hayat süren algler ya da bakterilerce çöktürülen, organik madde içeriğinden dolayı gözenekli ve süngerimsi yapıdaki kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) çöktürmeleri olarak kabul edilir.

Traverten terimi için birbirine yakın tanımlar yapılmakla beraber [2, 3, 6-8] yaygın olarak traverten, karstik ve sıcak su kaynakları etrafında, ufak ırmaklar ve bataklıklarda meydana gelebilen, kimyasal ve/veya biyokimyasal sistemle çökelebilen sıkı yapıli kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) çöktürleridir. Travertenlerde ilksel mineral, kalsittir.

Traverten ve tufaların ortak yönü, kalsiyum karbonatlı ( $\text{CaCO}_3$ ) kaynak veya diğler sulardan çöktürmüş karasal kökenli karbonat kayaçları olmalarıdır. Birbirinden, dokularını yansıtan özellikleri esas alınarak ayrılırlar. Bazı araştırmacılara göre 'traverten', genellikle sert ve kompakt, sıcak su (hidrotermal) çöktürü için; buna karşılık 'tufa' ise soğuk su kaynağında ya da göllerde oluşun gözenekli, süngerimsi çöktürüm için kullanılmıştır [9-10]. Çalışma alanındaki oluşum, tam pekişmemiş, yoğun gözenekli, süngerimsi yapıli ve bitki kırıntıları içerdüğinden dolayı tufa olarak adlandırılmıştır.

Kaynak sularından oluşun tufa ve traverten, birçok farklı çöktürme, iklim ve tektonik ortamda oluşur [7, 10-14]. Bu birikintilerin depolanma, jeokimyasal ve izotopik imzaları, paleoçevresel, paleoiklimsel ve tektonik koşulların kritik kayıtlarını sağlayabildiğinden önem [7-8, 13, 15-17]. Akdeniz civarında yaygın olarak gelişen tufalar ve travertenler, klasik Yunan ve Roma dönemlerinden beri ilgi görmektedir.

Tufa konusunda birkaç on yıldır pekçok çalışma yapılmıştır [4, 10-12, 14, 18-32]. Bunların çoğunluğu tufa litofasiyelerinin belirlenmesi, tufaların sınıflandırılması, oluşum ortamları, kökenleri, diyajenezi ve yaşlandırılmaları ile iklim değışimleriyle ilgili konulardadır.

Çalışma konusu olan tufaların oluşumunda önemli rol oynayan Doğı Anadolu Fay Sistemi (DAFS), kuzeydoğuda Karlıova (Bingöl) ile güneybatıda Akdeniz arasında uzanan, Türkiye'nin depremselliğı yönünden en mühim fay sistemlerindedir. Bu sistem, Arabistan-Afrika levhaları ile Anadolu bloğı arasındaki yakınlaşmayı yanal bir hareketle karşılamaktadır [33-44]. Bu niteliğiyile Doğı Akdeniz'in en mühim aktif tektonik yapılarından olan fay sistemi, bugüne dek çeşitli araştırmacılar tarafından farklı disiplinlerde değıerlendirilerek incelenmiştir.

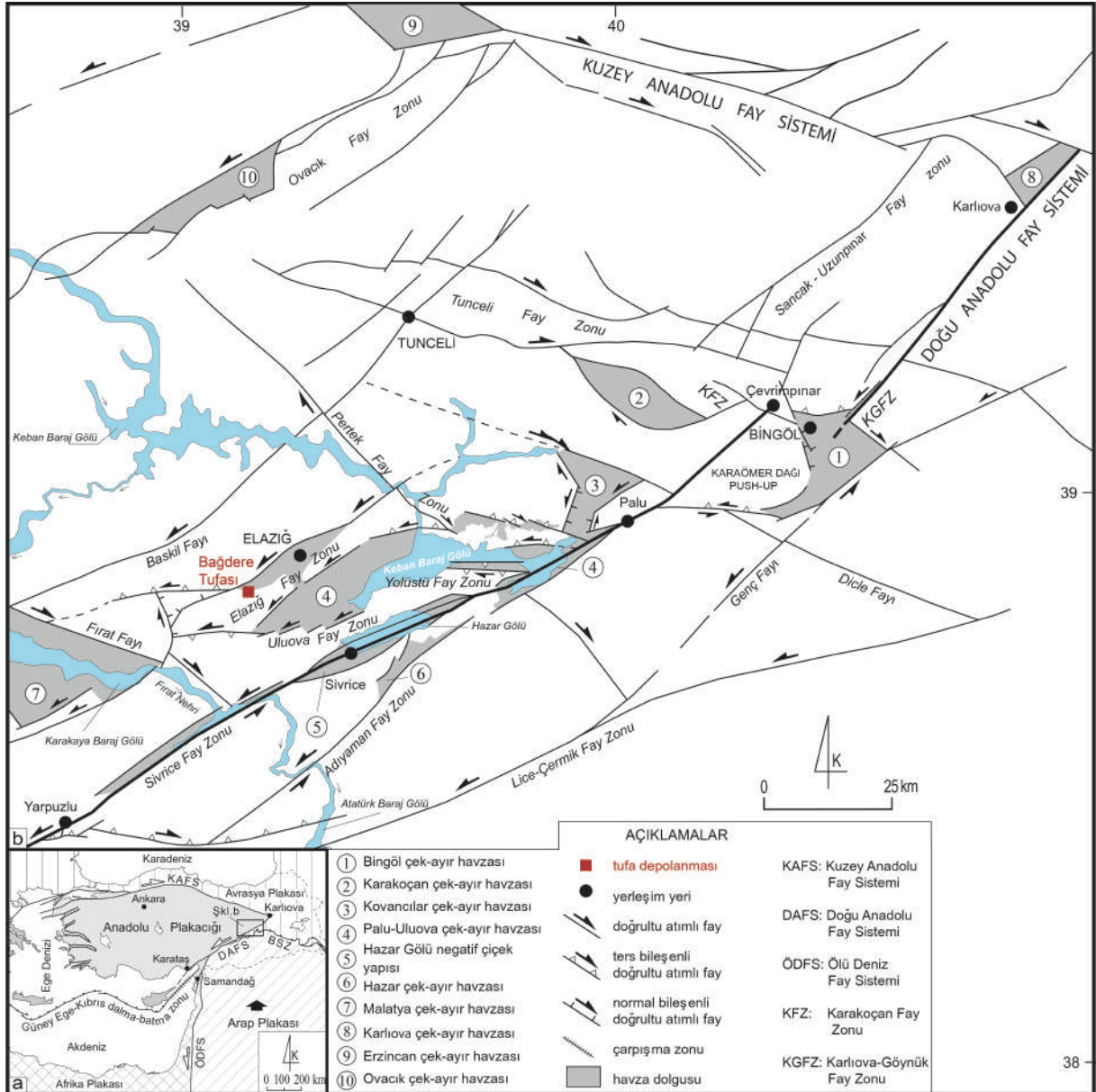
Doğı Anadolu Fay Zonu'nun geometrisi ve segmentasyonu için fay zonu boyunca gözlenen sıçrama ve büküm noktaları esas alınarak değışik çalışmalarda farklı önerilerde bulunulmuştur. DAFZ'yi, Hempton ve Dewey (1983) [45], Muehlberger ve Gordon (1987) [37] ile Westaway (1994) [40], 5 segmente; Barka ve Kadinsky-Cade (1988) [46], 14 segmente; Perinçek ve Çemen (1990) [47], 3 segmente; Şaroğı vd. (1992) [39], 6 segmente; Herece (2008) [48], 11 segmente; Koçyiğit (2003) [49], 5 segmente; Duman ve Emre (2013) [43] tarafından ana (güney) kol, 7 segmente ayrılarak incelenmiştir. Bu çalışmada, Koçyiğit (2003) [49] tarafından yapılmış olan sınıflama esas alınmıştır.

DAFS'nin üzerinde çalışma alanına yakın yapılan traverten konulu çalışmalara sınırlı sayıdadır. Bunlardan [50], DAFS'ne ait Karlıova-Bingöl Segmenti ve Adıyaman Fay Zonu üzerinde gelişen traverten depolanmalarının özelliklerini ve tektonik aktivite ile ilişkilerini multi-disipliner yöntemlerle incelemişlerdir. Yine [51], Sivrice Fay Zonu üzerinde yamaç topoğrafyasına uyumlu olarak fay önü traverteni olarak çöktürülen oluşumun depolanma, yapısal, jeokimya ve jeokronolojik özelliklerini incelemiştir. Tufa içerikli herhangi bir çalışma bulunmamaktadır.

## 2. Jeolojik Konum

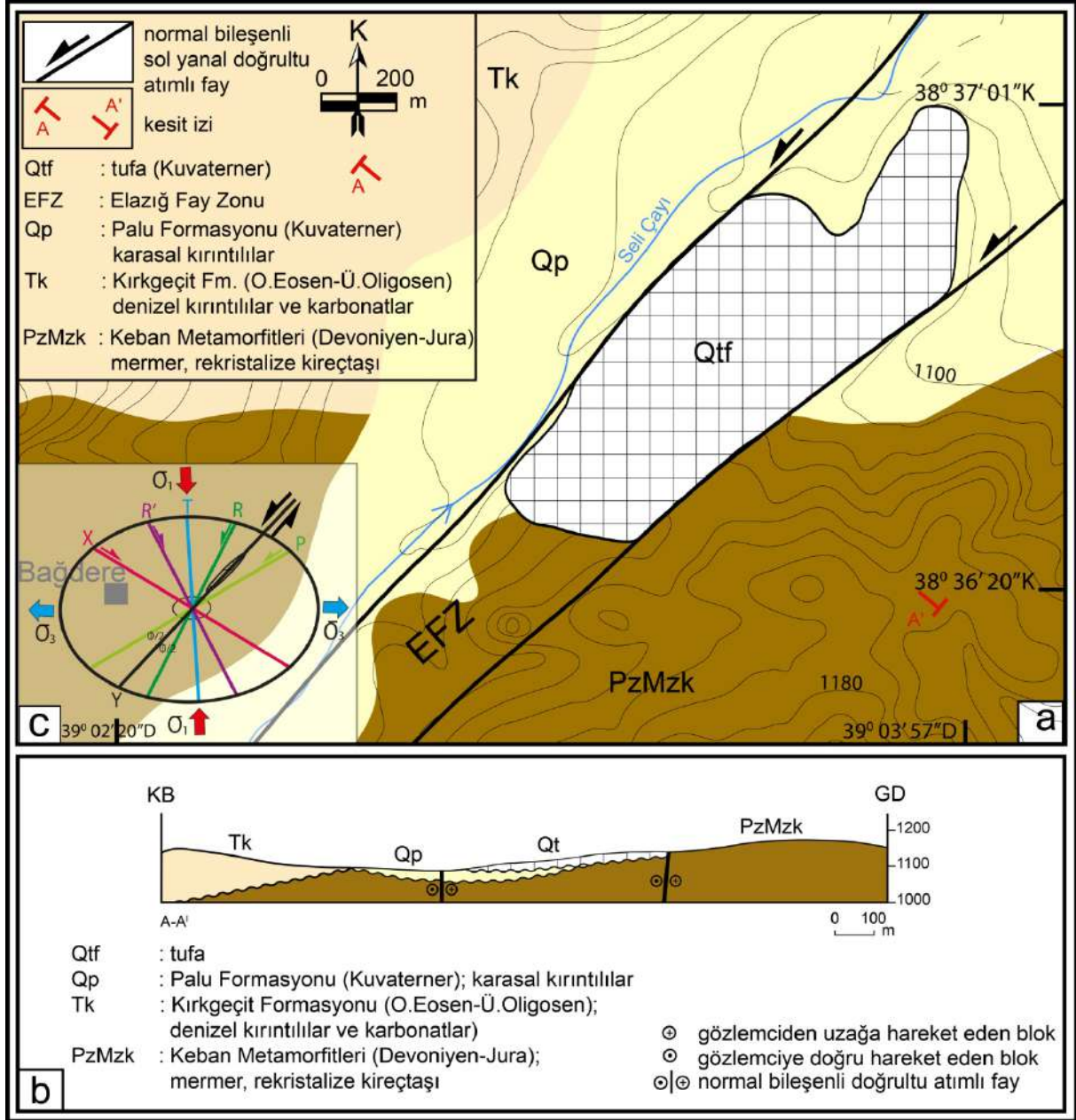
Elazığ şehir merkezinin yaklaşık 20 km güneybatısındaki Bağdere Köyü'nün 3 km kadar kuzeydoğusunda bulunan tufa yüzleğı, Doğı Anadolu Fay Sistemi'ni meydana getiren zonlardan biri olan sol yanal doğrultu atımlı karakterdeki Elazığ Fay Zonu ile ilişkili olarak depolanmıştır (Şekil 1 ve Şekil 2). Deniz seviyesi üzerinde 1090-1140 metreler arasında yer alan yüzlek, 0.75 km<sup>2</sup> lik bir alan kaplar (Şekil 3).

Bingöl-Yarpuzlu Segmenti, Doğı Anadolu Fay Sistemi'nin en uzun yapısal bölümü olup [52] K 50° D gidişlidir (Şekil 1). Kuzeydoğuda Bingöl il merkezinin yaklaşık 10 km kuzeybatısında Çevrimpınar Köyü yakınından başlar ve güneybatıya doğru yaklaşık 180 km uzanarak Yarpuzlu köyüne (Sincik, Adıyaman) ulaşır. Bingöl-Yarpuzlu Segmenti'nin bir alt bölümü olan ve Bağdere tufasının üzerinde depolandığı Elazığ Fay Zonu (EFZ), KD gidişli 54 km uzunluğunda ve 8 km genişliğinde, sol yanal doğrultu atımlı aktif bir fay zonu olup, Palu-Uluova çek-ayır havzasının Uluova bölümünün kuzeybatı kenarını denetler [53] (Şekil 1). Birbirine yakın mesafeli, uzunlukları 0,3-15 km arasında değışen, birçok paralel-yarı paralel KD gidişli faydan meydana gelir. Yüksek eğimli çizgisel fay diklikleri, üçgen yüzeyler, havzaya bakan basamak yapmış topoğrafya, çalışma alanı batısında Fırat Nehri ve bazı kollarında 5 km'ye varan sol yanal atımlar, faya paralel dizilmiş alüvyal yelpazeler ve yaşlı birimlerle Kuvaterner çöktürlerinin yan yana olması, Elazığ Fay Zonu'nun varlığının ve aktivitesinin açık morfolitik göstergeleridir. Fay zonu boyunca meydana gelen küçük magnitüdü depremlerin episantr dağılımı [54], fay zonunun varlığı ve aktivitesinin başka bir göstergesidir. Faylanmalar, hidrotermal akışkanın yeryüzüne ulaşmasında etkin görevleri vardır [55]. Bağdere tufa oluşumu da, Elazığ Fay Zonu ile ilişkili olarak depolanmıştır. Deformasyon elipsoidi üzerine yerleştirildiğı zaman, ana kırığa paralel olan KD gidişli sol yanal Y kırığı üzerinde gelişmiş olduğu görülür (Şekil 2a, c ve Şekil 3).

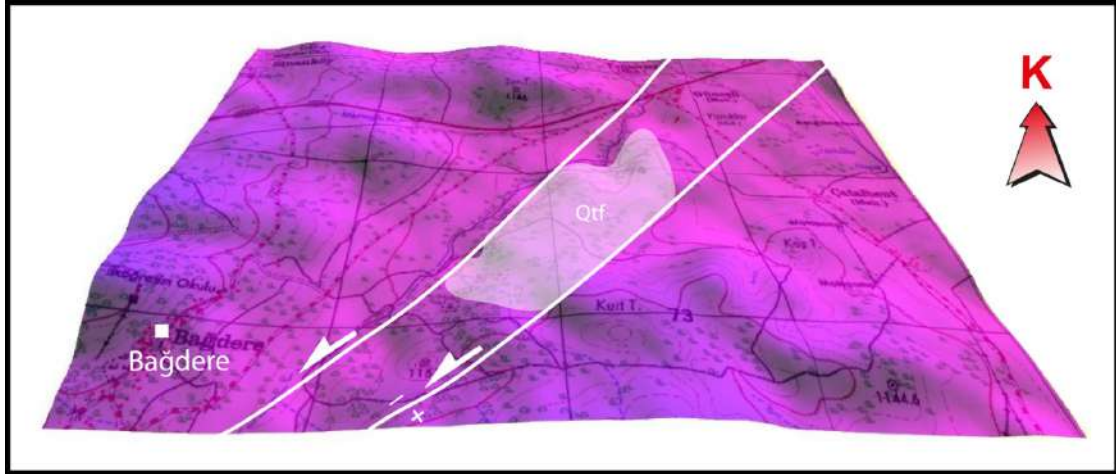


**Şekil 1.** Çalışma sahasının yerini belirten harita. a-Doğu Akdeniz Bölgesi'nin ana plakaları ve bunları sınırlayan fayları gösteren sadeleştirilmiş harita; b- Çalışma sahasının yeri ve Bingöl-Elazığ dolayında Doğu Anadolu Fay Sistemi'ni meydana getiren ana fay zonları ve doğrultu atım havzalarını gösteren tektonik harita ([52]'den değiştirilerek.)

Söz konusu tufa depolanmasının yüzeyletiği Bağdere Köyü çevresinde Devoniyen-Jura yaşlı [56] Keban Metamorfittleri, O. Eosen-Oligosen yaşlı Kırkgeçit Formasyonu ile Kuvaterner yaşlı havza dolgusu karakterindeki Palu Formasyonu, stratigrafik istifi oluşturan başlıca birimlerdir. Tufalar, bu birimlerden Keban Metamorfittleri üzerindeki Palu Formasyonu'yla yanal ve düşey ilişkili olarak bulunurlar (Şekil 2, 4, 5).



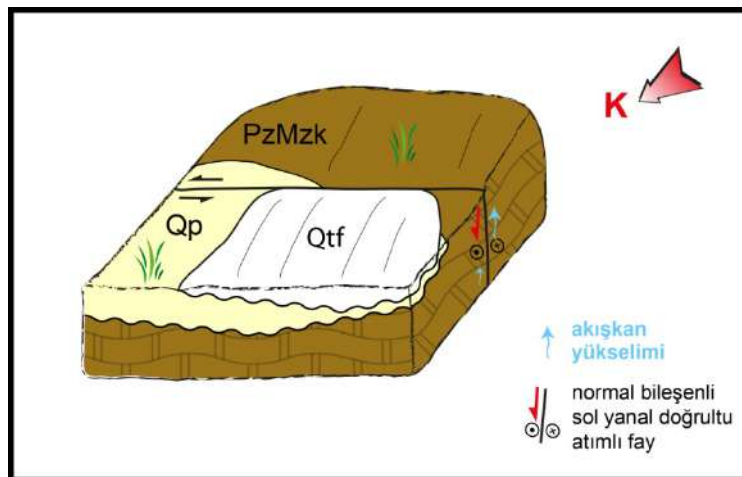
Şekil 2. Bağdere tufası çevresinin a- jeolojik haritası; b- enine jeolojik kesiti; c- tufanın deformasyon elipsoidi üzerindeki konumu



Şekil 3. Bağdere tufasını kontrol eden fayların DEM görüntüsü. Qtf: tufa yüzleği

Yaş	Kayaç Birimi	Litoloji	Açıklama
Kuvaterner	Tufa Palu Fm.		tufa kumtaşı koglomera
Devoniyen-Jura	Keban Metamorfileri		mermer ve rekritalize kireçtaşı
Ü. Kretase	Elazığ Magmatitleri		çoğunlukla andezitik volkanitler ve volkanoklastik kayalar

Şekil 4. Bağdere tufa yüzleği ve çevresinin tektono-stratigrafik kesiti



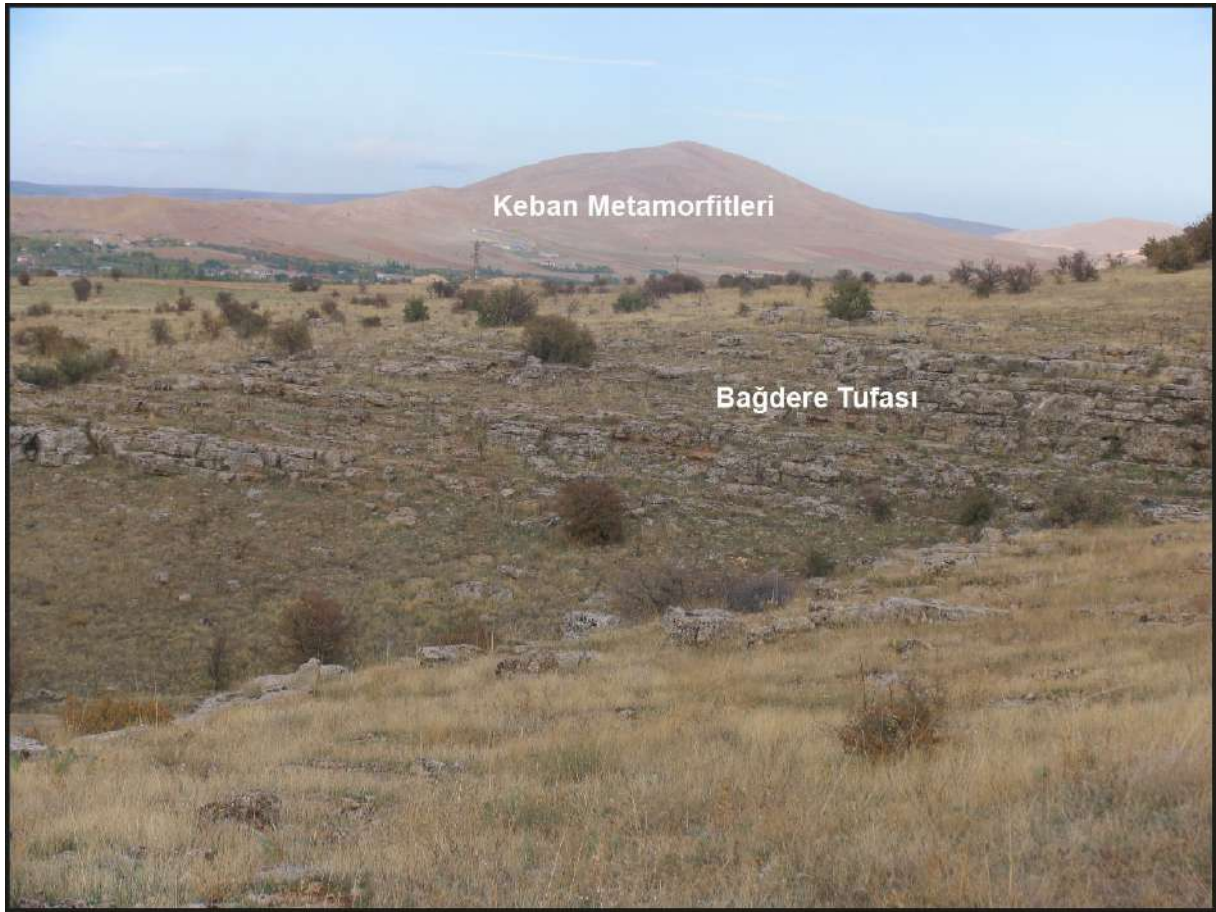
Şekil 5. Bağdere Tufası oluşum modeli. Qtf: Kuvaterner yaşlı tufa; Qp: Kuvaterner yaşlı Palu Formasyonu karasal kırıntılıları; PzMzk: Devoniyen-Jura yaşlı Keban Metamorfileri mermerleri ve rekristalize kireçtaşları

Tufa oluşumunda ana kaya rolü üstlenen, Keban ilçesi (Elazığ) civarındaki geniş yüzlekleri nedeniyle Keban Metamorfileri ismi verilen birim, Elazığ'ın batı kısmındaki yüksek alanları oluşturur (Şekil 6). Devoniyen-Jura'da depolanmış olan şelf tipi karbonat ve kırıntılardan oluşan bir istifin, Geç Kretase'de bölgede etkili olan ve Elazığ Magmatitleri olarak adlandırılan yay magmatitlerinin oluşumunu sağlayan yitim olayları sırasında, yeşilist



fasiyesinin düşük derecelerde metamorfizmaya uğramasıyla oluştuğu genel kabul gören bir yaklaşımdır. Bölgesel metamorfizma sonucu oluşan metamorfitle, alttan üste doğru rekristalize kireçtaşı-kalkıştler, mermerler ve metakonglomera-kalkfillitler şeklinde bir sıralanmaya sahiptir. Elazığ çevresindeki yüzlekleri, çoğunlukla mermer ve rekristalize kireçtaşlarıyla karakterize edilir.

Neotetis Okyanusu'nun kapanmasına neden olan kuzey yönlü yitim olayının sona ermesini takiben devam eden Arabistan-Anadolu levhaları arasındaki yakınlaşmayla ilişkili olan yaklaşık K-G doğrultulu sıkışmaya bağlı olarak Keban Metamorfitle, Geç Kretase sonlarında ve Erken Miyosen sonrasında güneye, Geç Kretase yaşlı yay magmatizması ürünü olan Elazığ Magmatitleri üzerine sürüklenmiştir. Bu sürüklenme örtüsü, özellikle Geç Pliyosen'den sonraki doğrultu atım rejimindeki neotektonik dönemde parçalanmış ve günümüz topoğrafyasında Elazığ yakın batısındaki yüksek alanları oluşturan tektonik klipleri oluşturmuştur. Birimin oluşumunu izleyen dönemde, bölgede etkili olmuş yoğun tektonizma nedeniyle Elazığ çevresindeki yüzlekleri oluşturan mermerler ve rekristalize kireçtaşları, çok kırıklı bir yapı kazanmışlardır.



Şekil 6. Bağdere Köyü'nün (Elazığ) yakın kuzeydoğusunda yer alan tufa yüzleğinden bir görünüm; arka planda Keban Metamorfitle'nin mermerleri. Bakış kuzeydoğuya.

Tufaların yanıl ve düşey ilişkili olduğu Kuvaterner yaşlı havza dolgusu, karasal kökenli kırıntılı çökellerle karakterize edilir [53]. Bu çökeller, Elazığ çevresindeki doğrultu atım havzalarında çökemiş ve Palu Formasyonu [57] olarak adlandırılan çökellere benzerlik gösterir. Bunların en yaygını da, havzayı kontrol eden faylara bağlı olarak yüksek alanlarda türeyen malzemenin, az eğimli alanlarda depolanmasıyla oluşmuş alüvyal yelpazelerdir. Kaynak alanla ilişkili olarak, çakılların çoğu Keban Metamorfitle'nden türemiştir.

### 3.BULGULAR

#### 3.1.Depolanma Özellikleri

Bağdere tufası genellikle yatay ve kalın tabakalı, açık-koyu kahverengi tonlarda, diyajenez süreçleri nedeniyle iyi sıkılmış ve bununla ilişkili olarak birincil depolanma özellikleri kolay seçilememektedir. 9 metrelik tufa istifinin en üstteki ~6 m'lik bölümü, ocak işletme faaliyetleri nedeniyle kesildiği için depolanma ile ilgili

gözlemler, bu seviyedeki ocak aynalarında yapılmıştır. 6 metrelik aynanın değişik düzeylerinde büyüme konumunda korunmuş kamyş kalıpları, onkolit seviyeleri (Şekil 7), tufa intraklastları ve tabanda çamurtaşları ara düzeyleri (Şekil 8) bulunmaktadır. Aynanın orta kesiminde, suyun türbülanslı akışını gösteren 15-20 cm kalınlığında bir onkolit seviyesinde, 3 cm'ye kadar ulaşan farklı boyuttaki onkolit taneleri gözlenmektedir (Şekil 7). Onkolitler, biyojenik bir tanenin etrafına sarılan bir dizi konsantrik  $\text{CaCO}_3$  laminasyonudur. Ayrıca bazı blok yüzeylerinde, birbiriyle ardışık, açık ve koyu paralel bantlardan oluşan seviyeler de gözlenmektedir. Bu depolanma sistemi, genellikle durgun ya da düşük hızlı akıntıların olduğu, sık, mevsimsel kuruyan gölcükler ve bataklık ortamını yansıtmaktadır [22, 58].



Şekil 7. Bağdere tufa istifinin üst kısımlarında bir onkolit düzeyi. Onkolit tanelerinin çapları 3 cm'ye kadar çıkmaktadır. İstifin en üstündeki ~ 6 metrelik ocak aynasının tabanı

### 3.2. Mineralojik Bileşim

XRD yöntemi, karbonat minerallerinin türü ve optik mikroskop ile incelenemeyecek boyutlardaki (submikroskopik) tane boyuna sahip minerallerin belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Mineralojik olarak travertenler ve tufalar,  $\text{CaCO}_3$ 'ün iki temel polimorfundan biri olan kalsitten (çoğunlukla) ve az miktarda aragonitten meydana gelir. Fakat, bazı hallerde bunlardan başka dolomit, barit vb. mineraller de oluşumda bulunabilirler [14, 59]. Bağdere tufası, tamamen kalsit bileşimlidir.

Bağdere tufasından alınan 4 örneğin element analiz sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir. Tufaların element bileşimleri, literatürdeki değerlerle çoğunlukla uyumludur [23, Çizelge 2; 12, Çizelge 1]. Buna göre tufalarda en bol element, 384719-390151 ppm ile Ca'dur. 112-338 ppm arasındaki Sr değerleri termojen travertenlerdeki değerlere göre oldukça düşüktür [14, Çizelge 4]. Bu değerler, Bağdere tufalarını oluşturan kaynak sularının sık dolaşımını işaret etmektedir.





Şekil 8. Bağdere tufa istifinde bir çamurtaşı ara düzeyi (tabanda okla işaretli)

Çizelge 1. Bağdere tufa örneklerinin element konsantrasyonları

Örnek No	Ca	Si	Al	Fe	Mg	Ba	Sr
	(ppm)						
BD-1	386649	3740	1482	1749	3860	21	112
BD-2	389008	3039	794	1329	3498	55	140
BD-3	390151	982	370	910	4704	14	338
BD-4	384719	4394	1535	1399	4764	17	182

### 3.3. Duraylı İzotop Bileşimi

“Meteojen” terimi, topraktan ve atmosferden gelen CO<sub>2</sub>'yi kullanan çökeller için; “termojen” terimi ise kireçtaşlarından çözünen veya doğrudan üst mantodan gelen CO<sub>2</sub> kaynaklı çökeller için kullanılmış ve bu termojen çökellerin yaygın olarak volkanik veya tektonik aktivitenin olduğu bölgelerde gözlemlendiği belirtilmiştir [60]. Termojen travertenlerin ve meteojen travertenlerin (=tufaların) duraylı izotop kayıtları, değişiklik sunar. Termojen travertenler, genellikle pozitif değerler verirken meteojen travertenler (=tufalar), negatif değerler verir [59]. Pozitif  $\delta^{13}\text{C}$  değerleri, magmatik faaliyetlerin yanında termo-metamorfik prosesler neticesinde ortaya çıkmış CO<sub>2</sub>'nin katkısını gösterir. Halbuki negatif  $\delta^{13}\text{C}$  değerleri, olasılıkla derin kökenli CO<sub>2</sub> ve toprak zonundan gelmiş CO<sub>2</sub>'in birleşmesinden meydana gelir.

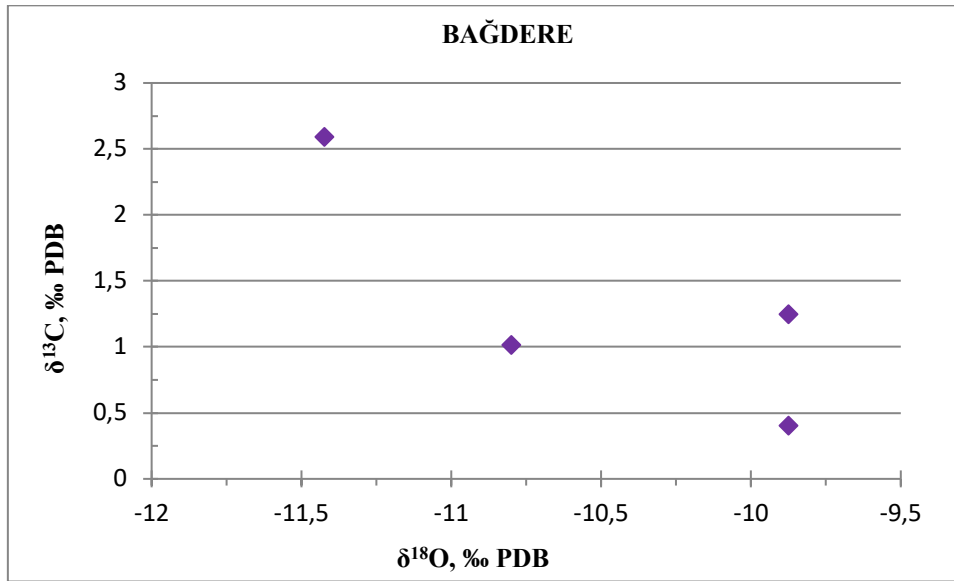
Tufa çökellerinin duraylı izotop değerleri ( $\delta^{13}\text{C}$  ve  $\delta^{18}\text{O}$ ), karbonatlardaki CO<sub>2</sub> kaynağının yanı sıra, sıcaklık, nem, beslenme alanı, toprak ve bitki gelişimi gibi önemli parametrelerin elde edilmesinde ve böylelikle paleoortamsal yorumlamalarda oldukça önemli veriler sunmaktadır [13, 22, 61].

Bu amaçlarla tufa örnekleri üzerinde duraylı izotop analizi ( $\delta^{13}\text{C}$  ve  $\delta^{18}\text{O}$ ) yapılmış ve alınan 4 adet örneğin  $\delta^{13}\text{C}$  değerleri, 0.4 ila 2.6 (‰ PDP) arasında;  $\delta^{18}\text{O}$  izotop değerleri ise -9.9 ila -11.4 (‰ PDP) olduğu görülmüştür.  $\delta^{13}\text{C}$  değerlerinin düşük pozitif olması, tufa oluşumuna organik kökenli karbondan çok, inorganik kökenli

karbonun girmiş olmasından kaynaklı olabilir. Çalışma alanında temel kaya olan Keban Metamorfite'lerinin mermerleri, inorganik karbon kaynağı olarak düşünülmektedir (Çizelge 2; Şekil 9).  $\delta^{18}\text{O}$  değerlerinin ise kendi içerisindeki daha az negatife doğru geçişi, kapalı bir çökeltme ortamında iklimsel salınma bağlı olarak artan buharlaşma ile ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Bunlara göre Bağdere tufalarının, sıg göl ortamında oluştuğu yorumlanmıştır.

Çizelge 2. Bağdere tufa örneklerinin  $\delta^{13}\text{C}$  ve  $\delta^{18}\text{O}$  duraylı izotop değerleri

Bağdere Örnek No	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰ PDB)
BD-1	0,4	-9,9
BD-2	1,2	-9,9
BD-3	2,6	-11,4
BD-4	1,0	-10,8



Şekil 9. Bağdere tufa örneklerinin  $\delta^{13}\text{C}$  ve  $\delta^{18}\text{O}$  izotop değerleri grafik dağılımı

### 3.4. Yaş Bulguları

Uranyum-Toryum, kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) materyallerin yaşını saptamak için yaygın olarak kullanılan bir radyometrik yaşlandırma tekniğidir. Bu çalışmada da kullanılan tekniğin genel ilkeleri için, Smart (1991) [62] temel alınmıştır. Kuramsal açıdan U (uranyum), Ca (kalsiyum) içeren doğal sularda rahatlıkla çözülebilir. Bu yüzden çökelti sonucu oluşan kayaç, uranyum izleri taşır. Aksine Th (toryum), çözeltide çözülemez, hızlıca hidroliz olur ve katı yüzeyler üzerine sıkıca tutunur. Dolayısıyla bu sulardan çökelen kayaçlar, genellikle toryum içermez. Yani uranyum, kalsiyum karbonatın biyolojik ve ya kimyasal çökeltmesi esnasında, aynı anda çökelmekte ve kalsit kristalleri arasında depolanmaktadır. Fakat toryum çökelmemektedir ve doğal sulardaki toryum miktarı, göz ardı edilmektedir. Dolayısıyla ana izotop olan  $^{234}\text{U}$ 'a karşın  $^{230}\text{Th}$  eksikliği vardır. Zamanla  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  oranı, eşitlik sağlanıncaya dek aşamalı bir şekilde artar. Çünkü  $^{234}\text{U}$  ve  $^{238}\text{U}$  arasında da, bir eşitsizlik vardır ve  $^{234}\text{U}$ 'nun ayrışması,  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  oranını giderek artırır.

Bir karbonat örneğinde Uranyum serisi yaş tekniğinin başarılı olarak uygulanabilmesi için bazı önkabuller ve kriterler temel alınır. Bunlar, karbonat örneğinin aynı çözeltiden hemen kristallenmiş olması ve depolanma esnasında kristallerde  $^{230}\text{Th}$  var olmayıp tane yüzeylerindeki toryumun,  $^{232}\text{Th}$  olmasıdır. Bu nedenle bu uzun ömürlü izotoptan, sonradan gelen toryum kirliliğini takip amaçlı yararlanılabilir. Şayet  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  değeri, 20'den azsa  $^{230}\text{Th}$  için düzeltme zorunludur; bunun için taneli ve çok poroziteli örneklerden sakınmak icap eder. Bu düzeltme için farklı metodlar uygulanmaktadır. Bir diğer önkabul ise sistemin, çökeltme bittikten sonraki U ve Th sirkülasyonuna kapalı olmasıdır. Rekristalleşme, ikincil kristalleşme ve de fazla gözeneklilik emareleri olan örneklerden sakınılmalıdır. Smart (1991), U-Th yaşlandırma tekniğinin, bilhassa 400.000-5.000 sene arasında uygulanabilir olduğunu belirtmektedir.



Bağdere tufasından alınan dört örneğin U/Th yaş analizi sonuçları, Çizelge 3'de verilmiştir. Buna göre Bağdere'de tufa oluşumu, günümüzden 524,597 yıl önce başlamıştır. Bu yaş, Pleyistosen (MIS 13, Marine Isotope Stage)'e karşılık gelmektedir.

**Çizelge 3.** Bağdere tufaların U-Th yaşlandırma analiz sonuçları

	Örnek No			
	BD-1	BD-2	BD-3	BD-4
<sup>238</sup> U ppm	0,268	0,037	0,391	0,455
±	0,001	0,000	0,002	0,002
<sup>232</sup> Th ppm	0,0067	0,0011	0,0040	0,0960
±	0,0000	0,0000	0,0000	0,0011
<sup>234</sup> U/ <sup>238</sup> U	1,1420	1,0698	1,1335	1,0479
±	0,0091	0,0071	0,0091	0,0073
<sup>230</sup> Th/ <sup>234</sup> U	0,8899	0,9095	0,8751	1,0108
±	0,0092	0,0156	0,0078	0,0135
<sup>230</sup> Th/ <sup>238</sup> U	1,0163	0,9731	0,9920	1,0592
±	0,0073	0,0155	0,0054	0,0127
<sup>230</sup> Th/ <sup>232</sup> Th	124,6780	99,1800	294,5430	15,3310
±	1,2880	1,7890	2,4990	0,2570
<b>Hesaplanan Yaş (binyıl)</b>	216,131	243,682	206,884	529,839
<b>Hata</b>	7,697	15,687	6,488	190,311
<b>Düzeltilen Yaş (binyıl)</b>	<b>215,545</b>	<b>242,906</b>	<b>206,637</b>	<b>524,597</b>
<b>Hata</b>	7,728	15,729	6,491	225,215

#### 4. Sonuçlar

Bağdere tufası, büyük bir makaslama zonu olan sol yanal doğrultu atımlı Doğu Anadolu Fay Sistemi'ni meydana getiren fay zonlarından biri olan Elazığ Fay Zonu'nun aktivitesiyle ilgili olarak genişlemeli bir alanda çökelmiştir.

Tufa çökelimine köken olan ana kaya, Keban Metamorfizmi'nin mermerleri ve rekrystalize kireçtaşlarıdır.

Duraylı izotop analizlerinden  $\delta^{13}\text{C}$  değerlerinin, 0.4 ila 2.6 (‰ PDP) arasında;  $\delta^{18}\text{O}$  izotop değerlerinin ise -9.9 ila -11.4 (‰ PDP) arasında olduğu görülmektedir.

Bağdere tufalarının, sığ göl ortamında oluştuğu yorumlanmıştır.

Yapılan XRD analizlerine göre tufaların, tamamen kalsitten meydana geldiği belirlenmiştir.

Yaş verileri tufa oluşumunun günümüzden en az 524,597 yıl önce başladığını işaret eder ki bu yaş Doğu Anadolu Fay Sistemi'nin oluşum yaşıyla da uyumludur.

#### Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK 110Y172 no'lu proje kapsamında desteklenmiştir.

#### Kaynaklar

- [1] Ford, T.D., Pedley, M.H. Tufa deposits of the world. J. Speleol. Soc. Japan 1992; 17, 46-63.
- [2] Bates, R. L., Jackson, J. A. Glossary of Geology (Second Edition). Virginia, USA: American Geology Institute Falls Church, 1980.
- [3] Wyatt, A. Challinor's Dictionary of Geology (6<sup>th</sup> Edition). University of Wales Press: Cardiff, 1986.
- [4] Pedley, H.M. Classification and environmental models of cool freshwater tufas. Sedimentary Geology 1990; 68, 143-154.

- [5] Atabey, E. Tufa ve traverten. Ankara, Türkiye: TBMMO Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, 2003.
- [6] Julia, R. Travertines. In: P.A. Scholle, D.G. Bebout and C.H. Moore (Editors), Carbonate depositional Environments. Am Assoc. Petrol. Geol. Mem. 1983; 33, 64-72.
- [7] Chafetz, H. S., Folk, R. L. Travertines, depositional morphology and the bacterially constructed constituents. Journal of Sedimentary Petrology 1984; 54, 289-316.
- [8] Guo, L., Riding, R. Hot-springs travertine facies and sequences, Late Pleistocene, Rapolano Terme, Italy. Sedimentology 1998; 45, 163-180.
- [9] Muir-Wood, R. Neohydrotectonics. In: Neotectonics and active faulting (edited by Steward, I.S., Vita-Finzi, C. and Owen, L.A.) Zeitschrift Geomorphologie Supplementary 1993; Volume, 94, 275-284.
- [10] Ford, T.D., Pedley, M.H. A review of tufa and travertine deposits of the world. Earth Sci. Review 1996; 41, 117-175.
- [11] Hancock, P.L., Chalmers, R.M.L., Altunel, E., Çakır, Z. Travertines: using travertines in active fault studies. Journal of Structural Geology 1999; 21, 903-916.
- [12] Arenas, C., Gutiérrez, F., Osácar, C., Sancho, C. Sedimentology and geochemistry of fluvio-lacustrine tufa deposits controlled by evaporite solution subsidence in the central Ebro Depression, NE Spain. Sedimentology 2000; 47, 883-909.
- [13] Andrews, J. E. Paleoclimatic record from stable isotopes in riverine tufas: synthesis and review. Earth-Science Review 2006; 75, 85-104.
- [14] Özkul, M., Kele, S., Gökğöz, A., Shen, C.C., Jones, B., Baykara, M.O., Fórizs, I., Nemeth, T., Chang, Y.W., Alçiçek, M.C. Comparison of the Quaternary travertine sites in the Denizli Extensional Basin based on their depositional and geochemical data. Sedimentary Geology 2013; 294, 179-204.
- [15] Altunel, E., Hancock, P.L. Morphology and Structural Setting of Quaternary Travertines at Pamukkale, Turkey. Geological Journal 1993; 28, 335-346.
- [16] Minissale, A., Kerrick, D. M., Magro, G., Murrell, M. T., Paladini, M., Rihs, S., Sturchio, N. C., Tassi, F., Vaselli, O. Geochemistry of Quaternary travertines in the region north of Rome (Italy): structural, hydrologic and paleoclimatologic implications. Earth and Planetary Science Letters 2002; 203, 709-728.
- [17] Jones, B., Renaut, R.W. Calcareous Spring Deposits in Continental Settings, eds: Alonso Zarza, A.M., Taner, L.H. Carbonates in Continental Settings: Facies, Environments and Processes, Developments. Sedimentology 2010; 61, 177-204.
- [18] Goudie, A. S., Viles, H. A., Pentecost, A. The late-Holocene tufa decline in Europe. The Holocene 1993; 3.2: 181-186.
- [19] Violante, C., Ferreri, V., D'argenio, B. and Golubic, S. Quaternary travertines at Rochetta a Volturmo (Isernia, Central Italy). Facies analysis and sedimentary model of an organogenic carbonate system. PreMeeting Fieldtrip Guidebook, A1. International Association of Sedimentologist, Ischia'94, 15th regional meeting; 1994; Italy. 3-23.
- [20] Pedley, H.M., Martin, J.A.G., Ordóñez, D.S., Garcia del Cura, M.A. Sedimentology of Quaternary perched springline and paludal tufas: criteria for recognition with examples from Guadalajara Province, Spain. Sedimentology 2003; 50.
- [21] Arenas, C., Cabrera, L., Ramos, E. Sedimentology of tufa facies and continental microbialites from the Palaeogene of Mallorca Island (Spain). Sedimentary Geology 2007; 197 (2007), 1-27.
- [22] Arenas-Abad, C., Vázquez-Urbez, M., Pardo-Tirapu, G., Sancho-Marcen, C. Fluvial and associated carbonate deposits. In: Alonso-Zarza, A.M., Tanner, L.H. (Eds), Continental Settings: Facies, Environments and Processes. Sedimentology 2010; 61, 133-176.
- [23] Özkul, M., Gökğöz, A., Horvatinčić, N. Depositional properties and geochemistry of Holocene perched springline tufa deposits and associated spring waters: A case study from the Denizli province, Western Turkey. In: Pedley, H.M. (Ed.), Tufas and Speleothems: Unravelling the Microbial and Physical Controls. The Geological Society, London 2010; Special Publications 336, pp. 245-262.
- [24] Koşun, E. Facies characteristics and depositional environments of Quaternary tufa deposits, Antalya, SW Turkey. Carbonates Evaporites 2012, 269-289.
- [25] Auqué, L. F., Arenas, C., Osácar, C., Pardo, G., Sancho, C., Vázquez-Urbez, M. Tufa sedimentation in changing hydrological conditions: the River Mesa (Spain). Geologica Acta 2013; 11(1), 85-102.
- [26] Capezzuoli, E., Gandin, A., Pedley, M. Decoding tufa and travertine (fresh water carbonates) in the sedimentary record: the state of the art. Sedimentology 2014; 61(1), 1-21.
- [27] Horvatinčić, N., Sironić, A., Barešić, J., Sondić, I., Krajcar Bronić, I., Borković, D. Carbon Based Proxies of Palaeoenvironmental Records in the Sediments of Two Lakes, the Plitvice Lakes, Croatia, 2017.
- [28] Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin, M., Pennock, D. Soil pollution: a hidden reality: FAO, 2018.
- [29] Brook, G. A., Cowart, J. B., Brandt, S. A. Comparison of Quaternary environmental change in eastern and southern Africa using cave speleothem, tufa and rock shelter sediment data. Quaternary deserts and climatic change 2020; 239-249.
- [30] Barešić, J., Faivre, S., Sironić, A., Borković, D., Lovrenčić Mikelić, I., Drysdale, R. N., Krajcar Bronić, I. The Potential of Tufa as a Tool for Palaeoenvironmental Research-A Study of Tufa from the Zrmanja River Canyon, Croatia. Geosciences 2021; 11(9), 376.
- [31] Sallam, E. S., Abou-Elmagd, K. Paleospring freshwater tufa carbonates of the Kurkur Oasis Geosite (southern Egypt): archives for paleoenvironment and paleoclimate. International Journal of Earth Sciences 2021; 110(3), 1073-1075.
- [32] Ranjbaran, M., Zamanzadeh, S. M. Determining the role of chemical and biological factors in controlling precipitation of tufa and travertine deposits in Shurab area, Northern Iran. Carbonates and Evaporites 2021; 36(4), 1-18.
- [33] Arpat, E., Şaroğlu, F. Doğu Anadolu Fayı ile ilgili bazı gözlem ve düşünceler. MTA Bül. 1972; 73, 1-9.
- [34] Jackson, J., McKenzie, D. Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt between western Turkey and Pakistan, Geoph. J. Royal Astr. Soc. 1984; 77, 185-264.

- [35] Şengör, A.M.C., Görür, N., Şaroğlu, F. Strike-slip faulting and related basin formation in zone of tectonic escape: Turkey as a case study. In: "Strike-slip deformation, basin deformation and sedimentation". Edited by: K.T. Biddle&N. Christie-Blick. Soc. Econ. Paleont. and Min. Spec. Publ. 1985; 37, 227-264.
- [36] Gülen, L., Barka, A. ve Toksöz, M. N. Kıtaların çarpışması ve ilgili kompleks deformasyon, Maraş üçlü eklemi ve çevre yapıları. *Yerbilimleri* 1987; 14, 319-336.
- [37] Muehlberger, W.R., Gordon, M.B. Observation on the complexity of The East Anatolian Fault, Turkey. *Jour. Structural Geology* 1987; 9/7, 899-903.
- [38] Lyberis, N., Yürür, T., Chorowicz, J., Kasapoğlu, E., Gündoğdu, N. The East Anatolian Fault: An Oblique collisional belt. *Tectonophysics* 1992, 204, 1-15.
- [39] Şaroğlu, F., Emre, Ö., Kuşçu, İ. The East Anatolian fault zones of Turkey. *Annales Tectonicae* 1992; 6, 99-125.
- [40] Westaway, R. Present-day kinematics of the Middle East and eastern Mediterranean. *Jour. Geophys. Res.* 1994; 99/B6, 12,071-12090.
- [41] Westaway, R. Kinematics of the Middle East and Eastern Mediterranean Updated, *Turkish J.Earth Sci. J.* 2003; 12, 5-46.
- [42] Gürsoy, H., Tatar, O., Piper, J. D. A., Heimann, A., Mesci, L. Neotectonic deformation linking the east Anatolian and Karatas-Osmaniye intracontinental transform fault zones in the Gulf of İskenderun, southern Turkey, deduced from paleomagnetic study of the Ceyhan-Osmaniye volcanic. *Tectonics* 2003; vol. 22, no. 6, 1067.
- [43] Duman, T., Emre Ö. The East Anatolian Fault: geometry, segmentation and jog characteristics. *Geological Society of London* 2013; Special Publications, 372.
- [44] Duman, T. Y., Elmacı, H., Özalp, S., Kürçer, A., Kara, M., Özdemir, E, Yavuzoğlu, A., Gündoğan, Ç. U. Paleoseismology of the western Sürgü-Misis fault system: East Anatolian Fault, Turkey. *Mediterranean Geoscience Reviews* 2020; 2(3), 411-437.
- [45] Hempton, M.R., Dewey J.F. Earthquake-induced deformational structures in young lacustrine sediments, East Anatolian Fault, Southeastern Turkey. *Tectonophysics* 1983; 98, 7-14.
- [46] Barka, A.A., Kadinsky-Cade, K. Strike-slip fault geometry and its influence on earthquake activity. *Tectonics* 1988; 7/3, 663-684.
- [47] Perinçek, D., Çemen, İ. The structural relationship between the East Anatolian and Dead Sea fault zones in Southeastern Turkey. *Tectonophysics* 1990;172, 331-340.
- [48] Herece, E. Doğu Anadolu Fayı (DAF) Atlası. Ankara Türkiye: MTA Özel Yayın Serisi-13, 2008.
- [49] Koçyiğit, A. Segmentation and near future seismicity of the East Anatolian Fault System. International workshop on the North Anatolian, East Anatolian and Dead Sea Fault System: recent progress in tectonics and paleoseismology; 31 August-12 September 2003, METU, Ankara. Abstracts, p.7.
- [50] Çolak Erol, S., Özkul, M., Aksoy, E., Kele, S., Ghaleb, B. Travertine occurrences along major strike-slip fault zones: Structural, depositional and geochemical constraints from the Eastern Anatolian Fault System (EAFS), Turkey. *Geodinamica Acta* 2015; 27, Issue 2-3, 154-173.
- [51] Çolak Erol, S. Doğrultu Atımlı Fay Sistemlerindeki Traverten Oluşumlarının Jeolojik, Tektonik, Jeokimyasal ve Jeokronolojik Özelliklerine Sivrice (Elazığ) Güneybatısı'ndan Bir Örnek. *Türkiye Jeoloji Bülteni* 2016; 59(3), 341-356.
- [52] Koçyiğit, A., Aksoy, E. and İnceöz, M., 2003. Basic neotectonic characteristics of the Sivrice Fault Zone in the Sivrice-Palu area, East Anatolian Fault System (EAFS), Turkey. International Workshop on the North Anatolian, East Anatolian and Dead Sea Fault systems: Recent progress in Tectonics and Paleoseismology, 31 August to 12 September 2003, METU-Ankara-Turkey. Pre-International workshop excursion guide-book, 20 p.
- [53] Çolak, S., Aksoy, E., Koçyiğit, A., İnceöz, M. The Palu-Uluova Strike-Slip Basin in the East Anatolian Fault System, Turkey: Its Transition from the Paleotectonic to Neotectonic Stage. *Turkish Journal of Earth Sciences* 2012; 21, 547-570.
- [54] Tan, O., Pabuçcu, Z., Tapırdamaz, C., İnan, S., Ergintav, S., Eyidoğan, H., Aksoy, E., Kuluöztürk, F. Aftershock study and seismotectonic implications of the 8 March 2010 Kovancılar (Elazığ, Turkey) earthquake (Mw= 6.1). Active Tectonic Research Group (ATAG) Workshop 14, 3-6 November 2010; Adıyaman, Turkey. Abstracts, p. 56.
- [55] Sibson, R.H., Moore, J.McM. Rankin, A.H. Seismic pumping a hydrothermal fluid transport mechanism. *Jour. Geol. Soc. London* 1975; 131, 653-659.
- [56] Kaya, A. Tectono-stratigraphic reconstruction of the Keban metamorphites based on new fossil findings, Eastern Turkey. *Journal of African Earth Sciences* 2016; 124, 245-257.
- [57] Çetindağ, B., Palu-Kovancılar (Elazığ) dolayının hidrojeoloji incelemesi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü (yayımlanmamış), 1985.
- [58] Henchiri, M. Quaternary paludal tufas from the Ben Younes spring system, Gafsa, southwestern Tunisia: Interactions between tectonics and climate. *Quaternary International* 2014; 338, 71-87.
- [59] Pentecost, A. Travertine. Berlin: Springer Verlag, 2005. [60] Pentecost, A. British travertines: A review. *Proceedings of the Geologists Association* 1993; 104, 23-39.
- [60] Deocampo, D. M. The geochemistry of continental carbonates. *Developments in Sedimentology* 2010; 62, 1-59.
- [61] Smart, P.L. Uranium series dating. In: P.L. Smart and P.D. Francis (Eds.). *Quaternary dating Methods-a User's Guide*. Quart. Res. Assoc. Tech. Guide. 4, London 1991; pp.45-83.

## İki Düzeyli Özbek Morfolojisi

Ahmet Eralp KÜÇÜK<sup>1\*</sup>, Atakan KURT<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>2</sup> Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye

\*<sup>1</sup> kucukea@gmail.com, <sup>2</sup> atakan.kurt@istanbul.edu.tr

(Geliş/Received: 15/12/2021;

Kabul/Accepted: 10/02/2022)

**Öz:** Biçimbilimsel (morfolojik) belirsizlik giderme, sözdizimsel ayrıştırma ve makine çeviri sistemlerinin temelini oluşturan morfolojik analiz, doğal dil işlemedeki ana konulardan birisidir. İki düzeyli morfoloji, biçimbilimsel olarak karmaşık dillerin analizi ve üretimi için ilk genel model olarak bilinir. Bu makalede, Özbekçe'nin iki düzeyli morfolojik analizi, Nuve biçimbilimsel çözümleyici ile ayrıntılı olarak sunulmaktadır. Nuve, biçimbilimsel analiz için kullanılan açık kaynak kodlu bir kütüphanedir. Nuve Studio, [www.nuvestudio.com](http://www.nuvestudio.com) internet adresinden erişilebilmekte olup, bu çalışma için geliştirilmiştir. Uygulama aşamasında, 30.000 kelime, kök kelime sözlüğü olarak kullanılmıştır. Çağdaş Özbekçe (yeni latin alfabesiyle) 26 iki düzeyli yazım (ortografik) kuralı ile tanımlanmıştır. Özbekçe kelime yapılarının biçim dizgeleri (morfolojik) fiil ve isim paradigmaları için sonlu durum makineleri ile gösterilmiştir. Fonolojik ve morfolojik özel durumlar, kısıtlamalar ve istisnalar örneklerle verilmiştir. Bu çalışma, sözcüksel, morfolojik ve sözdizimsel açıdan birçok ortak yönü bulunan Özbekçe ile diğer Türk dilleri arasında, Özbekçe dil işleme ve morfoloji tabanlı makine çevirisi için öncü bir çalışma olacaktır.

**Anahtar kelimeler:** Özbek Morfolojisi, Doğal Dil İşleme, Hesaplamalı Dilbilim, Morfolojik Analiz, Ortografik Kurallar.

## Two Level Uzbek Morphology

**Abstract:** Morphological analysing is one of the main issues in natural language processing and which is base for morphological disambiguation, syntactic parsing and machine translation systems. Two level morphology is known as the first general model for the analysis and generation of morphologically complex languages. This paper gives a detailed two level morphological analysis of Uzbek via Nuve Studio morphological analyser. Nuve is an open source library for morphological analysis. Nuve Studio is developed for this study, which is available on [www.nuvestudio.com](http://www.nuvestudio.com). In the implementation, 30.000 words are used as root word lexicon. The orthographic rules of contemporary Uzbek (in new Latin alphabet) are encoded using 26 two level rules. Morphotactics of Uzbek word structures have been encoded as finite state machines for verbal and nominal paradigm. Phonological and morphological special cases, limitations and exceptions are given with examples. This study will be pioneering study for Uzbek language processing and morphology based machine translation between Uzbek and other Turkic languages which have a lot in common from lexical, morphological and syntactic aspects.

**Key words:** Uzbek Morphology, Natural Language Processing, Computational Linguistics, Morphological Analysis, Orthographic Rules.

### 1. Giriş

Özbekçe, diğer Türk dilleri gibi sondan eklemeli ve biçimbilimsel (morfolojik) açıdan zengin bir dildir. Dilin alfabesi tarih boyunca değişime uğramıştır. 1930'lu yıllara kadar Arap alfabesi, 1930 ve 1940 yılları arasında Latin alfabesi kullanılmıştır. 1940'lardan sonra Kiril alfabesi kullanılmaya başlanmıştır. Çağdaş Özbek dilinde Latin alfabesi resmi alfabesi olarak kabul edilmesine rağmen Kiril alfabesi halen yer yer kullanılmaktadır. Bu çalışmada Özbekçenin morfolojik tanımı için Latin alfabesi (1993[1]'den sonra kabul edilen alfabesi) kullanılmıştır.

İki düzeyli morfoloji bir dilin morfolojisini tanımlamak ve analiz etmek için kullanılmaktadır. Bu makalede, Özbek morfolojisini tanımlamak için Koskenniemi'nin iki düzeyli morfoloji modeli [2] kullanılmıştır. Bu model bilgisayarlı dilbiliminde bir dilin morfolojisini tanımlamak için kullanılan ilk genel modeldir. Bu modele göre, lexical (yapısal) ve surface (yüzeysel) formlar (biçimler) bir kelimeyi temsil etmek için kullanılır. Bir kelimenin yüzeysel formu, doğal bir dildeki normal kullanımındaki gösterim biçimi ile aynıdır. Sözcüksel form ise kelimenin eklerini (morfeplerini) gösterir. Ortografik (yazım-ımla) kuralları ise bu iki form arasındaki dönüşümü tanımlayan kurallardır. Biçim dizgesi (Morfolojik) kuralları ise kelimedeki bulunan eklerin sıralamasını gösterir ve sonlu durum otomatu (finite state automata (FSA)) olarak bu modelde kodlanır.

Bir dili analiz etmek için, o dilin gramer kurallarına, sözlüğe (lexicon) ve morfolojik çözümleyiciye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, Özbek morfolojisini analiz etmek için açık kaynak kodlu morfolojik çözümleyici

\* Sorumlu yazar: [kucukea@gmail.com](mailto:kucukea@gmail.com). Yazarların ORCID Numaraları: <sup>1</sup> 0000-0001-8614-1282, <sup>2</sup> 0000-0002-9549-8475

ve makine çevirisi kütüphanesi olan Nuve kullanılmıştır. Nuve Studio (www.nuvestudio.com) bu kapsamdaki çalışmalar için geliştirilmiş ve uygulamalarda kullanılmıştır. Nuve dilden bağımsız bir kütüphanedir. Bir dilin Nuvede tanımlanması için suffix (ek) ve root (kök) sözlüklerine, morphotactics (morfotaktik) ve orthographic (ortografik) kurallar dosyalarına ihtiyaç vardır. Özbek morfolojisinin Nuve uygulamasında tanımlanması için 30.000 kök (root) kelimededen oluşan ve 370 ekten (suffix) oluşan kökler ve ekler sözlükleri kullanılmıştır. Çağdaş Özbekçe (kabul edilen yeni Latin alfabelerinden oluşan) için 26 tane iki düzeyli ortografi kuralı tanımlanmıştır. Diğer Türk dilleri gibi Özbekçe’de genellikle eklerin sıralanmasında bir düzene sahiptir. Örneğin “kitoblarimdagi” (kitaplarımdaki) kelimesindeki ekler aşağıdaki gibi gösterilebilir.

kitob + lar + im + da + gi

Örnekte yer alan ‘+’ işareti eklerin sınırlarını belirlemektedir. Bazen istisnai durumlardan dolayı biçimbilimsel analiz zor olabilir. Bu istisnai durumlar sonraki bölümlerde açıklanmıştır.

Bu çalışmanın amacı iki düzeyli Özbek morfolojisini tanımlamaktır. Çalışmamızın uygulamaları Nuve Studio kullanılarak yapılmıştır. Bu makalede bir sonraki bölümde benzer çalışmalar, sonraki bölümde iki düzeyli Özbek morfolojisi detaylı verilmiştir. Sonrasında, Özbek isim (nominal) ve fiil (verbal) biçim dizgesi tanımlamalarına değinilmiştir. Uygulama detayları, istisnai durumlar ve örnekler ile çalışma detaylandırılarak sonuç ve gelecek çalışmalar bölümleri ile makale sonuçlandırılmıştır.

## 2. Benzer Çalışmalar

Koskenniemi’nin iki düzeyli morfoloji modeli [2,3] birçok farklı sondan eklemeli dilin morfolojisinin tanımlanmasında kullanılmıştır. Birçok çalışmada farklı uygulama araçları kullanılarak bu model uygulanmıştır. Bask ve Svahili dilleri karmaşık morfolojiye sahip sondan eklemeli dillerdir. Bu iki dilin morfoloji çalışmalarında iki düzeyli morfoloji modeli kullanılmaktadır [4,5]. Svahili dilinin morfolojik analizi için SWATWOL uygulama aracı geliştirilmiştir. Japonca ve Korece de sondan eklemeli ve karmaşık morfolojiye sahip dillerdir. Japonca ve Korece’nin morfolojik analizi de iki düzeyli morfoloji modeli kullanılarak yapılmıştır [6,7]. Bu dillerin morfolojik analizinin uygulamasında sırasıyla, Koskenniemi’nin KIMMO ve bu uygulamanın yeni versiyonu PC-KIMMO morfolojik çözümleyici-üretici programları kullanılmıştır.

Türk dilleri de sondan eklemeli ve karmaşık morfolojiye sahip dillerdir. İki düzeyli morfoloji modeli Türk dillerinin biçimbilimsel analizinde de kullanılmıştır. Türkçe morfolojisi için bu alanda yapılan öncü çalışmalardan birinde 22 iki düzeyli yazım kuralları tanımlanarak PC-KIMMO programı ile uygulama gerçekleştirilmiştir [8]. Türk dillerinden Kazakça ve Kırgızca için gerçekleştirilen çalışmalarda iki düzeyli morfolojileri tanımlanmış ve uygulamaları sırasıyla Dilmaç [9] ve Nuve [10] programları ile gerçekleştirilmiştir.

Türk dillerinden biri olan Özbekçe de diğer Türk dilleri gibi sondan eklemeli ve karmaşık morfolojiye sahip bir dildir. Çağdaş Özbek dilinin morfolojisi, morfolojik analizi ve çözümlemesi üzerine sınırlı sayıda çalışma yapılmıştır. Sınırlı sayıda olan bu çalışmalardan bazıları Özbekçe için doğal dil işleme konusunda önemli bir yere sahiptir. Bir dil için biçimbilimsel analizin yapılabilmesi için o dilin yazım kurallarına ihtiyaç vardır. Çağdaş Özbekçe’nin yazım kuralları 24 Ağustos 1995 tarihinde Özbekistan Bakanlar Kurulu’nun 339 sayılı kararı ile yayımlanmıştır [11]. Bu günümüz Özbekçesi için son derece önemli bir çalışmadır. Modern Özbekçe için tanımlanan bu kurallar dil çalışmalarında temel referans kabul edilmiştir. Özbek morfolojisi, biçimdizgesi ve morfonemik kurallarla sunulmuştur. Tanımlanan Özbek morfolojisinin çözümlenmesi ve analizi için prolog tabanlı UZMORPP sistemi kullanılarak uygulaması yapılmıştır [12]. Özbekçe kelimelerin biçimbilimsel analizi FST metot ve yaklaşımıyla, kök kelime tanımları ve kelime sıralaması sağlanmıştır [13]. Özbekçe’nin iki düzeyli biçimbilimsel analizi FST teknoloji tabanlı biçimbilimsel çözümleyici ile uygulanmıştır [14].

## 3. İki Düzeyli Özbek Morfolojisi

İki düzeyli morfoloji, bir dildeki kelimelerin morfolojik tanımlanması için kullanılan dilden bağımsız bir yaklaşım sunan, genel bir modeldir[2]. Bu modele göre bir dilin analizi yapılırken kurallar ve sözlükler bir çözümleyici aracılığıyla birleştirilir ve dilin morfolojisi bu yaklaşımla modellenir ve analiz edilir. İki düzeyli morfoloji yaklaşımında ortografik kurallar iki düzeyli kurallar olarak tanımlanır. Yapım ve çekim eklerinin sıralamasını gösteren morfotaktik ise sonlu durum makineleri (Finite State Machine – FSM) kullanılarak tanımlanır.

İki düzeyli morfolojide kelimelerin sözcüksel (lexical) ve yüzeysel(surface) biçimde iki gösterimi bulunmaktadır. Yapısal form kelimenin biçimbilimsel yapısını ve kelimeye eklenen çekim ve yapım eklerinin

özelliklerini ve sırasını gösterir. Yüzeysel form da kelimenin çekim ve yapım eklerini aldıktan sonra ortaya çıkan yazım biçimini gösterir. İki düzeyli yazım kuralları (ortografik kurallar) bu iki form arasındaki dönüşümü gösterir [3,8]. İki düzeyli yazım kuralları aşağıda tanımlanmıştır.

Özbekçede 1993 yılından [1] günümüze Latin alfabesi kullanılmaktadır. Özbek alfabesi 29 harf ve apostrof (‘) karakteri [15] ile 30 karakterden oluşmaktadır. Özbek alfabesi 6 ünlü(a, e, i, u, o, o’) ve 23 ünsüz harften (b, d, f, g, h, j, k, l, m, n, p, q, r, s, t, v, z, y, x, g’, sh, ch, ng) oluşmaktadır[15,16]. Özbekçe ünlü harfleri Tablo 1’de ve Özbekçe ünsüz harfleri Tablo 2’de fonetik özellikleriyle gösterilmiştir [17].

**Tablo 1.** Özbekçe sesli harfler.

Ünlüler	Yuvarlak			Düz		
	Açık	Yarı Kapalı	Kapalı	Açık	Yarı Kapalı	Kapalı
Arka Sıralı	o	o’	u			
Ön Sıralı				a	e	i

**Tablo 2.** Özbekçe sessiz harfler.

Süreksiz		Dudaksıllar	Dişsel	Damaksıl	Art Damak	Küçük Dil	Gırtlaksal
		Tonsuz	p	t		k	q
	Tonlu	b	d		g		
Yarı Patlayıcı	Tonsuz			ch			
	Tonlu			j			
Sızıcı	Tonsuz	f	s	sh	x		h
	Tonlu		z			g’	
Geniz		m	n		ng		
Akıcı		v	l,r	y			

Özbekçe, Türk dilleriyle ünlü-ünsüz düşmesi, ünlü-ünsüz türemesi ve ünlü-ünsüz değişimi gibi konularda benzerlik gösterir. Birçok konuda Türk dilleriyle benzerlik gösteren Özbekçe’de düzenli bir ünlü ve ünsüz uyumu bulunmamaktadır [18]. Bu makalede Özbekçe dil ve yazım kuralları büyük bir titizlikle incelenerek, iki düzeyli yazım (ortografik) kuralları Özbek morfolojisini tanımlamak için kullanılmıştır. Yazım kurallarının daha sade ve kolay tanımlanması için harf kümelerinden oluşan meta-harfler kullanılmıştır. Tanımlamalarda kullanılan meta-harfler aşağıdaki gibidir.

$C = \{b, d, f, g, h, j, k, l, m, n, p, q, r, s, t, v, z, y, x, g', sh, ch, ng\}$ ,  $C_s = \{f, s, t, k, q, ch, sh, l, n, s, h, y\}$ ,  $V = \{a, e, i, u, o, o'\}$ ,  $V_{bo} = \{o, u\}$ ,  $V_{fu} = \{a, e, i\}$ ,  $V_{de} = \{o, i, u\}$ ,  $D = \{d, t\}$ ,  $Q = \{q, k\}$ ,  $G = \{q, k, g, g'\}$ ,  $I = \{u, i\}$ ,  $Y = \{a, y\}$ ,  $E = \{a, i\}$ .

İki düzeyli kuralları tanımlarken kullanılan bazı semboller ve anlamları şunlardır; \* önceki harfin sıfır ya da daha fazla tekrarlanması, ? önceki harfin sıfır ya da bir kez tekrarlandığını, 0 yüzeyde görünmediği, @ kelime sonunu, \$ sonraki harfin yüzeyde düştüğünü, + ek sınırlarını gösterirken, [a | b | c] ya da [abc] ise a veya b veya c anlamına gelmektedir.

Bu bölümde iki düzeyli kurallar örnekler ile açıklanmıştır. Her kuraldan sonra verilen örneklerin ilk satırında kelimenin sözcüksel (lexical) formu, ikinci satırda kelimenin yüzeysel (surface) formu gösterilmiştir. Uygulama aşaması 26 iki düzeyli yazım kuralı ile tamamlanmış olup, sadece en çok kullanılan 12 iki düzeyli yazım kuralı bu makaledeki sayfa kısıtlaması nedeniyle sunulabilmektedir.

1. Bu kurala göre gövdeye eklenen ektaki ünlü, gövdenin son ünlüsüne göre değişim göstermektedir. Buna göre, gövde son ünlüsü e veya i ise ve  $A = \{a, o\}$  meta harfini içeren bir ek alırsa, A yüzeyde a olarak gösterilir. Gövde son ünlüsü o veya u ise A yüzeyde o olarak gösterilir. Bu kural için bazı istisnalar bulunmaktadır.  $bu+(n)daqa \rightarrow bundaqa$  ve  $shu+(n)daqa \rightarrow shundaqa$  örneklerinde bu istisnalar gösterilmektedir.

A:a => V:[ei]C\*+C\*\_

A:o => V:[ou]C\*+C\*\_

ovun+chAQ	V(teselli ol) + JVD_CHAQ	ovunchoq	avuntu
kekir+dAQ	V(geğir) + NVD_D AQ	kekirdak	gırtlak

2. Son ünlüsü o, i veya u olan bir gövdeye E={a, i} meta harfini içeren bir ek gelirse, E yüzeyde i olarak gösterilir. Son ünlüsü o' olan bir gövde, E meta harfini içeren ek alırsa E yüzeyde a olarak gösterilir.

E:i => V:[oiu]C\*+C\*\_

E:a => V:o'C\*+C\*\_

uch+Er	V(uç) + CAUSR_ER	uchir	birisini / bir şeyi uçurmak
o't+Ger	V(geç) + CAUSR_ER	o'tkar	bir şeyi / birisini geçirmek

3. Son ünlüsü u veya e olan bir gövdeye I={u, i} meta harfini içeren bir ek gelirse, I yüzeyde u olarak gösterilir. Son ünlüsü i olan bir gövde, I meta harfini içeren ek alırsa I yüzeyde i olarak gösterilir.

I:u => V:[eu]C\*+C\*\_

I:i => V:iC\*+C\*\_

kekir+IQ	V(geğir) + NVD_IQ	kekirik	geğirme
uz+IQ	V(koparmak) + NVD_IQ	uzuq	kopuk
yet+IQ	V(yet) + JVD_IQ	yetuk	yetişkin

4. C<sub>s</sub> sert sessizlerinden biri ile biten gövdeye D={d, t} ile başlayan bir ek geldiğinde D meta harfi yüzeyde t sessizi ile gösterilir. C<sub>s</sub> sert sessizlerinden biri ile bitmeyen gövdelere eklenen ekin başındaki D meta harfi d sessizi ile gösterilir.

D:t => Cs+ \_

D:d => C-Cs+ \_

ayt+Dir	V(söyle) + CAUSDIR_DIR	ayttir	birine söylet
qil+Dir	V(yap) + CAUSDIR_DIR	qildir	birinin yapmasını sağlatmak

5. Son ünlüsü o veya u olan gövdelere Q={q, k} meta harfini içeren bir ek gelirse, Q meta harfi yüzeyde q olarak gösterilir. Gövdenin son ünlüsü a, e veya i harflerinden biri ise ve Q meta harfini içeren bir ek alırsa Q meta harfi yüzeyde k olarak gösterilir. Bu kuralın istisnaları bulunmaktadır. Örneğin chush kelimesi Q<sub>i</sub>r ekini aldığı zaman yüzeyde chushk<sub>i</sub>r olarak görünür. Bu örnekte Q meta harfi q olması gerekirken yüzeyde k olarak görülmektedir.

Q:q => V:[ou]C\*+C?\_C\*

Q:k => V:[aei]C\*+C?\_C\*

o'kir+IQ	V(bağır) + NVD_IQ	o'kirik	ağlama
solin+chAQ	V(kon) + JVD_CHAQ	solinchak	kulak memesi

6. k veya g ünsüzleri ile biten gövdelere G={q, k, g, g'} meta harfiyle başlayan bir ek gelirse, G meta harfi yüzeyde k olarak gösterilir. Gövdenin son ünsüzü g' veya C<sub>s</sub> sert sessizlerinden biri ise, ekin başında bulunan G meta harfi yüzeyde q olarak gösterilir. e, k veya g harflerinden birini barındıran gövdeye G meta harfiyle başlayan bir ek gelirse G meta harfi yüzeyde g olarak gösterilir. o, q, x veya g' harflerinden birini barındıran gövdeye G meta harfiyle başlayan bir ek gelirse G meta harfi yüzeyde g' olarak gösterilir.

G:q => @[g'Cs]+ \_

G:k => @[kg]+ \_

G:g => C\*V\*[ekg]V\*C\*+ \_

G:g' => C\*V\*[oqxg']V\*C\*+ \_

turt+Gi	V(dürt) + NVD_GI	turtki	dürtü
yul+Gich	V(yol) + NVD_GHCH	yulg'ich	hırsız

7. Ünlü ile biten gövdelere ünlü ile başlayan bir ek geldiğinde, ekin başındaki ünlü yüzeyde düşer.  
V:0 => V+\_

bola+Am	N(çocuk) + NNI_POSS1S_AM	bolam	çocuğum
---------	--------------------------	-------	---------

8. Sessiz ile biten bir gövdeye n sessizi ile başlayan bir ek geldiğinde, ekin başındaki n ünsüzü yüzeyde düşer.  
n:0 <=> C+\_

men+ning	Pron(ben) + NNI_GEN_NING	mening	benim
----------	--------------------------	--------	-------

9. Bazı kelimelerde, gövdenin son ünlüsü, ünlüyle başlayan bir ek aldığında yüzeyde düşer. Bazı durumlarda, ünsüzle başlayan bir ek alan gövdenin ünsüz harfi düşer.  
V:0 => \_C\*+V  
C:0 => \_+C\*

burun+Am	N(burun) + NNI_POSS1S_AM	burnim	burnum
suv+GAR	N(su) + VND_GAR	sug'or	sulamak

10. Gövdenin son ünsüzü g veya g' harflerinden biriye ve gövde G meta harfiyle başlayan bir ek alırsa gövdenin sonundaki g ünsüzü k ünsüzüne ve g' ünsüzü q ünsüzüne dönüşür. Bazı Rusça kökenli kelimeler örneğin biolog(ek aldıktan sonra yüzeyde biologga olarak yazılır) bu kurala uymaz.  
g:k => \_+G  
g':q=> \_+G

teg+Gani	V(değ) + AVD_GANI	tekkani	değmek için
bog'+Ga	N(bahçe) + NNI_DAT_GA	yulg'ich	bahçeye

11. Özbekçede iki ünlü yan yana gelmez. Bazı durumlarda, ünlü ile biten gövdelere ünlü ile başlayan bir ek geldiğinde y ünsüzü iki ünlü arasına eklenir.

parvo+Imiz	N(ilgi) + NNI_POSS1S_IM	parvoyimiz	ilgimiz
------------	-------------------------	------------	---------

12. Ünsüzle biten gövdelere ünsüzle başlayan bir ek geldiğinde ekin başındaki ünsüz yüzeyde düşer.  
C:0 => C+\_

bosh+si	N(baş) + NNI_POSS3S_SI	boshi	onun başı
---------	------------------------	-------	-----------

#### 4. Uygulama

Bu çalışmada Özbek morfolojisinin iki düzeyli tanımı detayları ile sunulmuştur. Özbek morfolojisinin iki düzeyli tanımının uygulanması Nuve Studio kullanılarak yapılmıştır. Nuve Studio[19,20], Nuve'nin yeni bir uygulama arayüzü olarak geliştirildi. Nuve[21] açık kaynak kodlu, biçimbilimsel çözümleme ve makine çevirisi için kullanılan doğal dil işleme kütüphanesidir.

Nuve Studio'da bir dilin morfolojik olarak tanımlayabilmek için kökler ve ekler sözlüğü ile yazım ve biçim dizgesi (morfolojik) kuralları tanımlanmalıdır. Özbekçe için hazırlanan dosyalar [http://www.nuvestudio.com/downloads/uz\\_UZ/uz\\_UZ.zip](http://www.nuvestudio.com/downloads/uz_UZ/uz_UZ.zip) linkinden indirilebilir.

#### 5. Özel Durumlar ve İstisnalar



Bu bölümde, uygulama esnasında ortaya çıkan, Özbek morfolojisinin bazı özel durumları ve istisnaları örneklerle sunulmuştur. Özel durumlar ve istisnalar için özel kurallar tanımlanmıştır. Özel durumların ve istisnaların örnekleri kelimenin biçim bilimsel analizi ve ek yapısını kapsamaktadır. Özel durumlar, kelimenin cümle içerisindeki kullanımını ve özel durumu göstermek için cümleler ile sunulmuştur. Kelimeler, beklenen ve istisnai durumun gerçekleştiği ya da gerçekleşmediği kelimenin doğru gösterimi ile örneklendirilmiştir. Özel durumlar ve istisnalar örneklerle aşağıda detaylandırılmıştır.

1. Bazı sayılara +dan veya +lab ekleri eklenince gövde zarfa dönüşür. Bu sayılara eklenen aynı ek bazı durumlarda gövdenin zarfa dönüşmeyerek sayı olarak kalmasına neden olur. +dan çekim eki istisnai durumlarda yapım eki gibi davranır. Aşağıdaki örneklerin ilkinde +dan ekini alan sayı gövdesi zarfa dönüşürken, ikinci örnekte sayı olarak kalmıştır.

Biçimbirimler(Morphemes)	Yapısal(Lexical)	Kelime	Cümle
bir+dan	SAYI(bir)+ÇIKMA(dan) (zarf – aniden)	birdan	Birdan kelip goldi. (Birden gelip kaldı.)
bir+dan	SAYI(bir)+ÇIKMA(dan)  (sayı – bir)	birdan	Birdan birni kamaytsa nol goladi. (Birden bir çıkarsa sıfır kalır.)

2. İşaret zamirlerine eklenen bazı hal ekleri(yönelme, bulunma ve çıkma) ve bazı çekim eklerinin arasına n sessizi ve ni harfleri türer. Üçüncü çoğul şahıs ekleri işaret zamirlerine eklenmesi durumunda istisnai olarak ni türemesi gözlenmez.

Biçimbirimler(Morphemes)	Yapısal(Lexical)	Beklenen	Doğru
shu+da	ZAMİR(shu)+BULUNMA (da)	shuda	shunda(şunda)
bu+ga	ZAMİR(bu)+YÖNELME (ga)	buga	bunga(buna)
shu+si	ZAMİR(shu)+3.TEKİL ŞAHIS İYELİK EKİ(si)	shusi	shunisi(
shu+lar+i	ZAMİR(shu)+ÇOĞUL(lar)+ 3.ÇOĞUL ŞAHIS İYELİK EKİ(i)	shunilari	shulari(şunları)

3. Özbekçe’de geçmiş zaman eki sadece +di ekdir. Geçmiş zaman eki ünsüz uyumundan dolayı herhangi bir ses değişimine uğramaz.

Biçimbirimler(Morphemes)	Yapısal(Lexical)	Beklenen	Doğru
ket+di	FİİL(ket)+GEÇMİŞ ZAMAN(di)+3.TEKİL ŞAHIS	ketti	ketdi(gitti)
top+di	FİİL(top)+GEÇMİŞ ZAMAN(di)+3.TEKİL ŞAHIS	topdi	topdi(bulundu)

4. Özbekçede bazı kelimelerin yazılışı aynı fakat anlamları farklıdır. Farklı eklerin bu gövdelere eklenmesi sonrası yazılışları aynı olsa bile farklı özel durumlara ve anlamlara sahip olabilir. Ayrıca, aynı ekler eklense bile bu gövdelerin anlamları ve morfolojik yapısı farklı olabilir. Bu kelimelerin hangisinin ne anlama geldiği ancak cümle veya konuşma dilinde anlaşılabilir olup, morfolojik belirsizliğe yol açmaktadır. Bu kelimelerin cümle içinde doğru morfolojik çözülmesi için morfolojik belirsizlik giderme yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Uygulama esnasında farklı kurallar tanımlanarak, bu kelimeler için özel durumlar oluşturulmuştur.

<b>Biçimbirimler(Morphemes)</b>	<b>Yapısal(Lexical)</b>	<b>Sonuç</b>
bo'l+di	FİİL(bo'l)+GEÇMİŞ ZAMAN(di)+3.TEKİL ŞAHIS	bo'ldi(böldü)
bo'l+di	FİİL(bo'l)+GEÇMİŞ ZAMAN(di)+3.TEKİL ŞAHIS	bo'ldi(oldu)
bek+mi	İSİM(bek)+3.TEKİL ŞAHIS+SORU(mi)	bekmi?(Bey mi?)
bek+mi	SIFAT(bek)+3.TEKİL ŞAHIS+SORU(mi)	bekmi?(Kapalı mı?)
qot+ma	FİİL(qot)+F.İ.YAPIM EKİ(ma)	qotma(sıska)
qot+ma	FİİL(qot)+OLUMSUZLUK(ma)	qotma(sert olma)
qot+ma	FİİL(qot)+F.F.YAPIM EKİ(ma)	qotma(setleşme)
qotma	İSİM(qotma)	qotma(sıska)

5. Bir gövdenin son harfi g, g', k ve q sessizlerinden biriye ve +Gan geçmiş zaman veya +Ga hal eklerinin biri gövdeye eklenirse, ekin ilk sessizi ve gövdenin son sessizi k veya q sessizine dönüşür. Gövdenin son harfleri g, g', k ve q sessizlerinden biri değilse bu durum gerçekleşmez. Özbekçe'de normalde, eğer bir gövde g, g', k ve q sessizlerinden biriyle biter ve G sessizi ile başlayan bir ek alırsa, sadece G sessizi k ve q sessizine dönüşür.

<b>Biçimbirimler(Morphemes)</b>	<b>Yapısal(Lexical)</b>	<b>Beklenen</b>	<b>Doğru</b>
teg+gan	FİİL(teg)+GEÇMİŞ ZAMAN(gan)+3.TEKİL ŞAHIS	teggan	tekkan(değmiş)
bo'g'+gan	FİİL(bo'g')+GEÇMİŞ ZAMAN(gan)+3.TEKİL ŞAHIS	bo'g'gan	boqqan(besledi)
tik+gan	FİİL(tik)+GEÇMİŞ ZAMAN(gan)+3.TEKİL ŞAHIS	tikgan	tikkan(dikilmiş)
uq+gan	FİİL(uq)+GEÇMİŞ ZAMAN(gan)+3.TEKİL ŞAHIS	uqgan	uqqan(uyanmış)
ket+gan	FİİL(ket)+GEÇMİŞ ZAMAN(gan)+3.TEKİL ŞAHIS	ketgan	ketgan(gitmiş)
bosh+ga	İSİM(bosh)+YÖNELME(ga)	boshga	boshga(başka)

6. Bir gövdenin son harfi y, r, sh ve n sessizlerinden biriye ve +Dir ettirgen fiil eki eklenirse, ekin ilk sessizi t(tir) olarak görünür. Eğer gövde herhangi bir başka sessizle biterse, bu durum gerçekleşmez. Gövdenin son harfinin l sessizi olması durumunda, +Dir eki tir olarak görünür. Sadece bir istisna kelimedede bu durum görünmez. Kel(gel) kelimesi ve istisnai durumu aşağıda sunulmuştur.

<b>Biçimbirimler(Morphemes)</b>	<b>Yapısal(Lexical)</b>	<b>Beklenen</b>	<b>Doğru</b>
aylan+Dir	FİİL(aylan)+ETTİRGEN(dir)	aylandir	aylantir(dönüştür)
chiqar+Dir	FİİL(chiqar)+ETTİRGEN(dir)	chiqardir	chiqartir(çıkarttır)
ko'pey+Dir	FİİL(ko'pey)+ETTİRGEN(dir)	ko'peydir	ko'peytir(çoktur)
kel+Dir	FİİL(kel)+ETTİRGEN(dir)	keldir	keltir(getir)
ol+Dir	FİİL(ol)+ETTİRGEN(dir)	oldir	oldir(öldür)

7. Bu istisna, +chAQ son ekiyle ilgilidir. Duruma göre ek +choq veya +chak olarak gözlemlenir. Bir kelimedede x,q ve g' sessizleri olduğunda, kelimedeki arka sıralı ünlüler kesinlikle arka sıralı ünlüler

gibi davranır. Diğer durumlarda, arka sıralı ünlüler kelimedeki ön sıralı ünlüler olarak sunulur. Bu durumlar aşağıda örneklendirilmiştir.

Biçimbirimler(Morphemes)	Yapısal(Lexical)	Sonuç
qo'zic+chAQ	İSİM(qo'zic)+İ.İ.YAPIM EKİ(chAQ)	qo'zichoq (kuzucuk)
o'rgim+chAQ	İSİM(o'rgim)+İ.İ.YAPIM EKİ(chAQ)	o'rgimchak(örümcek)

## 6. Örnekler

Bu bölümde, Nüve Studio uygulama ortamında test edilen örnekler ve sonuçları aşağıda sunulmuştur.

- Olmangiz

olma+ngiz	[İSİM(olma)+2.ÇOĞUL ŞAHIS İYELİK(ngiz)] (elmalarımız)
ol+ma+ngiz	[FİİL(ol)+F.İ.YAPIM EKİ(ma)+ 2.ÇOĞUL ŞAHIS İYELİK(ngiz)] (bir şey alma)
ol+ma+ngiz	[FİİL(ol)+OLUMSUZLUK(ma)+2.ÇOĞUL ŞAHIS EMİR(ngiz)] (alma)

- Bo'ldimi

bo'l+di+mi	[FİİL(bo'l)+GEÇMİŞ ZAMAN(di)+3.TEKİL ŞAHIS+SORU(mi)](Böldü mü?)
bo'l+di+mi	[FİİL(bo'l)+GEÇMİŞ ZAMAN(di)+3.TEKİL ŞAHIS+SORU(mi)](Böldü mü?)

- Bekmi

bek+mi	[İSİM(bek)+3.TEKİL ŞAHIS+SORU(mi)] (Bey mi?)
bek+mi	[SIFAT(bek)+3.TEKİL ŞAHIS+SORU(mi)] (Kapalı mı?)

- Sirdagi

sir+da+gi	[İSİM(sir)+BULUNMA(da)+İLGİ(gi)](sırdaki)
sir+da+gi	[İSİM(sir)+BULUNMA(da)+İLGİ(gi)](boyadaki)
sir+da+gi	[İSİM(sir)+BULUNMA(da)+İLGİ(gi)](peynirdeki)

- Keltirilgan

kel+tir+il+gan	[FİİL(kel)+ETTİRGEN(tir)+EDİLGEN(il)+GEÇMİŞ ZAMAN(gan)+3.TEKİL ŞAHIS] (Getirildi.)
kel+tir+il+gan	[FİİL(kel)+ETTİRGEN(tir)+EDİLGEN(il)+ SIFAT-FİİL(gan)] (getirilmiş)

- Qotma

qot+ma	[FİİL(qot)+F.İ.YAPIM EKİ(ma)](sıska)
qot+ma	[FİİL(qot)+OLUMSUZLUK(ma)](sert olma)
qot+ma	[FİİL(qot)+F.F.YAPIM EKİ(ma)](sertleşme)
qotma	[İSİM(qotma)](sıska)

## 7. Sonuç ve Gelecek Çalışmalar

Bu makalede, iki düzeyli Özbek morfolojisi detayları ile araştırılmıştır. İki düzeyli ortografi (yazım) kuralları tanımlanarak, Özbekçenin morfolojik çözümlemesi sağlanmıştır. Morfolojik çözümleme esnasında karşılaşılan özel durumlar ve istisnalar araştırılmış ve uygulama aşamasında tanımlanmıştır. Çalışmanın uygulaması bu çalışma için geliştirilen Nuve Studio uygulaması aracı ile yapılmıştır.

Özbekçenin biçimbilimsel çözümlemesinin uygulama aşamasında, 30.000 kök kelime ve 370 ek ile tanımlı kök ve ek sözlüğü kullanılmıştır. Uygulama için 26 iki düzeyli ortografi kuralı tanımlanarak bu kurallar doğrultusunda çözümlemeler yapılmıştır. İstisnai durumlar ayrıca işlenerek sözlüğe eklenmiş ve çözümlemeleri

sağlanmıştır. Bir kelimenin birden fazla biçimbilimsel çözümünün olması biçimbilimsel belirsizlik gidermenin konusu olarak bir sonraki aşamada belirsizlik giderme uygulamaları ile çözümlenecek olup, sözlükte tanımlanan kelimelerin istenilen çözümlerinin elde edildiği gözlemlenmiş olup, birden fazla çözümün birçok kelime için üretildiği ayrıca gözlemlenmiştir. Uygulama testlerinde tüm sözlük kullanılarak sağlanan testte 30.000 kelimenin 27.993 tanesi istenilen – doğru (true) ve 2.007 tanesi farklı – yanlış (false) çözümlenerek %93,31 oranında istenilen sonuca ulaşılmıştır. Farklı çözümler biçimbilimsel belirsizlik gidermenin konusu olup, biçimbilimsel belirsizlik giderme sonrası bu oranın artış göstereceği öngörülmektedir.

Sonuç olarak, Özbekçenin morfolojisinin karmaşık yapısına, özel ve düzensiz durumlar ile istisnalara rağmen uygulama başarılı olarak kabul edilebilir bir oranda istenilen sonuçları sağlamış olup, Özbekçenin biçimbilimsel çözümlemesi detayları ile anlatılmıştır. Özbekçenin biçimbilimsel belirsizlik giderme ve sözdizimsel çözümleme konuları gelecekte araştırılarak, Özbekçe ve Türkçe arasında makine çevirisi üzerinde çalışmalar yapılacaktır.

### Kaynaklar

- [1] Üşenmez E. Modern Özbek Türkçesinin Oluşumu. *Turkish Studies (Elektronik)* 2017; 12(7): 463-476.
- [2] Koskenniemi K. Two-level model for morphological analysis. In: *IJCAL*.1983; 683-685.
- [3] Koskenniemi K. Two-level morphology: A General Computational Model for Word-Form Recognition and Production. University of Helsinki, Dept. of General Linguistics 1983; 11.
- [4] Agirre E, Alegria I, Arregi X, Artola X, de Ilaraza AD et al. XUXEN: A spelling checker/corrector for Basque based on Two-Level morphology. In: *Third Conference on Applied Natural Language Processing*. 1992; 119-125.
- [5] Hurskainen A. A Two-Level Computer Formalism for the Analysis of Bantu Morphology An Application to Swahili. In: *NJAS*. 1992; 1:87-119.
- [6] Alam YS. A Two-Level Morphological Analysis of Japanese. In: *Texas Linguistic Forum*. 1983; 22:229-252.
- [7] Kim DB, Lee SJ, Choi KS, Kim GC. A two-level morphological analysis of Korean. In: *COLING The 15<sup>th</sup> International Conference on Computational Linguistics*. 1994; 1:535-539.
- [8] Oflazer K. Two-level description of Turkish morphology. *Literary and linguistic computing* 1994; 9(2): 137-148.
- [9] Zafer HR, Tilki B, Kurt A, Kara M. Two-level description of Kazakh morphology. In: *Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Foreign Language Teaching and Applied Linguistics (FLTAL)*. 2011; 560-564.
- [10] Yiner Z, Kurt A, Kulamshaev K, Zafer HR. Kyrgyz Orthography and Morphotactics with Implementation in NUVE. In: *International Conference on Engineering and Natural Science (ICENS)*, Sarajevo, Bosnia-Herzegovina. 2016; 1650-1658.
- [11] Principal Orthographic Rules For The Uzbek Language. The Uzbekistan Cabinet of Minister's Resolution No. 339., of August 24, 1995. Tashkent, Uzbekistan.
- [12] Matlatipov G, Vetulani Z. Representation of uzbek morphology in prolog. In: *Aspects of Natural Language Processing*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009; 83-110.
- [13] Atadjanov JA. Models of Morphological Analysis of Uzbek Words. *Кибернетика и программирование* 2016; 6:70-73.
- [14] Abdurakhmonova NZ. A Two-Level Morphological Analysis Of The Uzbek Corpus. *Иностранная филология. Социальная и национальная вариативность языка и литературы* 2019; 425-430.
- [15] Yusupova N. *Türkçe Özbekçe Sözlük*. Ankara, Türkiye: Türk Dil Kurumu, 2018.
- [16] Üşenmez E, Boltabayev S, Tuğlacı G. *Özbekçe-Türkçe Sözlük*. İstanbul, Türkiye: Türk Dünyası Vakfı, 2016.
- [17] Van Der Hulst H, Van De Weijer J. Topics in Turkish phonology. *Turkish Linguistics Today*. 1991; 11-59.
- [18] Üşenmez E. *Modern Özbek Türkçesi: (Giriş-Özbekistan-Dil Tarihi-Metinler-Gramer-Sözlük)*. İstanbul, Türkiye Akademik Kitaplar, 2012.
- [19] Nuve Studio (2021). Nuve Studio [online] <http://nuvestudio.com> [accessed 11. Month Year].
- [20] Küçük AE. Nuve Studio Source Code. <https://github.com/kucukea/nuve-studio>, 2021.
- [21] Zafer HR. Nuve : A Natural Language Processing Library for Turkish in C#. <https://github.com/hrzafer/nuve>, 2021.



## Derin Öğrenme Tabanlı Otomatik Beyin Tümör Tespiti

Muzaffer ASLAN\*

\*<sup>1</sup> Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Bingöl Üniversitesi, Bingöl, Türkiye  
<sup>1</sup> muzaffer.aslan@bingol.edu.tr

(Geliş/Received: 22/12/2021;

Kabul/Accepted: 12/02/2022)

**Öz:** Beyin tümörleri, insan ölümlerinin en yaygın nedenlerinden biridir. Beyin tümörlerinin erken ve doğru teşhisi etkili bir tedavi için oldukça önemlidir. Manyetik rezonans görüntüleme (MRG), beyin tümörlerinin tespitinde en etkili verileri sağlayan temel araçlardan biridir. Geleneksel yöntemler ile yapılan hastalık tespiti yerine yapay zekâ temelli bilgisayar uygulamaları ile beyin tümörlerinin tespiti uzmanlara önemli katkılar sağlayabilir. Özellikle son dönemler popüler olan derin öğrenme yöntemlerinin, medikal görüntülerin işlenmesine dayalı hastalık tespiti sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada, MRG görüntüleri ile beyin tümörlerinin tespiti için MobilNetV2 derin öğrenme modeli ile birlikte k en yakın komşu (k-EYK) algoritması kullanılmıştır. Çalışmada, öz nitelik olarak önceden eğitilmiş MobileNetV2 modelinin tam bağlantı katman değerleri kullanılmıştır. Elde edilen öz niteliklerin sınıflandırılması performansının artırılması için k-EYK sınıflandırma algoritması kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda, önerilen yöntem ile beyin tümörlerinin tespitinde k-EYK sınıflandırıcıda %96,44 doğruluk skoruna ulaşılmıştır. Aynı veri setinin kullanıldığı literatürdeki diğer bazı çalışmalar ile karşılaştırıldığında daha yüksek bir başarımla sağlanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Beyin Tümörü, Derin Öğrenme, MobileNetV2 Model, Sınıflandırma.

### Deep Learning-Based Automatic Detection

**Abstract:** Brain tumors are one of the most important causes of human death. Accurate and early diagnosis of brain tumors is crucial for treatment. Magnetic resonance imaging (MRI) is one of the basic tools that provide the most effective data in the detection of brain tumors. Detection of brain tumors with artificial intelligence-based computer applications instead of disease detection with traditional methods can provide significant contributions to experts. In particular, deep learning methods, which have been popular recently, and disease detection based on the processing of medical images are frequently used. This study used MobilNetV2 deep learning model and k Nearest Neighbor (k-NN) algorithm to detect brain tumors with MRI images. In the study, fully connect layer values of the pre-trained MobileNetV2 model were used as the feature. The k-EYK classification algorithm was used to increase the classification performance of the obtained features. In experimental studies, an accuracy score of 96.44% was achieved in detecting brain tumors with the proposed method. Higher performance was achieved when compared with some other studies in the literature using the same dataset.

**Keywords:** Brain Tumor, Deep Learning, MobileNetV2 Model, Classification

### 1. Giriş

Beyin tümörü hayatı tehdit eden ölümcül bir hastalıktır. Bu hastalık merkezi sinir sistemini ciddi şekilde bozabilecek beklenmedik şekilde yükselen beyin hücreleri kümesi olarak tanımlanır [1]. Beyin tümörleri, birincil ve ikincil olmak üzere ikiye ayrılırlar [2]. Birincil beyin tümörleri iyi huyludur ve beyinin diğer bölgelerine yayılmazlar. İkincil beyin tümörleri kötü huyludur, kanser hücreleri akciğer veya meme gibi diğer organlardan beyne yayıldığında ortaya çıkar [3]. Beyin tümörünün nedenleri tam olarak bilinmemektedir. Bununla birlikte bu hastalıkta genellikle baş ağrısı, kusma, göz anormallikleri veya çift görme zayıflığı, uyusukluk, yutma güçlüğü, kişilik veya davranış değişiklikleri, el titremesi gibi belirtiler ortaya çıkmaktadır. Beyin tümörünün tespitinde genellikle manyetik rezonans görüntüleme (MRG), bilgisayarlı tomografi (BT) ve kafa biyopsisi yöntemleri kullanılmaktadır [4]. Fakat, MRG yöntemi beyin yumuşak dokusu hakkında yüksek çözünürlüklü bilginin yanı sıra aynı dokuya ait birden fazla şekilsel bilgi de sağlamaktadır [5]. Bu nedenle, beyin cerrahları beyindeki en küçük anormallikleri tespit için onlara yeterli bilgi sağladığında yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Dünya Sağlık Örgütü'nün son verilerine göre, beyin tümörü dünya çapında en yaygın kanser ölüm türlerinden biri olup her yaşta ortaya çıkabilmektedir [6]. Özellikle 40 yaşın altındaki insanlarda daha fazla ölümlere neden olmaktadır. Beyin tümörünün erken teşhisi, hastaların tedavi edilmesi için oldukça önemlidir. Ayrıca erken teşhis edilmiş hastaların hayatta kalmaları önemli oranda artırılabilir. Bu nedenle beyin tümörlerinin tespit ve tedavi planlamasının hayati önem taşıdığından görüntülerin değerlendirilmesi hızlı ve doğru yapılması oldukça önemlidir.

\* Sorumlu yazar: [muzaffer.aslan@bingol.edu.tr](mailto:muzaffer.aslan@bingol.edu.tr). Yazar ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-2418-947

[7]. Fakat radyolog ve doktorlar tarafından yapılacak manuel kontroller hem zaman alıcı olabilir hem de hatalı kararlar verilmesine neden olabilir. Bu nedenle birçok araştırmacı, radyolog ve doktorların beyin tümörü teşhisine yardımcı olabilecek bilgisayar destekli otomatik tespit sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlamaya çalışmıştır.

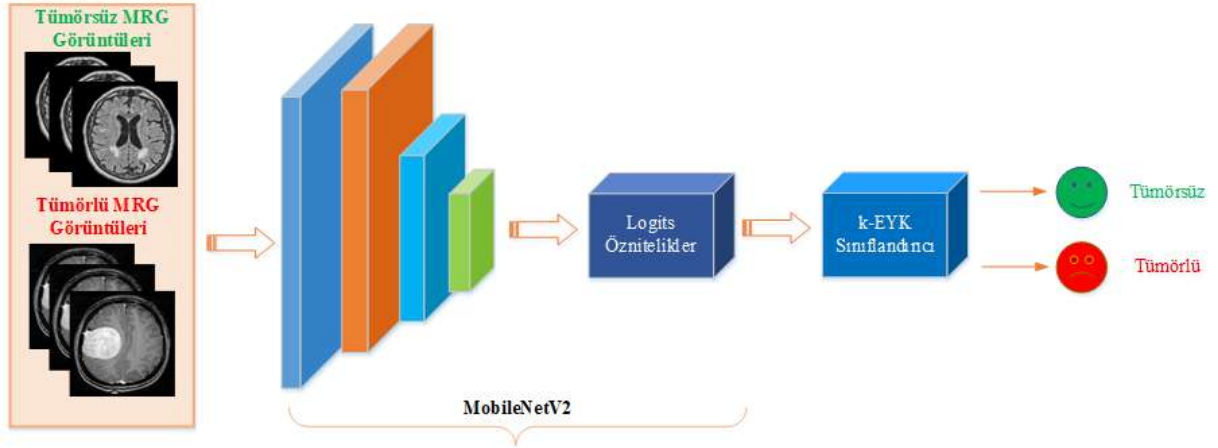
Literatürde beyin tümörü teşhisine yönelik makine öğrenmesi ve derin öğrenme modelleri yaygın olarak kullanılmıştır. Arı ve diğerleri [8] MRG görüntülerinin ön işlem aşamasında bölütleyerek bu bölgelerden elde edilen öz nitelikleri sınıflandırmışlardır. Deneysel çalışmalarda %83,39'luk sınıflandırma başarımı elde etmişlerdir. Bulut ve diğerleri [9] beyin tümör tespiti için MRG görüntülerinin segmentasyonunu dayalı bir model önerdiler. Deneysel çalışmalarda Markov rastgele alan yöntemi ile %87 doğrulukta beyin tümörlerini tespit etmişlerdir. Mohsen ve diğerleri [10] derin öğrenme yöntemleri ve Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD) modelini kullanarak beyin tümörlerini sınıflandırmak amacıyla yeni bir yöntem önerdiler. Deneysel çalışmalarda bu model ile %93,94 doğruluk elde etmişlerdir. Afşar ve diğerleri [11] beyin tümörlerini sınıflandırmak için CapsNet olarak adlandırdıkları bir yöntem önerdiler. Önerilen yöntem ile daha veri ile daha yüksek bir doğruluk skorunu hedeflemişlerdir. Bu amaçla tek evrişim katmanından elde edilen 64 öz niteliği kullandılar. Yöntem ile beyin tümörünü sınıflandırılmasında %86,56 doğruluk oranı elde ettiler. Vani ve diğerleri [12] beyin tümörü sınıflandırmak için makine öğrenmesi tabanlı, Destek Vektör Makinası (DVM) yöntemini önerdiler. Çalışmalarında beyin tümörünü pozitif ve negatif olarak sırasıyla %82 ve %81,48 doğrulukta tahmin ettiklerini belirtmişlerdir. Çıtak ve diğerleri [13], beyin tümörü tespiti için DVM, çok katmanlı algılayıcılar (ÇKA) ve lojistik regresyon (LR) olmak üzere 3 farklı makine öğrenme yöntemi kullanımını önerdiler. Deneysel çalışmalarda beyin tümörü tespitinde %93 doğruluk oranına ulaştılar. Shahzadi ve diğerleri [14] beyin tümörlerinin tespit etmek amacıyla ESA tabanlı hibrit model yapısını kullandılar. Özellik çıkarımı ve sınıflandırma AlexNet ve VggNet ESA modelleri ile birlikte Uzun Kısa Süreli Bellek (UKSB) yapısını birlikte kullandılar. Yapılan çalışmada AlexNet-UKSB ile %71 doğruluk, VGGNet-UKSB ile %84 doğruluk performansları elde ettiler. Swati ve diğerleri [15] çok sınıflı beyin tümörleri sınıflandırması için transfer öğrenimini önerdiler. Bu amaçla AlexNet, VGG16 ve VGG19 ESA modellerini kullandılar. Deneysel çalışmalarda, AlexNet, VGG16 ve VGG19 modellerinde sırasıyla %89,95, %94,65, %94,82 doğruluk oranlarına ulaştılar. Taş ve Ergin [16], MR görüntülerinde beyin tümörünün tespit için derin öğrenme ve K-ortalama bölütlemeyi kapsayan bir yöntem önermişlerdir. Çalışma sonucunda beyin tümörünün tespitini %84,45 doğruluk oranı ve %95,04 hassasiyet ile gerçekleştirmişlerdir. Saxena ve diğerleri [17], transfer öğrenmeye dayalı Resnet-50 kullanarak beyin tümörü tespiti için tahmine dayalı bir model geliştirdi. Deneysel sonuçları %95 doğruluk oranına ulaştılar.

Bu çalışmada beyin tümörlerini tespiti için önceden eğitilmiş ESA modellerinden MobileNetV2 ve k-en yakın komşu (k-EYK) temelli bir model önerilmiştir. Bu modelde öz nitelik çıkarımı için MobileNetV2 kullanılmıştır. MobileNetV2 modeli mobil cihazlara veya düşük hesaplama gücüne sahip herhangi bir cihazda kullanılabilirliği için tercih edilmiştir. Derin öz nitelikler sınıflandırılma performansının artırılması için k-EYK sınıflandırıcıya uygulanmıştır. Çalışmanın literatüre katkıları şunlardır;

- Daha düşük kapasiteli donanımlarda kullanılabilir bir ESA modeli önerildi.
- MobileNetV2 genelleme performansının artırılması için veri çoğaltma yapıldı.
- k-EYK sınıflandırıcı ile sınıflandırma performansları artırıldı.

## 2. Materyal ve Metodoloji

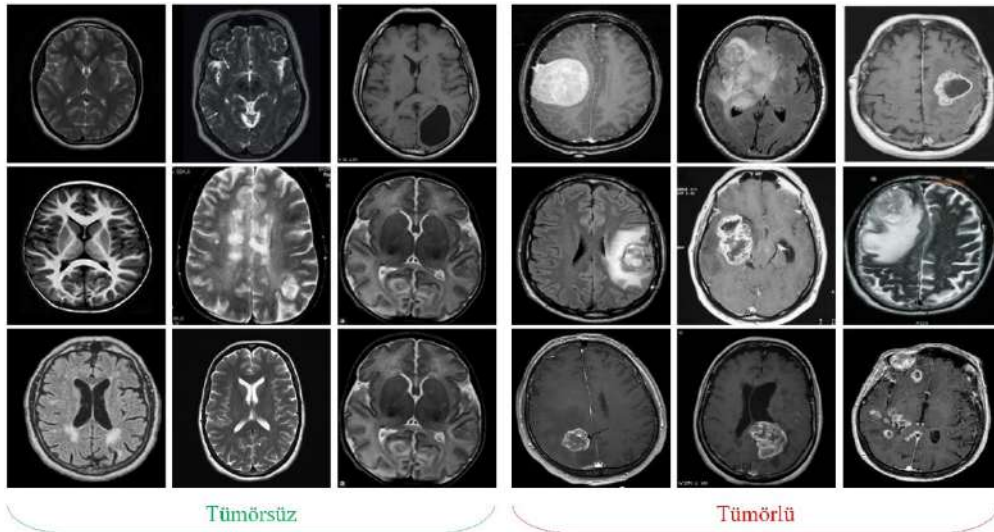
Bu çalışmada, iki sınıflı (beyin tümörü olanlar ve olmayanlar) MGR görüntüleri beyin tümörünü sınıflandırmak için derin öğrenme tabanlı bir model önerilmektedir. Önerilen yöntem; veri çoğaltma (arttırma), derin öz nitelik çıkarımı ve bu öz niteliklerin sınıflandırılması olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak, ön işlem aşamasında 253 olan MRG görüntüleri veri çoğaltma ile 1265 görüntüye çıkarıldı ve bu görüntüler MobileNetV2 girişine uygun olarak 224x224x3 şeklinde boyutlandırıldı. Ardından öz nitelik çıkarımı için tüm MRG görüntüleri önceden eğitilmiş MobileNetV2 modeline uygulandı ve modelin "Logits" tam bağlı katmanından 1000 derin öz nitelik alındı. Son aşamada, beyin tümör tespiti için bu derin öz nitelikler k-EYK sınıflandırıcıya uygulanmıştır. Öz nitelik çıkarımı ve sınıflandırıcı parametrelerinin belirlenmesi için kapsamlı deneysel çalışmalar yapılmıştır. Önerilen yöntemin blok diyagramı Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Önerilen modelin blok diyagramı

## 2.1. Veri seti ve veri çoğaltma

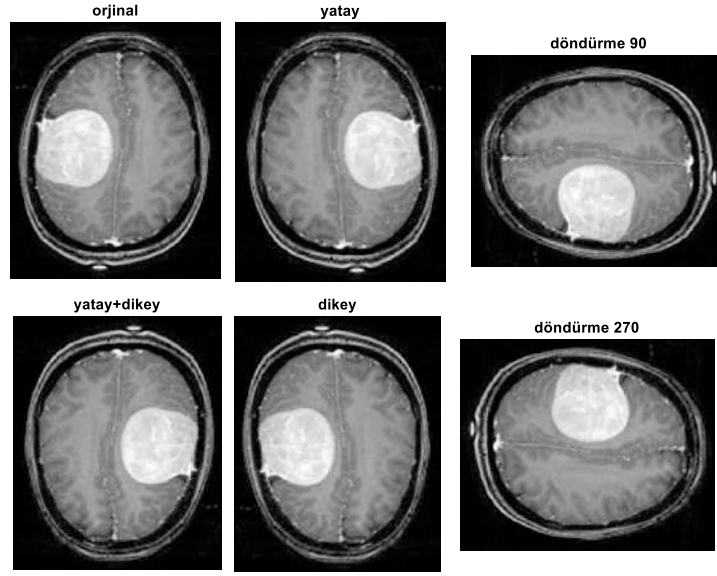
Deneysel çalışmalarda kullanılan veri seti kaggle sitesinden alınmıştır [18]. Veri seti 155'i tümörlü ve 98'i tümörsüz olmak üzere iki sınıflı toplam 253 MRG görüntüsünden oluşmaktadır. Veri seti uzmanlar tarafından gönüllü hastalardan elde edilmiştir. Görüntülerin her biri JPEG biçimini ve çeşitli çözünürlüklere sahiptirler. Şekil 2'de, tümörlü ve tümörsüz sınıflara ait bazı orijinal MRG görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 2. Veri setinde sınıflara ait görüntüler

Derin evrişimli sinir ağlarının eğitimi için kullanılan veri kümelerinin büyüklüğü, ESA performanslarının belirlenmesinde önemli bir faktördür. Veri seti görüntü sayısının yeterli olmadığı durumlarda veri çoğaltma yapılır. Bu süreçte, veri setindeki beyin MRG tarama görüntülerinin sayısını artırmak için yatay, dikey, yatay-dikey eksenlerde çevirme ve  $90^\circ$ ,  $270^\circ$  açılar ile döndürülmeyi içeren 5 farklı veri çoğaltma yöntemi kullanıldı. Böylece orijinal veri setindeki 253 MRG görüntüsü artırılarak, 775'i tümörlü ve 490'ı tümörsüz olmak üzere toplam 1265 MRG görüntüsü elde edildi. Böylelikle, önerilen ESA modelinin genelleme performansının artırılması ve ezberlemeyi önlemesi engellenerek çalışmanın güvenilirliği sağlanmıştır. Şekil 3'de beyin MRG görüntülere uygulanan veri çoğaltma yöntemlerine ait örnek görüntüler yer almaktadır.





Şekil 3. Veri çoğaltma yöntemlerine ait örnek görüntüler

## 2.2. Evrişimli sinir ağı

Evrişimli sinir ağları birkaç katmanın güçlü bir şekilde eğitildiği en önemli derin öğrenme yöntemlerinden biridir. Özellikle 2012 yılında Imagenet yarışmasını kazanan AlexNet modeli ile birlikte popülerliği artmış ve birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır [11]. ESA modelleri oldukça verimlidir ve bundan dolayı çeşitli yapay görme ve tıbbi görüntü işleme uygulamalarında en yaygın kullanılan yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir [19]. Genel olarak bir ESA; evrişim katmanı, havuzlama katmanı ve derin özniteliklerin alındığı, ayrıca sınıflandırma gibi farklı görevleri yapabilen tam bağlantılı katman olmak üzere üç ana katmandan oluşmaktadır [20].

Evrişim Katmanı, tüm girdi görüntüsü boyunca soldan sağa doğru kayan ve bu görüntüye ait özelliklerini çıkarmak için (3×3, 5×5, 7×7 gibi) farklı boyutlardaki filtrelerin kullanıldığı katmandır [21]. Bu hareket filtrenin maksimum genişliğine ulaşana kadar devam eder ve böylece girdi görüntüsüne ait özellikler çıkarılır [22].

Havuzlama Katmanı, evrişim katmanından elde edilen özellik haritalarının boyutlarını küçültmek için kullanılır. Ayrıca genellikle her evrişim katmanından sonra bir havuz katmanı kullanılarak hesaplama karmaşıklığını azaltması ve fazla uyum probleminin çözümüne yardımcı olması için tercih edilir [23].

Tam Bağlantılı Katman, önceki evrişim ve havuzlama katmanlarından elde edilen öznitelikleri sınıflandırmak için düzleştirilir. Düzleştirme, bir matrisi vektöre dönüştürme işlemidir. Ayrıca ağı eğitimi aşamasında en iyi performansı elde etmek için uyarlanabilir moment tahmini (ADAM) ve momentumlu stokastik gradyan iniş (SGDM) gibi optimizasyon algoritmaları kullanılmaktadır [24].

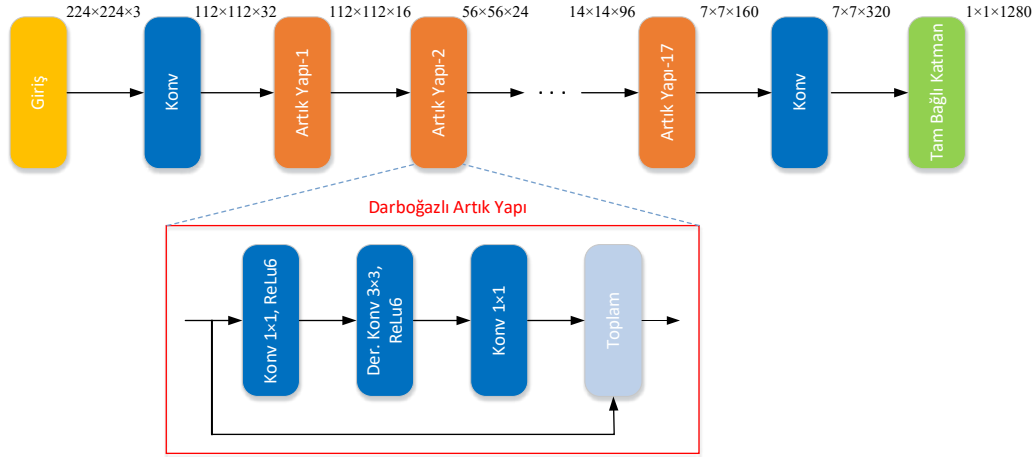
### 2.2.1. Transfer öğrenimi

Transfer öğrenimi, yeni farklı verileri öğrenmek için önceden eğitilmiş modeli kullanarak diğer sorunları çözmek için önceden öğrenilmiş özelliklerin kullanılmasıdır. Bu çalışmada, 1000 sınıfı tahmin etmek için 1,28 milyon görüntü (ImageNet) kullanılarak eğitilmiş MobileNetV2 ESA modeli kullanılmıştır.

### 2.2.2. MobilNetV2

2017 yılında Google tarafından önerilen MobileNetV1 modelinin en önemli özelliği mobil cihazlara veya düşük hesaplama gücüne sahip herhangi bir cihazda kullanılmak amacıyla geliştirilmiştir [25]. Bu model hafif bir yapıya sahip olup, ağı karmaşıklık maliyetini ve model boyutunu önemli ölçüde azaltan derinlemesine ayarlanabilen evrişimi temel almaktadır.

MobileNetV2, derinlemesine ayarlanabilen evrişimi koruyan MobileNetV1'in geliştirilmiş bir versiyonudur. Buna ek ters çevrilmiş artıklar ve doğrusal darboğazları kullanmaktadır [26]. Ters çevrilmiş artıklar, daha fazla özellik elde etmek için önce kanalı  $1 \times 1$  evrişim yoluyla genişletir. Ardından özellik çıkarımı için  $3 \times 3$  derinlemesine evrişimi kullanır ve son olarak kanal numarasını geri sıkıştırmak için  $1 \times 1$  noktadan noktaya evrişim kullanır. Lineer darboğazlar katmanı, öğrenmeyi hızlandırmak ve model kararlılığını arttırmak için ReLu6 aktivasyon fonksiyonunu kullanmaktadır [27]. Şekil 4'te MobileNetV2 modelinin yapısı görülmektedir.



Şekil 4. MobileNetV2 modelinin yapısı

### 2.3. k-EYK sınıflandırıcı

K-en yakın komşu, denetimli öğrenme temelli bir örüntü sınıflandırma algoritmasıdır. Basit ve yüksek performansı nedeniyle yaygın olarak kullanılan bir sınıflandırıcıdır. K-EYK, komşularının çoğunluk oyu ile görüntüleri sınıflandırır. Uzaklık matrisini oluşturmak için test görüntüsü öznelikleri ile her eğitim bir görüntüsü öznelikleri arasındaki uzaklık mesafesi kullanılır. Uzaklık matrisinin toplam değeri tahmin edilir ve daha sonra artan şekilde sıralanır. İlk olarak k eleman seçilir. Son olarak görüntüyü sınıflandırmak için çoğunluk sınıfının değeri belirlenir. Uzaklık hesaplamasında çoğunlukla Öklid  $\sqrt{\sum_{i=1}^k (x_i - y_i)^2}$  yöntemi kullanılmakla birlikte Minkowski  $(\sum_{i=1}^k (|x_i - y_i|^q))^{1/q}$  ve Manhattan  $\sum_{i=1}^k |x_i - y_i|$  yöntemleri de kullanılabilir.

### 2.4. Performans değerlendirme kriterleri

Genellikle sınıflandırma modellerinde, önerilen sınıflandırıcı başarısının ölçülmesi sınıflandırıcının etiketlediği sınıf değerleri ile gerçek sınıf değeri arasındaki ilişkilere göre belirlenir. Gerçek sınıf değeri pozitif olan bir veriyi pozitif olarak etiketlemeye DP (doğru pozitif), negatif olarak etiketlemeye yanlış negatif (YN), gerçek sınıf değeri negatif olan bir veriyi negatif olarak etiketlemeye doğru negatif (DN), pozitif olarak etiketlemeye de YP (yanlış pozitif) denmektedir. Buna göre karmaşıklık matrisindeki DP, DN, YP, YN değerleri kullanılarak performans değerlendirme kriterleri hesaplanmaktadır. Bilimsel çalışmalarda performans değerlendirme kriterleri olarak Doğruluk (Doğ), Duyarlılık (Duy), Özgüllük (Özg), Keskinlik (Kes) ve F1 skoru gibi ölçütler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte ikili sınıflandırma modellerinde veri setinde bir dengesiz bir dağılım olması durumunda Matthews Korelasyon Katsayısı da (MCC) diğer değerlendirme kriterlerinin yanı sıra kullanılmaktadır [28]. Performans değerlendirme kriterlerine ait bağıntılar Denklem 1- 6'da verilmiştir [28,29].

$$\text{Doğ} = \frac{\text{TP} + \text{TN}}{\text{TP} + \text{TN} + \text{FP} + \text{FN}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Duy} = \frac{TP}{TP + FN} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{Özg} = \frac{TN}{TN + FP} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{Kes} = \frac{TP}{TP + FP} \times 100 \quad (4)$$

$$F1 \text{ Skor} = 2 \times \frac{\text{Duy} \times \text{Kes}}{\text{Duy} + \text{Kes}} \times 100 \quad (5)$$

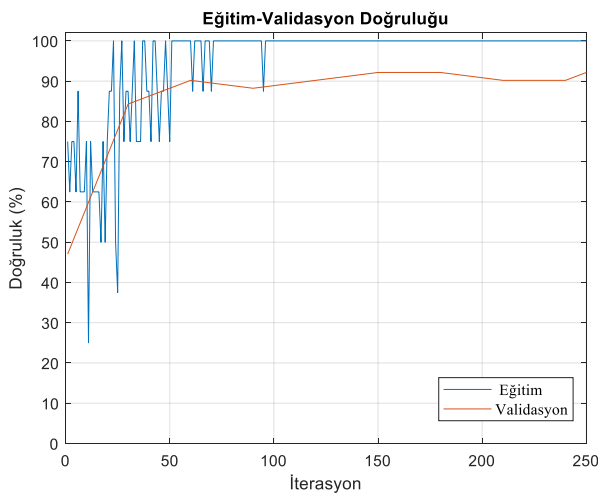
$$MCC = \frac{TP \times TN - FP \times FN}{\sqrt{(TP + FP)(TP + FN)(TN + FP)(TN + FN)}} \quad (6)$$

Tüm bu parametreler veri setinden çıkarılan öznelikler üzerindeki davranışını tahminine imkân sağlamaktadır.

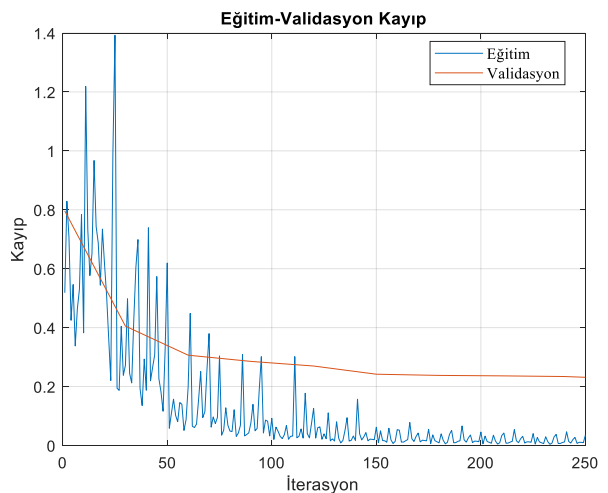
### 3. Deneysel Çalışmalar ve Sonuçlar

Deneysel çalışmalar, MATLAB (2020b) programının kurulu olduğu, dört çekirdekli, NVIDIA GTX 850M GPU ve 16GB hafızaya sahip bilgisayarda gerçekleştirildi. MobilNetV2 için MATLAB derin öğrenme araç kutusu kullanıldı. Deneysel çalışmalarda veri setinin %80'i (1012 MRG görüntü) eğitim ve %20'si (253 MRG görüntü) test için rastgele iki kısma ayrılmıştır. Eğitim veri seti önerilen MobilNetV2 modelin öğrenme sürecinde kullanıldı. Ayrıca test veri seti hem model parametrelerinin ayarlanmasında hem de performans değerlendirmesinde kullanıldı. MobilNetV2 parametreleri eğitim aşamasında optimize edilebilmesi birçok deney yapıldı. Bu deneysel çalışmalarda sonuçlarında MobilNetV2 için öğrenilebilir parametre optimizasyonu, stokastik gradyan iniş momentum (SGDM) algoritması, öğrenme oranı 0.0001 sabit, en yüksek tekrar sayısı 5 ve en küçük yığın boyutu 4 olarak seçilmiştir. K-EYK sınıflandırıcı için k değeri 5 olarak seçilmiştir. Ayrıca deneysel çalışmalarda 5 kat çapraz doğrulama yapılmıştır.

Transfer öğrenme aşamasında MobileNetV2 ESA modeline ait eğitim-validasyon doğruluk ve eğitim-validasyon kayıp grafikleri sırasıyla Şekil 5 ve 6'da görülmektedir. Şekil 5'de görüldüğü gibi eğitim süreci 250 yenilemede tamamlanmaktadır. Ağın eğitim aşamasında Şekil 6'da görülebileceği üzere kayıp oran 0,3'in altında kalarak önemli sayılabilecek bir veri kaybına uğramadan eğitim süreci tamamlanmıştır.



Şekil 5. MobileNetV2 eğitim-validasyon doğruluk grafiği



Şekil 6 MobileNetV2 eğitim-validasyon kayıp grafiği

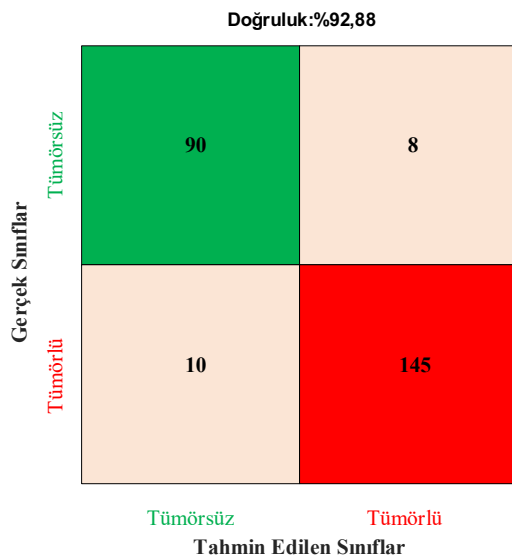
Önerilen MobileNetV2 ile yapılan deneysel çalışmalarda hem orijinal veri seti ve hem çoğaltılmış veri setine ait MobileNetV2 ve k-EYK performans karşılaştırma sonuçları Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Orijinal ve çoğaltılmış veri setlerinde MobileNetV2 ve k-EYK performans karşılaştırma sonuçları

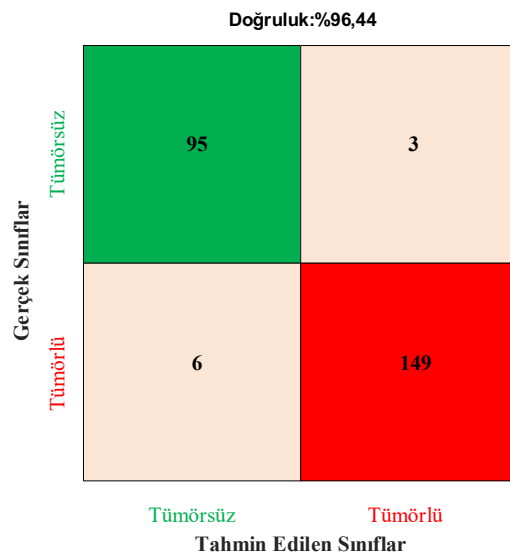
Veri Seti	Yöntem	Doğruluk	Duyarlılık	Özgüllük	Keskinlik	F1 Skor	MCC
Orijinal	MobileNetV2	86,56	86,73	86,45	80,19	83,33	0,722
	k-EYK	89,72	88,78	90,32	85,29	87,00	0,785
Çoğaltılmış	MobileNetV2	92,89	91,84	93,55	90,00	90,90	0,850
	k-EYK	96,44	96,94	96,13	94,06	95,48	0,925

Tablo 1’deki sonuçlar dikkate alındığında orijinal (ham) veri setinde MobileNetV2 ve k-EYK sınıflandırma doğruluk oranlarında sırasıyla %86,56 ve %89,72 başarımlar sağlandı. MobileNetV2 ESA modeli ile derin öznelik çıkarım performansını arttırmak için bölüm 2.1 tanımlanan veri çoğaltma yöntemleri kullanılarak ham veri seti 5 kat artırılarak 253 olan MRG görüntülerinin sayısı 1265’e artırıldı. Bu veri seti kullanılarak MobileNetV2 Logits tam bağlı katmanından alınan derin öznelikler sınıflandırıldığında k-EYK sınıflandırıcıda doğruluk, duyarlılık, özgüllük, keskinlik, F1 skor ve MCC değerlendirme ölçütlerinde sırasıyla %96,44, %96,94, %96,13, %94,06, %95,48 ve 0,925 oranlarında başarımlar elde edildi. Böylece veri artırma işlemi ile k-EYK sınıflandırmada %6,72 doğruluk oranında ve %7,5 MCC değerinde artış elde edildi. Benzer şekilde diğer performans değerlendirme kriterlerinde de önemli derecede artışlar sağlanmıştır.

Önerilen yöntemin genel başarımlarını değerlendirmesi ile birlikte veri setindeki her bir sınıf etiketindeki başarımları görebilmek için karmaşıklık matrisleri kullanılmaktadır. Şekil 7 ve 8 sırasıyla çoğaltılmış veri setinde MobileNetV2 ve k-EYK karmaşıklık matrisleri verilmiştir. Her iki şekilde görüldüğü gibi deneysel çalışmalarda test için ayrılan %20’lik veri setinde 98 tümörsüz ve 155 tümörlü görüntü yer almaktadır. Şekil 7’deki MobileNetV2 karmaşıklık matrisinde 98 adet tümörsüz (sağlıklı) verinin 90’ı doğru olarak (TP) sınıflandırılırken, 8 veri hatalı bir şekilde (FN) tümörlü (hasta) olarak sınıflandırılmıştır. Şekil 7’de yine benzer şekilde 155 adet tümörlü verinin 145’i doğru olarak (TN) tümörlü (hasta) olarak sınıflandırılmış ve 10 veri hatalı bir şekilde (FP) tümörsüz (sağlıklı) şekilde sınıflandırılmıştır. Sınıflandırma performansını arttırmak için kullanılan k-EYK sınıflandırıcısına ait Şekil 8’deki karmaşıklık matrisi ile karşılaştırıldığında 98 adet tümörsüz verinin 95 adet veri doğru olarak (TP) tümörsüz (sağlıklı) ve 155 adet tümörlü verinin 149’u doğru olarak (TN) tümörlü (hasta) olarak tahmin edilmiştir. Her iki karmaşıklık matrisi karşılaştırıldığında k-EYK sınıflandırıcı, 5 tümörsüz (sağlıklı) ve 4 tümörlü (hasta) veriyi daha doğru olarak tahmin etmiştir.



Şekil 7. MobileNetV2 karmaşıklık matrisi



Şekil 8. k-EYK karmaşıklık matrisi

Önerilen yöntemin daha detaylı performans değerlendirmesi için, aynı ve benzer veri setlerinin kullanıldığı bazı yöntemlerin performans karşılaştırmaları Tablo 2’de verilmiştir. Tablo 2’de görüldüğü gibi, önerilen yöntemin mevcut diğer yöntemlerden daha iyi doğruluk performansına sahip olduğu görülebilmektedir

**Tablo 2.** Bazı yöntemlerin performans karşılaştırmaları

Yöntem	Model	Doğruluk (%)
Arı ve diğerleri [8]	Bölütleme+k-NN	86,39
Bulut ve diğerleri [9]	MRF	87,00
Mohsen ve diğerleri [10]	ADD+PCA	93,94
Afşar ve diğerleri [11]	CapsNet	86,56
Vani ve diğerleri [12]	DVM	81,48
Çıtak ve diğerleri [13]	DVM+ÇKA+LR	93,00
Shahzadi ve diğerleri [14]	VGG+UKSB	84,00
Swati ve diğerleri [15]	VGG19	94,82
Saxena ve diğerleri [17]	ResNet50	95,00
Önerilen Yöntem	MobileNetV2+k-EYK	96,44

Ayrıca, Tablo 2’deki ESA modellerinin kullanıldığı 14, 15 ve 17 çalışmalar ile karşılaştırıldığında daha hafif ağırlıklı olan MobileNetV2 modeli ile daha yüksek bir sınıflandırma doğruluğu elde edilmesi önerilen yöntemin başarısını göstermektedir.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, MRG görüntülerini kullanarak otomatik beyin tümörü tespiti için etkili bir yöntem önerdik. Yöntem, MobileNetV2 ESA modelinden transfer öğrenmeye dayalı olarak derin öznitelik çıkarımı ve bu özniteliklerin k-EYK sınıflandırılmasını içeren bir yaklaşım sunulmuştur. Öznitelik çıkarımında performans arttırmak amacıyla beş farklı yöntem kullanılarak veri setindeki görüntü sayısı artırıldı. Deneysel sonuçlar, ayrı bir sınıflandırıcı kullanılmadan %92,88 sınıflandırma doğruluk skoruna ulaşılmıştır. K-EYK sınıflandırıcı ile sınıflandırma doğruluğu %3,56 oranında artırılarak %96,44 sınıflandırma doğruluğu sağlanmıştır. Ayrıca çalışmada, daha önceden eğitilmiş bir derin öğrenme modeli kullandığından öğrenilebilir parametrelerin optimizasyon süresi kısalmıştır. Böylelikle eğitim ve öznitelik çıkarım süreci yaklaşık 3 dakika gibi kısa sürede tamamlanmıştır. Ayrıca benzer yöntemler ile karşılaştırıldığında daha yüksek bir sınıflandırma oranı sağlanmıştır. Dolayısıyla önerilen bu yöntemin beyin tümörlerinin tespitinde uzmanlara karar vermede yardımcı olabileceği düşünülmektedir. Gelecekteki çalışmalarımızda, farklı beyin tümörlerini tespit etmek için büyük beyin tümörü veri kümeleri üzerinde yeni bir model oluşturmayı planlıyoruz.

#### Kaynaklar

- [1] Arbane M, Benlamri R, Brik Y, Djerioui M. Transfer learning for automatic brain tumor classification using MRI images. In: 2nd International Workshop on Human-Centric Smart Environments for Health and Well-Being; 9-10 February 2021; Boumerdes, Algeria: IEEE. pp. 210–214.
- [2] Tamilselvi R, Nagaraj A, Beham M. P, Sandhiya M. B. BRAMSIT: A Database for Brain Tumor Diagnosis and Detection. In: 2020 Sixth International Conference on Bio Signals Images and Instrumentation (ICBSII); 27-28 February 2020; Chennai, India: IEEE. pp. 1–5.

- [3] Hazra A, Dey A, Gupta S. K, Ansari M. A. Brain tumor detection based on segmentation using MATLAB. In: International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS); 1-2 August 2017; Chennai, India: IEEE. pp. 425-430.
- [4] Kapoor L, Thakur S. In: 7th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering - Confluence; 12-13 January 2017; Nodia, India: IEEE. pp. 582-585.
- [5] Maynard J, Okuchi S, Wastling S, Busaidi A A, Almossawi O, Mbatha W, Thust S. Prediction by mri morphologic features and apparent diffusion coefficient. *Radiology*. 2020; 296: 111–121.
- [6] Abd El Kader I, Xu G, Shuai Z, Saminu S, Javaid I, Salim Ahmad I. Differential Deep Convolutional Neural Network Model for Brain Tumor Classification. *Brain Sciences*. 2021; 11, 352.
- [7] Arı A, Alcin O. F, Hanbay D. (Brain MR Image Classification Based on Deep Features by Using Extreme Learning Machines. *Biomedical Journal of Scientific & Technical Research*. 2020;25;19137-19144.
- [8] Ari A, Alpaslan N, Hanbay D. Computer-aided tumor detection system using brain MR images. In: 2015 Medical Technologies National Conference (TIPTEKNO); 15-18 October 2015; Bodrum, Turkey : IEEE. pp. 1–4.
- [9] Bulut F, Kiliç I, Ince I. F. Beyin Tümörü Tespitinde Görüntü Bölütleme Yöntemlerine Ait Başarımların Karşılaştırılması ve Analizi. *Deu Muhendislik Fakültesi Fen ve Muhendislik*. 2018; 20:173–186.
- [10] Mohsen H, El-Dahshan E. S. A, El-Horbaty E. S. M, Salem A. B. M. Classification using deep learning neural networks for brain tumors, *Future Computing and Informatics Journal*. 2018; 3(1):68–71.
- [11] Afshar P, Mohammadi A, Plataniotis K. N. Brain Tumor Type Classification Via Capsule Networks. In: 25th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP); 7-10 October 2018; Athens, Greece: IEEE. pp. 3129–3133.
- [12] Vani N, Sowmya A, Jayamma N. Brain Tumor Classification using Support Vector Machine. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2017;4(7):792–796.
- [13] Citak-Er F, Firat Z, Kovanlikaya I, Ture U, Ozturk-Isik E. Machine-learning in grading of gliomas based on multi-parametric magnetic resonance imaging at 3T. *Computers in Biology and Medicine*. 2018; 99:154–160.
- [14] Shahzadi I, Tang T. B, Meriadeau F, Quyyum A. CNN-LSTM: Cascaded framework for brain tumour classification. *IEEE EMBS Conference on Biomedical Engineering and Sciences, IECBES*; 3-6 December 2018; Sarawak, Malaysia: IEEE. pp. 633–637.
- [15] Swati Z N K, Zhao Q, Kabir M, Ali F, Ali Z, Ahmed S, Lu J. Brain tumor classification for MR images using transfer learning and fine-tuning. *Computerized Medical Imaging and Graphics* 2019; 75: 34–46.
- [16] Tas M O, Ergin S. Detection of the Brain Tumor Existence Using a Traditional Deep Learning Technique and Determination of Exact Tumor Locations Using K-Means Segmentation from MR Images. *İleri Mühendislik Çalışmaları ve Teknolojileri Dergisi* 2020;1: 91–97.
- [17] Saxena P, Maheshwari A, Tayal S, Maheshwari S. Predictive modeling of brain tumor: A Deep learning approach. *Advances in Intelligent Systems and Computing* 2019; 1189: 275–285.
- [18] N. Chakrabarty. Brain MRI Images for Brain Tumor Detection. <https://www.kaggle.com/navoneel/brain-mri-images-for-brain-tumor-detection>. Erişim tarihi: Aralık 2021
- [19] Çınar A, Yıldırım M. (2020). Detection of tumors on brain MRI images using the hybrid convolutional neural network architecture. *Medical Hypotheses* 2020; 139: 109684.
- [20] Budak Ü, Cömert Z, Rashid Z N, Şengür A, Çıbuk M. Computer-aided diagnosis system combining FCN and Bi-LSTM model for efficient breast cancer detection from histopathological images. *Applied Soft Computing Journal* 2019; 85:105765.
- [21] Aslan M. (2021). CNN based efficient approach for emotion recognition, *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences* 2021.
- [22] Demir F, Turkoglu M, Aslan M, Sengur A. A new pyramidal concatenated CNN approach for environmental sound classification, *Applied Acoustics* 2020; 170.
- [23] Turkoglu M, Alcin O F, Aslan M, Al-Zebari A, Sengur A. (2021). Deep rhythm and long short-term memory-based drowsiness detection. *Biomedical Signal Processing and Control* 2021; 65:102364.
- [24] Balaha H M, El-Gendy E M, Saafan M M. CovH2SD: A COVID-19 detection approach based on Harris Hawks Optimization and stacked deep learning. *Expert Systems with Applications* 2021:186.
- [25] Howard A G, Zhu M, Chen B, Kalenichenko D, Wang W, Weyand T, Adam H. MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision Applications. *arXiv preprint* 2017;1704.04861.
- [26] Wang F, Zheng R, Li P, Song H, Du D, Sun J. Face recognition on Raspberry Pi based on MobileNetV2. *International Symposium on Artificial Intelligence and its Application on Media, ISAIAM*; 21-23 May 2021; Xi'an, China: IEEE. pp. 116–120.
- [27] Demir F. (Derin Öğrenme Tabanlı Yaklaşımla Kötü Huylu Deri Kanserinin Dermatoskopik Görüntülerden Saptanması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 2021;33: 617–624.
- [28] Bulut F. Örnek Tabanlı Sınıflandırıcı Topluluklarıyla Yeni Bir Klinik Karar Destek Sistemi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 2017; 33: 65–76.
- [29] Siuly S, Alçın Ö F, Kabir E, Şengür A, Wang H, Zhang Y, Whittaker F. A New Framework for Automatic Detection of Patients with Mild Cognitive Impairment Using Resting-State EEG Signals. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 2020; 28:1966–1976.



## Mask R-CNN Algoritmasını Kullanarak Demiryolu Travers Eksikliklerinin Tespiti İçin Otonom İHA Tasarımı

Emre GÜÇLÜ<sup>1</sup>, İlhan AYDIN<sup>2\*</sup>, Erhan AKIN<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye  
<sup>1</sup> emreguculu1367@gmail.com, <sup>2</sup> iaydin@firat.edu.tr, <sup>3</sup> eakin@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 22/12/2021;

Kabul/Accepted: 08/02/2022)

**Öz:** Demiryolları, genellikle aralarında belirli mesafe ile monte edilen traversler aracılığıyla balast altyapısı tarafından desteklenen çelik raylardan oluşur. Traversler ve bağlantı elemanları demiryollarının önemli bileşenleridir. Bu nedenle, bu bileşenlerin eksikliği, önemli sorunlara yol açabilir. Ancak, traverslerin denetlenmesi ve gerçek demiryolu sahasında travers eksikliklerinin tespiti için teknoloji eksikliği vardır. Bu çalışma, demiryollarında bulunan traverslerin kayma ve eksiklik durumlarını incelemek için otonom İHA uçuş kontrol yöntemi önermektedir. Çalışma, otonom ray takibi ve travers kusurlarını inceleme olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. İlk bölümde İHA'nın, demiryolunu otonom olarak gezinerek veri toplayabilmesi için ray takip algoritması geliştirilmiştir. İkinci bölümde, Mask R-CNN, travers tanıma ve eksiklik tespiti için eğitilmiştir. Tespit oranını ve verimliliğini artırmak amacıyla travers eksiklik tespiti için Mask R-CNN kullanılmıştır. Travers tespitinden sonra traversler arası mesafeler ölçülerek traverslerdeki eksiklikler tespit edilmiştir. Çalışmanın sınıflandırma başarı oranı %97'dir. Uygulanan yöntem geleneksel yöntemlere kıyasla maliyetleri önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu çalışma, travers eksikliklerinin tespiti ile mevcut rayların denetlenmesi için değerli olup, geleneksel yöntemlere kıyasla maliyetleri önemli ölçüde azaltmaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Otonom İHA, Kusur Tespiti, Travers Kusurları

### Autonomous UAV Design for Detection of Railway Sleeper Deficiencies Using Mask R-CNN

**Abstract:** Railroads usually consist of steel rails supported by ballast infrastructure via sleepers mounted at a certain distance between them. Sleepers and fasteners are important components of railways. Therefore, the lack of these components can lead to significant problems. However, there is a lack of technology for inspecting sleepers and detecting sleeper deficiencies at the actual railway site. This study proposes an autonomous UAV flight control method to examine the slip and deficiency conditions of sleepers on railways. The study is divided into two as autonomous track tracking and analysis of sleepers defects. In the first part, a rail tracking algorithm has been developed for the UAV to collect data by navigating the railway autonomously. In the second part, Mask R-CNN is trained for traverse recognition and deficiency detection. Mask R-CNN was used for sleepers missing detection to increase detection rate and efficiency. After the determination of the sleeper, the distances between the sleepers were measured and the deficiencies in the sleepers were determined. The classification success rate of the study was 97%. The applied method significantly reduces costs compared to traditional methods. This work is valuable for detecting sleeper deficiencies and inspecting existing rails, significantly reducing costs compared to traditional methods.

**Key words:** Autonomous UAV, Defect Detection, Sleepers Defects

### 1. Giriş

Demiryolu denetimi, güvenli ve hızlı ulaşım için belirli aralıklarla yapılması gereken yüksek maliyetli bir işlemdir. Günümüzde uygulanan, demiryolu denetimlerinin çoğu görsel incelemeye dayanmaktadır. Geleneksel yöntemlerle demiryolu denetiminde, demiryolu hattı boyunca yürüyen ve bileşenlerin durumunu kontrol eden eğitimli personeller görev yapmaktadır. Ancak bu yöntem verimsiz ve maliyetlidir. Ayrıca, bu yöntemler muazzam iş gücü tüketmektedir. Geleneksel yöntemlerle denetim uzun periyotlarda yapılmaktadır. Ancak uzun muayene periyodu, kusurların zamanında tespit edilememesine neden olmaktadır. Otomatik inceleme yöntemlerinin gelişmesiyle, geleneksel yöntemlerin dezavantajlarının üstesinden gelmek için daha gelişmiş kusur tespiti yaklaşımları tasarlanmıştır [1]. Demiryolu denetimi için bilgisayarlı görme tabanlı otomatik denetim sisteminin tasarlanması, hat güvenliğinin sağlanması ve bakım maliyetlerinin düşürülmesi açısından önemlidir. Özellikle son yıllarda denetim güvenliğini artırabilecek ve demiryolu trafiği kesintisiz önleyebilecek denetim yöntemleri geliştirilmektedir. Akustik emisyon denetimi [2], elektromanyetik tomografi [3], makine öğrenimi [4], ultrasonik

\* Sorumlu yazar: [iaydin@firat.edu.tr](mailto:iaydin@firat.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-4566-7517, <sup>2</sup> 0000-0001-6880-4935, <sup>3</sup> 0000-0001-6476-9255



algılama [5] gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Son yıllarda, bilgisayarların hesaplama hızlarının artmasıyla beraber demiryolu denetimi için bilgisayarlı görme üzerinde çeşitli araştırmalar yapılmaktadır [6-9].

Demiryolu denetimleri, bağlantı elemanları, ray, balast bölümü, traversler ile ilgili kusurların tespit edilmesine odaklanmaktadır. Demiryolu traversleri, demiryollarında çok sayıda bulunan bileşendir. Bu nedenle demiryolu denetiminin önemli bir parçasıdır. Traversler, bağlantı elemanları ile birlikte rayları belirli bir genişlikte sabitleyen, genellikle betondan oluşan ve trenden gelen yükü altyapıya dağıtan temel bileşendir [10]. Bu nedenle, traversler arasındaki açıklıklar ciddi sorunlara yol açabilir [11]. Ayrıca, eksik traverslerin zamanında tespit edilmesi kritik önem taşımaktadır. Literatür incelendiğinde, traverslerin denetimi için çeşitli çalışmalar yapıldığı görüldü de bu alanda büyük eksiklikler bulunmaktadır [12]. Traverslerin incelenmesi için bilgisayarlı görme tabanlı teknikler önemli bir potansiyele sahiptir.

Bilgisayarlı görme tabanlı travers denetimi için yüksek çözünürlüklü bir kamera ile demiryolu görüntülerinin toplanması gerekmektedir. Bu amaçla, çoğu araştırmada bir denetim treninin altına kamera yerleştirilmesi ile görüntü toplanmaktadır [13-14]. Ancak, tekniğin sınırlı bir alanı algılama aralığı ve yüksek maliyet gibi dezavantajları vardır. Bu dezavantajların üstesinden gelebilmek için İnsansız Hava Aracı (İHA) gibi alternatif araçların kullanılması gerekmektedir. İHA'lar hızları, geliştirilmiş bataryaları ve yüksek tespit verimliliği sayesinde, demiryollarının incelenmesi için güçlü araçlardır. İHA'lar, üzerlerinde bulunan kameralarla demiryolundan görsel veri yakalama özelliğine ek olarak kısa sürede geniş alanı tarama potansiyeline sahiptir. Bu özelliğiyle İHA ile demiryolu denetimi, manuel denetimlere oranla daha kısa denetim süresine sahiptir.

İnsansız Hava Araçları (İHA), üzerinde pilotu olmayan hava araçlarıdır. İHA kullanımındaki artış, sivil, ticari ve askeri alanlarda ivme kazanmıştır. Bunun nedeni, İHA'ların gelişmesi, küresel İHA üretiminin artması ve daha ucuz hale gelmesi ile erişebilir olmasıdır. İHA'lar uygun maliyetleri, iş gücünün azaltılması, çalışanların güvenliğinin sağlanması ve insanların erişemeyeceği yerlere kolayca erişebilmesi nedeniyle birçok alanda kullanılmaktadır. Son yıllarda, çeşitli durumları ve altyapıları izlemek için İHA kullanımına artan bir ilgi vardır. Yangınların izlenmesi [15], fotovoltaiik panellerdeki kusurların incelenmesi [16], arama kurtarma görevleri [17], hedef takibi [18] gibi görevlerde kullanımı oldukça yaygındır. Bunların yanında, İHA'lar demiryollarında bulunan kusurların tespiti için de kullanılabilir [19]. Demiryolu denetiminde karşılaşılan temel sorunlardan biri, denetim sırasında hattın meşgul edilmesidir. İHA'lar, demiryollarını meşgul etmeyerek iş verimliliğini artırma potansiyeline sahiptir. Ayrıca, demiryollarında oluşabilecek kusurlar, İHA inceleme sistemi tarafından görüntülenebilir ve daha fazla analiz edilebilir. Bu nedenle son zamanlarda araştırmacılar, denetimlerde İHA'ları kullanmaya başladılar. [20]'de İHA üzerinde LiDAR yerleştirilerek çerçeve ve diyagramları meşgul etmeden hizmette olan hatlardan verimli bir şekilde veri toplanabilmiştir. Başka bir çalışmada FCN-8 ağı ile İHA tarafından toplanan görüntülerden ray segmentasyonu yapılarak raydaki kusurlar tespit edilmiştir [21]. İnsan gözlemcilerle gerçekleştirilen geleneksel denetimlere kıyasla İHA kullanımının ana avantajı, hattın meşgul edilmemesi ve bunun sonucunda trenlerin optimum kapasitede çalışabilmesidir.

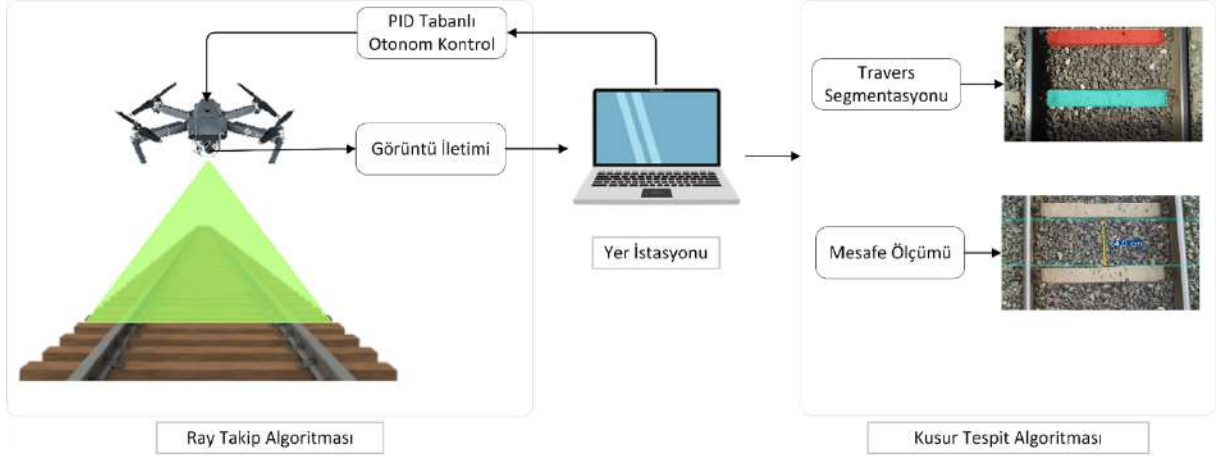
İHA'ların kontrolü için genellikle iki yöntem vardır. Bu yöntemlerden ilki yer istasyonu tarafından komutlarla uzaktan kontroldür. Diğer yöntem ise önceden tanımlanmış algoritmalarla araç bilgisayarı tarafından otonom olarak kontrol edilmesidir [22-26]. Kusur denetimi için otonom İHA'ların kullanımı, insan müdahalesini en aza indirecektir. Bu şekilde, verimlilik ve doğruluk artacaktır.

Bu makalenin kalanı şu şekildedir: Bölüm 2'de travers eksikliklerinin tespiti için önerilen yöntem açıklanmıştır. Bölüm 3'te Ray takip algoritmasının adımları açıklanmıştır. Bölüm 4'te demiryolundan toplanan görüntüler üzerinde travers tespiti ve mesafe ölçümü için yöntemler açıklanmıştır. Bölüm 5'te, tasarlanan otonom İHA algoritmasının demiryolu sahasında test sonuçları verilmiştir. Ardından demiryolundan toplanan görüntüler üzerinde travers eksikliklerinin tespiti için testler yapıp sonuçlar verilmiştir. Bölüm 6, genel sonuçlar ve değerlendirme içermektedir.

## 2. Önerilen Yöntem

Önerilen yöntemin tasarımı Şekil 1'de görselleştirilmiştir. Mimarının temel bileşenleri bilgisayar ve İHA'dır. İHA, bilgisayarın bağlanabileceği bir Wi-Fi ağı sağlamaktadır. İHA kamerasından video verilerini aktarmak için yüksek Wi-Fi bant genişliği gereklidir. İletişim için TCP ve UDP mesajları kullanılır, ancak Parrot SDK bunu yüksek seviyeli komutlara özetler. İHA, bilgisayara video ve durum verilerini gönderir. Bilgisayar bu verileri işler ve uçuş komutlarını geri gönderir. Video akışını işlemek için bilgisayarla görme algoritmaları kullanılır. Daha yüksek bilgi işlem gücünden yararlanmak için görme algoritmalarıyla ilgili hesaplama için güçlü bir bilgisayar kullanmak hızı artıracaktır. Tasarlanan otonom ray takip algoritmasıyla veriler toplandıktan sonra ikinci aşamada, toplanan veriler üzerinde kusur tespit algoritması çalıştırılmıştır. Traversler, Mask R-CNN algoritması ile bölümlendikten sonra aralarındaki mesafe ölçülerek eksiklik ve açıklıklar tespit edilmiştir.

Önerilen yöntem için üzerinde yerleşik bir kamerası olan bir İHA gereklidir. Bilgisayara gerçek zamanlı video akışı sağlaması ve komut alabilmek için SDK'sı olması gerekmektedir. Bu nedenle çalışmada bu ihtiyaçları sağlayan, Parrot Anafi 4K kullanılmıştır. Anafi'nin öne çıkan en önemli özelliği, kamerayı 180 derece hareket ettirebilmesidir. Bu özelliği sayesinde kamera 90 derece raya bakacak şekilde konumlandırılarak tek kamera ile hem ray takibi yapılmış hem de kusur tespiti yapılmıştır.



Şekil 1. Önerilen yöntemin tasarımı

### 3. Ray Takip Algoritması

Çalışmanın bu bölümü, İHA ile otonom ray takibi için kamera verilerini ve bilgisayar görmesini kullanan bir algoritma geliştirmeyi ele almaktadır. Otonom İHA ile ray takibi algoritması üç ana bölüme ayrılabilir. Bunlar; ray tespiti, İHA'nın bulunması gereken konumu hesaplama ve PID denetleyici kullanarak ray takibidir. Ray çizgilerinin tespiti, otonom sürüş için önemli bir temeldir. Bu nedenle ilk olarak, ray çizgilerini tespit etmek için temel yaklaşım olan HSV renk dönüşümüne ve histogram analizine dayalı bir yaklaşım sunulmuştur. Ardından İHA'nın raya göre konumunu belirleyebilmek için ray çizgilerinin orta noktası hesaplanmıştır. İHA'nın bulunması gereken konum bilgisi, PID denetleyici kullanılarak ray takibinde kullanılmıştır.

#### 3.1 Ray çizgilerinin tespiti için önerilen yaklaşım

Bu çalışmada, belirli bir renge sahip rayları tespit etmek için renk bölütleme kullanılmıştır. İHA kamerasından alınan görüntü RGB renk uzayındadır. Renk modeli dönüşümü, ray tespitinin vazgeçilmez bir parçasıdır. Gerçek demiryolu ortamı farklı bileşenler ve dış ortamdan oluşur. Böyle bir ortamdan alınan RGB görüntülerde renk bilgileri oldukça karmaşıktır. Ray görüntüsünün arka plandan ayrılması zor olmaktadır. RGB renk uzayı ray çizgilerini görüntüden ayırt etmek için yeterli değildir. Bu nedenle, RGB renk uzayı, renk ve yoğunluk bilgilerinin karıştırılması nedeniyle renk tabanlı algılama için tercih edilmemektedir. Bu durumun üstesinden gelmek için, alınan görüntü HSV renk uzayına dönüştürülmüştür. İHA ray boyunca ilerlerken alınan görüntülerde bulunan rayların renk bilgisi önemli ölçüde değişmez. Bu durum, HSV renk uzayında maskeleyme işlemi ile ray çizgilerinin tespit edilebileceğini göstermektedir.

HSV renk uzayı, silindirik biçimde bir yapıdır ve renkleri renk özü, doygunluk ve parlaklık olarak tanımlar. Renk özü,  $0^\circ - 360^\circ$  değerleri arasında açısal bir değerdir. Doygunluk ve parlaklık ise 0-100 arasında değerlerden oluşur. HSV renk alanı, renk ve parlaklığı açıkça ayırır. Ayrıca, yalnızca ton bileşeninin kullanılması, algoritmayı aydınlatma varyasyonlarına karşı daha az duyarlı hale getirir. RGB'den HSV'ye dönüştürme işlemi aşağıdaki denklemlerle sağlanır:

$$H = \begin{cases} \frac{(G - B) * 60}{S}, & \text{if } V = G \\ \frac{(G - B) * 60}{S} + 120, & \text{if } V = G \\ \frac{(G - B) * 60}{S} = 120, & \text{if } V = B \end{cases} \quad (1)$$

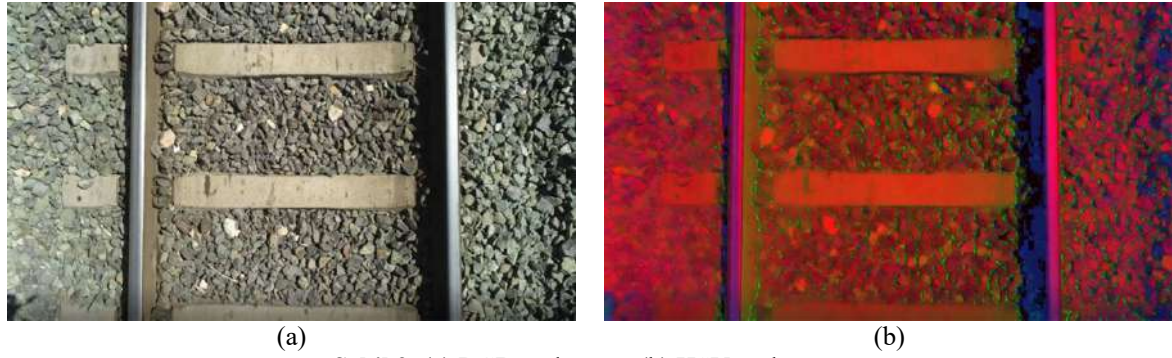
$$S = \begin{cases} V - \frac{\min(R, G, B)}{V}, & \text{if } V \neq 0 \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad (2)$$

$$V = \max(R, G, B) \quad (3)$$

Rayların tespiti için renk özü, doygunluk ve parlaklık için düşük eşik ve yüksek eşik maskesi uygulanmasıdır. Belirlenen değerlere göre ikili görüntüde bu eşikler içindeki rayı içeren pikseller 1'e ayarlanacak ve kalan pikseller sıfır olacaktır. Uygulanan eşikleme değerleri Tablo 1'de verilmiştir. HSV'nin burada en iyi şekilde çalışmasının nedeni, ray renklerinin aynı olmasıdır. Elde edilen sonuçlar Şekil 2'de gösterilmiştir.

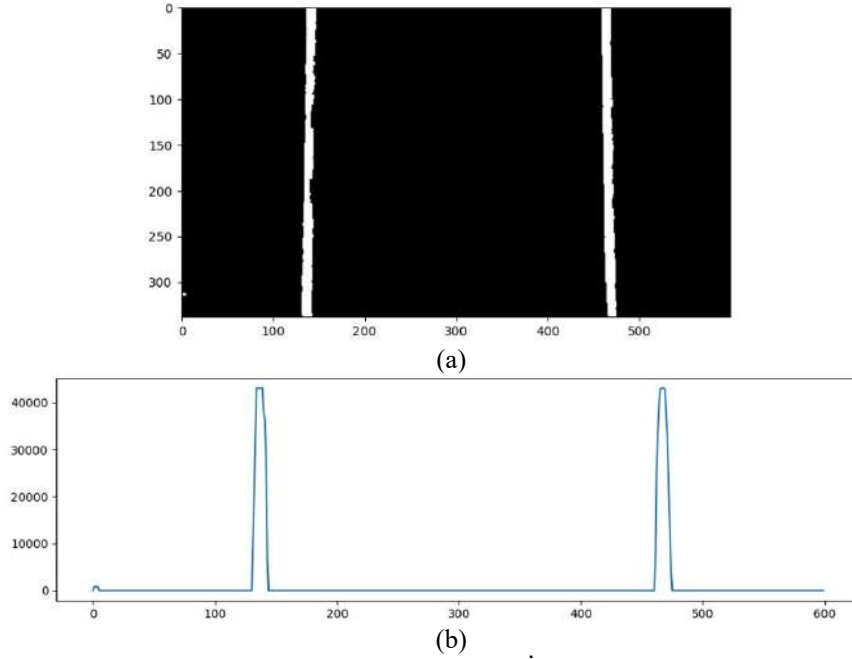
**Tablo 1.** Ray tespiti için eşik değerleri

Kanal	H	S	V
En Küçük	85	0	61
En Büyük	121	255	255



**Şekil 2.** (a) RGB renk uzayı (b) HSV renk uzayı

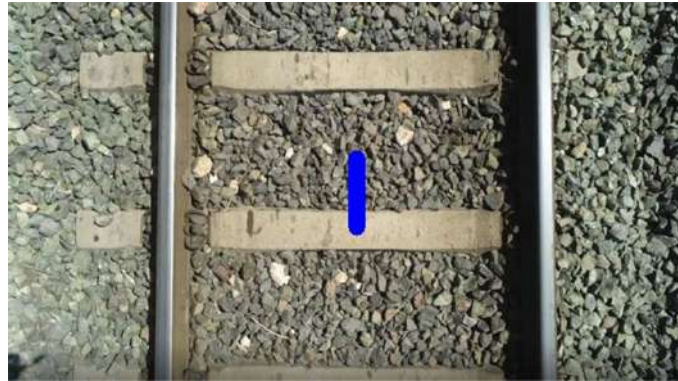
Demiryolu görüntüsüne eşikleme işlemi uygulandıktan sonra, Şekil 3.a'da görüldüğü gibi ray çizgilerinin net bir şekilde öne çıktığı ikili bir görüntü elde edilmiştir. Bu işlemden sonra hangi piksellerin raylara ait olduğu, hangilerinin sol çizgiye ve hangilerinin sağ çizgiye ait olduğu belirlenmelidir. Şerit çizgisi piksel algılaması için görüntüde beyaz piksellere sahip alanlarını bulmak üzere bir histogram oluşturulmuştur. Şekil 3.b'de görüldüğü gibi histogram çizildiğinde iki tepe noktası elde edilecektir. Bu tepe noktaları, sol ray çizgisine karşılık gelen bir sol zirve ve sağ şerit çizgisine karşılık gelen bir sağ zirveyi belirtmektedir.



Şekil 3 Ray konumlarının histogram tabanlı tespiti (a) İkili görüntü (b) Histogram pik noktaları

### 3.2 İHA konumunun belirlenmesi

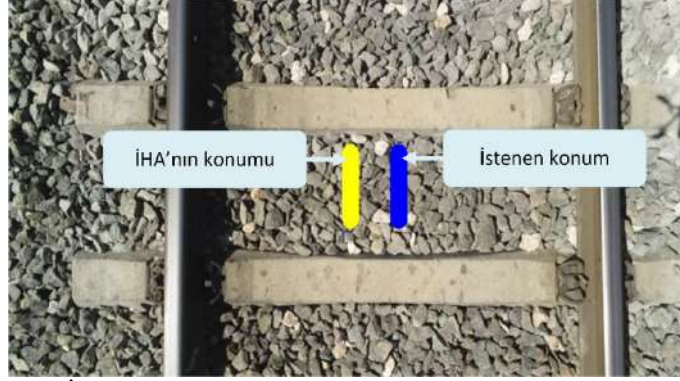
İHA'nın kamerası 90 derece aşağı bakacak şekilde ayarlanmıştır. Bu durumda ray merkezi, tespit edilen iki ray çizgisinin ortası olacaktır. Histogram pik noktaları grafiğinde oluşan sağ ve sol pik noktalarının x ekseninde oluşturduğu orta nokta bulunarak İHA'nın bulunması gereken konum işaretlenmiştir. Şekil 4'teki görüntü çerçevesinde İHA'nın bulunması gereken konum işaretlenmiştir. Tespit edilen iki ray çizgisinin orta konumu ve kameranın konumu kullanılarak, İHA'nın raylara göre konumu hesaplanmıştır. Bu işlem sonucu, İHA'nın merkezinin rayların ortasından ne kadar uzakta olduğunu hesaplanmıştır. Bu bilgi, PID denetleyici kullanarak rayın takip edilmesinde kullanılmıştır.



Şekil 4. İHA'nın bulunması gereken konum

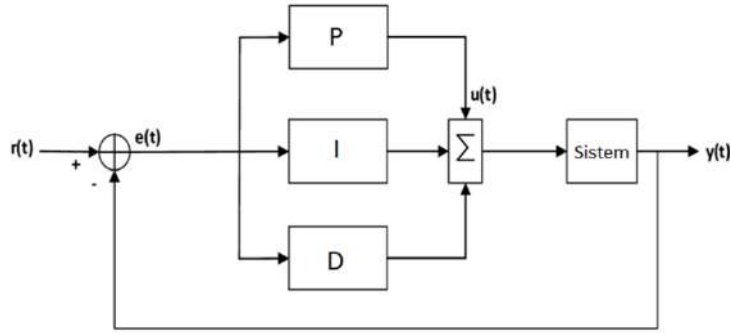
### 3.3 Ray takibi

Ray takibi, Şekil 5'te gösterilen İHA'nın anlık konumu ile İHA'nın bulunması istenen konum arasındaki mesafenin x ekseninde sıfıra indirgenmesiyle sağlanacaktır. İHA'nın anlık konumu, demiryolundan anlık alınan görüntünün x eksenindeki orta noktasıdır. İstenen konum ise histogram pik noktalarına göre belirlenmiş konumdur. İki nokta arasındaki yatay mesafe sıfırda tutulurken İHA, sabit irtifada ve yükseklikte ilerleyecektir. İki nokta arasındaki mesafe PID denetleyici kullanılarak kapatılacaktır. Bu şekilde demiryolu takibi sağlanmış olacaktır.



Şekil 5. İHA'nın bulunduğu konum ile istenen konumun belirlenmesi

PID denetleyici, sağlamlığı ve yapısı nedeniyle kontrol sistemlerinde kullanılan en yaygın kontrolördür. PID denetleyiciler İHA'ların kontrolünde de yaygın olarak kullanılmaktadır. PID denetleyicinin yapısı sadece üç ayar parametresinden oluşur. Bu nedenle uygulanması kolaydır. PID değerlerinin ayarlanması için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Şekil 6'da görüldüğü üzere klasik PID denetleyici yapısı, sistemden istenen değer ile sistemin o anki gerçek değerinin farkının yani hatanın kendisi, zamana bağlı türevi ve zamana bağlı integralinin toplanarak sisteme gönderildiği geri beslemeli bir denetleyici yapısıdır.



Şekil 6. PID denetleyici yapısı

PID denetleyicinin matematiksel gösterimi aşağıdaki gibidir:

$$U(t) = P_u + I_u + D_u \quad (4)$$

Burada  $P_u$ ,  $I_u$  ve  $D_u$ , sırasıyla oransal, integral ve türevsel olarak adlandırılır.  $K_p$  oransal katsayı,  $e$  hata ve  $t$  zaman olmak üzere, oransal terim aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$P_u = K_p e(t) \quad (5)$$

$K_i$  integral katsayısı,  $e$  hata,  $\tau$  integrasyon değişkeni ve  $t$  zaman olmak üzere, integral terimi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$I_u = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (6)$$

$K_d$  türevsel katsayısı,  $e$  hata ve  $t$  zaman olmak üzere, türev terimi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

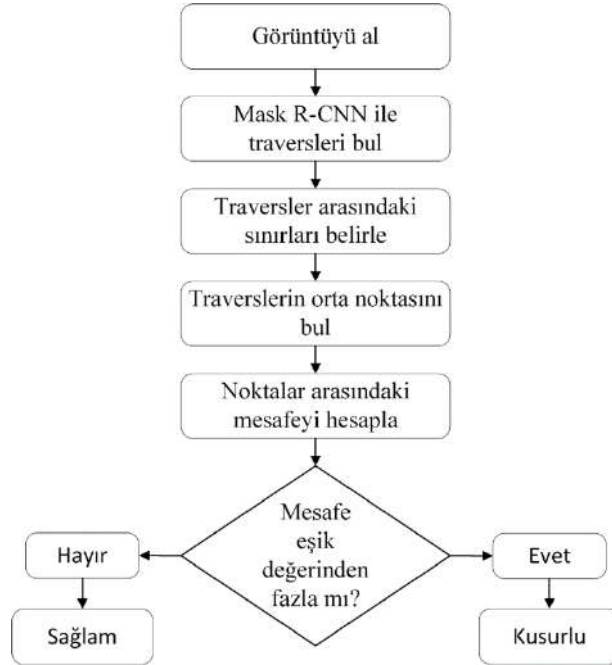
$$D_u = K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (7)$$

PID denetleyicinin çıkışı P,I ve D terimlerinin toplanması ile aşağıdaki gibi elde edilir:

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + D_u + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (8)$$

#### 4. Travers Eksikliklerinin Tespiti

Demiryolları, balast yatağına yerleştirilmiş traversler tarafından desteklenen raylarla balastlı raylarda çalışır. Balast üzerine yerleştirilen traversler, demiryolu hattından zemine tren yükünün transferinde önemli bir bileşendir. Bu nedenle, traversler arasındaki açıklıkların fazla olması veya traverslerin eksikliği önemli sorunlara yol açabilir. Bu çalışmada traversler arasındaki açıklıkların tespiti için Mask R-CNN algoritmasına dayalı yöntem kullanılmıştır. Algoritmada ilk olarak Mask R-CNN ile travers tespiti yapılmıştır. Ardından traversler arası ölçüm yapılarak eksik traversler tespit edilmiştir. Travers eksikliklerinin tespiti için önerilen yaklaşımın akış diyagramı Şekil 7’de verilmiştir.



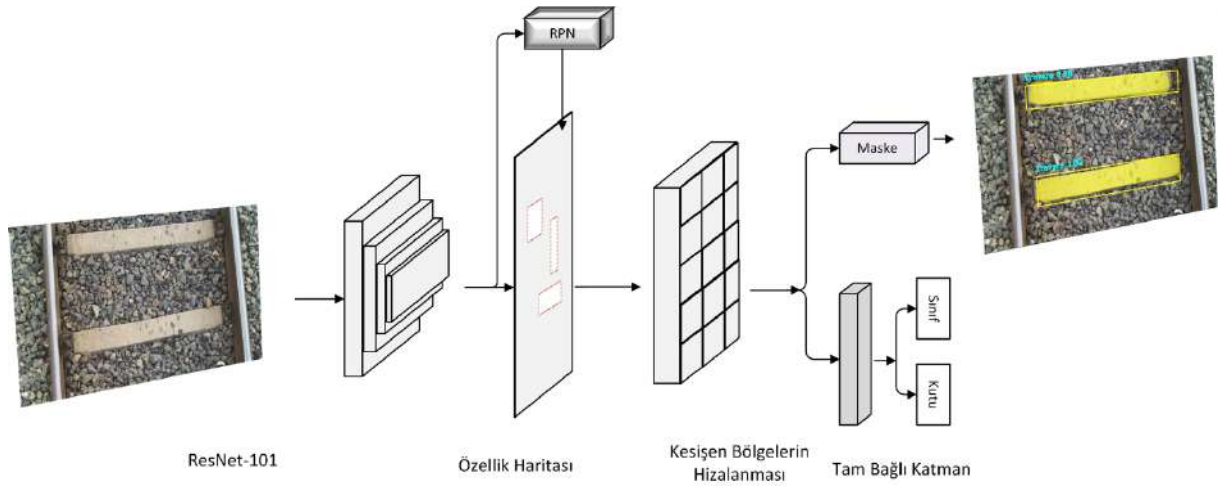
Şekil 7. Travers eksikliklerinin tespiti için önerilen algoritma

#### 4.1 Mask R-CNN

Mask R-CNN, daha hızlı R-CNN (Faster R-CNN) mimarisinden türetilen bir nesne bölütleme algoritmasıdır [27]. Mask R-CNN algoritması, görüntüdeki nesnelere tespit eder ve her nesnenin üzerinde maske oluşturur. Maskeleme tespit edilen nesnenin sınırları içerisinde bulunan piksellerin bölütlenmesi ile gerçekleştirilir.

Mask R-CNN iki aşamalı mimariye sahiptir. İlk aşama bölge teklif ağıdır (RPN). Bu aşamada aday nesnelere aday bölgeler çıkarılır ve hedef sınırlayıcı kutu ile sınıflandırılır. İkinci aşama ise aday olarak belirlenen kutulardan ROI Pooling kullanılarak özelliklerin çıkarılmasıdır. RPN tarafından iki ayrı çıktı oluşturulur. Çıktılardan ilki nesnenin hangi sınıfa ait olduğudur. Diğeri ise nesneyi içine alan sınırlama kutusunun boyutu ve konumudur. RPN tarafından oluşturulan sınırlama kutuları nedeniyle ROI kutuları farklı boyutlarda olabilmektedir. Farklı giriş boyutuna sahip olan görüntüleri işlemek zor olacağından sabit bir giriş boyutu belirlenmelidir. ROI Pooling işlemi burada devreye girmektedir. ROI pooling işlemi sonucunda sınıflandırma ve sınırlama kutusu regresyonu gerçekleştirilir. Sonuç olarak her bölge için maskeleme işlemi gerçekleştirilir. Mask R-CNN algoritmasının mimarisi Şekil 8’deki gibidir.

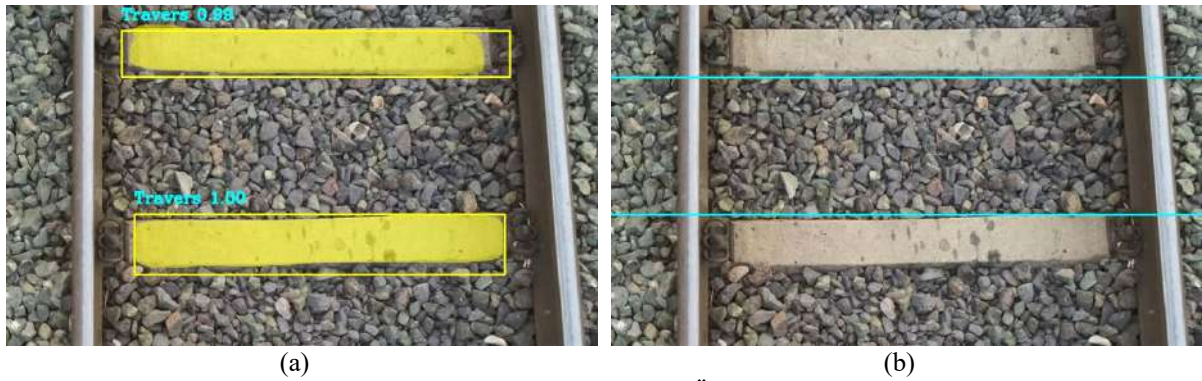




Şekil 8. Mask R-CNN mimarisi

#### 4.2 Önerilen ölçüm yöntemi

Eğitim için görüntüler demiryolundan Parrot Anafi 4K ile toplanmıştır. Çeşitli açılarda 800 adet görüntü toplanmıştır. Demiryolu görüntüleri 416x219 çözünürlükte JPEG formatına dönüştürülmüştür. Etiketlenen görüntüler 25 adım eğitilmiştir. Uygulama, test için ayrılan rastgele bir görüntü için çalıştırıldığında Şekil 9'da gösterildiği gibi sonuç elde edilmiştir. Burada traversler arası mesafeyi ölçebilmek için üstte kalan traversin alt sınırı ile altta kalan traversin üst sınırı belirlenmiştir. Bu sınırlar Mask R-CNN algoritmasının çizdiği sınırlardan faydalanılarak çizilmiştir. Sınırların belirlenmesi Şekil 9.b'de gösterilmiştir.

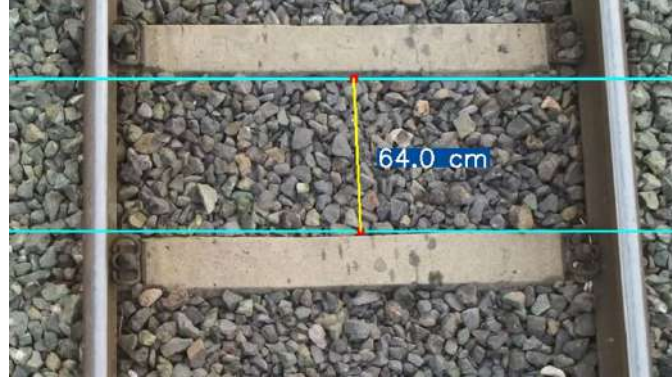


Şekil 9. (a) Mask R-CNN algoritmasının çıktısı (b) Ölçüm için sınırların belirlenmesi

Görüntüdeki iki travers arasındaki mesafeyi ölçebilmek için traversler arasındaki mesafe standartlara uyan bir referans görüntü kullanarak bir kalibrasyon yapılmalıdır. Traversler, belirli açıklıklarda dizilirler. Konvansiyonel hatlarda traversler arasındaki mesafesi 63-64 cm olarak uygulanmaktadır. Bu nedenle, referans olarak alınan görüntüdeki mesafe 64 cm olarak belirlenmiştir. Referans görüntüden Denklem 13'teki oran elde edilmiştir.

$$\text{Oran} = \frac{\text{düşey\_piksel\_sayisi}}{\text{bilinen\_genislik}} \quad (13)$$

Burada bilinen genişlik 64 cm'dir. Aradaki piksel ise Şekil 9.b'de çizilen sınırların arasında dikeyde bulunan piksel sayısıdır. Oran değeri sadece bir kez hesaplanır ve diğer test görüntülerine bu oran uygulanarak ölçüm yapılır. Ölçüm için üst ve alt sınırlarda birer nokta belirlenmelidir. Noktalar, Şekil 9.a'daki sınırların tam orta noktası olarak belirlenmiştir. Belirlenen noktalar kırmızı daire ile işaretlenmiştir. Bu noktalar arasındaki mesafenin ölçümü Şekil 10'da gösterildiği gibi ölçülmüştür.



Şekil 10. Referans görüntüde iki nokta arası ölçüm sonucu

## 5. Bulgular

Uygulanan ray takip algoritması sahada test edilmiştir. Önerilen ray takip algoritması demir yolunu başarılı bir şekilde takip edebilmektedir. Ray takip algoritmasının karmaşık çalışma koşullarında ve dinamik ortamlarda tanıma performansını doğrulamak için bu çalışmada, İHA ile önceden manuel olarak toplanmış demiryolu görüntüleri kullanılmıştır. Deneyde bu tür videolar İHA kullanılarak toplanmış ve farklı ray koşulları için şerit çizgileri tespit edilmiştir.

Ray takip algoritmasının performansını doğrulamak için gerçek demiryolu sahası deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 11’de görüldüğü üzere algoritmanın gerçek zamanlı olarak test edilebilmesi için gerçek demiryolu sahasında testler yapılmıştır. Uygulamada PID denetleyici için  $K_p$ ,  $K_i$  ve  $K_d$  değerleri sırasıyla 0.09, 0.05, 3 olarak seçilmiştir. Şekil 12.a, sahada PID denetleyici ile kontrol edilen İHA’nın tepkisini göstermektedir. Şekil 12. b ise PID çıktısının İHA’ya gönderilen dönme değerlerini göstermektedir.



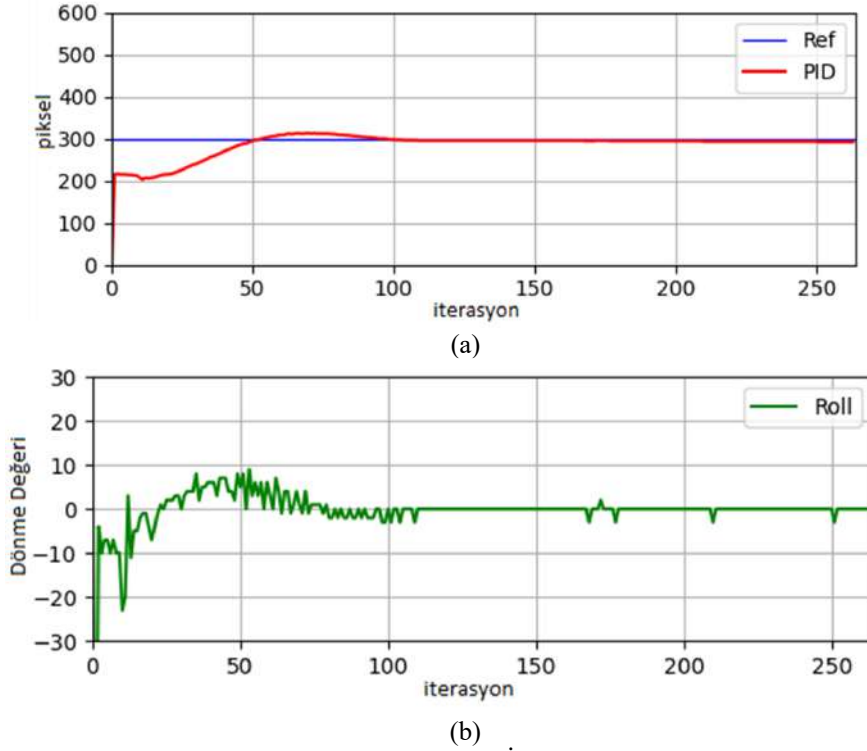
(a)



(b)

Şekil 11. Ray takibi algoritmasının sahada test edilmesi (b) İHA’nın istenen değeri yakalaması





Şekil 12. (a) Demiryolu sahasında ray hattını takip eden İHA'nın orta noktayı yakalaması (b) İHA'ya gönderilen dönme değerleri

Travers eksikliklerinin tespiti için önerilen algoritma 700 sağlam 50 kusurlu demiryolu görüntüsü üzerinde test edilmiştir. Karmaşıklık matrisi; doğruluk, duyarlılık, özgünlük ve F1 değerlerini ölçmek için son derece kullanışlıdır. Bu değerleri hesaplamak için gerekli denklemler aşağıda sırasıyla verilmiştir.

$$\text{Doğruluk} = \frac{DP + DN}{DP + YN + YP + DN} \quad (9)$$

$$\text{Duyarlılık} = \frac{DP}{DP + YN} \quad (10)$$

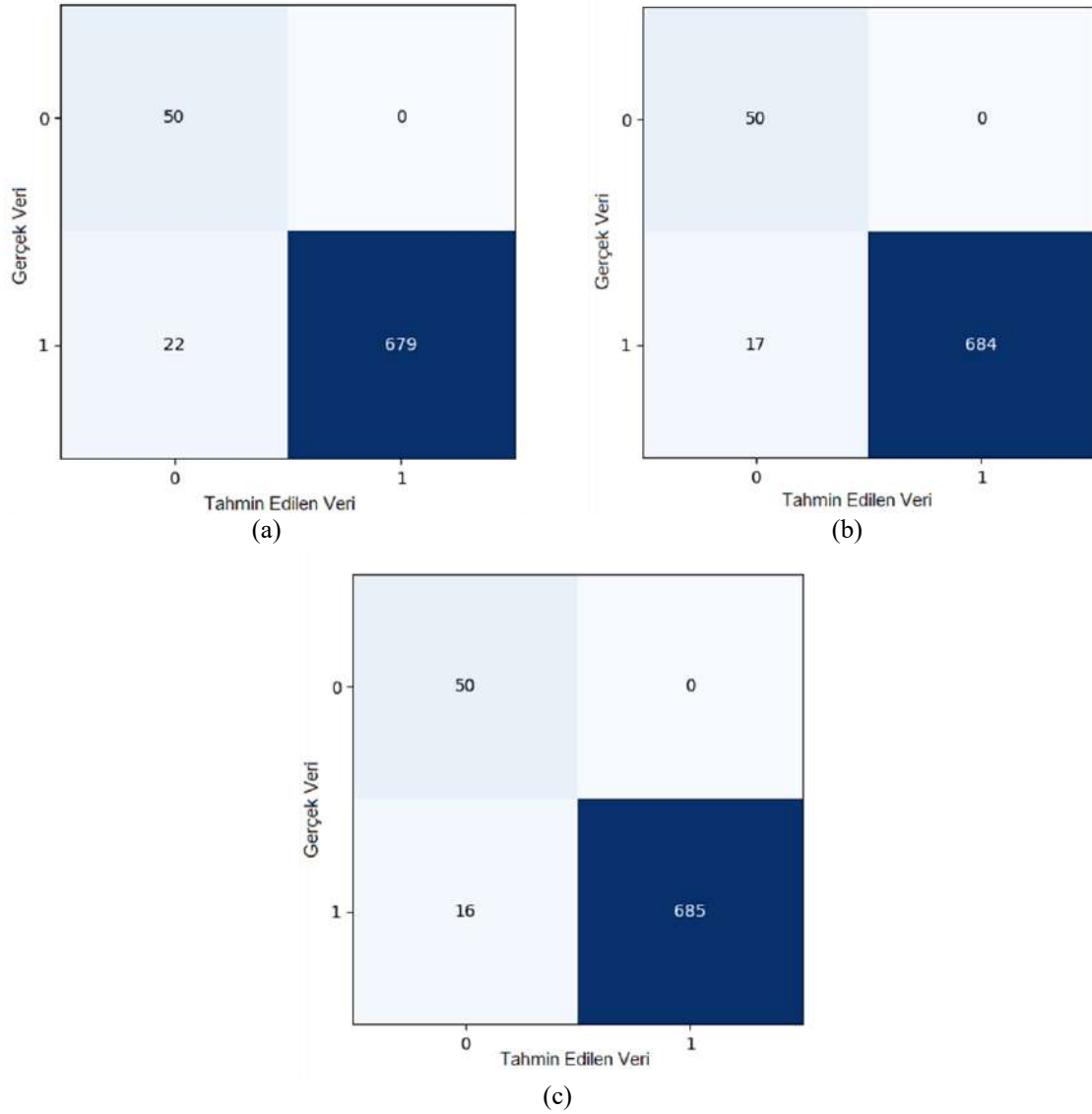
$$\text{Özgünlük} = \frac{DP}{DP + YP} \quad (11)$$

$$F1 = \frac{2 * DP}{2 * DP + YP + YN} \quad (12)$$

Test verilerinin sınıflandırılmasındaki doğruluk oranları 80 cm, 75 cm ve 70 cm eşik değeri için sırasıyla %97,8, %97,7 ve %97,0 olarak bulunmuştur. Algoritma sonucunun diğer metriklerine ait sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir. Elde edilen karmaşıklık matrisleri ise Şekil 13'te verilmiştir.

Tablo 2. Diğer ölçütler için performans sonuçları

Eşik değeri	Doğruluk	Duyarlılık	Özgünlük	F1
80 cm	%97,8	%100	%97,7	%98,8
75 cm	%97,7	%100	%97,5	%98,7
70 cm	%97,0	%100	%96,8	%98,4



**Şekil 13.** Test verilerinin sınıflandırılmasından elde edilen karmaşıklık matrisi (a) Eşik değeri 70 cm için sonuç (b) Eşik değeri 75 cm için sonuç (c) Eşik değeri 80 cm için sonuç

## 6. Sonuçlar

Bu çalışmanın ilk aşamasında, düşük hesaplama yüküne sahip gerçek zamanlı ray takibi yapabilen otonom İHA kontrol algoritması sunulmuştur. Önerilen yöntem herhangi bir eğitim işlemi gerektirmeden kameradan gelen verileri gerçek zamanlı işleyerek çalışmaktadır. Önerilen algoritma düz rayların yanı sıra kavisli raylarda da raydan çıkmadan iyi bir şekilde ray takibi yapabilmektedir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise otonom İHA tarafından toplanan görüntüler üzerinde travers eksikliklerinin tespiti yapılmıştır. Tespit için önerilen algoritma farklı eşik değerleri için %97 üzeri doğruluk oranıyla otomatik demiryolu denetimi için umut vadetmektedir. Gelecekteki çalışmalarımızda, geliştirilen otonom İHA'yı farklı bileşenlerdeki kusurların tespiti için genişletmeyi umuyoruz.

## Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TUBITAK) tarafından 120E097 numaralı proje ile desteklenmiştir.

### Kaynaklar

- [1] Edwards, J. R., Hart, J. M., Sawadisavi, S., Resendiz, E., Barkan, C., & Ahuja, N. (2009). Advancements in railroad track inspection using machine-vision technology. In AREMA Conference Proceedings on American Railway and Maintenance of Way Association (Vol. 290).
- [2] Zhang, X., Feng, N., Wang, Y., & Shen, Y. (2014). An analysis of the simulated acoustic emission sources with different propagation distances, types and depths for rail defect detection. *Applied Acoustics*, 86, 80-88.
- [3] Liu, Z., Li, W., Xue, F., Xiafang, J., Bu, B., & Yi, Z. (2015). Electromagnetic tomography rail defect inspection. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(10), 1-7.
- [4] Kocbek, S., & Gabrys, B. (2019, November). Automated machine learning techniques in prognostics of railway track defects. In 2019 International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW) (pp. 777-784). IEEE.
- [5] Jiang, Y., Wang, H., Tian, G., Chen, S., Zhao, J., Liu, Q., & Hu, P. (2018, July). Non-contact ultrasonic detection of rail surface defects in different depths. In 2018 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT) (pp. 46-49). IEEE.
- [6] Du, X., Cheng, Y., & Gu, Z. (2020). Change Detection: The Framework of Visual Inspection System for Railway Plug Defects. *IEEE Access*, 8, 152161-152172.
- [7] Han, Y., Liu, Z., Lyu, Y., Liu, K., Li, C., & Zhang, W. (2020). Deep learning-based visual ensemble method for high-speed railway catenary clevis fracture detection. *Neurocomputing*, 396, 556-568.
- [8] Lu, J., Liang, B., Lei, Q., Li, X., Liu, J., Liu, J., ... & Wang, W. (2020). SCueU-net: Efficient damage detection method for railway rail. *IEEE Access*, 8, 125109-125120.
- [9] Aydin, I., Akin, E., & Karakose, M. (2021). Defect classification based on deep features for railway tracks in sustainable transportation. *Applied Soft Computing*, 111, 107706.
- [10] Li, X., Doh, S. I., Jing, G., Chong, B. W., Suil, A. L., & Chin, S. C. (2021). A comparative review on American, European and Chinese standard for railway concrete sleeper. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 103073.
- [11] Ortega, R. S., Pombo, J., Ricci, S., & Miranda, M. (2021). The importance of sleepers spacing in railways. *Construction and Building Materials*, 300, 124326.
- [12] Franca, A. S., & Vassallo, R. F. (2020). A method of classifying railway sleepers and surface defects in real environment. *IEEE Sensors Journal*, 21(10), 11301-11309.
- [13] Feng, H., Jiang, Z., Xie, F., Yang, P., Shi, J., & Chen, L. (2013). Automatic fastener classification and defect detection in vision-based railway inspection systems. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 63(4), 877-888.
- [14] Li, Q., & Ren, S. (2012). A real-time visual inspection system for discrete surface defects of rail heads. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 61(8), 2189-2199.
- [15] Sherstjuk, V., Zharikova, M., & Sokol, I. (2018, April). Forest fire-fighting monitoring system based on UAV team and remote sensing. In 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO) (pp. 663-668). IEEE.
- [16] Hwang, Y. S., Schlüter, S., Park, S. I., & Um, J. S. (2021). Comparative evaluation of mapping accuracy between UAV video versus photo mosaic for the scattered urban photovoltaic panel. *Remote Sensing*, 13(14), 2745.
- [17] Alotaibi, E. T., Alqefari, S. S., & Koubaa, A. (2019). Lsar: Multi-uav collaboration for search and rescue missions. *IEEE Access*, 7, 55817-55832.
- [18] Rafi, F., Khan, S., Shafiq, K., & Shah, M. (2006, May). Autonomous target following by unmanned aerial vehicles. In *Unmanned Systems Technology VIII* (Vol. 6230, p. 623010). International Society for Optics and Photonics.
- [19] Ghassoun, Y., Gerke, M., Khedar, Y., Backhaus, J., Bobbe, M., Meissner, H., ... & Heyen, R. (2021). Implementation and Validation of a High Accuracy UAV-Photogrammetry Based Rail Track Inspection System. *Remote Sensing*, 13(3), 384.
- [20] Geng, Y., Pan, F., Jia, L., Wang, Z., Qin, Y., Tong, L., & Li, S. (2021). UAV-LiDAR-Based Measuring Framework for Height and Stagger of High-Speed Railway Contact Wire. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*.
- [21] Bojarczak, P., & Lesiak, P. (2021). UAVs in rail damage image diagnostics supported by deep-learning networks. *Open Engineering*, 11(1), 339-348.
- [22] Lygouras, E., Santavas, N., Taitzoglou, A., Tarchanidis, K., Mitropoulos, A., & Gasteratos, A. (2019). Unsupervised human detection with an embedded vision system on a fully autonomous UAV for search and rescue operations. *Sensors*, 19(16), 3542.
- [23] Shiri, H., Park, J., & Bennis, M. (2019, December). Massive autonomous UAV path planning: A neural network based mean-field game theoretic approach. In 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM) (pp. 1-6). IEEE.
- [24] Khadka, A., Fick, B., Afshar, A., Tavakoli, M., & Baqersad, J. (2020). Non-contact vibration monitoring of rotating wind turbines using a semi-autonomous UAV. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 138, 106446.
- [25] Wang, C., Wang, J., Wang, J., & Zhang, X. (2020). Deep-Reinforcement-Learning-Based Autonomous UAV Navigation With Sparse Rewards. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(7), 6180-6190.
- [26] Güçlü, E., Aydın, İ., & Akın, E. (2021, July). Fuzzy PID Based Autonomous UAV Design for Railway Tracking. In 2021 International Conference on Information Technology (ICIT) (pp. 456-461). IEEE.
- [27] He, K., Gkioxari, G., Dollár, P., & Girshick, R. (2017). Mask r-cnn. In *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision* (pp. 2961-2969).

## İçmesuyu Dağıtım Sistemlerinde Şebeke Yenileme için Ekonomik Analiz Hesaplama Modelinin Geliştirilmesi

Salih YILMAZ<sup>1</sup>, Mahmut FIRAT<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Çankırı Karatekin Üniversitesi, Çankırı, Türkiye

<sup>2</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye

<sup>1</sup> salihymz@gmail.com, <sup>2</sup> mahmut.firat@inonu.edu.tr

(Geliş/Received: 27/12/2021;

Kabul/Accepted: 11/02/2022)

**Öz:** İçme suyu dağıtım sistemlerinde meydana gelen arızaların ve sızıntıların azaltılması için çok farklı yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemler zaman alıcı ve maliyetlidir. Bu nedenle yöntem uygulanmadan önce maliyet bileşenleri tanımlanmalıdır. Şebeke yenileme faaliyeti, kentsel su yönetiminde uygulanan yöntemler arasında en fazla maliyet oluşturan yöntemdir. Bu nedenle bir dağıtım sisteminde şebeke yenilemeye karar vermeden önce, gerekliliğin ortaya konulması, maliyet bileşenlerinin belirlenmesi ve hesaplanması ve bu analizlerin belirli bir standart yapıda gerçekleştirilmesi oldukça önemlidir. Bu çalışmada içme suyu dağıtım sistemlerinde şebeke yenileme faaliyetleri için fayda maliyet bileşenlerini dikkate alan ve analiz gerçekleştiren bir hesaplama modeli geliştirilmiştir. Bu hesaplama aracında şebeke yenilemede maliyet oluşturan tüm bileşenler saha verileri esas alınarak tanımlanmıştır. Ayrıca mevcut şebeke koşullarında şebekedeki boru malzeme ve çap dağılımları ve arıza oranları dikkate alınarak faydalı ömür analizi için model tanımlanmıştır. Bu modelde yeni yapılacak şebekedeki boru malzeme ve çap dağılımı da dikkate alınmakta ve fayda maliyet analizi gerçekleştirilmektedir. Geliştirilen bu hesaplama aracının özellikle belediye ve su idarelerinde karar vericiler ve teknik personel için referans teşkil edeceği düşünülmektedir.

**Anahtar kelimeler:** İçme Suyu Dağıtım Sistemi, Şebeke Yenileme, Faydalı Ömür, Fayda Maliyet Analizi

## Development of Economic Analysis Calculation Model for Network Renewal in Water Distribution Systems

**Abstract:** Various methods are applied to reduce failures and leaks in water distribution systems. These methods are in many cases time consuming and costly. Therefore, cost components should be defined before the method is applied. Network renewal activity is the most costly method among the methods applied in urban water management. Therefore, before deciding on the renewal of the network in a distribution system, it is very important to reveal the necessity, determine and calculate the cost components, and carry out these analyzes in a certain standard structure. In this study, a web-based calculation tool that takes into account cost-benefit components and performs analysis for network renewal activities in drinking water distribution systems has been developed. In this calculation tool, all components that create cost in network renewal are defined on the basis of field data. In addition, a model has been defined for the useful life analysis by considering the pipe material and diameter distributions and failure rates in the current network conditions. In this model, the pipe material and diameter distribution in the new network is also taken into account and a cost-benefit analysis is carried out. It is thought that this developed calculation tool will be a reference for decision makers and technical personnel, especially in municipalities and water administrations.

**Key words:** Water Distribution System, Network Renewal, Useful Life, Cost-Benefit Analysis

### 1. Giriş

Kentsel su yönetiminde su idarelerinin en temel görevi olan istenilen miktarda ve kalitede suyun zamanında abonelere iletilmesinde yaşanan en önemli sorun şebekede arıza sayısı ve sızıntı hacminin yüksek oranlara ulaşmasıdır. Sistemin uzun dönemli yönetim modelinin oluşturulması ve işletme güvenliğinin sağlanması için bu oranların en aza indirilmesi oldukça önemlidir. Ancak hiçbir dağıtım sisteminde, şebeke ve elemanlarının dinamik yapısından arıza oranı veya sızıntı hacminin sıfır yapılması mümkün değildir. Arıza oranının ve sızıntı hacminin azaltılması ve işletme maliyetinin düşürülmesi için, basınç yönetimi [1-4], izole bölge tasarımı ve gece debisi analizi [5-7], boru malzeme yönetimi ve şebeke yenileme [8-10] gibi çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemler farklı gereksinimlere, maliyetlere, uygulama zorluklarına ve avantajlara sahip olabilmektedir. Sürdürülebilir bir şebeke yönetiminin sağlanması için yöntem seçilirken teknik, uygunluk, uygulanabilirlik ve ekonomik ölçütler göz önünde bulundurulmalıdır [11-14]. Bu yöntemler incelendiğinde boru malzeme yönetimi

\* Sorumlu yazar: [mahmut.firat@inonu.edu.tr](mailto:mahmut.firat@inonu.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-3206-1225, <sup>2</sup> 0000-0002-8010-9289

ve şebeke yenileme çalışması genel olarak en fazla ilk yatırım maliyeti oluşturan yöntem olarak değerlendirilmektedir. Gonelas vd. [15], gelir getirmeyen su hacminin azaltılmasının tüm su idarelerin ortak hedefi olduğunu ve seçilecek stratejilerde ekonomik analizlerin yapılmış olması gerektiğini ortaya koymuştur. Ekonomik kaçak seviyesinin en temel bileşenin basınç yöntemi olduğunu savunmuşlar ve yaptıkları çalışma ile seçilen pilot bölgede basınç müdahalelerinin faydaları ve maliyetleri analiz edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda basınç yönetiminin en etkili kayıp azaltma yöntemi olduğunu fakat yapılacak çalışmalarda yine de ekonomik analiz yapılması gerektiğini savunmuşlardır. Francisque vd. [16], şebeke yöneticilerinin su şebekesi yenileme veya değiştirme stratejilerini önceliklendirmelerine yardımcı olmak için kullanıcı dostu bir yaşam döngüsü maliyeti analizine dayalı karar destek aracı sunmaktadır. Farklı malzeme ve boyutlardaki su şebekeleri için bozulma eğrileri, arıza yapma olasılıklarına göre geliştirilmiştir. Ferrari ve Savic [5], izole bölge tasarımı ve saha imalatları için, öncelikle bu yöntemin uygulanması sonucunda sızıntının ve arızanın azaltılması, enerji ve su tüketiminin azaltılması ve verimliliğinin finansal olarak analiz edilmesini önermiştir. Bu amaçla çalışmada, verimlilik analizi gerçekleştirilmiş ve arıza sıklığı ve sızıntı azaltma kapsamında önemli ekonomik faydalar sağladığı ifade edilmiştir. Zamenian vd. [17], dağıtım sistemlerinde meydana gelen şebeke arızalarının, önemli sosyal, ekonomik ve çevresel etkilerinin olduğunu, önemli su kayıplarına neden olduğu ve özellikle pompa ile beslenen sistemlerde enerji tüketimi üzerinde önemli etkilerinin olduğunu vurgulamıştır. Bu nedenle, boruların hasar oluşturma potansiyelinin belirlenmesi, mevcut durumun değerlendirilmesi, arıza oranı tahmini yapılarak yenileme yapılacak bölgelerin önceliklendirilmesi için stratejik varlık yönetimi planlarının oluşturulması gerektiğini belirtmiştir. Haider vd. [18], yaptıkları çalışmada Suudi Arabistan'da yapılan çalışmalarını incelemiş ve genel olarak su kayıplarının azaltılması amacıyla uygulanan temel yöntemlerin (aktif kaçak kontrolü, basınç yönetimi ve boru-malzeme yönetimi) ekonomik analizlerini yapmışlardır. Yapılan analizler sonucunda aktif kaçak yöntemi ile altyapı kaçak indeksi (ILI) seviyesinin 20'den 7.28'e kadar düşürülebileceği ve diğer yöntemlerinde uygulanması ile ekonomik olarak %43'lük bir kayıp sisteme kazandırılabilceğini tespit etmişlerdir. Ayrıca yapılan çalışmada su satış fiyatlarının artırılması ile aktif kaçak kontrolü ile elde edilebilecek faydanın artırılabilceği de önerilmiştir. Moslehi vd. [19], yaptıkları çalışmada su kayıp azaltma çalışmalarının ciddi maliyetler oluşturması nedeniyle yapılacak çalışmalarda ekonomik analiz yapılması gerekliliğini savunmuşlardır. Aktif kaçak kontrolünü referans alarak yaptıkları çalışma ile İran'ın Mashhad şehrinde kısa dönemli ekonomik kaçak seviyesini 27 m<sup>3</sup>/bağlantı sayısı/yıl olarak tanımlamışlardır. Kısa dönemli ekonomik kaçak seviyesinin basınçtan ve şebeke koşullarından önemli ölçüde etkilendiği ve su idareleri tarafından uygulanacak su yönetim politikalarında bu verilerin kullanılması gerektiğini savunmuşlardır. Sharma vd. [20], su kaybının sifıra indirilmesinin teknik ve ekonomik olarak mümkün olmadığını, su kayıp bileşenlerinin doğru bir şekilde analiz edilerek kayıp azaltma politikası oluşturulması gerektiğini savunmuşlardır. Literatürde kabul görmüş yöntemler için yapılan analizlerde farklı yöntemler için aynı bölgelerde birbirinden farklı sonuçlar alındığını ve bu nedenle yapılacak çalışmalarda en az 2 yöntemin kullanılarak birbiriyle kıyaslamasının yapılması gerektiğini savunmuşlardır.

Literatürde yapılan çalışmalarda da vurgulandığı gibi, şebeke yenileme yönteminde boru malzemesinin tamamen değiştirilmesi arıza sayısının ve sızıntı hacminin azaltılmasında önemli avantaj sağlamaktadır. Ancak bu yöntemde sistemde boru ve ekipmanları değiştirildiği için idare açısından ekonomik olarak önemli yük oluşturmaktadır. Bu nedenle bir dağıtım sisteminde şebeke yenilemeye karar vermeden önce, gerekliliğin ortaya konulması, maliyet bileşenlerinin belirlenmesi ve hesaplanması ve bu analizlerin belirli bir standart yapıda gerçekleştirilmesi oldukça önemlidir. Bundan dolayı bu çalışmada, içmesuyu dağıtım sistemlerinde şebeke yenileme yaklaşımı için maliyet bileşenlerinin belirlenmesi ve bunların sistematik bir şekilde analizi için hesaplama aracının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bunun için şebeke yenilemede maliyet bileşenleri detaylı bir şekilde tanımlanmış, saha verilerine göre farklı tipteki boru malzemeleri için birim maliyetler oluşturulmuş ve hesaplama aracına tanımlanmıştır. Böylece bir dağıtım sisteminde şebeke yenileme faaliyetleri için ekonomik analizin sistematik ve doğru bir şekilde yapılması için referans oluşturacak bir hesaplama metodolojisi önerilmiştir.

## 2. Şebekede Arıza ve Sızıntı Yönetimi

İçmesuyu dağıtım sistemlerinde şebekenin fiziksel özellikleri (yaşı, mevcut durumu, büyüklüğü), işçilik ve malzeme kalitesi, boru malzeme türü, trafik yükü ve titreşim, zemin özellikleri, sistem işletme basıncı ve basınç dalgalanması gibi birçok faktör arıza oluşumunda etkilidir [21-22]. Bu arıza sayısının fazla olması, arıza onarım maliyetlerini (işçilik, kazı, dolgu, malzeme, yol kaplama vb.) arttıran en temel bileşendir. Literatürde yapılan çalışmalarda şebeke arızalarının, toplam arızalara oranının yaklaşık %38 olduğu hesaplanmıştır [23-25]. Dağıtım sistemlerinde teknik olarak en düşük sızıntı seviyesini ifade yıllık kaçınılmaz sızıntıların (UARL) hesaplanmasında IWA tarafından önerilen ve denklem (1)'de verilen denklem önerilmiştir. Bu denklemin geliştirilmesinde arıza sayısı, bir arızadaki birim sızıntı debisi, arıza onarım süresi gibi bazı kabuller yapılmıştır (Tablo 1) [26]. İyi yönetilen bir dağıtım sisteminde teknik olarak oluşabilecek en düşük arıza oranları tanımlanmıştır.

Tabloda görüldüğü gibi, iyi şebeke koşullarında teknik olarak oluşabilecek en düşük arıza sayıları, şebeke ana hatlarında 13 arıza /100 km/yıl ve servis bağlantılarında 3 arıza/1000 bağlantı/yıl şeklinde tanımlanmıştır. Bu arıza

oranları şebekedeki teknik olarak en düşük arıza oranını ifade etmekte olup her şebeke için ekonomik olmayabilir. Bu arıza sayıları esas alınarak dağıtım sistemlerindeki ana hat ve servis bağlantılarda ayrı ayrı olmak üzere mevcut arıza sayıları ile kıyaslanarak arıza indeksleri hesaplanmaktadır [26]. Bu arıza indekslerinin 1'e yakın olması sistemin iyi durumda olduğu şeklinde yorumlanmaktadır. Böylece arıza sayısı ve yönetimi açısından uygulayıcı ve karar vericiler için sistemin mevcut durumunun değerlendirilmesi ve planlama yapılması için referans bilgi elde edilecektir.

**Tablo 1.** Yıllık kaçınılmaz kayıp hacminin analizinde kullanılan parametreler [26].

Bileşenler	Belirsiz Sızıntılar	Rapor Edilen Arızalar	Rapor Edilmeyen Arızalar
Şebeke Hattı	20 litre/km/saat	12.4 arıza /100 km / yıl 12 m <sup>3</sup> /saat/arıza* Arıza süresi: 3 gün =864 m <sup>3</sup> /arıza	0.6 arıza / 100km / yıl 6 m <sup>3</sup> /saat/arıza* Arıza süresi: 50 gün =7200 m <sup>3</sup> /arıza
Servis bağlantı (ana boru-parsel sınırı arası)	1.25 litre/bağlantı/saat	2.25arıza / 1000 bağlantı / yıl 1.6 m <sup>3</sup> /saat/arıza* Arıza süresi: 8 gün =307 m <sup>3</sup> /arıza	0.75arıza / 1000 bağlantı / yıl 1.6 m <sup>3</sup> /saat/arıza* Arıza süresi: 100 gün =3840 m <sup>3</sup> /arıza
Özel mülkteki servis bağlantı (parsel sınırı-sayaç arası)	0.5 litre/bağlantı/saat (her 15 m uzunluk için)	1.5arıza / 1000 bağlantı / yıl 1.6 m <sup>3</sup> /saat/arıza* Arıza süresi: 9 gün =346 m <sup>3</sup> /arıza	0.5arıza / 1000 bağlantı / yıl 1.6 m <sup>3</sup> /saat/arıza* Arıza süresi: 101 gün =3878 m <sup>3</sup> /arıza

Tabloda verilen belirsiz sızıntılar, bir dağıtım sisteminde kılcal çatlaklarda meydana gelen ve düşük debiye sahip sızıntıları ifade etmektedir. Bu sızıntılar altındaki katsayılar uluslararası su birliği (IWA) tarafından iyi şebeke koşullarında oluşan birim sızıntılardır. Rapor edilen arızalar, zemine yüzeyine çıkmakta, birim sızıntı debileri yüksek ve zemin yüzeyinden görüldüğü gibi farkına varma ve onarım süreleri kısadır. Diğer taraftan rapor edilmeyen sızıntılar, zemin yüzeyine çıkmamakta, tespit edilmesi için aktif sızıntı kontrolü uygulanmakta ve fark edilme ve onarım süreleri uzun olmaktadır. Tablodan da görüldüğü gibi, rapor edilmeyen sızıntıların birim sızıntı debisi daha düşük olmasına rağmen fark edilme ve yerini tespit süreleri (arıza süresi) fazla olduğu için bir arızadan dolayı meydana gelen toplam kayıp daha fazla olmaktadır.

Şebekede arıza sayısının fazla olması durumunda işletme maliyetinin artmasının yanı sıra, işletme koşullarının bozulması, sürekli su kesintisinin yaşanması, abone şikayetlerinin artması ve lokal olarak değiştirilen boru oranı gibi bir çok olumsuzluk ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle arıza yoğunluklarının ve ekonomik etkilerinin izlenmesi ve mevcut koşullarda devam edilmesi veya şebeke yenilemeye karar verilmesi seçenekleri değerlendirilmelidir. Şebeke yenileme ilk yatırım maliyeti oldukça yüksek olduğu için detaylı analiz yapılması oldukça önemlidir.

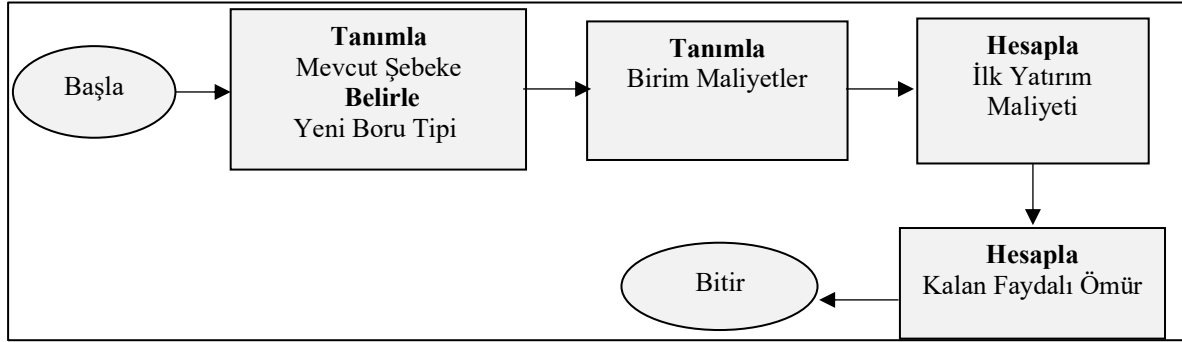
Dağıtım sistemlerinde su kayıplarının azaltılmasında, şebekede yer alan boru ve diğer bağlantı elemanlarının değiştirilmesini kapsayan ve genelde diğer aktif kaçak kontrolü yöntemlerine göre daha fazla maliyet oluşturan "şebeke yenileme" yöntemi birçok durumda öncelikli olarak tercih edilmektedir [27]. Ancak, dağıtım sisteminde, mevcut şebeke koşullarındaki arıza oranları, işletme, bakım ve onarım maliyetleri, yeni kaynak arama ve enerji maliyetleri göz önünde bulundurulmalı, şebeke yenileme durumunda ortaya çıkan ilk yatırım ve orta ve uzun dönemli işletme maliyetleri dikkate alınmalı lokal değiştirme ya da şebeke yenileme seçenekleri karşılaştırılmalıdır [27]. Literatürde yapılan çalışmalar genel olarak incelendiğinde şebekeler için faydalı ömür kavramının ön plana çıktığı görülmektedir. Bu kavram şebekelerin arıza onarımı, basınç yönetimi veya diğer temel yöntemlerle sızıntıların kontrol edilmesinin ekonomik olarak yönetilemediği durumlara odaklanmaktadır. Bir diğer deyişle şebekeyi işletmek amacıyla birim boru için harcanan maliyetin, borunun değiştirilmesi için harcanan maliyetten büyük olduğu durumlarda, şebeke için faydalı ömrünü tamamlamış şekilde değerlendirme yapılabilir [27]. Faydalı ömrün belirlenmesinde izlenen önemli yöntemlerden biri Loganathan vd. [28] tarafından ortaya konulmuştur. Yapılan çalışmada yıllık enflasyon oranı (R), yıllık arıza/boru onarım bedeli (C) ve şebekenin toplam yenileme maliyeti (F) değerleri kullanılarak arıza katsayısı (Brk) hesaplanmıştır.

$$Brk_n = \frac{\ln(1+R)}{\ln\left(\frac{C_{n+1}}{F_n} + \frac{F_{n+1}}{F_n}\right)} \quad (1)$$

İlgili denklemlerle hesap yapılabilmesi için öncelikle şebekenin toplam yenileme maliyetinin hesaplanması gerekmektedir. Bu hesap yapılması için her çap ve boru cinsi için birim imalat maliyetleri hesaplanmıştır (Yılmaz, 2021). İlgili maliyetin hesaplanabilmesi için kullanıcıların yenileme sırasında kullanmayı planladıkları boru cinsi ile, mevcut şebekenin ortalama boru çaplarını bilgileri geliştirilen hesaplama aracına tanımlanmalıdır. Söz konusu maliyet kalemlerinin ilk fiyatlarının hesaplanmasının ardından denklem (1)'de belirtilen esaslar doğrultusunda her yıl için faiz oranları da dikkate alınarak yenileme maliyetleri, arıza maliyetleri ve su kayıp maliyetleri ayrı ayrı hesaplanır.

$$BRK_n > BRK_{n+1} \text{ ve } BRK_n > BRK_{n-1} \quad (2)$$

Yapılan hesapların (2) nolu denklemleri aynı anda sağladığı nokta şebekenin kalan faydalı ömrünü verecektir. Bir diğer deyişle grafiğin (Şekil 6) minimum noktasının yılı kestiği nokta kalan faydalı ömürdür (Yılmaz, 2021). Böylelikle mevcut şebeke durumu, yenileme şartları ve yıllık faiz oranları dikkate alınarak şebekelerin faydalı kalan ömrünün hesabı yapılmış olacaktır. Söz konusu pik noktası eğer hiç oluşmuyorsa yani;  $BRK_n > BRK_{n+1}$  ve  $BRK_n > BRK_{n-1}$  şartı hiç sağlanmıyorsa şebeke ekonomik ömrünü tamamlamış anlamına gelmektedir. Bu durumda mevcut şebeke hemen yenilenmelidir. Dağıtım sistemlerinde şebekede yer alan boru ve diğer bağlantı elemanlarının değiştirilmesini kapsayan “şebeke yenileme” yöntemi birçok durumda diğer su kayıp azaltma yöntemlerine göre daha maliyetli olmaktadır. Ancak şebekenin faydalı ömrünü tamamladığı anlaşıldığı durumlarda ilk olarak değerlendirilmesi gereken bir su kayıp azaltma yöntemi olmaktadır. Şebeke yenileme ve boru malzemesi için maliyet hesabı algoritması Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Şebeke yenileme ve malzeme yönetimi için maliyet analizi akış diyagramı [27].

### 3. Şebeke Yenileme Ekonomik Analizi için Hesaplama Aracının Geliştirilmesi

Su kayıp yönetimi için uygulanan yöntemler oldukça maliyetlidir. Bu nedenle, uzun dönemli uygulanabilir ve yönetilebilir bir strateji ortaya koymak için, yöntemlere ait tüm bileşenler dikkate alınmalı, faydalar ve maliyetler için standart yapı tanımlanmalı, sistematik ve sürdürülebilir analiz gerçekleştirilmelidir. Bunları sürekli yapabilmek için hesaplama aracı geliştirilmeli ve uygulanmalıdır. Bu nedenle bu çalışmada, su kayıp yöntemlerine ait sistematik maliyet analizleri için “şebeke yenileme yöntemi ve bileşenleri için ekonomik analiz hesaplama aracı” geliştirilmiştir. Bu hesaplama aracında veriler “veri giriş ekranında” girilmekte (Şekil 2) [27] ve tüm modül sayfalarına otomatik olarak aktarılmaktadır [27]. Bu hesaplama modeline [www.sukayipyonetimi.com](http://www.sukayipyonetimi.com) adresinden ulaşılabilir. Bu hesaplama modüllerinde değişkenlere ait birim maliyetler, Kayseri Su ve Kanalizasyon İdaresi ve Malatya Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlükleri faaliyet alanında sahada yapılan çalışmalar esas alınmıştır. Bu çalışmalar ve analizler esas alınarak ve 2020 yılı birim fiyatları dikkate alınarak belirlenmiş ve sisteme tanımlanmıştır. Ancak bu birim fiyatların kullanıcı tarafından değiştirilmesi ve yeni değer girilmesi de mümkün olmaktadır.

Değişken Adı	Açıklama	Değer	Birim
Ölçülen Minimum Gece Debisi	MNF analiz #55 verisi girilmiŝe ilgili değer alınacaktır. Aksi takdirde "Veri Girişi" bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	<input type="text" value="0"/>	l/s
Ortalama Sistem Basıncı (P ilk)	MNF analiz #21 verisi girilmiŝe ilgili değer alınacaktır. Aksi takdirde "Veri Girişi" bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	<input type="text" value="0"/>	m
Ŗebeke Anahat Uzunluğu (Lm)	ILI analiz #9 verisi girilmiŝe ilgili değer alınacaktır. Aksi takdirde "Veri Girişi" bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	<input type="text" value="0"/>	km
Bölgede Kaydedilen Yıllık Ŗebeke Arıza Sayısı	PI analiz #34 verisi girilmiŝe ilgili değer alınacaktır. Aksi takdirde "Veri Girişi" bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	<input type="text" value="0"/>	adet
Fiziksel Kayıp Miktarı	Su dengesi hesaplanmış ise "Fiziksel Kayıplar (m3)" değeri alınacaktır. Aksi takdirde "Veri Girişi" bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	<input type="text" value="0"/>	m3
Yıllık Kaçınılmayan Fiziksel Kayıp Hacmi (UARL)	ILI analizinde hesaplanan UARL değeri alınmalıdır. Aksi takdirde "Veri Girişi" bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	<input type="text" value="0"/>	l/gün
Bölgede Kaydedilen Yıllık Abone Arıza Sayısı	PI analiz #35 verisi girilmiŝe ilgili değer alınacaktır. Aksi takdirde "Veri Girişi" bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	<input type="text" value="0"/>	adet
Birim Su Üretim Maliyeti	PI analiz #45 verisi girilmiŝe ilgili değer alınacaktır. Aksi takdirde "Veri Girişi" bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	<input type="text" value="0"/>	TL/m3
Bölgede kaydedilen Yıllık Toplam Rapor Edilen Arıza Sayısı	PI analiz #36 verisi girilmiŝe ilgili değer alınacaktır. Aksi takdirde "Veri Girişi" bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	<input type="text" value="0"/>	adet
Toplam Abone Sayısı	ILI analiz #4 verisi girilmiŝe ilgili değer alınacaktır. Aksi takdirde "Veri Girişi" bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	<input type="text" value="0"/>	adet
Faturalandırılmış Ölçülmüş Yasal Tüketim	Su dengesi hesaplanmış ise "Faturalandırılmış Ölçülmüş Yasal Tüketim (m3)" değeri alınacaktır. Aksi takdirde "Veri Girişi" bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	<input type="text" value="0"/>	m3
Suyun Birim m3 için Satış Bedeli	PI analiz #56 verisi girilmiŝe ilgili değer alınacaktır. Aksi takdirde "Veri Girişi" bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	<input type="text" value="0"/>	TL/m3

Ŗekil 2. Ekonomik analiz hesaplama aracı veri giriş ekranı

İzole ölçüm bölgelerinde sızıntıların farkına varılmasında uygulanan en temel yaklaşım minimum gece debisinin ölçülmesi ve izlenmesidir. Gece debisi, tüketimin en düşük olduğu gece saatlerinde (genelde 02:00-04:00 arası) ölçülmekte, gece yasal tüketimler hesaplanmakta, belirsiz sızıntılar Ŗebeke özelliğine göre analiz edilmekte ve buna göre bölgede potansiyel olarak önlenebilir sızıntılar belirlenmektedir. Bu analizler ve değerlendirmeler günlük olarak her bir bölgede yapılmalıdır. Bu nedenle bölgede sızıntı oranları hakkında daha doğru bir değerlendirme yapmak amacıyla minimum gece debisi de bir parametre olarak dikkate alınmaktadır.

Ortalama sistem işletme basıncı, bölge girişinde ve/veya kritik noktalarda ölçülen ve izlenen basıncı temsil etmektedir. Bir dağıtım sisteminde yeni arıza oluşumunda ve/veya mevcut arızalarda sızıntı hacminin artmasında sistem işletme basıncı doğrudan etkilidir. O nedenle analizlerde bu parametre dikkate alınmıştır. Ŗebeke ana hat uzunluğu, sistemin büyüklüğünü tanımlamada kullanılan en temel veriden biri olarak gösterilir. Ŗebeke hat uzunluğu arttıkça, potansiyel sızıntı nokta sayısı artmaktadır. Ayrıca Ŗebeke uzunluğuna bağlı olarak sızıntıların farkına varılması ve Ŗebekenin yönetilmesi daha zorlaŝacaktır. Bu nedenle Ŗebeke uzunluğu sistem iŝletmede en temel parametre olduğu için analizlerde kullanılmıştır. Ŗebekedeki arıza sayısı, rapor edilen ve arıza yönetim sisteminde tutulan ve onarılan arızaları kapsamaktadır. Fiziki kayıp miktarı, dağıtım sistemindeki sızıntılar olarak tanımlanabilir. Servis bağlantı arıza sayısı, servis bağlantılarında oluşan rapor edilen ve arıza yönetim sisteminde tutulan ve onarılan arızaları kapsamaktadır. Toplam yüzeye çıkan arızalar, Ŗebeke ve servis bağlantılarında meydana gelen yüzeye çıkan arızaların toplamına eşittir. Bir izole ölçüm bölgesinde işletme maliyetini arttıran, hizmet seviyesinin düşmesine neden olan, işletme koşullarının bozulmasında en temel faktörler sistemdeki arıza sayıları ve sızıntılardır (fiziki kayıplar). Dağıtım sisteminin en temel iki parametresi Ŗebeke ana hat uzunluğu ve servis bağlantı sayısıdır. Bu iki temel bileŝende meydana gelen arıza sayıları, arıza onarım maliyetleri ve birim sızıntı debileri farklı olduğu için geliştirilen sistemde bunlara ait veriler ayrı ayrı dikkate alınmıştır. Diğer taraftan izole bölge sınırları içinde yer alan ve idaredede abone yönetim sisteminde kayıtlı abonelerin sayısı toplam abone sayısı olarak ifade edilmiştir. Sisteme verilen suyun iletildiği ve gelirin elde edildiği bileşen yasal abone tüketimleridir. Su bütçesi analizinin ve işletme gelirinin doğru bir şekilde dikkate alınması için abone sayıları ve bu aboneler tarafından tüketilen yasal kullanımlar bir parametre olarak göz önünde bulundurulmuştur. Dağıtım sisteminde birim su satış bedeli kurumun geliri üzerinde doğrudan etkilidir. Sistem verimliliğinin sağlanması ve yatırımların planlandığı gibi yapılabilmesi için parametrenin detay analizlerle belirlenmesi gerekir.

Fiziki kayıpların yönetilmesinde yaygın bir şekilde uygulanan ve genel olarak en yüksek maliyet oluşturduğu için en son ŝeçenek olarak dikkate alınması sistem verimliliği açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada, geliştirilen Ŗebeke yenileme için ekonomik



analiz modülünde şebeke yenilemeden önce şebeke bilgileri, arıza oranları ve diğer işletme bilgileri esas alınarak fayda ve maliyetlerin hesaplanması mümkün olmaktadır. Bu amaçla öncelikle Şekil 3'te verilen verilerin sisteme tanımlanması gerekmektedir.

Verilerin Girilmesi	Açıklama	Değer	Birim
Şebeke Anahat Uzunluğu (Lm)	ILI analiz #9 verisi girilmiŝse ilgili değerin (x1000) katı alınacaktır. Aksi takdirde "Veri Girişi" bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	8,000.00	m
Birim Su Üretim Maliyeti	PI analiz #45 verisi girilmiŝse ilgili değer alınacaktır. Aksi takdirde "Veri Girişi" bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	2.00	TL/m3
Bölgede Kaydedilen Yıllık Şebeke Arıza Sayısı	PI analiz #34 verisi girilmiŝse ilgili değer alınacaktır. Aksi takdirde "Veri Girişi" bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	20.00	adet
Bölgede Kaydedilen Yıllık Abone Arıza Sayısı	PI analiz #35 verisi girilmiŝse ilgili değer alınacaktır. Aksi takdirde "Veri Girişi" bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	30.00	adet
Fiziksel Kayıp Miktarı	Su dengesi hesaplanmış ise "Fiziki Kayıplar (m3)" değeri alınacaktır. Aksi takdirde "Veri Girişi" bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	60,000.00	m3
Şebeke Arızası Onarım Maliyeti	Söz konusu fiyatlar Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2020 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları ve özel piyasa araştırmaları ile hesaplanmıştır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer <input type="text" value="1850"/>	TL/adet
Abone Arızası Onarım Maliyeti	Söz konusu fiyatlar Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2020 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları ve özel piyasa araştırmaları ile hesaplanmıştır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer <input type="text" value="1350"/>	TL/adet
Yıllık Enflasyon Oranı	Merkez Bankası tarafından yıllık olarak açıklanmaktadır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer <input type="text" value="0.1275"/>	%

Şekil 3. Şebeke yenileme ekonomik analizi için temel işletme verilerinin tanımlanması.

Şekil 2'de verilen veri ekranında, su üretim ve arıza onarım maliyetleri yer almaktadır. Su üretim maliyeti, sistemin işletme maliyeti üzerinde etkili olan, kurumun en önemli giderini ifade eden ve su satış bedelinin belirlenmesinde dikkate alınması gereken en temel parametreden biridir. Bu maliyeti, sistemdeki pompa ve terfi maliyetleri, varsa su arıtma maliyeti ve varsa isale hattındaki ara terfi istasyonlardaki enerji maliyetlerini içermektedir. Diğer taraftan arıza onarım maliyeti, dağıtım sistemindeki bir arızanın onarılmasında harcanan maliyeti ifade eder. Bu maliyet, kazı, işçilik, malzeme, dolgu ve yol kaplama maliyeti gibi detayları içermektedir. Sistem verimliliği üzerinde doğrudan etkiye sahip olan bu iki bileşen analizlerde girdi olarak dikkate alınmıştır.

Şekilden de görüldüğü sisteme ait temel verilerin yanı sıra birim arıza onarım maliyeti sisteme otomatik tanımlanmış durumdadır. Bu maliyet KASKİ ve MASKİ saha verileri esas alınarak belirlenmiş olup kullanıcı tarafından deęiŝtirilebilmektedir. Bu maliyetler şebeke arızası ve servis bağlantı arızası için ayrı ayrı tanımlanmıştır. Geliştirilen modüde detay analizlerin yapılabilmesi için Şekil 4'te şebeke bilgilerinin ayrıca sisteme tanımlanması gerekir.

Rehabilitasyon Durumunda Yapılması Planlanan Boru Cinsi	Kullanıcı tarafından seçilecektir.	Düktül	
Mevcut Şebekenin Tanıtılması	Açıklama	Değer	Birim
Şebekede Ø150 mm'den Küçük Boru Yüzdesi	Kullanıcı tarafından girilmelidir.	20	%
Şebekede Ø150 - Ø300 mm Arası Boru Yüzdesi	Kullanıcı tarafından girilmelidir.	40	%
Şebekede Ø300 - Ø500 mm Arası Boru Yüzdesi	Kullanıcı tarafından girilmelidir.	10	%
Şebekede Ø500 - Ø700 mm Arası Boru Yüzdesi	Kullanıcı tarafından girilmelidir.	30	%
Şebekede Ø700mm'den Büyük Boru Yüzdesi	Kullanıcı tarafından girilmelidir.	0	%

**Şekil 4.** Şebeke yenileme ekonomik analizi için mevcut şebekenin tanıtılması.

Şekil 4 incelendiğinde, boru çapları gruplandırılmış ve kullanıcılar tarafından sistemdeki sınıflara denk gelen boru yüzdeleri girmeleri istenmektedir. Bilindiği üzere boru çapına bağlı olarak, arıza onarım maliyeti, şebeke yenileme maliyeti artmakta ve boru çapına bağlı olarak arıza sayılarında değişiklikler gözlenmektedir. Geliştirilen sistemde bu etkilerin dikkate alınması için boru çapları şekilde görüldüğü gibi gruplandırılmıştır.

Dağıtım sistemlerinde boru malzemesi türü, arıza sayısı, oranı, bakım-onarım maliyetleri, basına bağlı olarak birim sızıntı debisi ve şebeke yenileme maliyetleri üzerinde doğrudan etkilidir. Bu nedenle geliştirilen ekonomik analiz modelinde ve hesaplama aracında boru malzeme türü dikkate alınmıştır. Bu amaçla sistemde PVC, DÜKTİL, HDPE, Çelik boruların inşaat maliyetlerinin boru çapına göre değişimleri sırasıyla Şekil 5'teki gibi sisteme tanıtılmaktadır.

PVC Boru için İnşaat Maliyetleri	Açıklama	Değer	Birim
Şebekede Ø150 mm'den Küçük Boru İmalatı	Söz konusu fiyatlar Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2020 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları ve özel piyasa araştırmaları ile hesaplanmıştır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer 110	TL/m
Şebekede Ø150 - Ø300 mm Arası Boru İmalatı	Söz konusu fiyatlar Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2020 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları ve özel piyasa araştırmaları ile hesaplanmıştır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer 345	TL/m
Şebekede Ø300 - Ø500 mm Arası Boru İmalatı	Söz konusu fiyatlar Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2020 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları ve özel piyasa araştırmaları ile hesaplanmıştır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer 600	TL/m
Şebekede Ø500 - Ø700 mm Arası Boru İmalatı	Söz konusu fiyatlar Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2020 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları ve özel piyasa araştırmaları ile hesaplanmıştır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer 950	TL/m
Şebekede Ø700mm'den Büyük Boru İmalatı	Söz konusu fiyatlar Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2020 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları ve özel piyasa araştırmaları ile hesaplanmıştır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer 1350	TL/m

İçmesuyu Dağıtım Sistemlerinde Şebeke Yenileme için Ekonomik Analiz Hesaplama Modelinin Geliştirilmesi

Düktül Boru İçin İnşaat Maliyetleri	Açıklama	Değer	Birim
Şebekede Ø150 mm'den Küçük Boru İmalatı	Söz konusu fiyatlar Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2020 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları ve özel piyasa araştırmaları ile hesaplanmıştır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer <input type="text" value="250"/>	TL/m
Şebekede Ø150 - Ø300 mm Arası Boru İmalatı	Söz konusu fiyatlar Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2020 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları ve özel piyasa araştırmaları ile hesaplanmıştır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer <input type="text" value="460"/>	TL/m
Şebekede Ø300 - Ø500 mm Arası Boru İmalatı	Söz konusu fiyatlar Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2020 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları ve özel piyasa araştırmaları ile hesaplanmıştır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer <input type="text" value="810"/>	TL/m
Şebekede Ø500 - Ø700 mm Arası Boru İmalatı	Söz konusu fiyatlar Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2020 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları ve özel piyasa araştırmaları ile hesaplanmıştır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer <input type="text" value="1200"/>	TL/m
Şebekede Ø700mm'den Büyük Boru İmalatı	Söz konusu fiyatlar Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2020 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları ve özel piyasa araştırmaları ile hesaplanmıştır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer <input type="text" value="1750"/>	TL/m

HDPE Boru İçin İnşaat Maliyetleri	Açıklama	Değer	Birim
Şebekede Ø150 mm'den Küçük Boru İmalatı	Söz konusu fiyatlar Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2020 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları ve özel piyasa araştırmaları ile hesaplanmıştır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer <input type="text" value="125"/>	TL/m
Şebekede Ø150 - Ø300 mm Arası Boru İmalatı	Söz konusu fiyatlar Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2020 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları ve özel piyasa araştırmaları ile hesaplanmıştır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer <input type="text" value="360"/>	TL/m
Şebekede Ø300 - Ø500 mm Arası Boru İmalatı	Söz konusu fiyatlar Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2020 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları ve özel piyasa araştırmaları ile hesaplanmıştır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer <input type="text" value="640"/>	TL/m
Şebekede Ø500 - Ø700 mm Arası Boru İmalatı	Söz konusu fiyatlar Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2020 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları ve özel piyasa araştırmaları ile hesaplanmıştır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer <input type="text" value="950"/>	TL/m
Şebekede Ø700mm'den Büyük Boru İmalatı	Söz konusu fiyatlar Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2020 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları ve özel piyasa araştırmaları ile hesaplanmıştır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer <input type="text" value="1400"/>	TL/m

Çelik Boru için İnşaat Maliyetleri	Açıklama	Değer	Birim
Şebekede Ø150 mm'den Küçük Boru İmalatı	Söz konusu fiyatlar Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2020 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları ve özel piyasa araştırmaları ile hesaplanmıştır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer 214	TL/m
Şebekede Ø150 - Ø300 mm Arası Boru İmalatı	Söz konusu fiyatlar Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2020 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları ve özel piyasa araştırmaları ile hesaplanmıştır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer 420	TL/m
Şebekede Ø300 - Ø500 mm Arası Boru İmalatı	Söz konusu fiyatlar Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2020 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları ve özel piyasa araştırmaları ile hesaplanmıştır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer 760	TL/m
Şebekede Ø500 - Ø700 mm Arası Boru İmalatı	Söz konusu fiyatlar Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2020 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları ve özel piyasa araştırmaları ile hesaplanmıştır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer 1100	TL/m
Şebekede Ø700mm'den Büyük Boru İmalatı	Söz konusu fiyatlar Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2020 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları ve özel piyasa araştırmaları ile hesaplanmıştır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer 1600	TL/m

Şekil 5. Farklı boru malzemeleri için şebeke yenileme durumunda boru döşeme maliyetleri.

Şekil 5 incelendiğinde, bölgede yeni imalat yapılması durumunda tercih edilecek boru malzeme türünün girilmesi gerekir. Ayrıca boru malzeme türüne göre hangi çapta boruların kullanılması gerektiği gibi en temel veriler istenmektedir. Boru malzeme türü ve boru çapı ilk yatırım maliyeti üzerinde doğrudan etkilidir. Boru malzeme türünü göre malzeme temin fiyatları değişmekte, taşıma ve sahada imalat maliyetleri doğrudan etkilenmektedir. Dolayısıyla yeni yapılacak imalatın maliyetinin tanımlanmasında ve veriminin analiz edilmesinde bu veriler oldukça önemlidir.

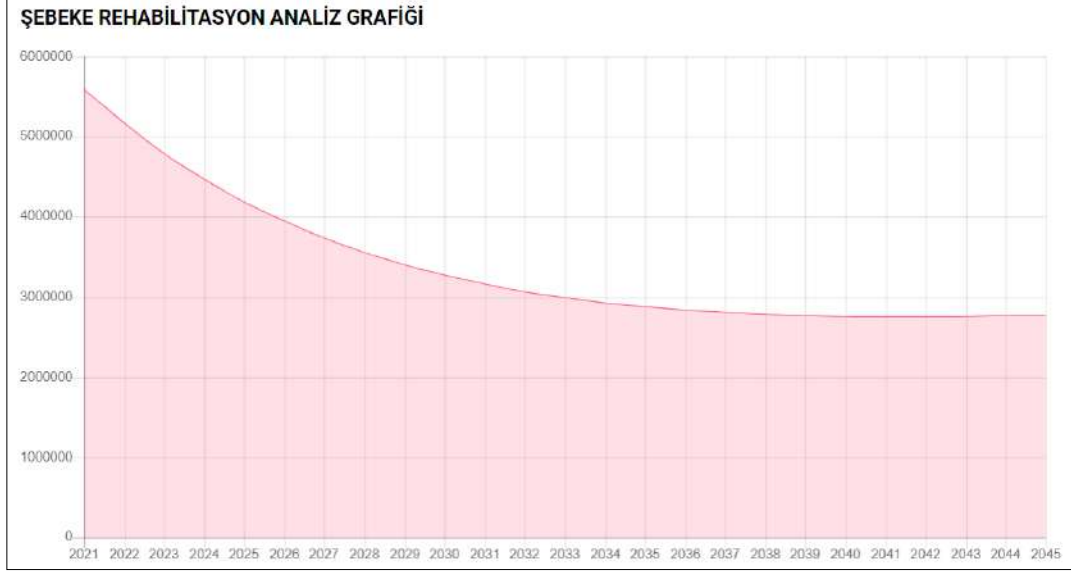
Söz konusu maliyetler boru fiyatları, boru ek parça fiyatları, kazı dolgu maliyetleri, işçilikler ve nakliyeler belirli standartlarda kabul edilerek 2020 yılı Çevre ve Şehircilik Bakanlığı poz fiyatlarıyla hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar belirli kabulleri içerdiğinden kullanıcıların bulunduğu şehir özelinde yeni maliyetleri girebilmesine imkan tanıyacak şekilde tasarlanmıştır. Yukarıda tanımlanan birim maliyetler, boru tipine göre birim değişim maliyetleri ve şebeke bilgileri esas alınarak hesaplama aracı tarafından belirlenen ilk maliyetler Şekil 6'da gösterilmektedir. Ayrıca şebeke yenileme analiz sonuçları Şekil 7'de verilmektedir.

İlk Maliyetlerin Hesabı	Açıklama	Değer	Birim
Şebeke Değişim Maliyeti	Girilen veriler doğrultusunda hesaplanmıştır. (TL/yıl)	5,400,000.00	TL
Arıza Onarım Yıllık Maliyeti	Girilen veriler doğrultusunda hesaplanmıştır. (TL/yıl)	77,500.00	TL/yıl
Su Kayıp Yıllık Maliyeti	Girilen veriler doğrultusunda hesaplanmıştır. (TL/yıl)	120,000.00	TL/yıl

Şekil 6. Hesaplama aracında belirlen ilk maliyetler.

Girilen değişkenler ve veriler doğrultusunda 3 farklı maliyet hesaplanmaktadır. Bu kapsamda; şebeke uzunluğunu, boru çaplarını ve planlanan şebekede ki boru cinsini esas alan “şebeke değişim maliyeti”, yıllık arıza sayısını ve arıza onarım bedelini dikkate alan “arıza onarım yıllık bedeli” ve yıllık su kayıp miktarı ile su üretim/satış fiyatını dikkate alan “su kayıp yıllık maliyeti” hesaplanmaktadır. Şebeke değişim maliyeti bize ilk yatırım maliyetini vermekteyken, arıza onarım ve su kayıp yıllık maliyetleri ise şebekenin mevcut durumda oluşturduğu yıllık kayıp maliyetleri göstermektedir. Şebeke değişim maliyetinde önceki aşamalarda girilen boru malzeme türü, çapı ve uzunluk oranları doğrudan etkilemektedir. Arıza onarım maliyeti ise bölgede arıza sayısına, boru malzemesine ve arızanın yerine (servis bağlantı, şebeke ana hat üzerinde) göre değişmektedir. Diğer taraftan su kayıp maliyeti, dağıtım sisteminde meydana gelen arıza sayısı, arızaların ortalama çözüm süresi ve bir arızadaki ortalama birim sızıntı debisi (boru malzeme türü, çatlak tipi, sistem basıncı doğrudan etkilidir) gibi faktörlere göre belirlenmekte ve değişmektedir.

Yapılan hesaplamalar sonucunda ilgili şebeke için kalan faydalı ömrün 20 yıl olduğu hesaplanmıştır. Bu şebekenin yaklaşık 20 yıl içerisinde değiştirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu tarz şebekelerde, kayıp azaltma yöntemleri için şebeke değişimi yerine su kayıp azaltma yöntemlerinin uygulanması daha ekonomik olacaktır.



Şekil 7. Şebeke Yenileme analiz grafiği.

ŞEBEKE REHABİLİTASYON ANALİZİ		
Şebekeye Kalan Faydalı Ömür	Hesaplanan Değer	Yıl
Şebekeye Kalan Faydalı Ömür	2,751,309.303	20
<b>Bu şebekenin 20 yıllık ömrü kalmıştır</b>		

Şekil 8. Şebeke Yenileme sonuç sayfası.

Şekil 7 ve 8 incelendiğinde, şebekenin mevcut koşullarda hizmet vermesi durumunda sistem verimliliğinin sağlanacağı görülmektedir. Sistemdeki arızaların ve sızıntıların yönetilmesi ve verimliliğin sağlanması için daha az maliyet oluşturan aktif sızıntı kontrolü ve basınç yönetimi gibi yöntemler uygulanabilir. Bu aktif sızıntı kontrolünün uygulanması ile arızalar daha kısa sürede belirlenebilecek sızıntı oranı azaltılacaktır. Diğer taraftan basınç yönetimine uygulanmasına bağlı olarak borular daha az basınca ve basınç dalgalanmalarına maruz kalacak ve dolayısıyla hasar riski azalacaktır. Böylece daha az maliyetle sistem işletilecek ve ilk yatırım maliyetinin yüksek olduğu şebeke yenileme ötelenmiş olacaktır.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada içme suyu dağıtım sistemlerinde şebeke yenileme faaliyetleri için fayda maliyet bileşenlerini dikkate alan ve analiz gerçekleştiren bir hesaplama modeli geliştirilmiştir. Bu hesaplama modelinde saha verileri temel alınarak şebeke yenileme için maliyet oluşturan bileşenler ve bunların birim maliyetleri tanımlanmıştır. Ayrıca boru malzemesinin değiştirilmesi durumunda elde edilecek potansiyel faydalar göz önüne alınarak şebekenin ekonomik ömrünün hesaplanması da mümkün olmaktadır. Dağıtım sistemlerinde boru malzemesi türü, arıza sayısı, oranı, bakım-onarım maliyetleri, basına bağlı olarak birim sızıntı debisi ve şebeke yenileme maliyetleri üzerinde doğrudan etkilidir. Bu nedenle geliştirilen ekonomik analiz modelinde ve hesaplama aracında boru malzeme türü dikkate alınmıştır. Geliştirilen şebeke yenileme için ekonomik analiz modülünde şebeke yenilemeden önce şebeke bilgileri, arıza oranları ve diğer işletme bilgileri esas alınarak fayda ve maliyetlerin hesaplanması mümkün olmaktadır. Bu hesaplama modüllerinde değişkenlere ait birim maliyetler, Kayseri KASKİ ve Malatya MASKİ sahalarında yapılan çalışmalar, analizler esas alınarak ve 2020 yılı birim fiyatları dikkate alınarak belirlenmiş ve sisteme tanımlanmıştır. Ancak bu birim fiyatların kullanıcı tarafından değiştirilmesi ve yeni değer girilmesi de mümkün olmaktadır. Ülkemizde genel olarak şebeke yönetiminde en pahalı yaklaşım olan

şebeke yenileme faaliyetleri öncelikli olarak tercih edilmektedir. Bu da ilk yatırım maliyetinin artmasına ve sistemin ekonomik olarak verimsiz yönetilmesine neden olmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada geliştirilen hesaplama aracının özellikle uygulayıcı ve karar vericiler için referans teşkil edeceği düşünülmektedir.

## Teşekkür

Bu çalışma, İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (İÜ-BAP FDK-2020-2053) tarafından desteklenmiştir.

## Kaynaklar

- [1] Candelieri A, Soldi D, Archetti F. Cost-effective sensors placement and leak localization – the Neptun pilot of the ICeWater Project. *J. Water Supply Res. Technol* 2015; 64(5): 567–582.
- [2] Berardi L, Laucelli DB, Simone A, Mazzolani G, Giustolisi O. Active Leakage Control with WDNNetXL, *Procedia Eng* 2016; 154: 62–70.
- [3] Cabral M, Loureiro D, Almeida M, Covas D. Estimation of costs for monitoring urban water and wastewater networks. *J. Water Supply Res. Technol. - AQUA* 2019; 68(2): 87–97.
- [4] Lipiwattanakarn S, Kaewsang S, Pornprommin A, Wongwiset T. Real benefits of leak repair and increasing the number of inlets to energy. *Water Sci* 2019; 14(3): 714–725.
- [5] Ferrari G, Savic D. Economic performance of DMAs in water distribution systems. *Procedia Eng* 2015; 119(1): 189–195.
- [6] Campbell E, Izquierdo J, Montalvo I, Pérez-García R. A novel water supply network sectorization methodology based on a complete economic analysis, including uncertainties. *Water (Switzerland)* 2016; 8(5):179.
- [7] di Nardo A, di Natale M, Giudicianni C, Santonastaso GF, Tzatchkov V, Varela JMR. Economic and energy criteria for district meter areas design of water distribution networks. *Water (Switzerland)* 2017; 9(7): 1–13.
- [8] Rogers D, Calvo B. “Defining the rehabilitation needs of water networks. *Procedia Eng* 2015; 119(1): 182–188.
- [9] Marchionni V, Cabral M, Amado C, Covas D. Estimating water supply infrastructure cost using regression techniques. *J. Water Resour. Plan. Manag* 2016; 142(4): doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000627.
- [10] Agathokleous A, Christodoulou S. Component-holistic condition assessment of water distribution networks. *J. Water Supply Res. Technol* 2017; 64(7): 509–519.
- [11] Mutikanga HM, Sharma SK, Vairavamoorthy K. Methods and Tools for Managing Losses in Water Distribution Systems. *J. Water Resour. Plan. Manag* 2013; 139(2): 166–174.
- [12] Ezbakhe F, Foguet A. Embracing data uncertainty in water decision-making: an application to evaluate water supply and sewerage in Spain. *Water Supply* 2019; 19(3): 778–788.
- [13] Jensen O, Nair S. Integrated Urban Water Management and Water Security: A Comparison of Singapore and Hong Kong. *Water* 2019; 11(4): 785.
- [14] Lopez ST, Barrionuevo M, Labajos B. Water accounts in decision-making processes of urban water management: Benefits, limitations and implications in a real implementation. *Sustain. Cities Soc* 2019; 50: 101676.
- [15] Kanakoudis V, Gonelas K. Non-revenue water reduction through pressure management in Kozani’s water distribution network: from theory to practice. *Desalin. Water Treat* 2016; 57(25): 11436–11446.
- [16] Francisque A, Tesfamariam S, Kabir G, Haider H, Reeder A, Sadiq R. Water mains renewal planning framework for small to medium sized water utilities: a life cycle cost analysis approach. *Urban Water Journal* 2017; 14(5): 493–501
- [17] Zamenian H, Mannering FL, Abraham DM, Iseley T. Modeling the Frequency of Water Main Breaks in Water Distribution Systems: Random-Parameters Negative-Binomial Approach. *J. Infrastruct. Syst* 2017; 23(2): 04016035.
- [18] Haider H, Al-Salamah S, Ghazaw YM, Abdel-Maguid RH, Shafiquzzaman M, Ghumman AR. Framework to establish economic level of leakage for intermittent water supplies in arid environments. *J. Water Resour. Plan. Manag* 2019; 145(2): 1–12.
- [19] Moslehi I, Ghazizadeh MRJ, Khoshghalb EY. Economic analysis of pressure management in water distribution networks. *J. Water Wastewater* 2019; 31(2): 100–117.
- [20] AL-Washali T, Sharma S, Lupoja R, AL-Nozaily F, Haidera M, Kennedy M. Assessment of water losses in distribution networks: Methods, applications, uncertainties, and implications in intermittent supply. *Resour. Conserv. Recycl* 2020; 152: 104515.
- [21] Lambert AO, Hirner W. Losses from water supply systems: Standard terminology and recommended performance measures. Blue pages, IWA, 2000.
- [22] Farley M, Wyeth G, Ghazali ZBM, Istandar A, Singh S. The Manager’s Non-Revenue Water Handbook. A Guide to Understanding Water Losses. 2008.
- [23] Nicolini M, Giacomello C, Scarsini M, Mion M. Numerical modeling and leakage reduction in the water distribution system of Udine. *Procedia Eng* 2014; 70: 1241–1250.
- [24] Aydogdu M, Firat M. Estimation of Failure Rate in Water Distribution Network Using Fuzzy Clustering and LS-SVM Methods. *Water Resour. Manag* 2015; 29(5): 1575–1590.
- [25] Boztaş F, Özdemir Ö, Durmuşçelebi FM, Firat M. Analyzing the effect of the unreported leakages in service connections of water distribution networks on non-revenue water. *Int. J. Environ. Sci. Tech* 2019; 16(8): 4393–4406.

- [26] Lambert AO, Brown TG, Takizawa M, Weimer D. A review of performance indicators for real losses from water supply systems. *J. Water Supply Res. Technol. - AQUA* 1999; 48(6), 227–237.
- [27] Yılmaz S. Su Kayıp Yönetiminde Ekonomik Kaçak Seviyesinin Optimizasyon Algoritmalarıyla Belirlenmesi. İnönü Üniversitesi, 2021.
- [28] Loganathan GV, Park S, Sherali HD. 2002. Threshold break rate for pipeline replacement in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management* 2002; 128(4)4: 271–279.



## Mobil Robotlar için Yük Altındaki Davranış Analizinin İncelenmesi

Halil İbrahim YAMAÇ<sup>1\*</sup>, Taner YILMAZ<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Mekatronik Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye  
<sup>\*1</sup> halilymc@gmail.com, <sup>2</sup> tnrylmz@live.com

(Geliş/Received: 04/01/2022;

Kabul/Accepted: 11/02/2022)

**Öz:** Robotların kullanımı özelliklerinden kaynaklı olarak gün geçtikçe artmaktadır. Endüstriyel alandaki gelişmeler, robotlara duyulan ihtiyacın artmasına neden olmuştur. Bu amaca yönelik çalışmalara araştırmacıları yönlentmiştir. Bu doğrultuda kullanılan robotlardan biri olan yük robotlarının birçok örnekleri mevcuttur. Bu araştırmanın amacı endüstri alanında faaliyet gösteren kuruluşlar ve araştırmacılar için yük robotları tasarımında önemli parametrelerin incelenmesi ile literatüre katkı sağlamaktır. Bu parametrelerden olan robot gövdesi ve montaj noktalarının analizleri yapılmıştır. Toplam deformasyon ve yük analizi, bir sonlu elemanlar yazılımı olan ANSYS programı ile incelenmiştir. Üç farklı yük altında (7,5 kN, 10 kN, 12,5 kN) yapılan analizler sonucunda gerilme sonuçlarında ciddi bir değişim gözlemlenmez iken, deformasyon sonuçlarında 0,23 mm -1,03 mm aralığında kısmi artışlar görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Endüstriyel Mobil Robot, Sonlu Eleman Analizi, Otonom Robotlar.

### Examination of Behavior Analysis Under Load for Mobile Robots

**Abstract:** The use of robots is increasing day by day due to their features. Developments in the industrial field have led to an increase in the need for robots. It has directed researchers to studies for this purpose. There are many examples of cargo robots, one of the robots used in this direction. The aim of this research is to contribute to the literature by examining the important parameters in the design of payload robots for organizations and researchers operating in the field of industry. The robot body and mounting points, which are among these parameters, were analyzed. Total deformation and load analysis were analyzed with the finite element software ANSYS. As a result of the analyzes performed under three different loads (7.5 kN, 10 kN, 12.5 kN), no significant change was observed in the stress results, while 0,23 mm -1,03 mm increases were observed in the deformation results.

**Key words:** Industrial Mobile Robot, Finite Element Analysis, Autonomous Robots.

### 1. Giriş

Robotik, modern teknolojinin birkaç farklı mühendislik alanını bir arada uygulayan dallarından biridir. Robotik, sistemlerin teorisi ve uygulaması ile ilgili olan bilim temelli bir teknolojidir [1]. Robotik sistemlerin uygulama alanlarının gelişimi incelendiğinde, her gün kullanım ve uygulama alanlarının arttığı görülmektedir. Robotik sistemler, askeri alanlar başta olmak üzere, sağlık sektöründe, rehabilitasyon çalışmalarında, endüstriyel ve sanayi uygulamalarında, evlerimizde vb. birçok alanda güvenle kullanılmaktadır [2].

Mobil robotlar, bir yerden başka bir yere operatörlerin yardımı olmadan hareket edebilen robotlardır. Yalnızca belirli bir çalışma alanına taşınabilen endüstriyel robotların çoğundan farklı olarak, önceden tanımlanmış bir çalışma alanında arzulanan hedeflerini gerçekleştirmek için serbestçe dolaşma özelliğine sahiptirler. Bu hareket kabiliyeti, yapılandırılmış veya yapılandırılmamış ortamlardaki geniş bir uygulama alanında kullanılmasını sağlamaktadır [3].

Mobil zemin robotları, tekerlekli mobil robotlar (WMR) ve bacaklı mobil robotlar (LMR) olarak iki gruba ayrılmaktadır. Tekerlekli robotlar diğer mobil robotlara göre daha yaygın kullanım alanına sahiptirler [4]. Bu robotların cazip olma nedeni uygulamada daha düşük mekanik karmaşıklığa sahip olmaları ve enerji tüketimlerinin daha az olması gibi avantajlarının olmasıdır. [5].

Günümüzde Robot ve insan etkileşiminin endüstriyel amaçlı örnekleri oldukça yaygındır. Bu doğrultuda insan ihtiyacı gerektiren sistemler, yerini robotlara bırakmaya başlamıştır. Endüstrideki gelişmeler endüstri 4.0 devriminin hızlanmasına neden olmuştur. Üretimde nesnelere ve hizmetlerin interneti ile siber fiziksel sistem uygulamaları teknolojik gelişmelerin ardından kullanılmaya başlanmıştır. Bu durum Endüstri 4.0 devriminin

\* Sorumlu yazar: [tnrylmz@live.com](mailto:tnrylmz@live.com). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-4628-0971, <sup>2</sup> 0000-0002-1721-9071



başlamasına neden olmuştur [6]. Nesnelerin interneti, hizmetlerin interneti, siber-fiziksel sistemleri endüstri devriminin ana öğeleri olarak görülmektedir. Bu öğelerin entegrasyonu ile de akıllı fabrikalar doğmuştur [7].

Akıllı fabrika kavramının net bir tanımı bulunmamasına rağmen mevcuttaki tüm tanımlar düşünüldüğünde akıllı fabrika kavramını; otomasyon, yazılım kombinasyonları, donanım, mekanik altyapı gibi teknolojik gelişmelere uyumlu olan ve yeniden yapılandırılabilen üretim süreçleriyle; imalat kaynaklı sorunları dinamik, esnek ve çevik bir biçimde çözebilen fabrika olarak tanımlamak mümkündür [8].

Bu teknolojik gelişmeler sonucu robotiğin endüstri ile entegrasyonu hız kazanmıştır. Endüstriyel amaçlı kullanılan yaygın robot tipleri:

- Üretim için kullanılan robotlar,
- Bakım, onarım amaçlı kullanılan yardımcı robotik sistemler,
- Paketleme amaçlı robotik sistemler,
- Çok amaçlı otonom asistan robotlar.

Otonom robotlar, sensörler, kameralar, yapay zeka uygulamaları vb. sistemler sayesinde çevreden edindiği bilgilere göre hareket eden ve verilen görevleri kendi kendine yerine getiren robotlardır [9]. Bu tarz robotların bir türü de yük amaçlı tasarlanan otonom mobil robotlardır. Endüstriyel amaçlı otonom mobil robotlar her türlü sanayi tesislerinde ve lojistik amaçlı birçok sektörde kullanım alanına sahiptir [10]. Bu doğrultuda akademik ve ticari amaçlı çalışmalar mevcuttur.

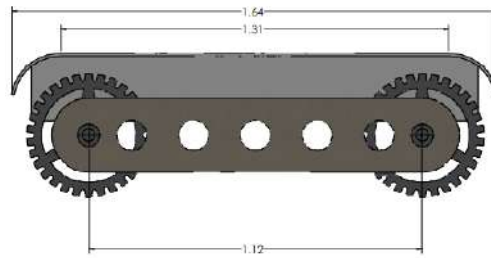
Yük amaçlı robotlar, yük taşıma amaçlı kullanılan çekici ve forkliftlerde olduğu gibi kaldırma ve taşıma şekillerine göre tasarımları değişiklik göstermektedir [11]. Bu amaçla tasarlanması hedeflenen sistemin tasarımının gerçekleştirilmesinde en önemli parametreler taşınması hedeflenen yükün ağırlığı ve boyutları olarak ön plana çıkmaktadır. Bu alanda yapılan prototiplerin deneysel testleri, bulunan hatalar maliyet açısından olumsuz sonuçlar doğurabildiğinden, simülasyon programları aracılığı tasarımı süreci, maliyeti ve optimizasyonu için büyük bir kolaylık sağlamaktadır [12].

Mühendislik alanında yaygın olarak kullanılan yazılım programlarından biri olan ANSYS ile disiplinler arası (mekanik, yapısal analiz, hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve ısı transferi vb.) çalışmaların sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analizlerini yapabilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık geometrilere sahip cisimlerin çok sayıda parçalara bölerek işlem kolaylığı sağlamaktadır. Böylece sonlu sayıdaki elemanın analizi sonucu elde edilen sonuçlar birleştirilerek test ve tutarlı bir analiz sonucu elde edilmektedir [13].

Bu çalışmanın amacı, ANSYS simülasyon programı aracılığı ile prototip üretimine ihtiyaç duyulmadan bir otonom yük robotunun farklı taşıma kapasitelerine göre gerilme ve deformasyon analizi yapılarak tasarımın sonuçları gözlenmiş ve bu alanda yapılacak yeni çalışmalara ışık tutarak literatüre katkıda bulunması hedeflenmiştir.

## 2. Gereçler ve Yöntem

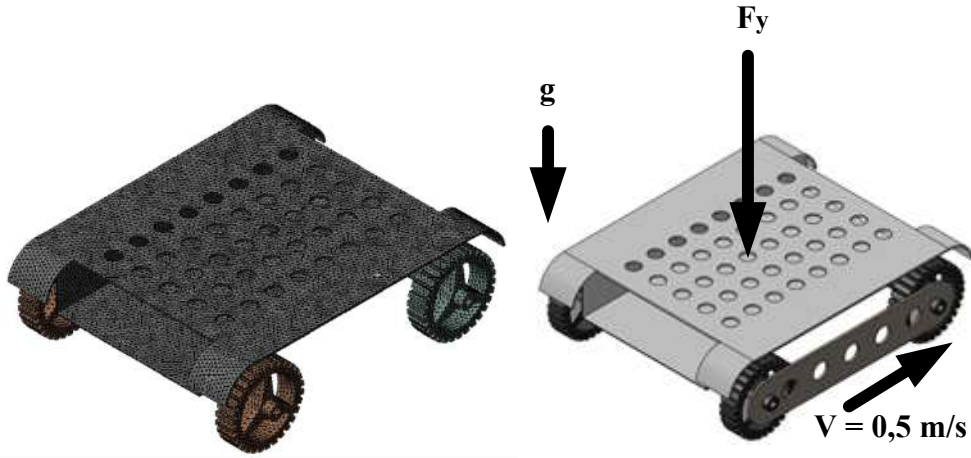
Şekil 1’de görüldüğü üzere analizi yapılması için tasarlanan örnek yük robotu, Solidworks programı aracılığı ile 3 boyutlu ortamda hazırlanmıştır.



Şekil 1. Tasarlanan mobil robot platformunun 3 boyutlu görseli.

Günümüzdeki örneklerinden esinlenerek tasarlanan robot platformu yaklaşık olarak 1,6 x 1,35 x 0,40 m boyutlarında 4 tekerlekli olarak hazırlanmıştır. 330 kg olan robotun ağırlığına ek olarak kullanılan sürüş tekerlerinin çapı 0,21 m. olarak belirlenmiştir. Tekerlerde kullanılan 2 adet motor aracılığı ile robot hareketleri sağlanmıştır.

ANSYS programı Static Structural modülünde analizler yapılmıştır. ANSYS sonlu farklar yöntemi kullanarak denklemleri yakınsama yöntemi ile çözmektedir [14]. Ağ yapısı ve analiz sınır şartları Şekil 2’de görülmektedir.



Şekil 2. Tasarlanan mobil robot platformunun 3 boyutlu görseli.

Ağ yapısı için element sayısı 103250, node sayısı 198172 ve element kalitesi en az ve en çok değerleri  $5,9 \times 10^{-2}$  ve 0,99; skewness değeri ortalaması 0,23 olarak çözümde kullanılmıştır.

Analiz için hazırlanan bu sistemin kendi yük ağırlığının (330kg.) yanı sıra -y ekseninde yerçekimi tanımlanmıştır. Uygulanan yük zemine paralel olarak robot üzerine uygulanmıştır. Yük parametreleri olarak 7,5kN, 10kN, 12,5kN belirlenmiştir. Uygulanan yükün neticesinde robot gövdesi, tekerlere bağlantıyı sağlayan mil ve tekerler üzerindeki kuvvet, kuvvetin sebep olduğu gerilim ve deformasyonların analizi incelenmiştir. Analiz sırasında kuvvetin sebep olduğu veriler incelenirken robot 0,5 m/s hızla hareketini sağlamaktadır.

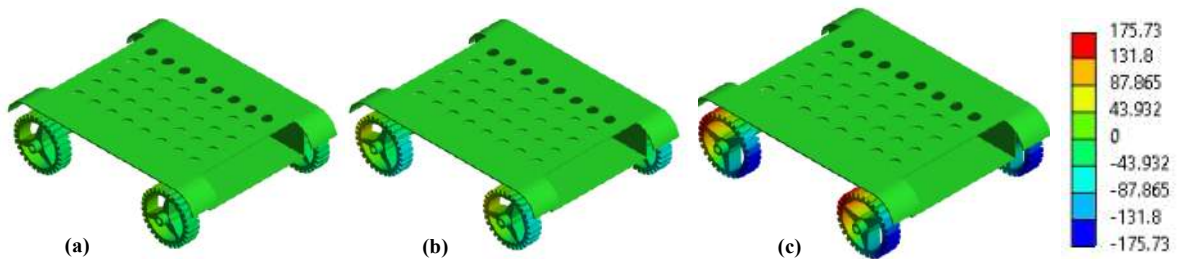
Analizler için kullanılan robot modelinde gövde paslanmaz çelik ile aks ve tekerlerde ise alüminyum alaşım kullanılmıştır. Malzemelere ait özellikler ise Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan malzemeler ve özellikleri

	Birim	Paslanmaz Çelik	Alüminyum Alaşım
<b>Yoğunluk</b>	kg/m <sup>3</sup>	7750	2770
<b>Young Modülü</b>	MPa	$1,93e^5$	71000
<b>Poisson Oranı</b>	MPa	0,31	0,33
<b>Bulk Modülü</b>		$1,693e^5$	69608
<b>Kayma Modülü</b>	MPa	73664	26692
<b>Akma Dayanımı</b>	MPa	207	280
<b>Çekme Dayanımı</b>	MPa	586	310

### 3. Bulgular ve Tartışma

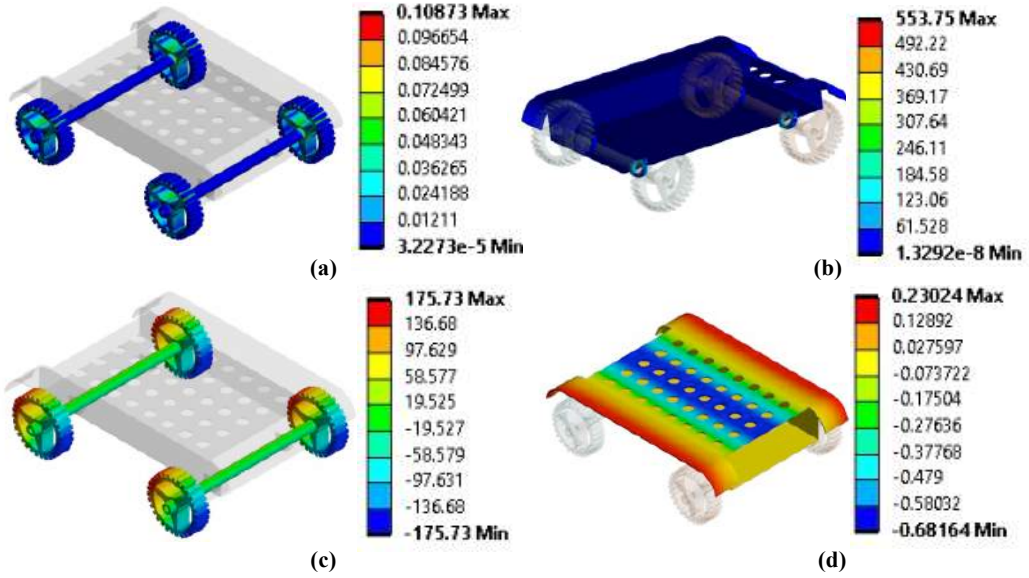
Robotun 12,5 kN’luk yük altında ki hareketinde tüm parçalar üzerinde meydana gelen deformasyon Şekil 3’de gösterilmiştir.



Şekil 3. Robotun zamana bağlı hareketindeki toplam deformasyonu a) 0,2 saniye b) 0,4 saniye c) 0,7 saniye

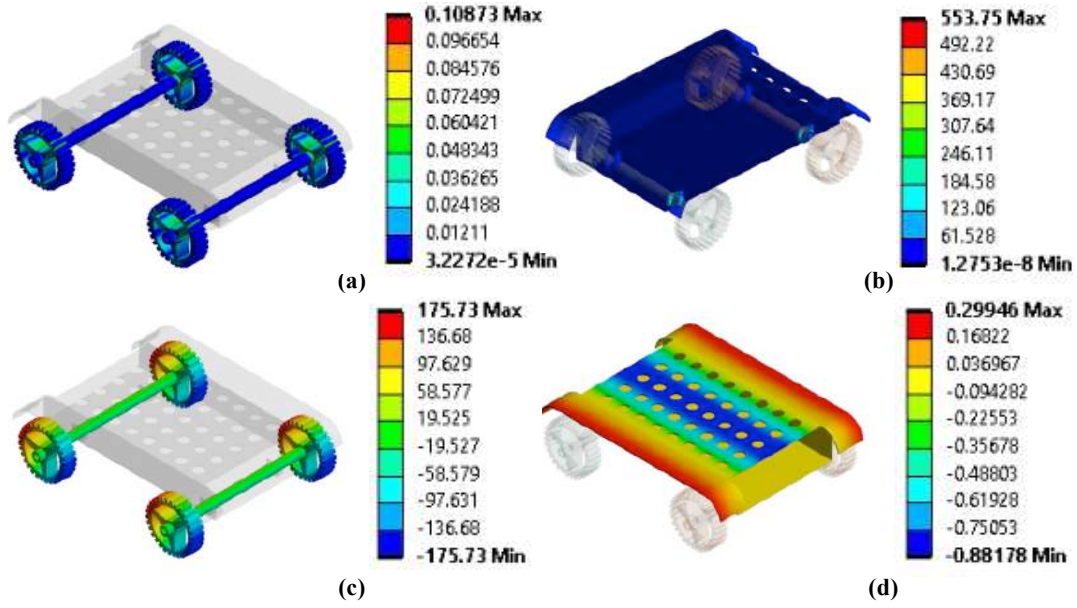
Burada zamana bağlı olarak yükün hareket ettirilmesinde en çok deformasyonun tekerler üzerinde meydana geldiği görülmektedir. Simülasyon sonucunda 0,4 saniyeden 0,7 saniyeye gelene kadar tekerler üzerinde bir deformasyon artışı meydana geldiği görülmektedir. Maksimum değerin 0,7 saniyede yaklaşık  $175 \times 10^{-3}$  mm olduğu ilgili şekilden anlaşılmaktadır. Gövdede oluşan deformasyonun değişiminin ihmal edilebilecek kadar az olduğu söylenebilir.

Yapılan analiz sonuçlarında üç farklı yük etkisinde robot üzerinde meydana gelen gerilim ve deformasyon sonuçları hesaplanmıştır. 7,5 kN yük için robotun gerilim ve deformasyon verileri Şekil 4’de gösterilmiştir.



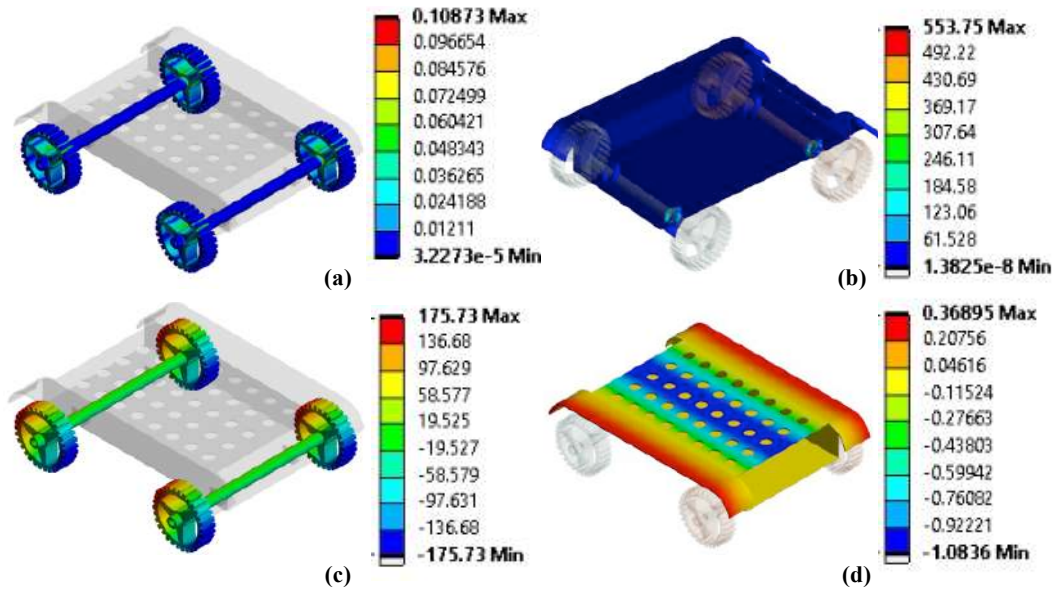
Şekil 4. 7,5 kN Yük altında (a) Aks ve tekerlek gerilme sonuçları (MPa) (b) Gövde gerilme sonuçları (MPa) (c) Aks ve tekerlek deformasyonu (nm) (d) Gövde deformasyonu (mm)

Şekil 4a’da aks ve tekerler üzerindeki gerilmenin maksimum değeri yaklaşık 0,11 MPa olarak görülmektedir. Aksların dönüşü sırasında gövdeden gelen yük etkisi tekerlere iletiildiği için bu kısımlarda daha büyük gerilme gözlenmiştir. Şekil 4c’de aks ve tekerler üzerinde oluşan deformasyon görülmektedir. Deformasyonun maksimum değeri yaklaşık  $175 \times 10^{-3}$  mm olarak tekerlerin zeminden uzak kısmında meydana gelmiştir. Yük ve hareket kaynaklı, gövde üzerinde oluşan gerilme ve deformasyon sırasıyla Şekil 4b ve Şekil 4c’de verilmiştir. Gövdede meydana gelen gerilmenin sonucu düşük seviyelerde kaldığı gözlemlenmiştir. Gövdeyle tek parça olan aks ile gövdenin birleşim bölgesinde gerilme değerinin 553 MPa –  $1,3292 \times 10^{-8}$  aralığında kaldığı görülmüştür. Bunun sebebi gövde üzerinde ki yükün robotun hareketi sırasında bu birleşim bölgesine etki etmesidir. Gövdede meydana gelen toplam deformasyonun maksimum değeri yaklaşık 0,2 mm’dir ve bu değer gövdenin yan uç kısımlarında meydana gelmiştir. Şekil 4’te seçilen parametreler Şekil 5 ve Şekil 6 için de geçerlidir.



Şekil 5. 10 kN Yük altında (a) Aks ve tekerlek gerilme sonuçları (MPa) (b) Gövde gerilme sonuçları (MPa)(c) Aks ve tekerlek deformasyonu (mm) (d) Gövde deformasyonu (mm)

$F_y = 10$  kN için elde edilen sonuçlar Şekil 5'te gösterilmiştir. Aks ve teker parçaları üzerinde yapılan gerilme ve deformasyon analizinde ciddi bir farklılık oluşmamıştır. Bunun haricinde gövde deformasyon analizinde 0,29 mm - -0,88mm aralığında artış gözlemlenmiştir.



Şekil 6. 12,5 kN Yük altında (a) aks ve tekerlek gerilme sonuçları (MPa) (b) Gövde gerilme sonuçları (MPa)(c) Aks ve tekerlek deformasyonu (mm) (d) Gövde deformasyonu (mm)

Şekil 6'da  $F_y=12,5$  kN yük altında sonuçlar gözlemlenmiştir. Şekil 4 ve Şekil 5'te olduğu gibi gövde, aks ve tekerlerin gerilme ve deformasyonları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre aks ve tekerler üzerinde gerilim ve deformasyonda değişim gözlenmez iken, robot gövdesinde gerilme analizinde çok küçük değerlerde artış olurken deformasyon artışı görülmüştür.

#### 4. Sonuçlar

Yapılan çalışmada, modellenen yük robotu için 7,5kN, 10kN ve 12,5kN olmak üzere 3 farklı yük altında 0,5m/s hızla seyir halinde iken analiz çalışması yapılmıştır. Yapılan analiz sonuçları için, 3 farklı kuvvet parametresinde gerilme ve deformasyon analiz sonuçları incelenmiştir.

Gerilme ve deformasyon sonuçları incelendiğinde değişimlerin ihmal edilebilecek kadar düşük bir seviyede olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçların geliştirilmesi için tekerler ve gövde arasında eklenebilecek destek parçaları ile gövdenin kenar kısımlarında meydana gelen deformasyonun daha düşük seviyelere gelebileceği düşünülmektedir. Aynı zamanda farklı malzeme seçimlerinin gerilme ve deformasyon analizinde daha başarılı sonuçlar elde edebileceği tahmin edilmektedir.

Bu çalışmada, gerçekleştirilmesi hedeflenen benzer tasarımlar için kritik bir konu olan taşınacak yükün etkisinin tasarımdaki önemi için bir farkındalık oluşturması hedeflenmiştir.

#### Kaynaklar

- [1] Tzafestas SG. Mobile Robot Control V. Introd to Mob Robot Control. 2014;319–84.
- [2] Quaglia G, Oderio R, Bruzzone L, Razzoli R. A modular approach for a family of ground mobile robots. *Int J Adv Robot Syst*. 2013;10.
- [3] Tantawi KH, Sokolov A, Tantawi O. Advances in Industrial Robotics: From Industry 3.0 Automation to Industry 4.0 Collaboration. *TIMES-iCON 2019 - 2019 4th Technol Innov Manag Eng Sci Int Conf*. 2019;4–7.
- [4] Sosa-Cervantes CY, Silva-Ortigoza R, Márquez-Sánchez C, Taud H, Saldaña-González G. Trajectory Tracking Task in Wheeled Mobile Robots: A Review. *Proc - 2014 IEEE Int Conf Mechatronics, Electron Automot Eng ICMEAE 2014*. 2014;110–5.
- [5] Chirag Savant. Design of Driveline for Mobile Robot Platform. 2018;63.
- [6] Wang T, Ramik DM, Sabourin C, Madani K. Intelligent systems for industrial robotics: Application in logistic field. *Ind Rob*. 2012;39(3):251–9.
- [7] Schluse M, Priggemeyer M, Roßmann J. The virtual robotics lab in education: Hands-on experiments with virtual robotic systems in the industry 4.0 era. *52nd Int Symp Robot ISR 2020*. 2020;191–8.
- [8] Wall T. Responsible consumption and production. 2021. 32–33 p.
- [9] Jalled F, Voronkov I. Object Detection using Image Processing. 2016;1–6. Available from: <http://arxiv.org/abs/1611.07791>
- [10] Cupek R, Drewniak M, Fojcik M, Kyrkjebø E, Lin JCW, Mrozek D, et al. Autonomous guided vehicles for smart industries – the state-of-the-art and research challenges. *Lect Notes Comput Sci (including Subser Lect Notes Artif Intell Lect Notes Bioinformatics)*. 2020;12141 LNCS:330–43.
- [11] Morihiro Y, Takahashi N, Nonaka K, Sekiguchi K. Model Predictive Load Distribution Control for Leg/Wheel Mobile Robots on Rough Terrain. *IFAC-PapersOnLine [Internet]*. 2018;51(22):441–6. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.594>
- [12] Li P, Yang H, Li H, Liang S. Nonlinear ESO-based tracking control for warehouse mobile robots with detachable loads. *Rob Auton Syst [Internet]*. 2021;149:103965.
- [13] Cao Y, Li Q, Yu L. A software for design and analysis of PMSM based on ANSYS. *2009 1st Int Conf Inf Sci Eng ICISE 2009*. 2009;78–81.
- [14] ANSYS Inc. ANSYS Manual - Release 5.6 [Internet]. Theory Reference. 1999. p. 1–1286. Available from: <http://research.me.udel.edu/~lwang/teaching/MEx81/ansys56manual.pdf>



## Derin Öğrenme Modellerinde Komşuluk Bileşen Analizi Yöntemi Kullanarak Çiçek Görüntülerinin Sınıflandırılması

Harun BİNGÖL<sup>1\*</sup>

<sup>\*1</sup> Yazılım Mühendisliği, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Malatya, Türkiye  
<sup>\*1</sup> harun.bingol@ozal.edu.tr

(Geliş/Received: 04/01/2022;

Kabul/Accepted: 03/02/2022)

**Öz:** Çiçekler tıpkı insanlar ve hayvanlar gibi doğanın yeri doldurulamaz canlılarıdır. Çiçekler birçok hastalığın tedavisinde tıp uzmanları tarafından kullanılmaktadır. İlaç şirketleri büyük araştırma laboratuvarlarında ilaç üretmek için devasa bütçeler ayırarak bu çiçek türleri üzerine araştırma yapmaktadırlar. Bazı çiçekleri gördüğümüz zaman hemen tanırız fakat doğada bizim bildiğimizden çok daha fazla çiçek türü mevcuttur. Hatta günümüzde hiç tanınmamış çiçek türleri bile vardır. Bu çalışmada çiçek türleri üzerine çalışan araştırmacıların, çiçek türlerini tespit etme işlerini kolaylaştırmak amacıyla çiçek görüntüleri derin öğrenme metotları kullanarak sınıflandırılmıştır. Derin öğrenme yöntemleri son zamanlarda özellikle görüntü işlemede yaygın bir şekilde kullanılmakta ve oldukça etkili sonuçlar vermektedir. Bu çalışmada altı farklı derin öğrenme yöntemi kullanılmıştır. İlk aşamada çiçek görüntüleri, önceden eğitilmiş olan Alexnet, Googlenet, Shufflenet, Efficientnetb0, Resnet50 ve Inceptionv3 mimarileri kullanarak sınıflandırılmıştır. İkinci aşamada ise bu altı mimariden elde edilen özellik haritaları KBA (Komşuluk Bileşen Analizi) yöntemi ile optimize edildikten sonra ayrı ayrı makine öğrenmesi sınıflandırıcılarında sınıflandırılmıştır. Üçüncü aşamada, önceden eğitilmiş bu altı derin öğrenme modelini kullanarak veri setindeki çiçek görüntülerinin özellik haritaları çıkarılmıştır. Bu altı derin öğrenme mimarisinden üç tanesi kullanılarak elde edilen özellik haritaları birleştirilmiştir. Daha sonra bu özelliklere algoritmanın çalışma zamanını kısaltmak için KBA metodu uygulanarak gereksiz özellikler çıkarılmış ve optimize edilmiştir. Optimize edilmiş olan özellik haritası klasik makine öğrenmesi sınıflandırıcılarında sınıflandırılmıştır. Deneysel çalışmalarımız sonucunda önermiş olduğumuz modelin doğruluk oranı yüzde 93.49'dur.

**Anahtar kelimeler:** Derin Öğrenme, ESA, Çiçek Görüntüleri, Sınıflandırıcılar, KBA

### Classification of Flower Images using Neighborhood Component Analysis Method in Deep Learning Models

**Abstract:** Flowers are irreplaceable creatures of nature, just like humans and animals. Flowers are used by medical professionals in the treatment of many diseases. Pharmaceutical companies devote huge budgets to producing drugs in large research laboratories and research these flower types. When we see some flowers, we immediately recognize them, but there are many more flower types in nature than we know. There are even species of flowers that have never been recognized today. In this study, flower images were classified using deep learning methods in order to make it easier for researchers working on flower species to identify flower species. Deep learning methods have recently been widely used especially in image processing and give very effective results. In this study, 6 different deep learning methods were used. In the first stage, flower images were classified using pre-trained Alexnet, Googlenet, Shufflenet, Efficientnetb0, Resnet50 and Inceptionv3 architectures. In the second stage, the feature maps obtained from these six architectures were optimized with the NCA (Neighborhood Component Analysis) method and classified in separate machine learning classifiers. In the third step, feature maps of flower images in the dataset were extracted using these six pre-trained deep learning models. The feature maps obtained using three of these six deep learning architectures were combined. Then, unnecessary features were removed and optimized by applying the NCA method to these features in order to shorten the running time of the algorithm. The optimized feature map is classified in classical machine learning classifiers. As a result of our experimental studies, the accuracy rate of the model we proposed is 93.49 percent.

**Key words:** Deep Learning, CNN, Flower Images, Classifiers, NCA

#### 1. Giriş

Çiçekler yüzyıllardır doğada var olan bir canlı türüdür. Antik çağlardan beri pek çok medeniyette sosyal ve dini açıdan çiçeğin her zaman önemli bir yeri olmuştur [1]. Bu canlıları insanlar farklı amaçları doğrultusunda kullanmaktadır. Renkli görüntüleri ve hoş kokularından ötürü insanların hep ilgisini çekmiştir. Bu canlıları insanlar özel günlerde birbirlerine hediye etmek için kullanabileceği gibi bir mekânın peyzaj süslemesinde de kullanmaktadır. Dahası insan ve hayvan hastalıklarını tedavi etmek için ilaç sanayisinde de kullanılmakta ve bu

\* Sorumlu yazar: [harun.bingol@ozal.edu.tr](mailto:harun.bingol@ozal.edu.tr). Yazarın ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-5071-4616

konu üzerine bilim dünyası sürekli çalışmaktadır. Çiçeklerin renklerinden ve sahip oldukları şekillerinden ötürü bir birlerinden ayırt etmek uzmanlık gerektiren oldukça zor bir iştir. Yeterince uzmanın bulunmadığı durumlarda ya da yeterince uzman olsa bile mevcut uzmanların çiçekleri bir birinden ayırt edip sınıflandırma işlemi için fazladan vakit harcamaması ve iş gücü kaybı yaşanmaması için derin öğrenme teknolojileri kullanılmaktadır. Derin öğrenme teknolojileri ile geliştirilmiş olan birçok model vardır. Görüntü işleme alanında en çok kullanılan model ise Evrimsel Sinir Ağı (ESA) modelidir. ESA modeli yapısı gereği vektörlerle çalışmaz bunun yerine ham görüntülerle yani matrislerle çalışmaktadır. Bu sayede uzman bilgisine ihtiyaç duyulmadan sınıflandırılması düşünülen görüntüleri ait özellikler otomatik olarak ortaya çıkarılmaktadır. Sınıflandırma, hangi sınıfa ait olduğu bilinmeyen görüntülerin önceden tanımlanmış olan sınıflardan birine dahil edilmesi olayıdır [2]. Bu olay sınıflandırılacak olan görüntüden elde edilen özellikler baz alınarak gerçekleşmektedir. Derin öğrenme yöntemleri ile sınıflandırma uygulamaları literatürde oldukça yaygın kullanılmaktadır. Çiçek türlerinin sınıflandırılması ile ilgili literatürdeki bazı çalışmalar şu şekildedir:

Saha ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada etiketli eğitim verilerinin olmadığı durumlarda kullanılacak, çiçek görüntülerinin segmentasyon işleminde derin öğrenme teknolojilerini kullanan yeni bir yöntem önermişlerdir. Önermiş oldukları yöntemin başarımı için denetimli yöntemlere benzer sonuçlar elde ettiklerini belirtmişlerdir [3].

Wang ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada elma çiçeğinin fenolojik aşamalarını tahmin etmek için derin öğrenmeye dayalı otomatik bir yöntem önermişlerdir. Kullanmış oldukları veri seti hem gece hem de gündüz görüntülerinden oluşmaktadır. Önermiş oldukları algoritmanın 0,235'lik bir Kullback-Leibler (KL) değeriyle çok daha iyi doğruluk elde ettiği belirtilmiş, YOLOv5l için KL değeri 0,511'de bunun neredeyse iki katı olduğunu ifade etmişlerdir [4].

Shi ve arkadaşlarının yapmış oldukları bu makalede, derin öğrenmeye dayalı bir çiçek görüntüsü otomatik tanıma sistemini önermişlerdir. Önermiş oldukları sistemde kullanıcı mobil akıllı telefon ile çiçek görüntülerini çekmekte ve bu çekilen görüntüsünü InceptionV3'e dayalı transfer öğrenimi ile yeniden eğitilen CNN ağına gönderdiklerini belirtmişlerdir. Deneyler esnasında veri seti olarak Oxford-17[5] ve Oxford-102[6] 'ye dayalı 32 çiçek kategorisi kullandıklarını belirtmişlerdir. Sınıflandırma doğruluğu diğer yöntemlerden daha yüksek olan yaklaşık olarak %95 oranlarına ulaştıklarını belirtmişlerdir. [7].

Jyothi ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada kendilerine ait nispeten büyük bir çiçek video veri setimiz üzerinde kapsamlı bir deney yapıldı. Kullanmış oldukları veri setinde 30 farklı çiçek sınıfına ait çiçek 2600'den fazla video olduğunu belirtmişlerdir. Deneysel çalışmalarda küme analizi kullanılarak seçilen ana karelere dayalı olarak çalıştığı vurgulanmıştır. Tüm ana kare, bir ana karenin parçalı çiçek bölgesi ve çiçek bölgesinin gradyanı ESA tarafından özellik çıkarımı için dikkate alındığını vurgulamışlardır. Sunulan model geleneksel öznitelik çıkarım yöntemleriyle karşılaştırılmış ve önerilen modelin erişim sonuçları açısından mevcut modellerden daha üstün olduğunu belirtmişlerdir [8].

Patel ve arkadaşı yaptıkları çalışmada çiçek nesne tespiti, lokalizasyonu ve sınıflandırması için NAS-FPN ve Faster R-CNN tabanlı derin bir ESA önermişlerdir. Deneyler esnasında ResNet 50, ResNet 101, Inception ResNet V2, Inception V2, NAS ve MobileNet V2 transfer öğrenme metodları ile 19679 çiçek görüntüsünü içeren çiçek 30 veri kümesi ve çiçek 102 veri kümesi üzerinde eğitildiği ve değerlendirildiği belirtilmektedir. Önerilen modelin, çiçekleri çok sınıflı sınıflandırma ve çoklu etiketleme teknikleri kullanarak çiçek adı, bölümü, sınıfı, alt sınıfı, sırası, ailesi ve bitki çiçeğini içeren diğer önemli ayrıntılarla birlikte tespit edebilir, konumlandırabileceği ve sınıflandırabileceği belirtilmiştir. Önerilen modelin 102 çiçek sınıfı veri setinde %87,6 ve 30 çiçek sınıfı veri setinde %96,2 mAP ile optimum sonuç verdiği belirtilmiştir [9].

Yapılan bu çalışmada çiçek görüntülerini derin öğrenme mimarileri kullanarak sınıflandırmak amacıyla hibrit bir model geliştirilmiştir. Geliştirmiş olduğumuz bu modelde üç farklı derin modelin özellik haritaları birleştirildikten sonra optimize edilmiştir. Optimize edilen özellik haritası Destek Vektör Makinesi (DVM) sınıflandırıcısı kullanılarak sınıflandırılmıştır.

Bu makalenin organizasyonu şu şekilde yapılmaktadır. Bölüm 2' de çiçek görüntülerinin sınıflandırılmasında kullanılan derin öğrenme mimarileri ve KBA boyut indirgeme yöntemi açıklanmaktadır. Ayrıca önermiş olduğumuz hibrit model bu bölümde detaylı bir şekilde verilmektedir. Bölüm 3'te çiçek görüntülerini sınıflandırmak için gerçekleştirilen deneysel sonuçlar verilmektedir. Bölüm 4'te algoritmaların başarımları üzerine yorumlar gerçekleştirilmekte ve son olarak Bölüm 5'de sonuçlar yorumlanmakta ve gelecekte yapılabilecek uygulamalar hakkında bilgiler verilmektedir.

## 2. Materyal ve Metot

Bu bölümde çalışmada kullanılan veri seti, ESA mimarileri, KBA boyut indirgeme yöntemi ve önermiş olduğumuz hibrit model açıklanmıştır.

### 2.1. Veri seti

Yapılan çalışmada kullanılan veri seti halka açık olan kaggle [10] web sitesinden alınmıştır. Bu veri setinde 4317 adet çiçek görüntüsü içeren papatya, karahindiba, gül, ayçiçeği ve lale olmak üzere 5 farklı çiçek türü mevcuttur. Veri setinden alınan örnek çiçekler Şekil 1’de gösterilmektedir. Veri setinde bulunan çiçek türlerine ait olan görüntü sayıları Tablo 1’de verilmektedir.



Şekil 1. Çiçek veri setinden örnek görüntüler

Tablo 1. Veri setindeki çiçek türlerine ait görüntü sayıları

Çiçek Adı	Karahindiba	Papatya	Ayçiçeği	Lale	Gül	Toplam
Görüntü Sayısı	1052	764	733	784	784	4317

### 2.2. ESA mimarileri ve KBA

Çalışmamızın bu bölümünde deneyler esnasında kullanılan 6 adet ESA mimarisi olan Alexnet, Googlenet, Shufflenet, Efficientnetb0, Resnet50 ve Inceptionv3 hakkında bilgi verilmektedir. Alexnet mimarisi, Krizhevsky ve arkadaşları [11] tarafından önerilen ve ilk olarak ImageNet LSVRC-2012 yarışmasında ortaya çıkan ve rekabetçi sonuçlar elde eden derin bir ESA mimarisidir [12]. Googlenet mimarisi aslında Inception mimarisini temel alan yalnız daha derin ve daha geniş bir modeldir. Bu mimari hesaplama verimliliği ve pratikliği göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır, böylece özellikle düşük bellek ve sınırlı hesaplama kaynaklarına sahip olan bireysel cihazlarda kullanılabilir [13]. Shufflenet çok kısıtlı hesaplama gücüne sahip olan mobil aygıtlar için geliştirilmiş oldukça başarılı sonuçlar üreten bir ESA mimarisidir [14]. EfficientNet mimarisi, sabit bir bileşik katsayı kullanarak ağırlık derinlik, genişlik ve görüntü çözünürlüğü gibi farklı boyutlarını aynı anda eşit bir şekilde ölçeklendirme ilkesine dayanmaktadır. Bu aile 8 farklı ESA mimarisini bünyesinde barındırır. Efficientb0’dan Efficientb7’ye kadar isimlendirilmektedir. Efficientb0,  $224 \times 224$  giriş boyutuna sahip temel sürümü temsil eder ve ters çevrilmiş darboğaz kalıntısı, sıkıştırma ve uyarma bloklarını temel alır [15]. Resnet50 modeli 2015 yılında He ve arkadaşları [16] tarafından geliştirilen bir ESA modelidir. Bu model aynı zamanda 2015 yılında yapılan ILSVRC ImageNet yarışmasının kazananıdır. Bu yarışmada Resnet50 mimarisi %3,6 hata oranıyla birinci olmuştur. Resnet50, derin ESA’nın eğitim sürecindeki zorlukları aşmaya çalışmakla beraber, algılama doğruluğunu artırmaya çalışır. Toplu normalleştirmeyi kullanan ilk mimarilerden biridir [17,18]. Inceptionv3 mimarisi Szegedy ve arkadaşları [19] tarafından inceptionv1 ve inceptionv2 modelleri geliştirilerek elde edilmiştir. Inceptionv3 modelini evrişim bloğu, başlangıç bloğu ve sınıflandırıcı bloğu olmak üzere üç bölümden oluşan bir model olarak tanımlamışlardır [20]. Bu model girdi verilerini  $299 \times 299$  boyutunda alır. Inceptionv3 modeli toplam 315 katmandan oluşmaktadır. Ayrıca aktivasyon katmanı olarak Relu katmanını kullanmaktadır. Normalleştirme için toplu normalleştirme ve ortaklama için maksimum ortaklama ve ortalama ortaklamayı birlikte kullanmaktadır [21].

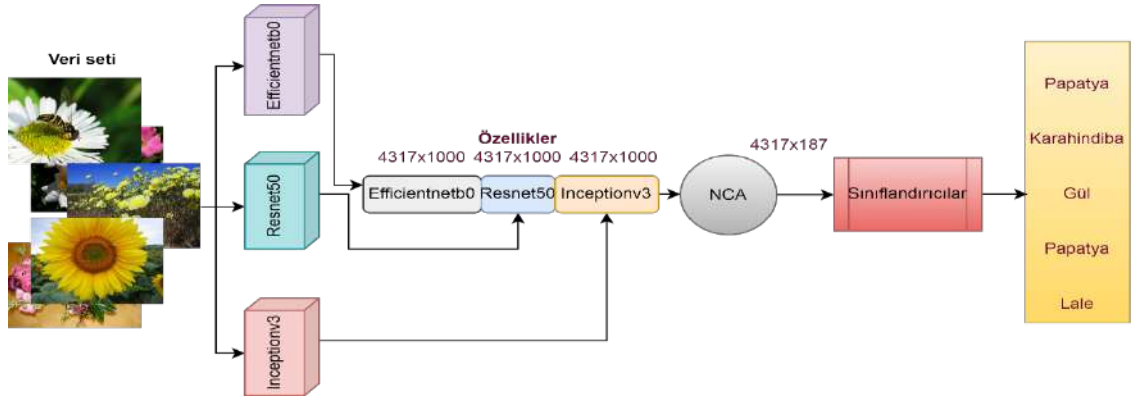
KBA, hesaplama maliyetini düşürmek ve küçük boyuta sahip daha kullanışlı özellik haritaları elde etmek için kullanılmaktadır. Bu yöntem sayesinde değerli olan bilgi kaybolmadan matris üzerinde optimizasyon işlemi yapılarak daha düşük boyutlu özellik haritaları elde edilir. KBA yöntemi, daha az değerli özellikleri bertaraf



etmekte ve zaman tüketim maliyetini azaltmada etkili olarak kullanılan yöntemlerdendir. Bu aynı zamanda sınıflandırma maliyetlerine de olumlu olarak yansımaktadır.

### 2.3. Önerilen hibrit model

Yapılan bu çalışmada son yıllarda oldukça popüler olan Efficientnetb0, Resnet50 ve Inceptionv3 mimarileri taban olarak kullanılmıştır. Bu mimariler sayesinde çiçek veri setindeki görüntülerin farklı özellikleri elde edilmiştir. Her bir mimaride elde edilen özellik haritasının boyutu 4317 x 1000'dir. Daha sonra elde edilen özellik haritaları birleştirilerek 4317 x 3000 boyutunda bir özellik haritası elde edilmiştir. Elde edilen özellik haritasının boyutunu indirmek için KBA boyut indirgeme yöntemi kullanılmıştır. KBA boyut indirgeme yöntemi uygulandıktan sonra elde edilen özellik haritasının boyutu 4317 x 187 olmuştur. Son olarak optimize edilen özellik haritası klasik makine öğrenmesi sınıflandırıcılarında sınıflandırılmıştır. Önermiş olduğumuz yöntem a ait blok diyagram Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Önerilen yöntemin blok diyagramı

### 3. Deneysel Sonuçlar

Bu çalışmamız Matlab 2021b ortamında i5 işlemcili, 8 GB ram ve Geforce GTX1650 4GB ekran kartına sahip olan bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada modellerin performans metriklerini değerlendirmek için karışıklık matrisi kullanılmıştır. DP (Doğru Pozitif), YP (Yanlış Pozitif), YN (Yanlış Negatif) ve DN (Doğru Negatif)'tir. Tablo 2'de karmaşıklık matrisine örnek verilmiştir.

Tablo 2. Karmaşıklık matrisi

Doğru Sınıf	1	DP	YP
	2	YN	DN
		1	2
		Tahmin Sınıf	

Çalışmada kullanılan başarımlar ölçüm matrisleri karışıklık matrisi kullanılarak hesaplanmaktadır. Yapılan çalışmada modellerin başarımlarını değerlendirmek için doğruluk, duyarlılık, özgünlük ve f\_ölçütü değerlendirme ölçütleri kullanılmıştır [22].

$$Doğruluk = \frac{DP+DN}{DP+DN+YP+YN} \quad (1)$$

$$Duyarlılık = \frac{DP}{DP+YN} \quad (2)$$

$$Özgünlük = \frac{DN}{DN+YP} \quad (3)$$

$$F\_ölçütü = \frac{2*DP}{(2*DP+YP+YN)} \quad (4)$$

Çalışmamızda öncelikle önermiş olduğumuz modelin performansını karşılaştırmak için önceden eğitilmiş altı farklı ESA mimarisinde sonuçlar alınmıştır. Bu mimarilerde alınan doğruluk değerleri Tablo 3'te verilmektedir.

**Tablo 3.** ESA mimarilerinden alınan doğruluk değerleri

Alexnet	Googlenet	Shufflenet	Efficientb0	Resnet50	Inceptionv3
87,96	90,39	87,85	90,28	91,55	92,82

Tablo 3 incelendiğinde 6 farklı ESA mimarisi içinde en yüksek doğruluk değerinin %92,82 değeri ile Inceptionv3, en düşük doğruluk değerini %87,85 değeri ile Shufflenet mimarisi vermiştir. Tablo 4'te 6 ESA mimarisinin doğruluk değerlerini gösteren karmaşıklık matrisleri gösterilmektedir.

**Tablo 4.** ESA mimarilerine ait karmaşıklık matrisleri

Alexnet						Googlenet							
Doğru Sınıf	1	141	6	2	1	3	Doğru Sınıf	1	145	3	2	3	
	2	7	191	1	7	4		2	6	192	1	8	3
	3	3	1	143	1	9		3		2	143		12
	4	2	12	2	130			4	1	8	5	130	3
	5	4	8	25	5	155		5		4	19	3	171
Tahmini Sınıf						Tahmini Sınıf							
Shufflenet						Efficientnetb0							
Doğru Sınıf	1	135	10	2	2	4	Doğru Sınıf	1	142	5	2	4	
	2	11	185	2	6	6		2	3	197		7	3
	3	1	1	141	2	12		3	3	2	138	4	10
	4	3	11	2	128	3		4	3	6	4	131	3
	5	1	1	23	2	170		5	1	5	14	5	172
Tahmini Sınıf						Tahmini Sınıf							
Resnet50						Inceptionv3							
Doğru Sınıf	1	141	8	1	2	1	Doğru Sınıf	1	146	4	1	2	
	2	9	198		2	1		2	3	205			2
	3	2		143		12		3		1	141		15
	4	3	5	2	135	2		4	2	5	1	137	2
	5	2	4	15	2	174		5		4	18	2	173
Tahmini Sınıf						Tahmini Sınıf							

Çalışmada kullanılan 6 farklı ESA mimarisinde en yüksek doğruluk değeri Inceptionv3 mimarisinde elde edilmiştir. Bu mimaride toplam 864 tane çiçek görüntüsünden 802 tanesi doğru tahmin edilirken, 62 tanesi ise model tarafından yanlış tahmin edilmiştir.

Çalışmamızın ikinci adımda çalışmada kullanılan 6 ESA mimarisinden ayrı ayrı elde edilen özellik haritaları KBA boyut indirgeme yöntemi ile optimize edildikten sonra DVM sınıflandırıcısında sınıflandırılmıştır. KBA yönteminde 0,0005'den küçük değerler elemine edilmiştir. 6 ESA mimarisinden elde edilen özellik katmanı ve özellik sayıları Tablo 5'de verilmiştir.

**Tablo 5.** Mimariler, özellik haritalarının elde edildiği katman ve özellik sayıları

	<b>Alexnet</b>	<b>Googlenet</b>	<b>Shufflenet</b>	<b>Efficientnetb0</b>	<b>Resnet50</b>	<b>Inceptionv3</b>
<b>Katman</b>	Fc8	loss3-classifier	node_202	efficientnet-b0 model head dense MatMul	Fc1000	predictions
<b>Özellik Sayısı</b>	1000	1000	1000	1000	1000	1000
<b>KBA'lı özellik sayısı</b>	355	155	271	652	293	379
<b>Doğruluk değerleri</b>	87	87.7	89.2	<b>92.1</b>	<b>90.9</b>	<b>89.6</b>

Çalışmada kullanılan 6 farklı ESA mimarisinden elde edilen özellik haritaları KBA yöntemi ile optimize edildikten sonra en yüksek doğruluk değeri %92.1 ile Efficientnetb0 mimarisinde elde edilirken, en düşük doğruluk değeri ise %87 ile Alexnet mimarisinde elde edilmiştir. Elde edilen karmaşıklık matrisleri Tablo 6'da verilmiştir.

**Tablo 6.** ESA mimarilerinin sınıflandırıcılara verildikten sonraki karmaşık matrisleri

<b>Alexnet + SVM</b>						<b>Googlenet + SVM</b>							
Doğru Sınıf	1	665	42	21	21	25	Doğru Sınıf	1	651	53	13	25	22
	2	32	957	7	42	14		2	34	965	7	30	16
	3	15	6	654	10	99		3	13	1	662	10	98
	4	16	33	10	652	22		4	20	22	8	666	17
	5	16	13	95	21	839		5	14	18	90	18	844
			1	2	3	4		5			1	2	3
Tahmini Sınıf						Tahmini Sınıf							
<b>Shufflenet + SVM</b>						<b>Efficientnetb0 + SVM</b>							
Doğru Sınıf	1	664	46	15	15	24	Doğru Sınıf	1	686	33	12	16	17
	2	36	976	8	17	15		2	28	994	5	16	9
	3	9	6	685	10	74		3	8	8	706	6	58
	4	11	27	16	661	18		4	7	22	8	683	13
	5	12	15	78	14	865		5	8	13	46	10	907
			1	2	3	4		5			1	2	3
Tahmini Sınıf						Tahmini Sınıf							
<b>Resnet50 + SVM</b>						<b>Inceptionv3 + SVM</b>							
Doğru Sınıf	1	676	40	11	16	21	Doğru Sınıf	1	677	34	12	25	16
	2	28	985	6	17	16		2	17	980	4	27	24
	3	7	5	705	10	57		3	7	6	671	23	77
	4	7	24	13	679	10		4	12	21	20	658	22
	5	10	15	64	18	877		5	7	12	66	15	884
			1	2	3	4		5			1	2	3
Tahmini Sınıf						Tahmini Sınıf							

Çalışmada kullanılan 6 farklı ESA mimarisinden elde edilen özellik haritaları optimize edildikten sonra DVM sınıflandırıcısında sınıflandırılmıştır. En yüksek doğruluk değeri Inceptionv3 mimarisinde elde edilmiştir. Bu mimaride toplam 4317 tane çiçek görüntüsünden 3870 tanesi doğru tahmin edilirken, 447 tanesi ise model tarafından yanlış tahmin edilmiştir. Son olarak Tablo 6’da en yüksek doğruluk değerine ulaşan ve koyu olarak gösterilen 3 mimariden elde edilen özellik haritaları birleştirilmiştir. Her bir mimaride elde edilen özellik haritasının boyutu 4317 x 1000 iken, birleştirme işleminden sonra elde edilen özellik haritasının boyutu 4317 x 3000’dir. Daha sonra elde edilen özellik haritasının boyutu KBA yöntemi ile optimize edildikten sonra elde edilen yeni boyut 4317 x 187 olmuştur. Önerilen modelin doğruluk değeri %93,49 elde edilmiştir. Önerilen modelde elde edilen karmaşıklık matrisi Tablo 7’de gösterilmektedir.

**Tablo 7.** Önerilen modelin karmaşıklık matrisi

Doğru Sınıf	1	699	34	9	10	12
	2	8	1015	2	11	16
	3	7	1	718	6	52
	4	6	17	8	692	10
	5	5	11	43	13	912
		1	2	3	4	5
		Tahmini Sınıf				

Önermiş olduğumuz model 4317 çiçek görüntüsünden 4036 tanesini doğru sınıflandırırken 281 tanesini yanlış sınıflandırmıştır. Önermiş olduğumuz modelde elde edilen ortalama doğruluk değeri %93,49 olmuştur. Elde edilen bu ortalama doğruluk değeri önerilen modelin, deneyler esnasında kullanılan standart ESA mimarilerinin üretmiş olduğu doğruluk değerlerinden yüksektir. Modelimizde elde edilen performans değerlendirme ölçütleri Tablo 8’de gösterilmektedir.

**Tablo 8.** Önerilen modelin performans değerlendirilmesi

	Doğruluk	Duyarlılık	Özgünlük	F Ölçütü
<b>Papatya</b>	91,49	96,41	98,19	93,28
<b>Karahindiba</b>	96,48	94,16	98,85	95,30
<b>Gül</b>	91,58	92,05	98,13	91,81
<b>Ayçiçeği</b>	94,41	94,54	98,85	94,47
<b>Lale</b>	92,68	91,02	97,82	91,84

#### 4. Tartışma

Çiçek sınıflandırma işlemleri, geleneksel olarak insanlar tarafından göz yardımıyla sınıflandırılması işlemleri gerçekleştirilirken çiçek sayısının çok fazla olması, görüntünün yeterince net olmaması, işlemlerin çok zaman alması ve yeterince uzmanın bulunmaması gibi birçok sorunla karşılaşmaktadır. Bir diğer sorun ise çiçeğe ait yaprak, diken, dal gibi elemanların sınıflandırma başarımını olumsuz etkilemesidir.

Günümüzde teknolojinin gelişmesi ile birlikte çiçek görüntülerinin sınıflandırma işlemleri, bilinmeyen çiçek türlerinin ortaya çıkarılmasında ya da bilinen bir çok çiçek türüne ait bir çok çiçek görüntüsü içinden bir birine çok benzeyen çiçeklerin göz yanılması gibi durumlardan etkilenmeyerek geleneksel yöntemlere kıyasla çok daha kısa sürede ve daha yüksek başarımla yapay zeka yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Deneyler esnasında kullanılan veri setini kullanan diğer çalışmalar Tablo 9’da gösterilmektedir.

**Tablo 9.** Deneysel çalışmalarda aynı veri kümesini kullanan bilimsel çalışmalar

Akademik çalışma	Kullanılan Metot	Doğruluk (%)
Guo ve ark. [23]	ESA, Genetik algoritma	74,34
Luus ve ark. [24]	ESA, Boyut indirgeme, Yarı denetimli öğrenme	79,33
Toğaçar ve ark. [25]	ESA, Özellik seçim yöntemi	91,10
<b>Önerilen yöntem</b>	ESA, KBA	<b>93,49</b>

Önermiş olduğumuz yöntemi, bizim bildiğimiz kadarıyla, aynı veri kümesini kullanan diğer çalışmalar ile karşılaştırmasını Tablo 9’da gösterilmektedir. Tablo 9 incelendiğinde önermiş olduğumuz metodun, en yüksek başarımla elde eden çalışmadan yaklaşık olarak %2,39 daha yüksek başarımla çiçek görüntülerini sınıflandırdığı görülmektedir.

## 5. Sonuçlar

Derin öğrenme yöntemleri günümüzde görüntü işleme ve sınıflandırma uygulamalarında yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Çiçek görüntülerinin derin öğrenme yöntemleri kullanılarak sınıflandırılmasına olan gereksinim son yıllarda giderek artmış durumdadır. Yapılan bu çalışmada 4317 adet çiçek görüntüsünden oluşan 5 adet çiçek sınıfını bünyesinde ihtiva eden halka açık veri kümesi kullanılarak derin öğrenme yöntemleri ve özellik seçim metotları birlikte kullanılarak sınıflandırma uygulaması gerçekleştirilmiştir. Önerilen modelin doğruluğu %93,49’dur.

Gerçekleştirilen bu çalışmada kullanılan ESA mimarileri, KBA boyut indirgeme yöntemi ve DVM sınıflandırıcısı çiçek görüntüleri üzerinde oldukça etkili sonuçlar göstermiştir. Kullanılan bu mimariler ve yöntemler insan hastalıklarının tespit ve teşhisinde de etkili bir şekilde kullanılabilir.

Yapılan bu çalışma göstermiştir ki, bir görüntüye ait tüm özellikler kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırma işlemi yapmak yerine çok daha az sayıda nitelikli özellik seçilerek daha iyi başarımla gösteren sınıflandırma işlemi gerçekleştirilebilmektedir. İleriki çalışmalarda daha başarılı sonuçları elde etmemize olanak sağlayacak olan hem derin öğrenme yöntemleri hem de özellik seçim metotları araştırılacak ve çiçek görüntülerinin sınıflandırılması uygulamalarında kullanılmaya çalışılacaktır.

## Kaynaklar

- [1] Bulut, Y., Akpınar, E., Yılmaz, H. (2007). Erzurum kentinin kesme çiçek tüketim potansiyelinin belirlenmesi ve çözüm önerileri.
- [2] Sonka, M., Hlavac, V., Boyle, R. (2014). Image processing, analysis, and machine vision. Cengage Learning.
- [3] Saha, S., Sheikh, N., Banerjee, B., Pendurkar, S. (2020). Self-supervised Deep Learning for Flower Image Segmentation. In 2020 14th International Conference on Innovations in Information Technology (IIT) (pp. 126-130). IEEE.
- [4] Wang, X. A., Tang, J., Whitty, M. (2021). DeepPhenology: Estimation of apple flower phenology distributions based on deep learning. Computers and Electronics in Agriculture, 185, 106123.
- [5] Anisi, D. A. (2003). Optimal motion control of a ground vehicle (Doctoral dissertation, Master’s thesis. Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden).
- [6] Jacques Cohen (Ed.). 1996. Special Issue: Digital Libraries. Commun. ACM 39, 11 (Nov. 1996).
- [7] Shi, L., Li, Z., Song, D. (2019). A flower auto-recognition system based on deep learning. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 234, No. 1, p. 012088). IOP Publishing.
- [8] Jyothi, V. K., Guru, D. S., YH, S. K. (2018). Deep learning for retrieval of natural flower videos. Procedia computer science, 132, 1533-1542.
- [9] Patel, I., Patel, S. (2020). An Optimized Deep Learning Model for Flower Classification Using NAS-FPN and Faster R-CNN. International Journal of Scientific & Technology Research, 9(03), 5308-5318.
- [10] Alexander Mamaev. Flowers Recognition | Kaggle, 2 Ocak 2022, URL-7, <https://www.kaggle.com/alxmamaev/flowers-recognition>
- [11] Krizhevsky, A., Sutskever, I., Hinton, G. E. (2012). Imagenet classification with deep convolutional neural networks. Advances in neural information processing systems, 25, 1097-1105.
- [12] Lu, S., Lu, Z., Zhang, Y. D. (2019). Pathological brain detection based on AlexNet and transfer learning. Journal of computational science, 30, 41-47.
- [13] Szegedy, C., Liu, W., Jia, Y., Sermanet, P., Reed, S., Anguelov, D., ... & Rabinovich, A. (2015). Going deeper with convolutions. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition (pp. 1-9).

- [14] Zhang, X., Zhou, X., Lin, M., Sun, J. (2018). Shufflenet: An extremely efficient convolutional neural network for mobile devices. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition (pp. 6848-6856).
- [15] Samia, B., Boudjelal, M., Lézoray, O. (2021). Skin lesion classification using convolutional neural networks based on Multi-Features Extraction. In 19th International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns (CAIP 2021).
- [16] He, K., Zhang, X., Ren, S., Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition (pp. 770-778).
- [17] Çinar, A., Yildirim, M. (2020). Detection of tumors on brain MRI images using the hybrid convolutional neural network architecture. Medical hypotheses, 139, 109684.
- [18] Bingol, H., Alatas, B. (2021). Classification of Brain Tumor Images using Deep Learning Methods. Turkish Journal of Science and Technology, 16(1), 137-143.
- [19] Szegedy, C., Vanhoucke, V., Ioffe, S., Shlens, J., & Wojna, Z. (2016). Rethinking the inception architecture for computer vision. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition (pp. 2818-2826).
- [20] Lin, C., Li, L., Luo, W., Wang, K. C., Guo, J. (2019). Transfer learning based traffic sign recognition using inception-v3 model. Periodica Polytechnica Transportation Engineering, 47(3), 242-250.
- [21] Eroglu, Y., Yildirim, M., Cinar, A. (2021). mRMR-based hybrid convolutional neural network model for classification of Alzheimer's disease on brain magnetic resonance images. International Journal of Imaging Systems and Technology.
- [22] Eroglu, Y., Yildirim, K., Çinar, A., Yildirim, M. (2021). Diagnosis and grading of vesicoureteral reflux on voiding cystourethrography images in children using a deep hybrid model. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 210, 106369.
- [23] Guo, Hu, Wu, Peng, Wu. The Tabu\_Genetic Algorithm: A Novel Method for Hyper-Parameter Optimization of Learning Algorithms, Electronics. 2019;8(5):579. URL-16, <https://www.mdpi.com/2079-9292/8/5/579>
- [24] Luus F, Khan N, Akhalwaya I. Active Learning with TensorBoard Projector. 2019;1-7. URL-17, <http://arxiv.org/abs/1901.00675>
- [25] Toğaçar, M., Ergen, B., Özyurt, F. (2020). Evrışimsel Sinir Ağı Modellerinde Özellik Seçim Yöntemlerini Kullanarak Çiçek Görüntülerinin Sınıflandırılması. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 32(1), 47-56.



## MFCC Yöntemi ve Önerilen Derin Model ile Çevresel Seslerin Otomatik Olarak Sınıflandırılması

Muhammed YILDIRIM<sup>1\*</sup>

<sup>\*1</sup> Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Malatya, Türkiye  
<sup>\*1</sup> muhammed.yildirim@ozal.edu.tr

(Geliş/Received: 11/01/2022;

Kabul/Accepted: 03/02/2022)

**Öz:** Gelişen teknoloji ile birlikte farklı teknolojileri bir araya getirmede Nesnelerin İnterneti (IoT) ön plana çıkmaktadır. Nesnelerin interneti özellikle akıllı şehir uygulamalarında da sıklıkla kullanılmaktadır. Akıllı şehir uygulamaları her geçen gün daha da yaygın bir hale gelmektedir. Yapılan bu çalışmada da akıllı şehir uygulamalarında sıklıkla kullanılacak bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada çevre seslerinden oluşan ve bu konuda literatürdeki en büyük veri setlerinden biri olan UrbanSound8K veri seti kullanılmıştır. Akıllı şehir uygulamalarına katkıda bulunmak amacıyla çevresel sesleri sınıflandırmak için yeni bir derin tek boyutlu (1D-CNN) model önerilmiştir. Geliştirilen modelde ilk olarak Mel-frekans kepstrogram katsayısı (MFCC) kullanılarak veri setindeki çevresel seslerin öznelik haritaları elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen öznelik haritaları geliştirilen 1D-CNN ağında sınıflandırıldığında yüksek bir doğruluk değeri elde edilmiştir. Elde edilen bu doğruluk değeri önerilen modelin ses verilerini sınıflandırma işleminde kullanılabileceğini göstermektedir.

**Anahtar kelimeler:** Sınıflandırma, MFCC, Derin Öğrenme, IoT, Akıllı Şehirler

### Automatic Classification of Environmental Sounds with the MFCC Method and the Proposed Deep Model

**Abstract:** With the developing technology, the Internet of Things (IoT) is at the forefront of bringing different technologies together. The Internet of Things is also frequently used, especially in smart city applications. Smart city applications are becoming more common day by day. In this study, an application that will be used frequently in smart city applications has been realized. In this study, the UrbanSound8K dataset, which consists of environmental sounds and is one of the largest datasets in the literature, was used. A new deep one-dimensional (1D-CNN) model is proposed to classify environmental sounds to contribute to smart city applications. In the developed model, firstly, the feature maps of the environmental sounds in the data set were obtained by using the mel-frequency cepstrum (MFCC) method. A high accuracy value was obtained when the feature maps obtained later were classified in the developed 1D-CNN network. This accuracy value obtained shows that the proposed model can be used in the classification process of audio data.

**Key words:** Classification, MFCC, Deep Learning, IoT, Smart Cities

#### 1. Giriş

Şehirleri verimli, teknolojik olarak daha gelişmiş, daha yeşil ve sosyal olarak daha kapsayıcı hale getirmeye yönelik teknolojiler her geçen gün artmaktadır [1]. Gelişen teknolojiyle birlikte akıllı şehir kavramı her geçen gün daha popüler bir hale gelmeye başlamıştır. Akıllı şehir kavramının ortaya çıkmasında IoT teknolojisinin payı oldukça yüksektir [2]. Nesnelerin interneti, elektronik cihazları internete bağladığından dolayı şehirler üzerinde ciddi anlamda olumlu bir etkiye sahiptir [3]. Bu cihazlardan üretilen ses sinyalleri farklı amaçlar için kullanılabilir. Gerçek zamanlı seslerin IoT cihazları sayesinde toplanıp, sınıflandırılması büyük bir önem arz etmektedir. Ses sinyalleri her geçen gün araştırmacılar tarafından yaygın olarak tartışılan sıcak bir konu olmaya başlamıştır. Çevresel seslerin sınıflandırılması önemli ve zorlu bir problemdir [4, 5].

Yapılan bu çalışmada IoT ağlarının ve akıllı şehir uygulamalarının artmasından dolayı çevresel seslerden oluşan bir veri seti kullanılarak çevresel seslerin sınıflandırılması yapılmıştır. Son dönemlerde sınıflandırma konusunda derin öğrenme mimarileri oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [6]. Derin öğrenme yöntemleri görüntü, metin ve ses sınıflandırma gibi alanlarda yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Derin öğrenme mimarilerinin büyük veri setlerinde başarılı olması ve bu mimarilerin özellik haritalarını otomatik çıkarması gibi sebeplerden dolayı derin öğrenmeye olan ilgi artmıştır. Derin öğrenme mimarileri birbirini takip eden katmanlardan oluşmaktadır. Bu mimariler, bir katmanın çıkışı diğer bir katmanın girişi olacak şekilde

\* Sorumlu yazar: [muhammed.yildirim@ozal.edu.tr](mailto:muhammed.yildirim@ozal.edu.tr). Yazarın ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0003-1866-4721



tasarlanmaktadır. Derin öğrenme mimarilerinde katman sayısının belirli bir kriteri yoktur. Bundan dolayı literatürde kabul görmüş mimarilerin katman sayıları birbirlerinden farklıdır [7].

Derin öğrenme, biyomedikal görüntülerden hastalık teşhisi ve derecelendirilmesi [8], sürücüsüz arabalar [9], nesnelerin interneti [10], video işleme ve görüntü sınıflandırma gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [11]. Ayrıca son dönemlerde derin öğrenme mimarileri ses sinyallerinin sınıflandırılması sürecinde de kullanılmaya başlanmıştır. Bu konuda yapılmış farklı alanlarda çalışmalar mevcuttur.

### 1.1. Literatür Araştırması

Son yıllarda yapay zekâ yöntemleri kullanılarak ses sınıflandırması sıklıkla yapılmaktadır. Çevresel seslerin sınıflandırılmasında da yapılmış çalışmalar mevcuttur.

Song ve arkadaşları yapmış oldukları bu çalışmada çevre seslerini sınıflandırmak için Urbansound8K veri setini kullanmışlardır. Çevre seslerini sınıflandırmak için evrişimsel tekrarlayan sinir ağlarını (CRNN) kullanmışlardır. Araştırmacılar yaptıkları bu çalışmada 4 farklı model önermişlerdir. Bu modeller Keras ve Tensorflow ortamlarında yürütülmüştür. Araştırmacılar önerdikleri modellerde sırasıyla %67.41, %73.92, %77.06 ve %68.07 oranlarında doğruluk değerleri elde etmişlerdir [12].

Chen ve arkadaşları UrbanSound8K veri setini kullanarak çevresel sesleri sınıflandırmayı amaçlamışlardır. Araştırmacılar veri setindeki çevresel sesleri sınıflandırmak için CNN tabanlı bir model önermişlerdir. Ayrıca araştırmacılar yaptıkları bu çalışmada katman sayısının başarımlar üzerindeki etkisini de incelediklerini belirtmişlerdir. Önerilen bu modelde %78 oranında bir doğruluk değeri elde edilmiştir [13].

Demir ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada UrbanSound8K veri setindeki çevresel sesleri sınıflandırmak için Sort Time Fourier Dönüşümünü (STFT) kullanarak ses dosyalarını görüntüye dönüştürmüşlerdir. Araştırmacılar, ses görüntülerini oluşturduktan sonra önceden eğitilmiş Evrişimsel sinir ağları (Convolutional Neural Network-CNN) mimarilerini kullanmışlardır. Önerilen modelde VGG16, VGG19 ve Densenet201 mimarileri özellik çıkarımı için kullanılmıştır. Elde edilen özellik haritaları SVM sınıflandırıcısında sınıflandırılmıştır. Yapılan bu çalışmada önerilen modelde %78.14 oranında bir doğruluk değeri elde edilmiştir [14].

Davis ve arkadaşları yaptıkları bu çalışmada UrbanSound8K veri setindeki çevresel sesleri sınıflandırmak için CNN tabanlı bir model önermişlerdir. Araştırmacılar önerdikleri modelin başarımlarını artırmak için veri artırma tekniklerini kullanmışlardır. Ayrıca yapılan çalışmada çevresel ses analizi için en iyi büyütme tekniğinin hangisi olduğunun belirlenmesi için farklı büyütme yöntemleri kullanılmıştır. Araştırmacılar veri büyütme yöntemleri içerisinde en başarılı yöntemin LPCC olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan bu çalışmada orijinal veri setinde %67.8 oranında bir doğruluk değeri elde edilmiştir [15].

Piczak ve arkadaşları yapmış oldukları bu çalışmada çevresel sesleri sınıflandırmak için MFCC yöntemini kullanarak özellik çıkarımı yapmışlardır. Yapılan bu çalışmada UrbanSound8K veri seti kullanılmıştır. Araştırmacılar maksimum ortaklama katmanı ile birlikte 2 evrişim katmanı ve 2 tam bağlantılı katmandan oluşan bir model önermişlerdir. Önerilen bu modelde %72.7 oranında bir doğruluk değeri elde edilmiştir [16].

Salamon ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada çevresel seslerin sınıflandırılması için UrbanSound8K veri setini kullanmışlardır. Araştırmacılar yaptıkları çalışmada çevresel seslerin az olmasından dolayı veri çoğullaması yaptıklarını belirtmişlerdir. Önerilen CNN tabanlı modelde çevresel seslerin sınıflandırılmasında %73 oranında bir doğruluk değeri elde edilmiştir [17].

### 1.2. Yenilik ve Katkılar

Bu çalışmada UrbanSound8K veri seti kullanılarak çevresel seslerin sınıflandırılması amaçlanmıştır. Nesnelerin interneti ağının ve bulut bilişim teknolojilerin gelişmesi beraberinde akıllı şehir kavramını da getirmiştir. Yapılan bu çalışmada akıllı şehirlerde çevresel seslerin sınıflandırılması için bu konuda en büyük veri setlerinden biri olan UrbanSound8K veri seti kullanılmıştır. Bu veri setindeki ses sinyallerinin öznelik haritalarının elde edilmesinde literatürde yaygın olarak kullanılan MFCC yöntemi kullanılmıştır. Daha sonra elde edilen öznelik haritaları geliştirdiğimiz model ile sınıflandırılmıştır. Önerilen modelimizde elde ettiğimiz performans metrikleri diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında yüksek bir performansın elde edildiği görülmektedir. Modelimizin çevresel seslerin sınıflandırılmasında elde ettiği doğruluk değeri %84.02'dir.

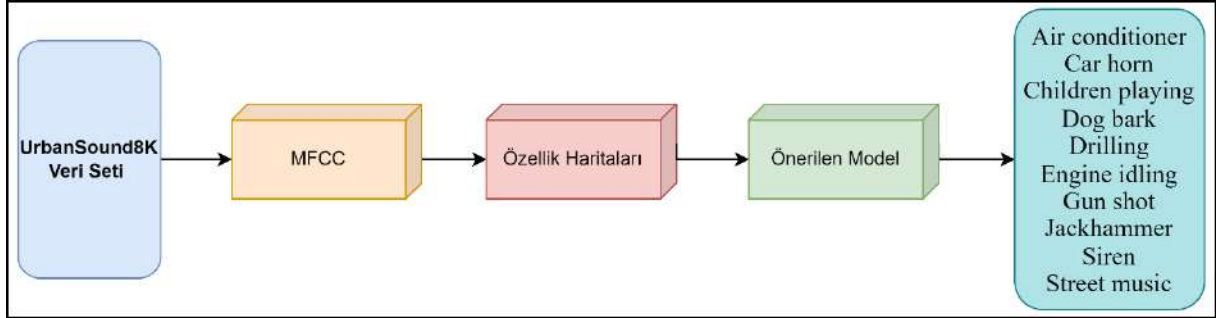
### 1.3. Makalenin Organizasyonu

Çalışmanın ilk aşamasında genel bilgi sağlamaya ve literatür taramasına odaklanılmıştır. Ayrıca birinci bölümde çalışmanın amacına ve çalışmadaki yeniliklere değinilmiştir. İkinci bölümde kullanılan veri seti,

geliştirilen model ve MFCC yöntemi incelenmiştir. Üçüncü bölümde, çalışmanın uygulama sonuçları, performans ölçütleri ve elde edilen sonuçlara yer verilmiştir. Dördüncü bölüm tartışma ve son bölüm ise sonuç bölümüdür.

## 2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada çevresel sesleri sınıflandırmak için UrbanSound8K veri seti kullanılmıştır. Önerilen model ile veri setindeki bu çevresel sesler sınıflandırılmıştır. Şekil 1, önerilen modelin blok diyagramını göstermektedir.



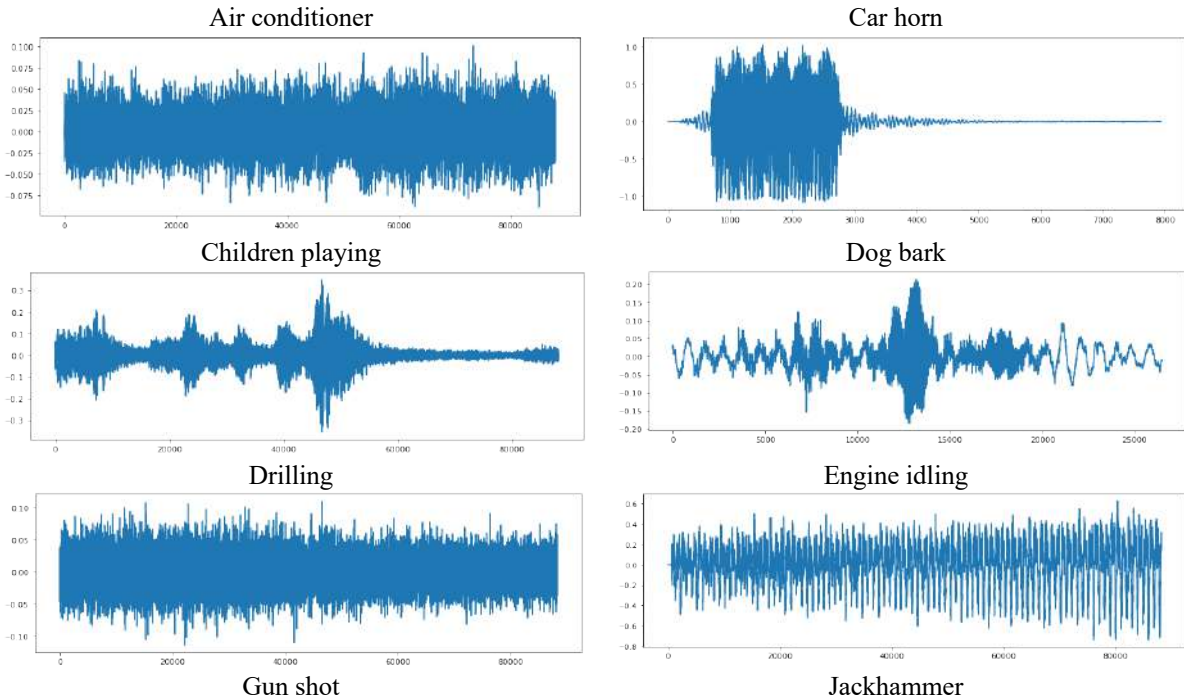
Şekil 1. Önerilen Modelin Kabaca Gösterimi

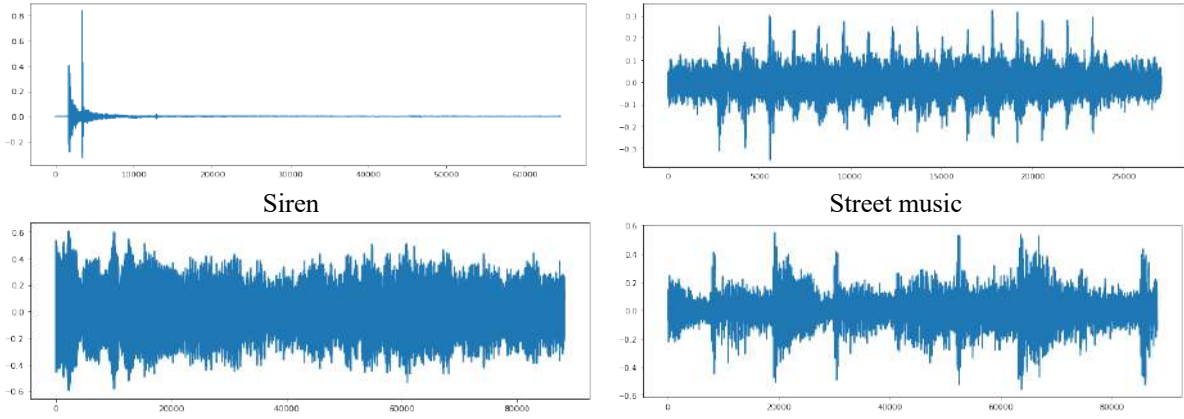
Bu bölümde çalışmada kullanılan veri seti, ses verilerinden öznelik çıkarmak için kullanılan MFCC yöntemi ve ses verilerini sınıflandırmak için geliştirilen model detaylı olarak incelenmiştir.

### 2.1. Veri Seti

Yapılan bu çalışmada çevresel sesleri sınıflandırmak için UrbanSound8K veri seti kullanılmıştır [18]. UrbanSound8K veri seti çevresel seslerden oluşan literatürdeki en büyük veri setlerinden biridir. Bu veri seti toplamda 9,7 saat olmak üzere 4 saniyeye kadar süreli 8732 etiketli çevresel ses verisinden oluşmaktadır [12]. UrbanSound8K veri setindeki çevresel sesler dış ortamdan elde edildiğinden dolayı gürültü oranı yüksektir. Bundan dolayı UrbanSound8K veri setindeki çevresel sesleri sınıflandırmak oldukça zorlu bir süreçtir.

UrbanSound8K veri seti 10 farklı sınıftan oluşmaktadır. Çalışmada kullanılan ses dosyalarının sinyal olarak gösterimi Şekil 2'de verilmiştir.

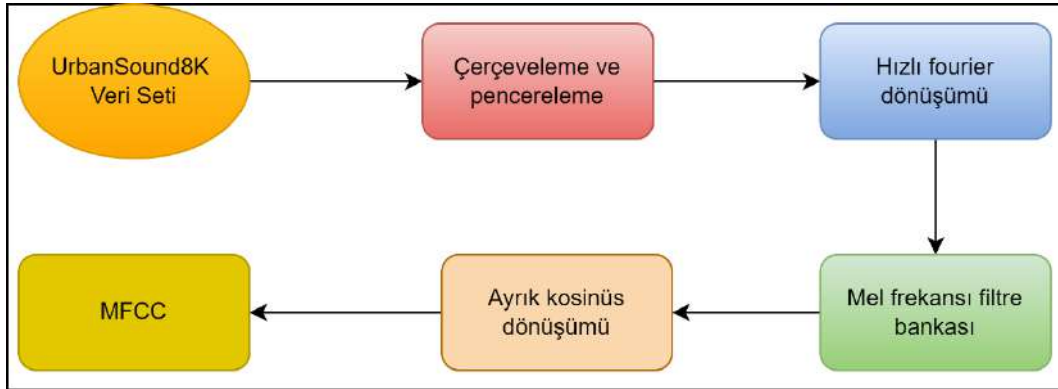




Şekil 2. Çevresel seslerin sinyal olarak gösterimi

## 2.2. MFCC Özellik Çıkarım Yöntemi

Bu çalışmada UrbanSound8K veri setindeki çevresel seslerin özelliklerini çıkarmak için çok önemli bir Python paketi olan Librosa Kütüphanesi kullanılmıştır. Bu kütüphane, ses sinyali kayıtlarını değerlendirmek için kullanılır. Bu çalışmada, çevresel seslerin özellik haritalarını elde etmek için Mel-frekans kepstrum katsayısı (MFCC) yöntemi kullanılmıştır. MFCC, ses sinyallerinden öznitelikleri çıkarmak için literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, çevresel seslerden oluşan veri kümemizdeki seslerin öznitelikleri çıkarmak için MFCCs yöntemini kullandık. MFCCs yöntemi ilk olarak 1980'lerde Davis ve Mermelstein tarafından kullanılmıştır [19]. MFCC algoritması, Hamming penceresini kullanarak bir ses akışını daha küçük pencerelelere yeniden şekillendirerek çerçevelere bölmektedir. Spektrum, Fast Fourier Dönüşümü kullanılarak her çerçeve için üretilir ve her spektrum filtre bankası kullanılarak ağırlıklandırılır. Son olarak, Logaritma ve Ayrık Kosinüs Dönüşümü kullanılarak MFCC vektörü hesaplanır. MFCC'lerin özellik işleme süreci Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. MFCC özellik işleme süreci

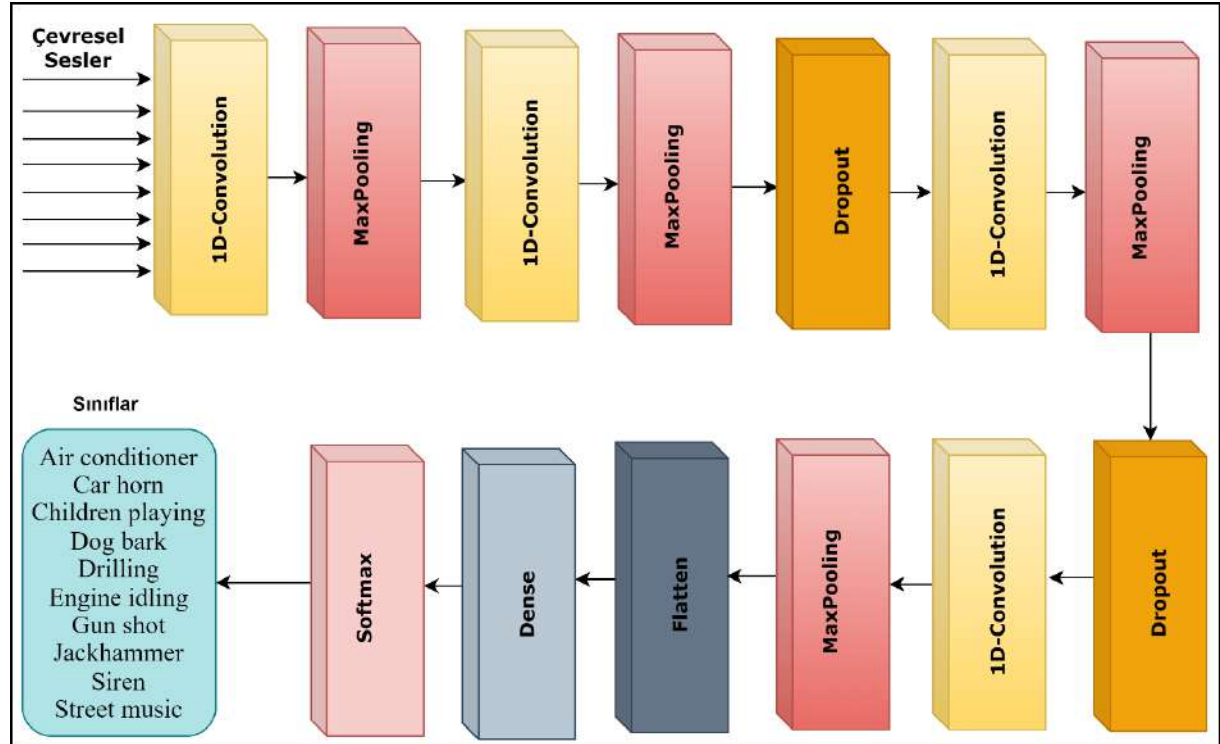
Bu çalışmada her bir ses sinyalinden 40 özellik elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen bu özellikler derin öğrenme tabanlı modellerde kullanılmak üzere düzenlenmiştir. Sonuç olarak elde edilen özellik haritaları önerdiğimiz derin model ile sınıflandırılmıştır.

## 2.3. Önerilen Derin Model

Çalışmada ilk olarak, çevresel seslerin sınıflandırılması için MFCC yöntemi kullanılarak ses sinyallerinin öznitelik haritaları elde edilmiştir. UrbanSound8K veri setinden elde edilen özellik haritaları daha sonra önerdiğimiz derin model ile sınıflandırılmıştır. Son yıllarda CNN'ler görüntü işleme, metin işleme ve ses işlemede sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. CNN'lerin bu özellikleri boyut sayısından bağımsızdır. Görüntü

sınıflandırmasında 2D-CNN ve 3D-CNN kullanılırken, özellikle sinyal analizinde tek boyutlu CNN'ler kullanılmaktadır.

UrbanSound8K veri setindeki çevresel sesleri sınıflandırmak için önerdiğimiz derin ağ modelinde 1D-CNN kullanılmıştır. Geliştirilen model 1D-CNN, 1D-MaxPooling, Dropout, Flatten ve Dense (softmax) katmanlarına sahiptir. Elde edilen öznelik haritalarının aktivasyonu için Relu, hesaplama karmaşıklığını azaltmak için Pooling katmanı kullanılan bir diğer katmandır. Ağ eğitilirken, ezberleme olayının önüne geçmek için Dropout katmanı kullanılarak, ağdaki bazı düğümleri devre dışı bırakmak amaçlanmıştır. Flatten katmanı, verileri matris biçiminde düzleştirmek için kullanılan bir diğer katmandır. Sınıflandırma işlemi için Softmax tercih edilmiştir. Bu katman, aldığı değerlere göre sınıflandırma işlemi için olasılık değerleri üretir. Bu değerler hangi sınıfa daha yakınsa ilgili sınıfa yerleştirilir. Modelin kabaca gösterimi Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Önerilen derin model

Önerilen model incelendiğinde, çalışmada 4 tane 1D-Convolution, 4 tane Maxpooling, 1 tane Dropout, 1 tane Flatten, 1 tane Dense ve 1 tane Softmax katmanının kullanıldığı görülmektedir. Tablo 1, önerilen modelde kullanılan parametreler ve katmanlar hakkında ayrıntılı bilgi vermektedir.

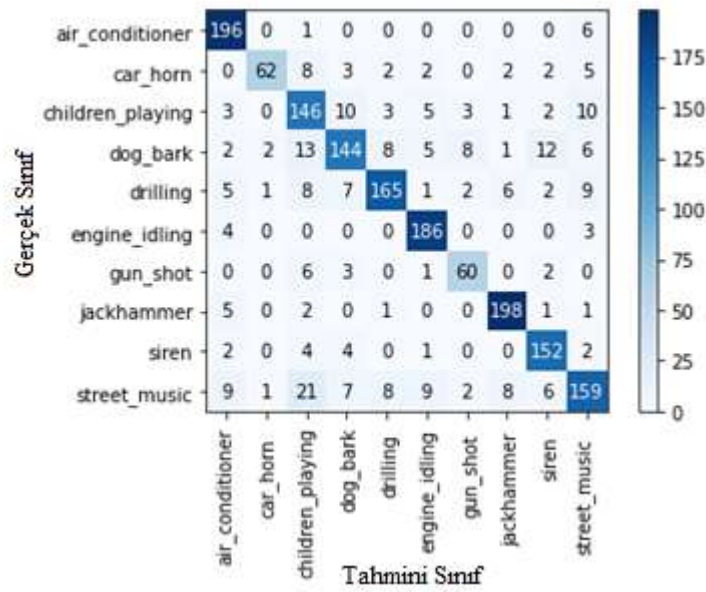
Tablo 1. Önerilen Derin Modeldeki Katman ve Parametreler

Katmanlar	Çıktı Biçimi	Aktivasyon Fonksiyonu	Parametre
Conv1d	(None, 20, 32)	Relu	96
Max_pooling1d	(None, 10, 32)	-	0
Conv1d	(None, 5, 64)	Relu	4160
Max_pooling1d	(None, 2, 64)	-	0
Dropout	(None, 2, 64)	-	0
Conv1d	(None, 1, 64)	Relu	8256
Max_pooling1d	(None, 1, 64)	-	0
Dropout	(None, 1, 64)	-	0
Conv1d	(None, 1, 32)	Relu	4128
Max_pooling1d	(None, 1, 32)	-	0
Flatten	(None, 32)	-	0
Dense	(None, 10)	-	330

### 3. Deneysel Sonuçlar

Bu çalışma, Intel(R) Core masaüstü bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Kullanılan bilgisayar, 16 GB RAM bellek ve 8 GB ekran kartına sahiptir. Çalışmada UrbanSound8K veri seti kullanılarak önerilen derin model ile çevresel seslerin sınıflandırılması amaçlanmıştır. Önerilen modelin performansını ölçmek için farklı değerlendirme parametreleri kullanılmıştır. Doğruluk, Hassaslık, Duyarlılık ve F1-ölçümü bu çalışmada önerilen modelin performansını ölçmek için kullanılan değerlendirme ölçütleridir. Bu performans ölçme metriklerinin çoğu karışıklık matrisi kullanılarak hesaplanmaktadır [20].

UrbanSound8K veri setindeki çevresel sesleri sınıflandırmak için öncelikle MFCC yöntemi kullanılarak özellik haritaları elde edilmiştir. Elde edilen bu özellik haritaları önerilen derin model ile sınıflandırılmıştır. Önerilen model eğitilirken veri setindeki verilerin %80'i modelin eğitimi için kullanılırken, geriye kalan %20'si ise modelin test edilmesi için kullanılmıştır. Bu değerler rastgele seçilmiştir. Önerilen modelde elde edilen karışıklık matrisi Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 5. Önerilen modelde elde edilen karışıklık matrisi

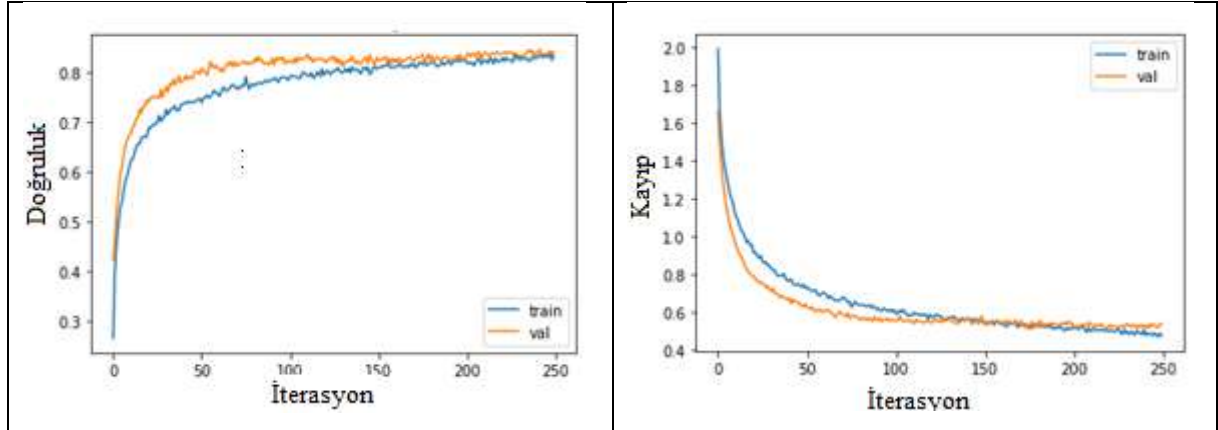
Şekil 5 incelendiğinde sınıflandırma başarımı en yüksek olan sınıf Air conditioner sınıfıdır. Önerilen model bu sınıftaki 203 test sesinin 196 tanesini doğru sınıflandırırken 7 tanesini de yanlış sınıflandırmıştır. Sınıflandırma başarımı en düşük olan sınıf ise Street music sınıfıdır. Önerilen model bu sınıftaki 230 test sesinin 159 tanesini doğru sınıflandırırken 71 tanesini ise yanlış sınıflandırmıştır.

Önerilen modelin başarımleri Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Önerilen Modelin Başarım Metrikleri

Sınıflar	Doğruluk(%)	Duyarlılık(%)	F1-Ölçümü(%)
Air conditioner	96.55	87	91
Car horn	72.09	94	82
Children playing	79.78	70	74
Dog bark	71.64	81	76
Drilling	80.09	88	84
Engine idling	96.37	89	92
Gun shot	83.33	80	82
Jackhammer	95.19	92	93
Siren	92.12	85	88
Street music	69.13	79	74

Tablo 2 incelendiğinde en başarılı sınıfın Air conditioner sınıfı olduğu görülmektedir. Bu sınıfta elde edilen doğruluk oranı %96.55'tir. En başarısız sınıf ise Street music sınıfıdır. Bu sınıfta elde edilen doğruluk değeri %69.13'tür. Önerilen modelin UrbanSound8K veri setindeki çevresel sesleri sınıflandırma doğruluğu %84.02'dir. Önerilen modelin doğruluk ve kayıp eğrileri Şekil 6'da verilmiştir.

**Şekil 6.** Önerilen modelin doğruluk ve kayıp eğrileri

#### 4. Tartışma

Derin öğrenme yöntemleri son yıllarda özellikle görüntü, metin, sinyal ve ses verilerini sınıflandırma da yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Yapılan bu çalışmada UrbanSound8K veri seti kullanılarak çevresel sesler sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma işlemi için derin öğrenme tabanlı bir model önerilmiştir. Bu çalışma gelişen IoT teknolojisiyle birlikte akıllı şehir uygulamalarının popüler olmaya başlamasından dolayı büyük bir önem arz etmektedir. Literatürde akıllı şehirler ile ilgili yapılmış birçok çalışma mevcuttur [21, 22]. UrbanSound8K veri setindeki çevresel sesleri sınıflandırmak için önerdiğimiz model literatürdeki benzer çalışmalar ile karşılaştırıldığında, önerilen modelin yüksek bir başarı oranı elde ettiği görülmektedir. Çevresel seslerin sınıflandırılması için literatürde yapılan benzer çalışmalar Tablo 3'te verilmiştir.

**Tablo 3.** Çevresel Seslerin Sınıflandırılması ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Referans	Yıl	Yöntem	Veri Seti	Doğruluk(%)
Sang ve arkadaşları[12]	2018	CRNN	UrbanSound8K	%67.41, %73.92, %77.06, %68.07
Chen ve arkadaşları[13]	2019	CNN	UrbanSound8K	%78
Demir ve arkadaşları[14]	2020	STFT, VGG16, VGG19 ve Densenet201	UrbanSound8K	%78.14
Davis ve arkadaşları[15]	2018	CNN	UrbanSound8K	%67.8
Piczak ve arkadaşları[16]	2015	MFCC, CNN	UrbanSound8K	%72.7
Salamon ve arkadaşları[17]	2017	CNN	UrbanSound8K	%73
<b>Önerilen Model</b>	2022	MFCC, CNN	UrbanSound8K	<b>%84.02</b>

Tablo 3 incelendiğinde önerilen modelin %84.02 gibi yüksek bir doğruluk değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu çalışmanın temel avantajlarından biri, UrbanSound8K veri setindeki çevresel sesleri 10 farklı kategoride sınıflandırmaktadır. Bu çevresel seslerin sınıflandırılması özellikle akıllı şehir uygulamalarında büyük bir önem arz etmektedir. Uygulamada kullanılan veri seti 8732 tane ses dosyasından oluşmaktadır. Bu sesler dış ortamda kayıt edildiğinden dolayı gürültü oranı yüksektir. Buna rağmen önermiş olduğumuz model literatürdeki benzer çalışmalar ile karşılaştırıldığında, önerdiğimiz modelin yüksek bir doğruluk değeri elde ettiği görülmektedir.

## 5. Sonuçlar

Ses verilerinin sınıflandırılması gelişen teknoloji ile beraber önemli konulardan biri haline gelmiştir. Çevresel seslerinin sınıflandırılması akıllı şehir uygulamaları başta olmak üzere farklı alanlarda da kullanılmaktadır. Bu çalışmada, 8732 ses dosyası ve 10 sınıftan oluşan UrbanSound8K veri setindeki çevresel sesler önerilen CNN tabanlı bir model ile sınıflandırılmıştır. Önerilen model, 10 farklı çevresel sesi sınıflandırırken %84.02 gibi yüksek bir doğruluk değeri elde etmiştir. Bu doğruluk değeri, önerilen modelin çevresel sesleri sınıflandırmak için kullanılabilirliğini göstermektedir.

## Teşekkür

Araştırmacılara veri setlerini paylaştıkları için teşekkür ederim.

## Kaynaklar

- [1] Ghazal, T.M., et al., IoT for smart cities: Machine learning approaches in smart healthcare—A review. *Future Internet*, 2021. 13(8): p. 218.
- [2] Teng, H., et al., A low-cost physical location discovery scheme for large-scale Internet of things in smart city through joint use of vehicles and UAVs. *Future Generation Computer Systems*, 2021. 118: p. 310-326.
- [3] Sarkar, N.I. and S. Gul, Green computing and internet of things for smart cities: technologies, challenges, and implementation, in *Green Computing in Smart Cities: Simulation and Techniques*. 2021, Springer. p. 35-50.
- [4] Mandalapu, H., et al., Audio-visual biometric recognition and presentation attack detection: A comprehensive survey. *IEEE Access*, 2021. 9: p. 37431-37455.
- [5] Luz, J.S., et al., Ensemble of handcrafted and deep features for urban sound classification. *Applied Acoustics*, 2021. 175: p. 107819.
- [6] Eroglu, Y., et al., Diagnosis and grading of vesicoureteral reflux on voiding cystourethrography images in children using a deep hybrid model. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2021. 210: p. 106369.
- [7] Cengil, E., A. Çınar, and M. Yıldırım. A Case Study: Cat-Dog Face Detector Based on YOLOv5. in *2021 International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing, and Technologies (3ICT)*. 2021. IEEE.

- [8] BİNGÖL, H. and B. ALATAS, Classification of Brain Tumor Images using Deep Learning Methods. *Turkish Journal of Science and Technology*, 2021. 16(1): p. 137-143.
- [9] Karmakar, G., et al., Assessing Trust Level of a Driverless Car Using Deep Learning. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021.
- [10] Ullah, I. and Q.H. Mahmoud, Design and development of a deep learning-based model for anomaly detection in IoT networks. *IEEE Access*, 2021. 9: p. 103906-103926.
- [11] Sarma, M.S., et al., Traditional Bangladeshi Sports Video Classification Using Deep Learning Method. *Applied Sciences*, 2021. 11(5): p. 2149.
- [12] Sang, J., S. Park, and J. Lee. Convolutional recurrent neural networks for urban sound classification using raw waveforms. in *2018 26th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*. 2018. IEEE.
- [13] Chen, Y., et al., Environmental sound classification with dilated convolutions. *Applied Acoustics*, 2019. 148: p. 123-132.
- [14] Demir, F., et al., A new pyramidal concatenated CNN approach for environmental sound classification. *Applied Acoustics*, 2020. 170: p. 107520.
- [15] Davis, N. and K. Suresh. Environmental sound classification using deep convolutional neural networks and data augmentation. in *2018 IEEE Recent Advances in Intelligent Computational Systems (RAICS)*. 2018. IEEE.
- [16] Piczak, K.J. Environmental sound classification with convolutional neural networks. in *2015 IEEE 25th international workshop on machine learning for signal processing (MLSP)*. 2015. IEEE.
- [17] Salamon, J. and J.P. Bello, Deep convolutional neural networks and data augmentation for environmental sound classification. *IEEE Signal processing letters*, 2017. 24(3): p. 279-283.
- [18] Salamon, J., C. Jacoby, and J.P. Bello. A dataset and taxonomy for urban sound research. in *Proceedings of the 22nd ACM international conference on Multimedia*. 2014.
- [19] Davis, S. and P. Mermelstein, Comparison of parametric representations for monosyllabic word recognition in continuously spoken sentences. *IEEE transactions on acoustics, speech, and signal processing*, 1980. 28(4): p. 357-366.
- [20] Eser, S., A deep learning based approach for the detection of diseases in pepper and potato leaves. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 2021. 36(2): p. 167-178.
- [21] Chang, V., An ethical framework for big data and smart cities. *Technological Forecasting and Social Change*, 2021. 165: p. 120559.
- [22] Chen, D., P. Wawrzynski, and Z. Lv, Cyber security in smart cities: a review of deep learning-based applications and case studies. *Sustainable Cities and Society*, 2021. 66: p. 102655.





## Derin Öğrenme Temelli Robotik Maske Kontrol Sistemi

Mustafa GÖKSU<sup>1\*</sup>, Ahmet ALKAN<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş, Türkiye

<sup>1</sup> mustafagoksu02@gmail.com, <sup>2</sup> aalkan@ksu.edu.tr

(Geliş/Received: 19/01/2022;

Kabul/Accepted:14/02/2022)

**Öz:** Korona virüsün (COVID-19) hızlı bulaşması nedeniyle dünya büyük bir sağlık kriziyle karşı karşıya kalmıştır. Korona virüsün yayılmasını engellemek için Dünya Sağlık Örgütüne (WHO) göre en etkili tedbir, halka açık yerlerde ve kalabalık alanlarda maske takmaktır. Ancak kalabalık ortamlarda uzun süre kalan kişilerde sıkılma, boş verme ve umursamazlık gibi nedenlerle insanlar bu kuralı ihlal edebilmektedir. Bu nedenle kalabalık alanlarda insanların izlenmesi ve gerektiğinde ilgililerin uyarılarak toplum sağlığını korumak önem arz etmektedir. Bu çalışmada maske takmayan, maskesini yanlış takan ve maskesini doğru takan kişileri belirleme sürecini otomatikleştirmek için iki derin öğrenme modeli kullanan bir robotik model geliştirilmiştir. İnternette elde edilen veri setleri ve çevreden alınan fotoğraflar kullanılarak özgün bir veri seti oluşturulmuştur. Geliştirilen yapay zekâ modellerinin daha iyi tahmin sonuçları verebilmesi için veri seti görüntüleri üzerinde veri çoğaltma (aynalama, döndürme) teknikleri kullanılmıştır. Çalışmada gerçek zamanlı olarak maskeli, maskesiz ve maskesini yanlış takan kişilerin tespiti gerçekleştirilmiş sesli olarak kişilere dönütler verilmiştir. Geliştirilen yapay zekâ modellerinde üç sınıf (maskeli, maskesiz, maskesini yanlış takan) için ortalama tahmin/sınıflandırma başarı oranı (mAP) %96,58 ile %98,45 olarak tespit edilmiştir. Hız ve eğitim süresi açısından YOLOv4-tiny algoritmasıyla geliştirilen modelin daha başarılı olduğu tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında geliştirilen yapay zekâ modellerinin farklı donanımlar üzerinde gerçek zamanlı çalıştırılması için MKS (Maske Kontrol Sistemi) olarak adlandırılan etkileşimli yazılım önerilmektedir. MKS yazılımı geliştirilen hareketli bir robot üzerinde çalıştırılmıştır. Prototip robotla gerçekleştirilen uygulamalarda oldukça yüksek maske denetleme başarımları elde edilmiştir. Geliştirilen robotun, kullanımıyla kurumlara personel ve zaman tasarrufu sağlayabileceği, COVID-19 tedbirlerinin kontrolü ve toplum bilincinin artırılmasında yararlı olacağı düşünülmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Derin Öğrenme, COVID-19, YOLOv4, YOLOv4-tiny, Robot.

## Deep Learning Based Robotic Mask Control System

**Abstract:** Due to the rapid transmission of the coronavirus (COVID-19), it has faced a major health crisis. According to the World Health Organization (WHO), the most effective measure to prevent the spread of the coronavirus is to wear a mask in public and crowded areas. However, people who stay in crowded environments for a long time may violate this rule for reasons such as boredom, disregard, and indifference. For this reason, it is important to monitor people in crowded areas and to protect public health by warning those concerned when necessary. In this study, a robotic model using two deep learning models was developed to automate the process of identifying people who do not wear masks, wear masks incorrectly, and wear masks correctly. An original data set was created using data sets obtained from the internet and photographs taken from the environment. For the developed artificial intelligence models to give better estimation results, data duplication (mirroring, rotation) techniques were used on the data set images. In the study, masked, unmasked, and masked people were identified in real-time, and verbal feedback was given to the people. In the developed artificial intelligence models, the mean Average Precision (mAP) for the three classes (with mask, without a mask, and with the wrong mask) was determined as 96.58% to 98.45%. It has been determined that the model developed with the YOLOv4-tiny algorithm is more successful in terms of speed and training time. Interactive software called MCS (Mask Control System) is recommended for the real-time running of artificial intelligence models developed within the scope of the study on different hardware. It has been determined that the model developed with the YOLOv4-tiny algorithm is more successful in terms of speed and training time. Interactive software called MCS (Mask Control System) is recommended for real-time running of artificial intelligence models developed within the scope of the study on different hardware. MKS software was run on a developed mobile robot. Very high mask inspection performances have been achieved in the applications performed with the prototype robot. It is thought that the developed robot can save time by reducing personnel costs to institutions with its use, and will be useful in controlling COVID-19 measures and increasing public awareness.

**Key words:** Deep Learning, COVID-19, YOLOv4, YOLOv4-tiny, Robot.

\* Sorumlu yazar: [mustafagoksu02@gmail.com](mailto:mustafagoksu02@gmail.com). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-7235-2019, <sup>2</sup> 0000-0003-0857-0764

## 1. Giriş

COVID-19 virüsü ve bu virüsün etkileri tüm insanlığın sağlığını tehdit ederek, sadece sağlığımızı etkilememekte, yaşam şeklimizi de değiştirmeye başlamaktadır. COVID-19 hayatımıza maske takmak, sosyal mesafeye, temizlik ve hijyene dikkat etmek, kapalı ve kalabalık yerlerden kaçınmak gibi yeni zorunluluklar getirmiştir. Sağlık bakanlığımız kontrollü sosyal hayat stratejisiyle yaşam biçimimizi şekillendirmiştir. Yeni yaşam biçimimizde uymamız gereken maske kullanımının önemi Dünya Sağlık Örgütü tarafından yayınlanan makaleler ile vurgulanmaktadır.

Hastalığa yol açan SARS-CoV-2 RNA'nın havada 3 saat kalabildiği ve paslanmaz çeliklerde 48 saat, bakır yüzeylerde 4 saat, karton yüzeylerde 24 saat kalabildiği tespit edilmiştir [1].

Hastalıkla mücadelede asemptomatik şekilde geçiren vakaların yüksek olması önemli bir problemdir. Tüm enfeksiyonların %60 oranında hafif semptomlu veya asemptomatik ait olduğu bu vakaların virüsü hasta olmayanlara geçirebileceği tahmin edilmektedir [2].

Daha önceden yapılan bir araştırmaya göre COVID-19 virüsü ile mücadele etmek ve korunmanın en etkili yöntemlerinin kişisel hijyen kuralları, sosyal mesafe ve maske kullanımı olduğu ifade edilmiştir [3].

Virüsün her yeni varyantı farklı özellikler göstermekte, özellikle en güncel varyantı olan Omicron'un yayılma/bulaşma hızının daha da fazla olduğu belirtilmektedir. Dolayısıyla virüsle mücadelede en etkili yol temizlik, maske ve mesafeye dikkat etmektir. Ancak toplumsal hayatta iş/okul vb. ortamlarda mesafenin korunması mümkün olmadığından tek ve en etkili korunma aracı, kurallarına uygun maske kullanımınıdır. Maske kullanımında kuralların alışkanlık haline gelmesi için etkili denetim ve kontrol çok önemlidir. Maske takmayarak kuralları ihlal edecek çok az bir grup, büyük çoğunluğun kurallara uymuş olmasını anlamsız hale getirebilmektedir. Maske kullananların bu konu hakkında bilinçlendirilmesi ve maske kullanımının denetlenmesi önemlidir. Bu amaçla, çalışmada bir maske kontrol ve uyarı sistemi geliştirilmiştir. Maske kontrol sisteminin hayata geçirilmesi ile maske denetimi yapan özel ve kamu personelinin görev yükü azaltılarak iş gücünden tasarruf edilmiş olacaktır. Son yıllarda literatürde maske kontrolü yapabilen derin öğrenme yöntemleri ile geliştirilen değişik çalışmaların yapılmaya başlandığı görülmektedir.

Literatürdeki bir çalışmada 4 sınıfa ait (maskeli, maskesiz, yanlış maske kullanımı ve maske alanı) 52.635 görsel kullanılarak bir veri seti oluşturulmuş, bu veri seti ile 8 çeşit YOLO ağ algoritmaları eğitilmiştir. Çalışmanın eğitim sonuçlarına bakıldığında en yüksek mAP (ortalama hassasiyet değeri) değerini veren YOLOv4 ağı ile eğitilen model %71,69 değerine ulaşmıştır. Aynı çalışmada YOLOv4-tiny ağı ile geliştirilen modelin %57 mAP değerine ulaşmıştır [4].

1376 ve 873 adet maskeli ve maskesiz kişilere ait 2 farklı veri seti üzeri üzerinde yapılan diğer bir çalışmada yüz tespiti işleminden sonra yüzlerde maske olup olmadığı CNN ile sınıflandırılmıştır. Başarı oranları sırasıyla %95,77 ve %94,58 elde edildiği görülmüştür [5].

YOLOv4 ağının görüntü ölçekleme ve hesaplamalarını azaltacak sistemin önerildiği çalışmada yüz maskesinin tespiti için eğitilen modelin mAP değerinin %98,3 değeri elde edilmiştir [6].

Maske tespiti yapan başka bir çalışmada Pynq-YOLO-Net olarak isimlendirilen YOLO ağı ile geliştirilen model %97'lik algılama doğruluğu elde etmiştir [7].

YOLOv4 algoritması kullanılarak geliştirilen başka bir çalışmada maskeli ve maskesiz kişileri tanıyabilen modelin 4000 iterasyon sonunda %98 ortalama hassasiyet değerine (mAP) ulaştığı görülmüştür [8].

1376 adet görsel üzerinde destek vektörleri (SVM) ve MobileNetV2 birleştirilmesi ile yapılan başka bir çalışmada maske takan kişilerin sınıflandırılması yapılmış ve başarı oranı %97,1 elde edildiği görülmüştür [9].

Yapılan başka bir çalışmada 1415 adet veri seti üzerinde özellik çıkarma için ResNet50, nesne algılama için YOLOv2 algoritmaları kullanılarak %81 hassasiyet yüzdesine ulaşıldığı belirtilmektedir [10].

YOLOv3 algoritması ile maske tespiti yapan bir çalışmada 4000 iterasyon sonunda %96 başarı elde ettiği görülmüştür [11].

Maskeli ve maskesiz kişilerin tespiti için ilk aşamada yüzleri tespit eden bir modelden geçirdikten sonra ikinci aşamada tespit edilen yüzde maske olup olmadığı sınıflandıran CNN tabanlı bir ağ kullanılmış ve %99,5 doğruluk oranı elde edilmiştir [12].

Yüzde maske tespiti için MobileNetV2, VGG16 ve ResNet50 derin öğrenme algoritmalarının kullanıldığı çalışmada en iyi başarımın %97,82 ile VGG16 algoritması ile elde ifade edilmektedir [13].

YOLOv5 derin öğrenme algoritması ile maske tespiti yapan başka bir çalışmada 300 iterasyon sonunda %96,5 doğruluğa erişildiği görülmüştür [14].

SSD (Single Shot Detector) ve MobileNetV2 sınıflandırıcının birleştirilmesi ile yapılan başka bir çalışma %92,64 başarı oranı ulaştığı ve gömülü sistemlerde kullanılabilecek düzeyde olduğu belirtilmiştir [15].

4098 adet görsel ile oluşturulmuş bir veri seti üzerinde maskesini takan ve takmayan kişileri sınıflandırmak için MobileNetV2 derin öğrenme ağı üzerinden transfer öğrenme tekniği kullanılarak yapılan başka bir çalışmada %98'lik doğruluğa ulaşıldığı görülmüştür [16].

25.000 görüntüden oluşturulan maskesiz ve maskeli kişileri gerçek zamanlı raspberry pi donanımı üzerinde ayırtıran bir çalışmada MobileNetV2 ve SSD mimarileri kullanılarak %96 doğruluk elde edildiği rapor edilmiştir [17].

Maskesini takan kişilere kapıyı otomatik olarak açmasını hedefleyen başka bir çalışmada MobileNetV2 kullanılmış %95,85 doğruluk elde edildiği görülmüştür [18].

Görüldüğü gibi son yıllarda literatürde maske kontrolü yapabilen derin öğrenme yöntemleri ile geliştirilen değişik çalışmaların yapılmaya başlandığı görülmektedir. Ancak geliştirdiğimiz maske kontrol sistemi sadece bir yazılım olmayıp, önerilen yazılımın işlevsel bir robot üzerinde gömülü sisteme taşınarak prototip bir ürüne dönüştürülmüş olması dikkate alınır, çalışmayla literatürdeki birçok çalışmanın ilerisine geçilmiştir.

Bu çalışmada, 2864 adet görsel 3 farklı sınıf için etkilendirilmiştir. Çalışmada kullandığımız veri setinde maskesiz, maskeli ve maskesini yanlış kullanan kişiler olmak üzere 3 sınıf bulunmaktadır. Veri setinin %70'lik kısmı eğitim için, %20'lik kısmı doğrulama ve %10'luk kısmı test için ayrılmıştır. Veri seti YOLOv4-tiny ve YOLOv4 algoritmaları kullanılarak Model 1 ve Model 2 olarak isimlendirilen modeller oluşturulmuştur. Her iki modelle eğitim sonucunda elde edilen başarımleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen başarılı maske kontrol sistemi robot üzerinde de uygulanarak, başarılı bir prototip oluşturulmuştur. Çalışmada 2. bölümde kullanılan veri seti hakkında bilgiler verilmiştir. Kullanılacak yöntemler 3. bölümde özetlenmiştir. 4. bölümde deneysel çalışma ve uygulamalar verilerek elde edilen başarımleri sunulmuştur. 5. bölümde tartışma sonuçları verilmiştir.

## 2. Materyal

Çalışmada web'te ücretsiz olarak erişilebilen veri setleri ve çevremizden elde ettiğimiz fotoğraflarla oluşturulan özgün bir veri seti oluşturulmuştur [19-20]. Kullanılan veri seti Şekil.1'de örnekleri görülen özelliklerinde, JPG formatında görüntülerden oluşmaktadır. Çalışmada kullanılan bu görüntüler üç farklı sınıfta (maskeli, maskesiz, maskesini yanlış takan) etiketlenmiştir.

Önerilen MKS sistemi için Şekil 1.a-c'de sırasıyla maskesiz, maskeli ve maskesini yanlış takan kişileri sınıflandırılmasına ait 1835 görselin, 1328 daha önceden veri setlerini hazırlayanlar tarafından 507 tanesi de bu çalışmada veri setinin zenginleştirilmesi için yeni görüntüler eklenerek etiketlenmiştir.



(a)  
Maskesiz



(b)  
Maskeli



(c)  
Maskesini yanlış takan

**Şekil 1.** Veri setine kullanılan 3 sınıfa ait görüntülerden bir bölüm.

Veri çoğaltma işlemi sonrası kullanılan her sınıfa ait, eğitim ve doğrulama setini oluşturan veri sayıları Tablo 1'de sunulmuştur. Veri setinin %70'lik kısmı eğitim için, %20'lik kısmı doğrulama, %10'luk kısmı ise test için ayrılmıştır. Tablo 1'de veri setinin %70'lik kısmına denk gelen 1301 adet görüntüde aynalama, 90 derece saat yönü ve 90 derece saat yönünün tersine döndürme veri çoğaltma işlemleri uygulanarak 3903 görüntü sayısına çıkarılmıştır. Veri setinde yer alan bütün görüntüler 416\*416 boyutuna göre tekrar boyutlandırılmıştır.

**Tablo 1.** Veri setinde bulunan sınıflara göre görüntü sayıları.

Görüntü sayısı	Maskesiz Kişiler	Maskeli Kişiler	Maskesini Yanlış Takanlar	Toplam
Eğitim seti %70	288	574	439	1301
Doğrulama seti %20	79	163	124	366
Test seti %10	36	82	50	168
<b>Toplam</b>	<b>403</b>	<b>819</b>	<b>613</b>	<b>1835</b>

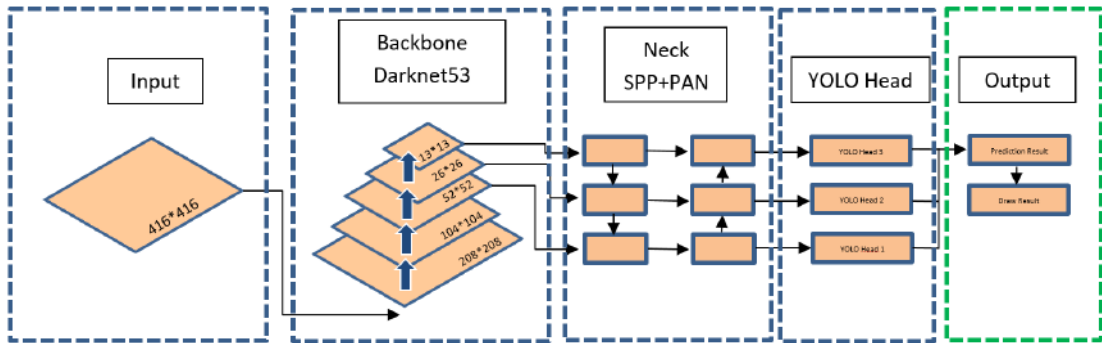
### 3. Metotlar

Bu bölümde çalışmada kullanılan modeller ve metotlar açıklanmaktadır. Yapay zekânın alt kümelerinden olan derin öğrenme tekniği klasik makine öğrenmesi tekniklerinden farklı olarak dış müdahale olmadan modellerin yanlış karar verip vermediği algılayabilen bir tekniktir [21]. Çalışmada derin öğrenme yöntemlerinden YOLOv4 ve YOLOv4-tiny nesne tespiti algoritmaları kullanılmıştır. YOLOv4-tiny YOLOv4'e göre katman sayısı ve modüller değiştirilerek gömülü sistemler, mobil cihazlar ve düşük donanıma sahip cihazlar için daha iyi FPS değerleri elde etmek için tasarlanmıştır [22].

Çalışmada kullanılan veri seti üzerinde iki farklı derin öğrenme algoritması (YOLOv4-tiny ve YOLOv4) kullanılarak yapay zekâ modelleri Google Colab platformu üzerinde Tesla P100-PCIE-16GB GPU kullanılarak eğitilmiştir. Her iki model için geliştirilen ortam ve iterasyon sayısı 6000 olarak belirlenmiştir. Model 1 ve Model 2 olarak adlandırılan modeller sırasıyla YOLOv4-tiny ve YOLOv4 algoritmalarının COCO veri seti üzerinde eğitilen ağırlıkları kullanılarak transfer öğrenmesi yöntemiyle eğitilmiştir.

#### 3.1. YOLOv4

YOLOv4 algoritması Joseph Redmon tarafından 2016 yılında geliştirilmiştir. Gerçek zamanlı nesne tespiti yapabilen bu algoritma aynı anda nesnenin sınıfını ve nesnenin tespit edilen alanı çerçeve içine alabilmektedir [23]. Şekil 2'te çalışmada kullanılan YOLOv4 mimarisi görülmektedir. YOLOv4 mimarisinde Input bölümünde giriş olarak 416\*416 çözünürlükte görüntüler alınmaktadır. Backbone bölümünde giriş olarak verilen görüntülerde özellik çıkarım işlemleri gerçekleştirilmektedir. Neck bölümünde daha fazla bilgi çıkarımları gerçekleştirilerek modelin daha iyi tahmin yapabilmesi sağlanmaktadır. Neck bölümü PAN ağı ile SPP katmanının birleşiminden oluşmaktadır. PAN ağı özellik toplamasını sağlarken, SPP havuzlama katmanı PAN ağı ile çıkarılan özelliklerin boyutlarından bağımsız olarak sabit boyutlu olmasını sağlamaktadır. YOLO Head bölümünde ise sınırlayıcı kutuların koordinatlarını, güven skoru bulunmakta ve sınırlayıcı kutuların sınıf tahmin işlemleri gerçekleştirilmektedir [24].

**Şekil 2.** YOLOv4 Mimarisi çalışmaya göre düzenlenmiştir (Lin et al. 2021).

#### 3.2. YOLOv4-tiny

YOLOv-tiny algoritması YOLOv4 algoritmasından türetilmiştir. Yolov4-tiny algoritmasında iki CSPBlock modülü yerine ResNet-D ağına iki adet ResBlock-D modülü kullanılmaktadır ve bu da hesaplama karmaşıklığını azaltmaktadır. YOLOv4-tiny algoritmasında, YOLOv4 algoritmasında kullanılan CSPDarknet53 ağı yerine

Backbone bölümünde CSPDarknet53-tiny ağını kullanılmaktadır. Yolov4-tiny ile YOLOv4 ağı arasında farklardan biride ağ boyutu ve parametreleri YOLOv4-tiny büyük ölçüde küçültülmüştür [22].

### 3.3. MKS Robotu

MKS yazılımının hareketli olarak çalıştırabilmesi ve maske kontrolü yapılacak insanlara etkili geri dönütler verilebilmesi için hareket edebilen 85 cm uzunluğunda 27 cm genişliğinde bir robot geliştirilmiştir. Robotun dış kabuğu 3d yazıcılar ile 3 parça halinde hazırlanmıştır. Robotun enerjisi 4 adet 3.7V 6000 mAh li-ion piller ile sağlanmıştır. MKS yazılımının çalışmasını sağlayan kütüphanelerin kurulabilmesi ve yapay zekâ modellerinin çalışabilmesi için robotta Latte Panda Delta mini bilgisayar kullanılmıştır. Mini bilgisayarda işletim sistemi olarak Windows Inspire kullanılmıştır. Robotunu hareketi bluetooth donanımı ve d.c. (doğru akım) motorları ile mobil uygulama üzerinden cep telefonu ile sağlanmaktadır [25].

## 4. Deneysel Çalışmalar ve Bulgular

Bu bölümde metotlar bölümünde anlatılan Model 1 ve Model 2'ye ait yapay zekâ modellerinin geliştirilmesi aşamasında, kişisel bilgisayarlarda çalıştırılması, mini bilgisayarlarda çalıştırılması ve robotun üzerinde uygulanmasıyla elde edilen bulgular yer almaktadır.

Tablo 2 de YOLOv4-tiny ve YOLOv4 derin öğrenme algoritmaları kullanılarak geliştirilen sırasıyla Model 1 ve Model 2 için metrikleri görülmektedir. Her iki model için geliştirilen ortam ve iterasyon sayısı aynı olarak belirlenmiştir.

**Tablo 2.** Modellere ait hassasiyet, geri çağırma, F1-skor, tespit zamanı IoU ve mAP değerleri.

Modeller	Hassasiyet (Precision)	Geri Çağırma (Recall)	F1-Skoru	Tespit Zamanı(ms)	IoU	mAP	Boyut (Mb)
YOLOv4-tiny	0,93	0,93	0,93	3-4	%74,74	%96,58	22,4
YOLOv4	0,94	0,97	0,96	20-21	%78,65	%98,45	244,2

Tablo 2 de Model 1 ve Model 2 için tespit zamanları Google Colab platformunda P100-PCIE-16GB GPU' lu bilgisayar üzerinde hesaplanmıştır. Model 1'in test verileri üzerinde 3-4 milisaniyede tespit işlemi gerçekleştirdiği, Model 2'nin ise 20-21 milisaniyede tespit işlemi gerçekleştirdiği görülmüştür. Model 1 ve Model 2'ye ait hassasiyet, geri çağırma, F1-skoru metrikleri sırasıyla 0,93 - 0,94, 0,93 - 0,97, 0,93 - 0,96 olarak tespit edilmiştir.

Nesne tespiti algoritmalarında modelinin başarısının tespitinde kullanılan IoU ve mAP metrikleri kullanılmaktadır [26].

$$IoU = \frac{\text{Gerçekte olması gereken kutu alanı} \cap \text{Tahmin edilen kutu alanı}}{\text{Gerçekte olması gereken kutu alanı} \cup \text{Tahmin edilen kutu alanı}}$$

Şekil 2’te veri setinde mor renkte belirtilen kutu alanı maskesiz kişinin modeller tarafından tahmin edilmeden önce etiketlenmesine ait alanı yani gerçekte olması gereken referans alanı (ground truth) göstermektedir. Yeşil renkte belirtilen kutu alanı geliştirilen yapay zekâ modellerinden Model 1’e ait tahmin alanıdır [25].

Bu çalışmada Model 1 ve Model 2’ye ait 3 sınıfa ait ortalama IoU değerleri sırasıyla %74,74 ve %78,65 olarak elde edilmiştir. Doğru pozitif, yanlış pozitif değerleri nesne tespiti yapan algoritmalarının performanslarını belirleyen metriklerinin hesaplamalarında kullanılmaktadır. Çalışmada IoU değeri 0,5’e eşit veya büyükse doğru pozitif olarak kabul edilmektedir. IoU değeri 0,5’in altında olursa yanlış pozitif olarak kabul edilmektedir. Yanlış negatif değeri ise güven eşiği olarak bu çalışmada belirlenen 0,25 in altında IoU değerine sahip tahminler olarak alınmaktadır. Doğru pozitif, yanlış pozitif ve yanlış negatif değerleri elde edildikten sonra nesne tespitinde kullanılan başarı metrikleri hesaplanmaktadır:



Şekil 3. IoU Metriği Kullanımı.

$$Hassasiyet(P) = \frac{Doğru\ Pozitif}{Doğru\ Pozitif + Yanlış\ Pozitif} \quad (1)$$

$$Geri\ çağırma(R) = \frac{Doğru\ Pozitif}{Doğru\ Pozitif + Yanlış\ Negatif} \quad (2)$$

$$F1\ Skoru = \frac{2 * Geri\ çağırma * Hassasiyet}{Geri\ çağırma + Hassasiyet} \quad (3)$$

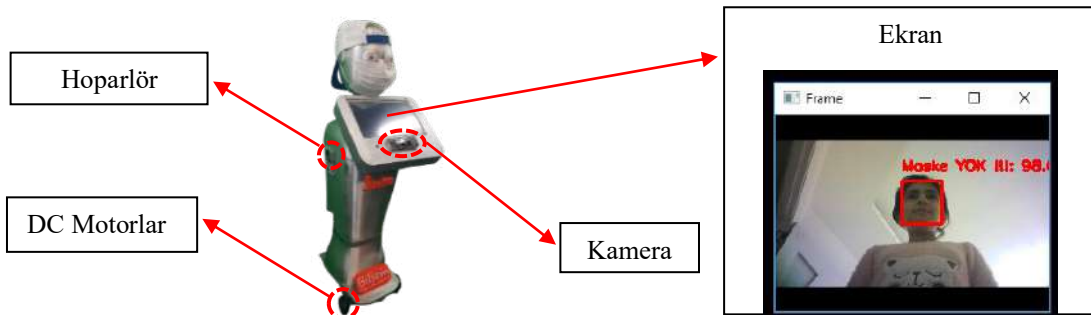
$$Ortalama\ Hassasiyet\ (AP) = \int_0^1 P(R)dR \quad (4)$$

$$Toplam\ Ortalama\ Hassasiyet\ (mAP) = \frac{\sum_{i=1}^N AP_i}{N} \quad (5)$$

AP değerleri çalışmada kullanılan 3 sınıfa ait tüm nesnelerin hassasiyet ve geri çağırma eğrisinin altında kalan alanlarının hesaplanması Denklem 4 ile elde edilir. Denklem 5 ile Denklem 4 ile elde edilen AP değerlerinin kullanılarak toplam ortalama hassasiyet değeri (mAP) hesaplanır [27]. Model 1 ve Model 2 için mAP değerleri sırasıyla %96,58 ile %98,45 elde edilmiştir.

#### 4.1. MKS Robotu ve Bulguları

Çalışmada üretilen prototip MKS Robotu Şekil 4’te görülmektedir. Robotun ekranının altında yer alan kameradan görüntüler alınarak Model1 kullanılarak, MKS yazılımı ile maske kontrolü gerçekleştirilmektedir. Sesli dönütler robotun her iki yanında yer alan hoparlörler ile sağlanmıştır [25]. Robotun maske kontrolü sırasında sesli

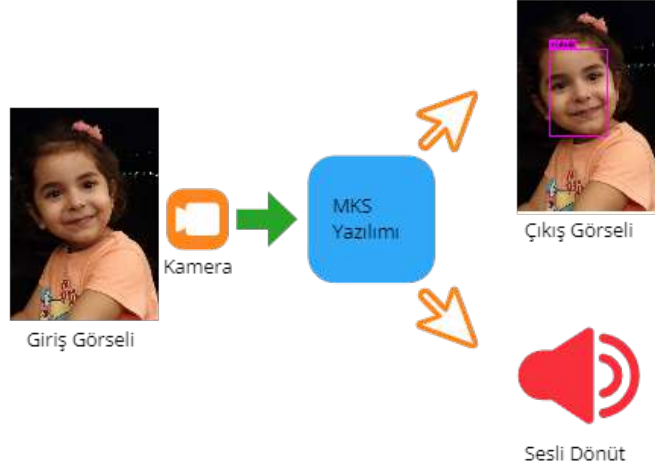


Şekil 4. Geliştirilen Yapay Zekâ Destekli MKS Robot Prototipi.



dönütler ile beraber robotun ön tarafında yer alan 10 inch ekran ile kişilerin anlık olarak maske kontrollerinin sonuçları gösterilmektedir.

Şekil 5’ te görüldüğü gibi dış dünyadan kamera ile anlık alınan görüntüler MKS yazılımı içerisinde bu çalışma kapsamında geliştirilen modellerden geçirilerek gerçek zamanlı maske kontrolü gerçekleştirerek ses çıkışı yapabilen donanımlar sayesinde sesli dönütler verebilmektedir. Robot üzerinde çalıştırılan MKS yazılımı ile maskesiz kişiye sesli olarak “Lütfen maskenizi takınız” şeklinde hoparlörler ile geri dönüt verilmiştir. Aynı şekilde maskesini doğru olarak kullanan kişilere “Maskenizi taktığınız için teşekkür ederim” mesajı verilirken, maskesini yanlış takan kişi tespit ettiğinde “Lütfen maskenizi doğru kullanınız” şeklinde sesli geri dönütler verilmektedir [25].



Şekil 5. MKS yazılımının çalışma şeması.

#### 4.2. Modellere Ait Bilgisayar Bulguları

Model 1 ve Model 2’ nin gerçek zamanlı çalıştırılması ve kişilere sesli uyarılar verilebilmesi için MKS yazılımı geliştirilerek farklı donanımlar üzerinde çalıştırılmış tahmin sonuçları ve FPS değerleri elde edilmiştir.

MKS sistemi kişisel bilgisayarlar, Raspberry Pi 4 ve Latte Panda Delta, Nvidia Jetson Nano mini bilgisayarlar üzerinde çalışabilmektedir. MKS sistemi Google Colab üzerinde eğitilen Model 1 ve Model 2 olarak isimlendirilen derin öğrenme modellerinin bir kamera vasıtasıyla çalıştırılmasına dayanmaktadır [25].

Çalışmada geliştirilen yapay zekâ modelleri Tablo 3’te gösterilen donanımlar üzerinde çalıştırılmıştır. MSI GP72 ve Nvidia Jetson Nano bilgisayarlarında GPU (Grafik İşlemci Birimi) donanımları varken diğer donanımlarda GPU bulunmamaktadır. MSI GP72 bilgisayarı diz üstü bilgisayar iken diğer donanımlar mini bilgisayar olarak sınıflandırılmaktadır. Mini bilgisayarlar MSI GP72 gibi diz üstü bilgisayarlar ve masaüstü bilgisayarlar göre daha az enerji tüketen bilgisayarlar olmakla beraber büyüklükleri daha küçüktür. MKS yazılımının mini bilgisayarlar, masaüstü bilgisayarlar, dizüstü bilgisayarlarda kullanımı ön görüldüğü için birçok donanım üzerinde çalıştırılmıştır. Mini bilgisayarlarda GPU donanımına sahip Nvidia Jetson Nano geliştirilen yapay zekâ modelleri üzerinde çalışma performansı Tablo 4’te dikkat çekmektedir. Düşük enerji tüketimi ve kapladığı alana itibarı ile Nvidia Jetson Nano mini bilgisayarın robot projelerinde kullanımı önerilmektedir [25].

Tablo 3. Çalışmada kullanılan bilgisayar donanımları.


Donanım	Özellikleri
MSI GP72	<b>CPU:</b> Intel i7 7700 HQ 2.8 GHz <b>Ram:</b> 16 GB <b>GPU:</b> Nvidia Geforce GTX 1050 4GB
Nvidia Jetson Nano	<b>CPU:</b> Quad-core ARM A57 @ 1.43 GHz <b>Ram:</b> 4 GB 64 bit LPDDR4 <b>GPU:</b> 128 Çekirdek Maxwell GPU







Latte Panda Delta	<b>CPU:</b> Intel 8. Nesil Celeron İşlemci N4100 <b>Ram:</b> 4 GB LPDDR4 2400MHz <b>GPU:</b> Yok
Raspberry Pi 4- 8GB	<b>CPU:</b> 1.5 GHz Broadcom BCM2711 dört çekirdekli ARM Cortex-A72 <b>Ram:</b> 8 GB LPDDR4 -3200 <b>GPU:</b> Yok
Raspberry Pi 4- 4GB	<b>CPU:</b> 1.5 GHz Broadcom BCM2711 dört çekirdekli ARM Cortex-A72 <b>Ram:</b> 4 GB LPDDR4-3200 <b>GPU:</b> Yok





MKS yazılımı kişilerin yüzünde maskesiz, maskeli ve yanlış maske kullanımı yapan kişilerin gerçek zamanlı tespitini yaparak kişileri sesli olarak uyarabilmektedir. MKS yazılımının uygulanması için Raspberry Pi 4 ve Nvidia Jetson Nano mini bilgisayarlar sırasıyla Linux tabanlı Raspberry Pi Os ve Ubuntu işletim sistemi yüklenmiştir. Raspberry Pi 4 ve Nvidia Jetson Nano mini bilgisayarlar işletim sistemine ssh kabuk kontrol yazılımı olan Git Bash ve VNC Viewer adlı uzaktan kontrol yazılımı ile bağlanılmış, gerekli kütüphaneler olan opencv, lxml, tqdm, tensorflow, absl-py, easydict, matplotlib, pillow, omxplayer VNC Viewer üzerinden yüklenmiştir. MKS sisteminin maske tanıma ve sesle uyarı yapabilmesi için ilgili kütüphaneler Raspberry Pi 4 ve Nvidia Jetson Nano mini bilgisayarlar yüklenmiştir. MSI GP72 kişisel bilgisayara Windows 10 Pro. ve Latte Panda Delta mini bilgisayara Windows inspire işletim sistemleri yüklenmiştir. Raspberry Pi 4 ve Nvidia Jetson Nano mini bilgisayarlar yüklenen yazılımların Windows işletim sistemine ait kütüphane ve yazılımları MSI GP72 kişisel bilgisayara ve Latte Panda Delta mini bilgisayarına GPU ve CPU sürümleri yüklenmiştir. Python dili ile hazırlanan Maske Kontrol Sistemi(MKS) yazılımı Raspberry Pi 4 ve Nvidia Jetson Nano, Latte Panda Delta ve MSI GP72 model bilgisayarda çalıştırılmıştır. MKS yazılımının uygulanması ile elde edilen tahmin görselleri ve FPS değerleri Tablo 4’ te görülmektedir.

**Tablo 4.** MKS yazılımının farklı donanımlar üzerindeki tahminleri ve FPS sonuçları.

Model	Donanımlar	MKS Çıktıları	Çalışma Zamanı Türü	FPS Minimum ve Maksimum Değerleri
Model 1	MSI GP72		GPU	13,62 -21,42

<b>Model 2</b>	MSI GP72		GPU	1,9 - 2,03
<b>Model 1</b>	Latte Panda Delta 4 GB		CPU	1,82 - 2,06
<b>Model 2</b>	Latte Panda Delta 4 GB		CPU	0,19 – 0,22
<b>Model 1</b>	Raspbery Pi 4 – 4 GB		CPU	0,59 – 1,54

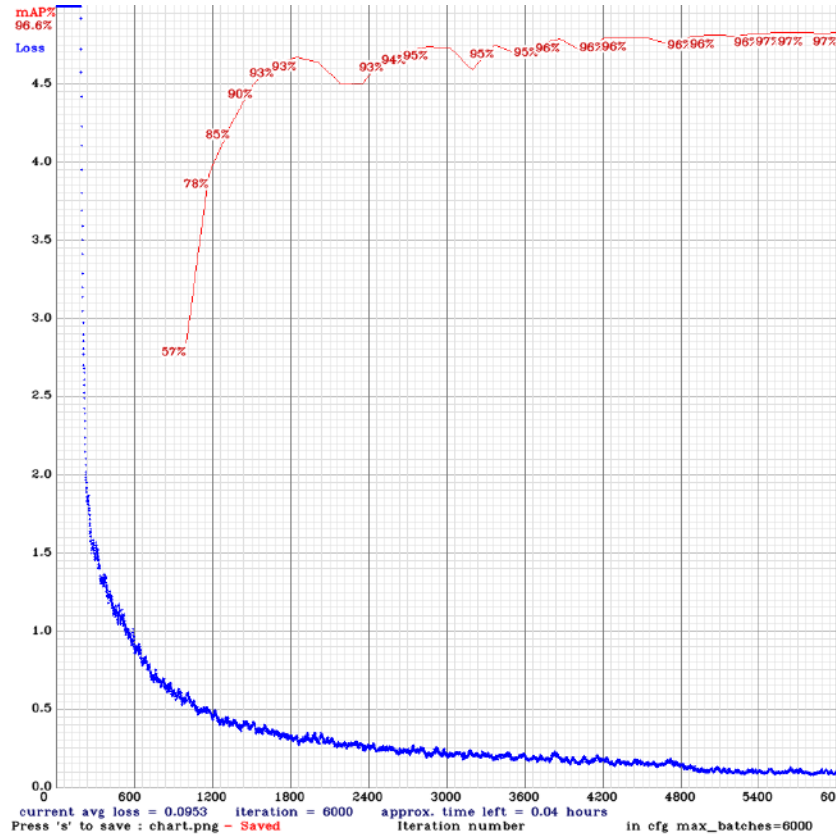
Derin Öğrenme Temelli Robotik Maske Kontrol Sistemi

<b>Model 2</b>	Raspbery Pi 4 – 4 GB		CPU	0,11 – 0,16
<b>Model 1</b>	Raspbery Pi 4 – 8 GB		CPU	0,84 – 1,72
<b>Model 2</b>	Raspbery Pi 4 – 8 GB		CPU	0,15 – 0,17
<b>Model 1</b>	Nvidia Jetson Nano 4 GB		GPU	8.2 – 12,3

Model 2	Nvidia Jetson Nano 4 GB		GPU	1,1 – 1,8
---------	-------------------------	---	-----	-----------

### 4.3. Google Colab Bulguları

Şekil 6'da YOLOv4-tiny ile geliştirilen Model 1'e ait mAP, kayıp (loss) ve iterasyon değerlerine ait grafik görülmektedir. Bu grafik Google Colab üzerinde eğitim sonunda elde edilmiştir. Şekil 6'da 6000 iterasyon sonunda mavi renk ile gösterilen kayıp (loss) değerlerinin azaldığı ve kırmızı renk ile gösterilen mAP değerlerinin arttığı görülmüştür.



Şekil 6 - YOLOV4-tiny ile geliştirilen Model 1'e ait mAP, kayıp (loss) / İterasyon Grafiği

## 5. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada 3 sınıflı (maskeli, maskesiz ve maskesini yanlış takan) maske kontrolünü gerçekleştiren 2 adet yapay zekâ modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen yapay zekâ modelleri Google Colab platformu üzerinde GPU'lu bilgisayarlar üzerinden eğitilmiştir. Model 1 ve Model 2 yapay zekâ modellerine ait mAP ve ortalama IoU değerleri sırasıyla %96,58 ile %98,45 - %74,74 ve %78,65 olarak elde edilmiştir. Çalışma için geliştirilen Model 1 ve Model 2 MKS yazılımı ile farklı donanımlara sahip bilgisayarlar üzerinde çalıştırılmıştır. Tablo 4'te MKS yazılımına ait FPS ve tahmin görselleri görülmektedir. Bu çalışmada geliştirilen yapay zekâ modellerinin GPU'lu bilgisayarlar CPU'ya sahip bilgisayarlara oranla daha yüksek FPS değerlerine ulaştığı Tablo 4'te görülmektedir. Model 2'nin Model 1'e göre daha başarılı olmasının nedeni Model 2'nin YOLOv4 ile geliştirilmiş olmasıdır. Yine Tablo 4'te Model 1'in FPS değerlerinin Model 2'ye göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Model 1'in Model 2'ye göre daha hızlı çalışmasını gösteren FPS değer farkının oluşmasındaki neden modellerin geliştirilme sürecinde kullanılan YOLO algoritmalarından kaynaklanmaktadır. Model 1 için kullanılan YOLOv4-tiny, Model 2 için kullanılan YOLOv4 ağına göre daha az katmana sahiptir. Tablo 2 de Modellere ait hassasiyet, geri çağırma, F1-skoru metrikleri sırasıyla 0,93 - 0,94, 0,93 - 0,97, 0,93 - 0,96 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca Tablo 2'de Model1 ve Model2'nin dosya boyutlarının sırasıyla 22,4 - 244,2 Mb (Megabayt) olduğu görülmektedir.

MKS sisteminin halka açık alanlarda robot üzerinde uygulanması ile maske takmayan kişiler sesli olarak uyarılmıştır. MKS sistemiyle maske takmayan kişiler kolaylıkla tespit edilerek, bu kontroller için kullanılacak iş gücünden tasarruf sağlanmıştır. MKS sistemi ile maske takan kişilere sesli teşekkür mesajları iletilerek maske kullanımı pekiştirilmek hedeflenmiştir. MKS sistemi geliştirilen robot üzerinde çalıştırılarak maske kontrolü gerçekleştirilmiştir.

MKS sistemi donanımsal olarak çok fazla bileşenden oluşmadığı gibi uygulanabilirlik olarak istenilirse devlet kurumları veya özel kurumların girişlerinde sistem sabit kameralara ve hoparlörlere bağlanarak turnike girişlerinde maske kullanımın kontrolü sağlanabilir. MKS sistemi mini bilgisayar ve kişisel bilgisayarlar üzerinde çalışabilmektedir. Çalışmada elde edilen prototipin farklı senaryolarla, yeni eklenecek modüllerle daha işlevsel ve yenilikçi bir ürün haline getirilmesi ve üretilmesi amaçlanmaktadır.

## Teşekkür

Çalışmada gerçekleştirilen prototip robot Teknofest 2021'de İnsanlık Yararına Teknoloji Yarışması Sağlık ve İlk Yardım kategorisinde üçüncülük elde etmiştir. Desteklerinden dolayı Teknofest düzenleme kuruluna teşekkür ederiz.

## Kaynaklar

- [1] Neeltje van Doremalen ve diğerleri, "Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1," (2020).
- [2] Qiu J., Covert coronavirus infections could be seeding new outbreaks. 2020.
- [3] Şirin H., Özkan S., "Dünyada ve Türkiye'de COVID-19 Epidemiyolojisi," Kulak Burun Boğaz ve Baş Boyun Cerrahisi Dergisi, vol. 28, (2020).
- [4] Kumar A. ve diğerleri, "Scaling up face masks detection with YOLO on a novel dataset," Optik, vol. 239, (2021).
- [5] Das A. ve diğerleri, "Covid-19 Face Mask Detection Using TensorFlow, Keras and OpenCV," in 2020 IEEE 17th India Council International Conference, INDICON 2020, 2020.
- [6] Yu J., Zhang W., "Face mask wearing detection algorithm based on improved yolo-v4," Sensors, vol. 21, no. 9, (2021).
- [7] Said Y., "Pynq-YOLO-Net: An embedded quantized convolutional neural network for face mask detection in COVID-19 pandemic era," International Journal of Advanced Computer Science and Applications, vol. 11, no. 9, (2020).
- [8] Mahurkar R. R., Gadge N. G., "Real-time Covid-19 Face Mask Detection with YOLOv4," in Proceedings of the 2nd International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems, ICESC 2021, 2021.
- [9] Oumina A. ve diğerleri, "Control the COVID-19 Pandemic: Face Mask Detection Using Transfer Learning," in 2020 IEEE 2nd International Conference on Electronics, Control, Optimization and Computer Science, ICECOCS 2020, 2020.
- [10] Loey M. ve diğerleri, "Fighting against COVID-19: A novel deep learning model based on YOLO-v2 with ResNet-50 for medical face mask detection," Sustainable Cities and Society, vol. 65, (2021).
- [11] Bhuiyan M. R. ve diğerleri, "A Deep Learning Based Assistive System to Classify COVID-19 Face Mask for Human Safety with YOLOv3," in 2020 11th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies, ICCCNT 2020, 2020.
- [12] Abbasi S. ve diğerleri, "A Face-Mask Detection Approach based on YOLO Applied for a New Collected Dataset," in 26th International Computer Conference, Computer Society of Iran, CSICC 2021, 2021.
- [13] Gedik O., Demirhan A., "Comparison of the effectiveness of deep learning methods for face mask detection,"

- Traitement du Signal, vol. 38, no. 4, (2021).
- [14] Ieamsaard J. ve diğerleri, "Deep Learning-based Face Mask Detection Using YoloV5," in Proceeding of the 2021 9th International Electrical Engineering Congress, iEECON 2021, 2021.
- [15] Nagrath P. ve diğerleri, "SSDMNV2: A real time DNN-based face mask detection system using single shot multibox detector and MobileNetV2," Sustainable Cities and Society, vol. 66, (2021).
- [16] Mercaldo F., Santone A., "Transfer learning for mobile real-time face mask detection and localization," Journal of the American Medical Informatics Association, vol. 28, no. 7, (2021).
- [17] Kumar G. P., "Face Mask Detection with Raspberry Pi," International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, vol. 9, no. VI, (2021).
- [18] Rani N. ve diğerleri, "Real-Time Face Mask Detection Using Raspberry Pi and Camera," in Lecture Notes in Networks and Systems, 2022, vol. 300 LNNS.
- [19] Cabani A. ve diğerleri, "MaskedFace-Net – A dataset of correctly/incorrectly masked face images in the context of COVID-19," Smart Health, vol. 19, (Mar. 2021).
- [20] "Face Mask Detection ~12K Images Dataset | Kaggle," Online: <https://www.kaggle.com/ashishjangra27/face-mask-12k-images-dataset> [Accessed: 09 January 2022]
- [21] Aalami N. ve diğerleri, "Derin Öğrenme Yöntemlerini Kullanarak Görüntülerin Analizi." <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.09.022>
- [22] Jiang Z. ve diğerleri, "Real-time object detection method for embedded devices."(2020). <https://arxiv.org/abs/2011.04244>
- [23] Redmon J. ve diğerleri, "You only look once: Unified, real-time object detection," in Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016, vol. 2016-December.
- [24] Lin H. H. ve diğerleri, "Efficient cell segmentation from electroluminescent images of single-crystalline silicon photovoltaic modules and cell-based defect identification using deep learning with pseudo-colorization," Sensors, vol. 21, no. 13, (Jul. 2021).
- [25] Göksu M., "Yapay Zeka Destekli İnteraktif Sağlık Robotu". (2022), Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tez Çalışması.
- [26] Parico A. I. B., Ahamed T., "Real time pear fruit detection and counting using yolov4 models and deep sort," Sensors, vol. 21, no. 14, (2021).
- [27] Kulshreshtha M. ve diğerleri, "Oatcr: Outdoor autonomous trash-collecting robot design using yolov4-tiny," Electronics (Switzerland), vol. 10, no. 18, (Sep. 2021).



## Diyabet Hastalıkları İçin GA-DFÇ-UÖM Tabanlı Uzman Tanı Sistemi

Akif DOĞANTEKİN<sup>1\*</sup>, Cafer BAL<sup>2</sup>

<sup>1</sup> İç Hastalıkları Bölümü, Gaziantep Emek Hastanesi, Gaziantep, Türkiye  
<sup>2</sup> Mekatronik Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye  
<sup>1</sup> akifdahiliye@gmail.com, <sup>2</sup> cbal@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 01/12/2021;

Kabul/Accepted: 12/12/2021)

**Öz:** Uç Öğrenme Makinesi (UÖM), regresyon ve sınıflandırma problemleri için yeni bir alandır. Bu çalışmada diyabet teşhisi için Genetik Algoritma-Dalgacık Çekirdek Fonksiyonu-Uç Öğrenme Makinesi (GA-DFÇ-UÖM) yöntemi kullanılmıştır. GA, UÖM' nin gizli nöron sayısını (GNS) ve Dalgacık Çekirdek Fonksiyonu (DFÇ)' nin q, t, j parametre değerlerini optimize etmek için kullanılır. Ayrıca DFÇ-UÖM' nin sınıflandırma performansını artırmak için Genetik Algoritma (GA) kullanılmaktadır. Diyabet Veri Seti (DVS) toplam 768 vaka içermektedir. Bu deneysel çalışmada kullanılan veri seti, UCI veri setinden alınan gerçek diyabet verilerinden oluşmaktadır. Veri seti, DFÇ-UÖM' nin eğitimi ve testi için kullanılır. Sağlıklı ve diyabetik hasta bilgilerinin özellik vektörü, DFÇ-UÖM sınıflandırıcısına girdi olarak sağlanır. Önerilen GA-DFÇ-UÖM yönteminin en başarılı sınıflandırma doğruluğu %98,3 olarak bulunmuştur. Bu başarıya dayalı olarak dalgacık çekirdek fonksiyonunun (DFÇ) q, t, j parametrelerinin değerleri 8, 9 ve 7 olarak bulunmuş ve GNS 140 olmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Uç Öğrenme Makinesi, Dalgacık Çekirdeği, Genetik Algoritma, Diyabet Hastalıkları Veri Kümesi, Teşhis Sistemi.

## GA-WKF-ELM Based Expert Diagnosis System for Diabetes Diseases

**Abstract:** The Extreme Learning Machine (ELM) is a new field for regression and computation. For this modeling function, it was designed using the Genetic Algorithm (GA)-Wavelet Kernel (WKF)- Extreme Learning Machine (ELM) method. GA is used for the optimization of Hidden Neuron Number (HNN) and q, t, j parameters of Wavelet Kernel Function (WKF). In addition, Genetic Algorithm (GA) is used for the comparative magnification of CFD-NPM. The Diabetes Dataset (DVS) contains a total of 768 cases. The data set used in this training consists of UCI data. The dataset is used for training and testing of the DFÇ-NPM. The behavior towards healthy and dietetic disease is submitted as input to the CFC-NPM classifier. I think that the GA-DFÇ-NPM method has the most successful results with 98.3%. Based on this structure, the values of the wavelet core (q, t, j frame were used as 8, 9 and 7 and the GNS was 140).

**Key words:** Edge Learning Machine, Wavelet Core, Genetic Algorithm, Diabetes Diseases Dataset, Diagnostic System.

### 1. Giriş

Kan aynı zamanda ömür boyu şeker hastalığına (diyabet) neden olan ve yüksek şeker değerlerine neden olan kronik bir hastalıktır. Vücudumuzdaki kan şekerini dengelemek için pankreas tarafından insülin adı verilen bir hormon üretilir [1]. Diyabet, vücudun insülini gerektiği gibi üretememesi ve vücudun insülini gerektiği gibi kullanamamasından kaynaklanır [2]. Vücudun şekerini (glikoz) enerji olarak depolanmak üzere kas, yağ ve karaciğer hücrelerine taşımadıkları için şeker hastalarında kan şekeri seviyeleri yüksektir. Diyabet çevresel ve genetik faktörlerden etkilenir. Şu anda dünyadaki yetişkinlerin %6,4'ü diyabetiktir [3]. 2030 yılına kadar diyabetli sayısının 438 milyona ulaşacağı ve yetişkinler için bu oranın %7,4 olacağı tahmin edilmektedir.

Diyabet iki gruba ayrılır [4]. Bunlar yetişkin ve çocuk diyabetidir. Obezite yetişkin diyabetine neden olur. Diyabet hastaları kesin olarak tedavi edilmezler ancak diyet ve egzersizle kontrol altına alınabilirler.

Literatürde diyabetle ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Levenberg-Marquardt, BFGS yarı Newton, Gradient, GRNN, RBF diyabet teşhisi için literatürde kullanılmıştır. Diyabet için Gradient iniş [5], GDA-LS-SVM [4], SVM [6], Semi-Naive Bayes, Naive Bayes [7] gibi yöntemler önerilmiştir. Önerilen akıllı sistem, doktorlara diyabet teşhisi konusunda yardımcı oluyor.

Bu çalışmada, diyabet tanısı için GA-DFÇ-UÖM tabanlı sistem önerilmektedir. Bu makalede sınıflandırıcı olarak tek katmanlı sinir ağı (SLNN) sınıflandırıcı, sınıflandırıcı eğitimi için DFÇ-UÖM öğrenme yöntemi kullanılmıştır. DFÇ-UÖM yapısı, DFÇ' nin üç adet düzenlenebilir parametresine sahiptir. q, t, j parametreleri UÖM' nin performansını etkiler. Bu parametrelere ek olarak GNS' nin belirlenmesinde önemlidir. Bu nedenle q, t,

\* Sorumlu yazar: [akifdahiliye@gmail.com](mailto:akifdahiliye@gmail.com). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-6078-540X, <sup>2</sup> 0000-0002-1199-2637



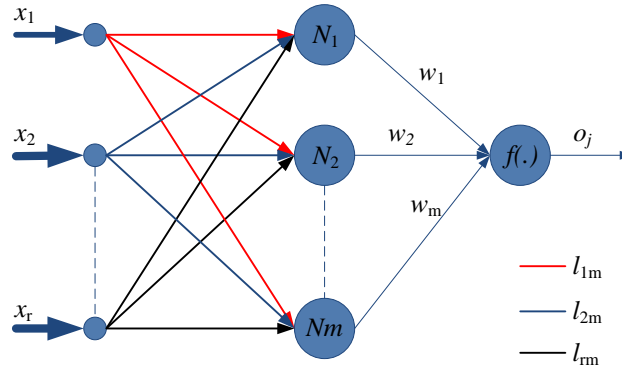
$j$  ve gizli nöronların (GN) değerlerinin doğru olması gerekir. Bu çalışmada, UÖM' nin bu parametrelerin ve GNS' lerinin optimal değerlerini bulmak için GA uygulanmıştır [8].

Bu çalışmada kullanılan veriler UCI Dataset' te elde edilen gerçek DVS' den alınmıştır. DVS, sağlıklı ve hasta olmak üzere iki gruptan oluşur. Önerilen GA-DÇF-UÖM sisteminin performansını değerlendirmek için ROC eğrileri, sınıflandırma doğruluğu, duyarlılık ve özgüllük analizi hesaplanır. GA, UÖM' nin GNS' sını ve DÇF' nin parametrelerini optimize etmek için kullanılır. GA' da bir birey toplam 20 bittten oluşur. Bu bireylerin her birinin 1., 2., 3. ve 4. bitleri, DÇF' lerin  $q$  parametre değerlerini (1 ila 16) temsil eder. Bu bireylerin her birinin 5., 6., 7. ve 8. bitleri, DÇF' lerin  $t$  parametre değerlerini (1 ila 16) temsil eder. Bu bireylerin her birinin 9., 10., 11. ve 12. bitleri, DÇF' lerin  $j$  parametre değerlerini (1 ila 16) temsil eder. Kalan 8 bit HNN'yi gösterir (5 ile 259 arasında). Birinci popülasyonda rastgele 60 kişi seçilmektedir. DDS toplam 768 vaka içerir. WK-ELM sınıflandırıcı, iyi bir genelleme performansı elde etmek için 576 veri seti ile eğitilmiştir. Kalan 192 veri seti, WK-ELM'yi test etmek için kullanılır. Sonuç olarak sınıflandırıcının hedefleri, hasta ve sağlıklı vakalar vardır. GA-DÇF-UÖM yöntemi diyabet tanısı için literatürde kullanılan yöntemlerle karşılaştırılır [8].

Bölüm 2' de UÖM, Bölüm 3' te GA, Bölüm 4' te DÇF-UÖM, Bölüm 5' te Kullanılan veritabanının vadeli işlemleri, Bölüm 6' da GA-DÇF-UÖM' nin diyabet teşhisi için uygulanması, Bölüm 7' de tartışma ve sonuç sırasıyla sunulmaktadır.

## 2. Uç Öğrenme Makinesi (UÖM)

Yapay Sinir Ağları (YSA' lar) problemlerde ve örüntü tanıma uygulamalarında kullanılır. Öğrenme parametrelerinin zor olması, hızlı olmayan öğrenme ve zayıf eğitim performansı YSA' ların dezavantajlarıdır [9],[10]. Huang ve diğerleri, UÖM' yi önerdiler. Gradient tabanlı öğrenme yöntemlerinin dezavantajlarının üstesinden gelmek için [10]. UÖM algoritmaları, tek bir gizli katman (GK) ileri besleme ağının (SLFN) hedef ağırlıklarının yinelemeli öğrenme şemasını kullanmaz. Bunun yerine UÖM, Moore-Penrose'u (MP) genelleştirilmiş tersini kullanarak analitik olarak hesaplar. Şekil 1, UÖM kullanılarak bir SLFN' nin yapısını göstermektedir.  $l_{1m}$ ,  $l_{2m}$  ve  $l_{rm}$ , GN ve giriş nöronlarını birleştiren ağırlık vektörleridir.  $w$ , GN ve hedef nöronun ağırlık fonksiyonudur,  $f(.)$  ÇF' dur.



Şekil 1. UÖM Mimarisi.

UÖM' nin özellikleri aşağıda verilmiştir.

- UÖM, hızlı öğrenme yeteneği nedeniyle sınıflandırma problemde kullanılır.
- UÖM, en azından eğitim hatasını ve en küçük ağırlığı elde etmeyi amaçlar.
- Bu nedenle UÖM, sinir ağları için iyi performans gösterir.
- UÖM' nin öğrenmesi hızlıdır. Bu nedenle SLFN, UÖM ile klasik yöntemlerden daha hızlı eğitilebilir.
- UÖM öğrenme algoritmaları, SLFN' leri eğitmek için kullanılır. UÖM, türevlenemeyen ÇF' lar ile kullanılabilir.
- UÖM, cevaba doğrudan ulaşmayı amaçlar [9]. Aşağıda,  $m$  tane nöron ve  $f$  tane ÇF' a sahip bir SLFN' nin çıkışı bulunmaktadır.

$$o_j = \sum_{i=1}^m \beta_i f(l_i x_r + b_i) \quad (1)$$

Burada, standart SLFN m adet GN ve f adet ÇF' a sahiptir, SLFN çıkışı m tane örneği kullanarak, herhangi bir hata olmadan hesaplar, burada w ve l ağırlıklar, b biastır [9], [11].

$$\sum_{j=1}^m (o_j - t_j) = 0$$

$$t_j = \sum_{i=1}^m w_i f(l_i x_r + b_i), \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

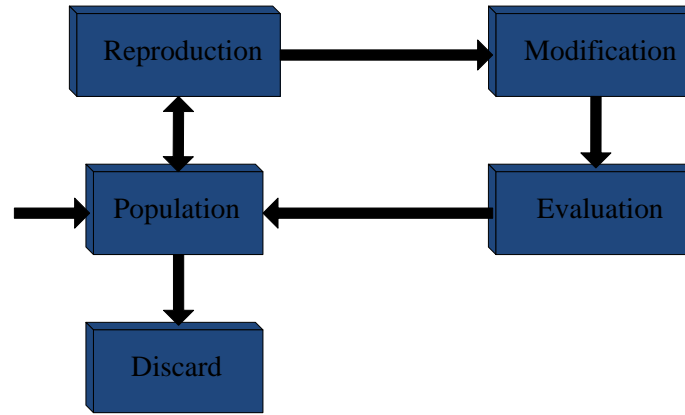
$$H \times w = T \quad (3)$$

Burada H, SLFN' nin hedef matrisidir.

$$H(l_1, \dots, l_m, b_1, \dots, b_m, x_1, \dots, x_m) = \begin{bmatrix} f(l_1 x_1 + b_1) & \dots & f(l_m x_1 + b_m) \\ \vdots & \dots & \vdots \\ f(l_1 x_m + b_1) & \dots & f(l_m x_m + b_m) \end{bmatrix} \quad (4)$$

### 3. Genetik Algoritma

GA, doğal seleksiyon ilkesine dayanan sayısal bir optimizasyon yöntemidir. GA, optimizasyon ve makine öğrenimi uygulamaları için bazı parametreleri ayarlamak için etkili bir yöntemdir [12]. GA tıpta, bilimde ve mühendislikte yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 2, bir GA'nın yapısını göstermektedir. GA' nın yapısı, kodlama tekniğini, başlatma prosedürünü, değerlendirme fonksiyonunu, ebeveyn seçimini, genetik operatörleri içerir [8].



Şekil 2. Bir GA' nın bileşenleri.

GA' da bireyler kromozomlarla temsil edilir ve kromozomlu bir başlangıç popülasyonu rastgele oluşturulur [13]. Bireyler, permütasyonlar (P11, P3, P7, ..., P14, P15), kurallar listesi (K1, K2, K3, ..., K22, K23), bit dizileri (0101 ... 1100), gerçek sayılar (56.3-78.6 ... 1.4 91.15 ) gibi veri yapıları ile temsil edilir. Aşağıdaki işlem adımlarını kullanarak GA, üreme döneminde popülasyonun bireylerini, popülasyon değerlerine göre rastgele seçer. GA, değerlendirme aşamasında bir kromozomu çözer ve onu bir uygunluk fonksiyonundan geçirerek, uygunluk değerini hesaplar [8]. Aşağıda GA içerisinde yapılan bu işlemler adım adım verilmiştir:

**Adım 1:** Problem için uygun çözüm olan rastgele n tane kromozomdan oluşmuş bir popülasyon elde edilir.

**Adım 2:** Popülasyondaki her bir x bireyi için uygunluk fonksiyonu  $f(x)$  hesaplanır. Bu çalışmada, popülasyondaki her bir birey, rastgele oluşturulur.

**Adım 3:** Popülasyondaki bireyler, en yüksek uygunluk değerlerine göre sıralanarak, istenilen sayıda uygunluk değeri yüksek birey seçilerek, bu bireyler kendi arasında çaprazlanır. Böylelikle, popülasyonun bir sonraki nesilinde de birey sayısının sabit tutabilmesi için eksik birey sayısı tamamlanır.

**Adım 4:** Çaprazlama operatörü uygulanarak, yeni bireyler elde edilir. Eğer bu adımda çaprazlama operatörü uygulanmasaydı, bireyler bir önceki popülasyondaki bireylerle aynı kalırdı.

**Adım 5:** Kromozom üzerindeki bazı diziler, spesifik mutasyon oranına göre yer değiştirir.

**Adım 6:** Yeni elde edilen popülasyon, eski popülasyon ile değiştirilir. Böylece yeni bireyler elde edilir.

**Adım 7:** Nihai koşullar uygunsa, genetik algoritma durdurulur ve mevcut popülasyon en iyi sonucu verir.

**Adım 8:** 2. adım geçilir. Yeni oluşturulan popülasyon, algoritmada [14] döndürülür.

#### 4. DÇF-UÖM

Öğrenme parametrelerinin zor olması, hızlı olmayan öğrenme ve zayıf eğitim performansı YSA' ların dezavantajlarıdır. Son zamanlarda UÖM kullanımı artmıştır [11], [16]. UÖM algoritmasında gizli katmanın başlangıç parametrelerinin ayarlanmasına gerek yoktur. Bu algoritma doğrusal olmayan fonksiyonlarda GN olarak kullanılır. Farklı örnek veri kümeleri  $\{(p_j, m_j) | p_j \in Q^l, m_j \in Q^k, j = 1, \dots, M\}$  için k, bir GN olarak UÖM' nin hedef işlevidir.

$$u_k(p) = \sum_{j=1}^K N_j h_j(p) = h(p)N, \quad (5)$$

$h = [h_1(p), h_2(p), \dots, h_k(p)]$  p girişine göre Gizli Katman (GK)' nin çıkış vektörüdür.  $N = [N_1, N_2, \dots, N_k]$  çıkış nöronları ve GK nöronları arasındaki çıkış ağırlıklarının vektörüdür. h vektörü, giriş alanını UÖM özellik alanına dönüştürür [16]. UÖM' nin yapımında eğitim hataları minimuma indirilmelidir. Bu nedenle eğitim hatası ve çıkış ağırlıkları aynı anda en düşük noktaya indirilmelidir. UÖM kullanımı ile sinir ağlarının genelleştirme yeteneği artmaktadır.

Minimize denklemleri:  $\|TN - W\|, \quad \|N\|.$

$$N = T^T \left( \frac{1}{R} + TT^T \right)^{-1} W, \quad (6)$$

T, GK çıkış matrisini, W, örneklerin beklenen çıkış matrisini ve R, regresyon katsayısını temsil eder. Aşağıda, UÖM öğrenme algoritmasının çıkış fonksiyonu gösterilmektedir.

$$u(p) = h(p)T^T \left( \frac{1}{R} + TT^T \right)^{-1} W \quad (7)$$

$h(p)$  öznitelik vektörü bilinmediği sürece, Mercer'in koşullarına göre UÖM' nin çekirdek matrisi aşağıdaki gibidir:

$$K = TT^T : k_{jz} = h(p_j)h(p_z) = b(p_j, p_z), \quad (8)$$

Böylece,  $u(p)$  UÖM çıkış fonksiyonuna dayalı DÇF aşağıdaki gibidir:

$$u(p) = [b(p, p_1), \dots, b(p, p_M)] \left( \frac{1}{R} + K \right)^{-1} W \quad (9)$$

$K = TT^T$  çekirdek matrisidir.  $b(p, g)$  UÖM' nin ÇF' sidir. Doğrusal çekirdek, polinom çekirdeği, Gauss çekirdeği ve üstel çekirdek gibi bazı ÇF' ları UÖM literatüründe Mercer koşuluna göre fonksiyonlardır. Bu çalışmada Denk. (10), DÇF-UÖM [25]' in performans testi için uygulanmıştır.

$$b(p, g) = \cos \left( q \frac{\|p - g\|}{t} \right) \exp \left( - \frac{\|p - g\|^2}{j} \right) \quad (10)$$

Denklem 11' de gösterilen DÇF' nin eğitim ve test başarısı, sırasıyla doğrusal çekirdek, polinom çekirdeği, Gauss çekirdeği ve üstel klasik ÇF' lerin performansları ile karşılaştırıldığında daha iyidir. DÇF' nin  $q$ ,  $t$  ve  $j$  düzenlenebilir parametreleri, sinir ağlarının performansını etkiler. Bu nedenle bu parametrelerin değerleri probleme göre dikkatli bir şekilde ayarlanmalıdır. GK özelliklerinin ve GNS' nin DÇF-UÖM algoritmalarında bilinmesine gerek yoktur. Ayrıca, DÇF-UÖM öğrenme algoritması, diğer benzer algoritmalarından daha iyi genelleme yeteneğine sahiptir. DÇF-UÖM' nin klasik UÖM' den daha tutarlı olduğu açıktır. DÇF-UÖM diğer sınıflandırıcılardan daha hızlı sonuca ulaşır [16], [17].

## 5. Kullanılan Veritabanının Özellikleri

Bu deneysel çalışmada kullanılan veri seti, UCI veri setinden alınan gerçek diyabet verilerinden oluşmaktadır. DÇF-UÖM' nin eğitimi ve testi için veri seti uygulanır. Bu veritabanı aşağıdaki özelliklerden oluşmaktadır.

- a) Örnek Sayısı: 768' dir.
- b) Özellik Sayısı: 8' dir.

Özellikler, oral glukoz tolerans testinde 2 saatlik plazma glukoz konsantrasyonu, diyastolik kan basıncı, gebelik sayısı, triceps deri kıvrım kalınlığı, saat serum insülini, vücut kitle indeksi, diyabet soy fonksiyonu ve yaştan oluşur. Tablo 1' de veri setinin istatistiksel analizi verilmektedir. Sütun 9, 0 veya 1 değerlerinden birini alır. Sınıf değeri 1, "diyabet için test pozitif" olarak yorumlanır ve sınıf değeri 0, diyabet için "diyabet için test negatif" olarak yorumlanır.

Örneklerin Sınıflara göre dağılımı

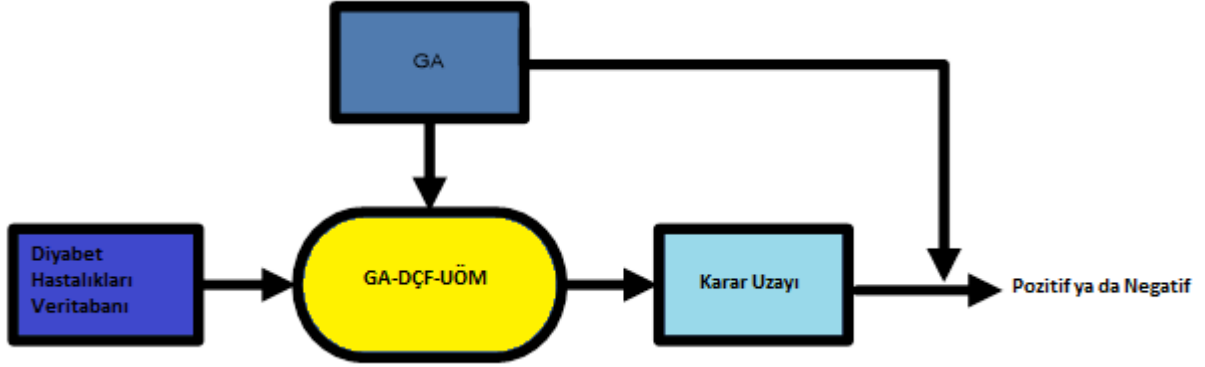
0	500
1	268

**Tablo 1.** Veritabanının istatistiksel analizi

Özellik Numarası	Ortalama	Standart Sapma
1	3.8	3.4
2	120.9	32.0
3	69.1	19.4
4	20.5	16.0
5	79.8	115.2
6	32.0	7.9
7	0.5	0.3
8	33.2	11.8

## 6. GA-DÇF-UÖM Yönteminin Diyabet Hastalıkları Veritabanına Uygulanması

Diyabet hastalıklarının teşhisi için GA-DÇF-UÖM yöntemi tabanlı akıllı teşhis sisteminin akış şeması aşağıda Şekil 3' te gösterilmektedir.



Şekil 3. GA-DÇF-UÖM' nin akış şeması

GA-DÇF-UÖM' nin üç katmanı vardır. İlk katman DVS içerir. DVS toplam 768 örnek içerir. İkinci katmanda GA, UÖM' nin GNS' sini ve DÇF' nin parametrelerini optimize eder. GA yapısında bir birey toplam 20 bitten oluşur.

- Bu bireylerin her birinin ilk dört biti (1., 2., 3. ve 4. bitler), DÇF'lerin q parametre değerlerini (1 ila 16) temsil eder.
- Bu bireylerin her birinin ikinci dört biti (5., 6., 7. ve 8. bit), DÇF'lerin t parametre değerlerini (1 ila 16) temsil eder.
- Bu bireylerin her birinin (9., 10., 11. ve 12. bitler) üçüncü dört biti, DÇF'lerin j parametre değerlerini (1 ila 16) temsil eder.
- Kalan 8 bit GNS' yi (5 ile 259 arasında) gösterir [8].

İlk popülasyon için bireyler rastgele seçilir. DÇF-UÖM, sınıflandırıcının en iyi performansını elde etmeyi amaçlar. DÇF-UÖM sınıflandırıcısı 576 veri seti ile eğitilmiştir. Kalan 192 veri seti, DÇF-UÖM' yi test etmek için kullanılır. Sağlıklı ve hastalıklı durumları sınıflandırıcının çıkışı temsil eder.

DÇF parametresinin optimal değerleri ve UÖM' nin gizli nöron sayısı, optimum değerleri öneren GA-DÇF-UÖM yöntemi ile hesaplanmıştır. GA-DÇF-UÖM, bu alandaki önceki çalışmalardan farklıdır. Sonuç olarak, GA-DÇF-UÖM diyabet teşhisi için çok güçlü ve gerçek zamanlı bir sistem olarak görünmektedir. Bu çalışmada, GA kullanılarak üçlü çapraz doğrulama şeması uygulanmıştır. GA-DÇF-UÖM performansını bulmak için ortalama değerler hesaplanmıştır. İlk olarak, rastgele başlangıç popülasyonu olarak toplam 20 bitten oluşan 60 birey seçilir. DÇF'nin q, t, j parametrelerinin kodlama değerleri Tablo 2' de, GNS' nin kodlaması ise Tablo 3' te verilmiştir.

**Tablo 2.** DÇF' lerin parametreleri için kodlama

q, t, j parametrelerinin değerleri	Kodlama
1	0 0 0 0
2	0 0 0 1
3	0 0 1 0
4	0 0 1 1
5	0 1 0 0
6	0 1 0 1
7	0 1 1 0
8	0 1 1 1
9	1 0 0 0
10	1 0 0 1
11	1 0 1 0
12	1 0 1 1
13	1 1 0 0
14	1 1 0 1
15	1 1 1 0
16	1 1 1 1

**Tablo 3.** GNS' nin Kodlanması

q, t, j parametrelerinin değerleri	Kodlama
5	0 0 0 0 0 0 0 0
6	0 0 0 0 0 0 0 1
7	0 0 0 0 0 0 1 0
8	0 0 0 0 0 0 1 1
.	.
.	.
.	.
.	.
259	1 1 1 1 1 1 1 1

Bireylerin her birinin (1., 2., 3. ve 4. bitler) ilk dört biti, DÇF' lerin q parametre değerlerini (1 ila 16) temsil eder. Bireylerin her birinin ikinci dört biti (5., 6., 7. ve 8. bit), DÇF' lerin t parametre değerlerini (1 ila 16) temsil eder. Bireylerin her birinin üçüncü dört biti (9., 10., 11. ve 12. bit) DÇF' lerin j parametre değerlerini (1 ila 16) temsil eder ve kalan 8 bit GNS' yi (5 ila 259) temsil eder [8].

Bu çalışmada, sınıflandırma doğruluğu, Alıcı Operasyonel Karakter (AOK) eğrileri, duyarlılık ve özgüllük analizi kullanılarak GA-DÇF-UÖM' nin performansı hesaplanmıştır. Veri setleri için sınıflandırma doğrulukları aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır [20-22].

$$DO(C) = \frac{\sum_{k=1}^{|C|} d(c_k)}{|C|}, \quad c_k \in C \quad (11)$$

$$d(C) = \begin{cases} 1 & \text{if } C(c) = c.m \\ 0 & \text{aksihalde} \end{cases} \quad (12)$$

$$d(c) = \begin{cases} 1, & \text{if } C(c) = c.d \\ 0, & \text{aksihalde} \end{cases} \quad (12)$$

Burada C sınıfların tamamıdır. c.m, m. c sınıfıdır. Duyarlılık ve özgüllük analizinin hesaplanması aşağıda gösterilmiştir.

$$sensitivity(\%) = \frac{TP}{TP + FN} \quad (13)$$

$$specificity(\%) = \frac{TN}{FN + TN} \quad (14)$$

Burada; TP, gerçek pozitifleri temsil eder. TN, gerçek negatifleri temsil eder. FP, yanlış pozitifleri temsil eder. FN, yanlış negatifleri temsil eder [21].

## 7. Sonuçlar ve Karşılaştırmalar

Önerilen GA-DÇF-UÖM' nin performansı, sınıflandırma doğruluğu, AOK eğrisi, duyarlılık ve özgüllük analizi kullanılarak değerlendirilmiştir. Farklı GNS ve farklı ÇF' lara sahip klasik UÖM sınıflandırıcılarının performansı, optimum GNS ve optimal parametreler q, t, j2 nin kullanıldığı GA-DÇF-UÖM yönteminin performansı ile karşılaştırılmıştır. Önerilen GA-DÇF-UÖM' nin en iyi sınıflandırma doğruluğu % 98,3 olarak bulunmuştur. Bu başarıya dayalı olarak DÇF' nin q, t, j parametrelerinin değerleri 8, 9 ve 7 olarak bulunmuş ve GNS 140 olarak bulunmuştur. Tablo 4, önerilen GA-DÇF-UÖM'nin en iyi dört performansını ve parametre değerlerini göstermektedir.

**Tablo 4.** Önerilen GA-DÇF-UÖM' nin en iyi dört performans ve parametre değeri.

Kullanılan Yöntem	ÇF Tipi	DÇF' nin q parametre tipi	DÇF' nin t parametre tipi	DÇF' nin j parametre tipi	GNS	Doğruluk (%)
GA-DÇF-UÖM	Dalgacık	8	9	7	140	98.31
GA-DÇF-UÖM	Dalgacık	6	9	11	66	97.65
GA-DÇF-UÖM	Dalgacık	11	15	13	115	96.58
GA-DÇF-UÖM	Dalgacık	14	2	15	9	95.86

UÖM' nin optimum parametrelerini bulmak için farklı işlemler gerçekleştirilebilir. Gizli Katman Nöron Sayısı (GKNS)' nı kademeli olarak 1'den 100'e 10' ar adım çıkararak, eğitim ve test süreçlerinde farklı aktivasyon fonksiyonları kullanılmıştır [23]. Tablo 5' te UÖM' nin performansı gösterilmiştir.

**Tablo 5.** Farklı parametreler için UÖM' nin performansı.

Aktivasyon Fonksiyonu	GKNS	Sınıflandırma Doğruluğu (%)	
		Eğitim	Test
<i>Logaritmik Sigmoid</i>	10	79.69	76.02
	20	78.65	75.00
	30	77.60	76.50
	40	77.08	76.04
	50	77.08	76.04
	60	80.73	75.52
	70	77.60	75.52
	<b>80</b>	<b>80.73</b>	<b>79.17</b>
	90	80.73	72.40
	100	81.25	74.48
<i>Sinüsoidal</i>	10	78.99	75.52
	20	80.21	77.60
	30	81.60	75.52
	40	80.73	75.00
	50	82.47	76.04
	60	84.03	76.56
	70	82.29	76.04
	80	83.33	76.56
	<b>90</b>	<b>83.16</b>	<b>78.65</b>
	100	83.85	75.00
<i>Tanjant Sigmoid</i>	10	78.47	78.13
	20	81.03	80.21
	30	82.05	81.25
	40	80.73	77.08
	<b>50</b>	<b>85.02</b>	<b>84.61</b>
	60	80.73	80.21
	70	82.64	76.56
	80	84.03	76.56
	90	84.03	75.52
	100	84.55	79.69

Tablo 4 ve Tablo 5 karşılaştırıldığında, GNS' nin optimum değeri GA kullanılarak belirlenerek sınıflandırma performansı iyileştirilmiştir. Ayrıca DÇF-UÖM' nin q, t, j parametreleri GA kullanılarak optimize edilmiştir. Böylelikle, GA-DÇF-UÖM' nin sınıflandırma performansı artırılmıştır.

Tablo 4' de GA-DÇF-UÖM tabanlı sistemin sınıflandırma doğruluğu önceki yöntemler [5], [7], [15], [18], [19], [24] ile karşılaştırılmıştır. Tablo 4 ve Tablo 5 karşılaştırıldığında, GNS' nin GA kullanılarak belirlenen optimum değeri kullanılarak, sınıflandırma performansının iyileştirildiği görülmüştür. Ayrıca DÇF-UÖM' nin q, t, j parametreleri GA kullanılarak optimize edilmiştir. Böylelikle, GA-DÇF-UÖM' nin sınıflandırma performansı artırılmıştır. Tablo 6' da GA-DÇF-UÖM tabanlı sistemin sınıflandırma doğruluğu önceki yöntemler [5], [7], [15], [18], [19], [24] ile karşılaştırılmıştır.



**Tablo 6.** GA-DÇF-UÖM tabanlı sistemin doğru tanıma performansının önceki yöntemlerle karşılaştırılması

<b>Yöntem</b>	<b>Doğruluk %</b>	<b>Kaynak</b>
Logdisc	77.7	Statlog
IncNet	77.6	Norbert Jankowski
DIPOL92	77.6	Statlog
Linear Discr. Anal.	77.5-77.2	Statlog; Ster & Dobnikar
SMART	76.8	Statlog
GTO DT (5xCV)	76.8	Bennet and Blue
kNN, k=23, Manh, raw, W	76.7±4.0	WD-GM, feature weighting 3CV
kNN, k=1:25, Manh, raw	76.6±3.4	WD-GM, most cases k=23
ASI	76.6	Ster & Dobnikar
Fisher discr. analysis	76.5	Ster & Dobnikar
MLP+BP	76.4	Ster & Dobnikar
MLP+BP	75.8± 6.2	Zarndt
LVQ	75.8	Ster & Dobnikar
RBF	75.7	Statlog
NB	75.5-73.8	Ster & Dobnikar; Statlog
kNN, k=22, Manh	75.5	Karol Grudziński
MML	75.5± 6.3	Zarndt
SNB	75.4	Ster & Dobnikar
BP	75.2	Statlog
kNN, k=18, Euclid, raw	74.8± 4.8	WD-GM
CART DT	74.7± 5.4	Zarndt
CART DT	74.5	Statlog
DB-CART	74.4	Shang & Breiman
ASR	74.3	Ster & Dobnikar
Bayes	72.2± 6.9	Zarndt
C4.5 (5xCV)	72.0	Bennet and Blue
CART	72.8	Ster & Dobnikar
Kohonen	72.7	Statlog
kNN	71.9	Ster & Dobnikar
C4.5 rules	67.0± 2.9	Zarndt
QDA	59.5	Ster, Dobnikar
BFGS quasi Newton	77.08	(Yildirim et al. 2003)
Levenberg-Marquardt	77.08	(Yildirim et al. 2003)
RBF	68.23	(Yildirim et al. 2003)
GRNN	80.21	(Yildirim et al. 2003)
GDA-LS-SVM	79.16	(K. Polat et al., 2008)
Gradient descent	77.60	(Yildirim et al. 2003)
SVM (5xCV)	77.6	Bennet and Blue
C4.5	76.0±0.9	Friedman, 5xCV
Semi-Naive Bayes	76.0±0.8	Friedman, 5xCV
Naive Bayes	74.5±0.9	Friedman, 5xCV
GA-DÇF-UÖM	98.31	Bu çalışmada

Önerilen GA-DÇF-UÖM' nin geçerliliğini göstermek için önceki çalışmalarla karşılaştırılan sonuçlar da Tablo 4' de gösterilmektedir. Tablo 6' da gösterildiği gibi, diyabet için en iyi performans %98,31 ile önerilen GA-DÇF-UÖM kullanılarak elde edilmiştir. Çünkü UÖM' nin GNS' sının optimum değerleri ve DÇF' nun q, t, j parametreleri GA kullanılarak elde edilmiştir.

GA-DÇF-UÖM' ye dayalı olarak önerilen tanı sisteminin etkinliğini göstermek için duyarlılık ve özgüllük analizi yapılır. Diyabet için GA-DÇF-UÖM yöntemi kullanılarak elde edilen duyarlılık ve özgüllük değerleri Tablo 7' de gösterilmiştir. Tablo 8' de, elde edilen duyarlılık ve özgüllük değerlerinin bu alanda yapılan diğer çalışmalarla karşılaştırılması gösterilmiştir.

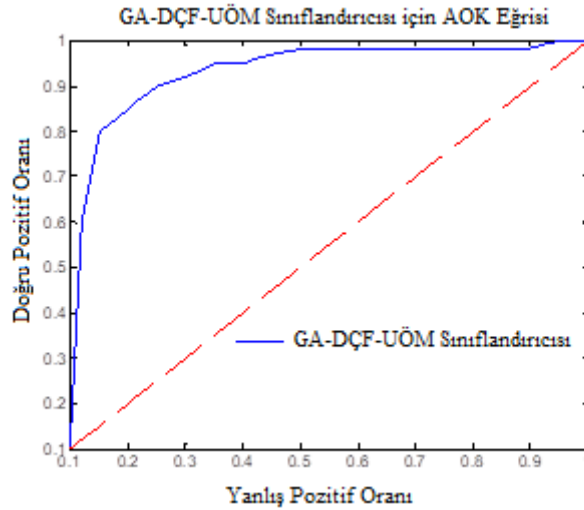
**Tablo 7.** Diyabet için GA-DÇF-UÖM yöntemi kullanılarak elde edilen duyarlılık ve özgüllük değerleri

Yöntem	Sınıflandırma Doğruluğu (%)
Duyarlılık Analizi	97.72
Özgüllük Analizi	98.9
<b>Ortalama</b>	<b>98.31</b>

**Tablo 8.** Duyarlılık ve özgüllük değerlerinin bu alanda yapılan diğer çalışmalarla karşılaştırılması

	Duyarlılık (%)	Özgüllük (%)
LS-SVM (K. Polat ve arkadaşları, 2008)	73.91	80
GDA-LS-SVM (K. Polat ve arkadaşları, 2008)	79.16	83.33
GA-DÇF-UÖM (Bu çalışmada kullanılan yöntem)	97.72	98.9

Bu çalışmada TP, TN, FP ve FN kullanılarak AOK eğrileri ve AUC değerleri bulunmuştur. TP, gerçek pozitifleri temsil eder. TN, gerçek negatifleri temsil eder. FP, yanlış pozitifleri temsil eder. FN, yanlış negatifleri temsil eder. GA-DÇF-UÖM'nin AOK eğrisi Şekil 5'te gösterilmiştir. AOK eğrilerinin AUC (AOK Eğrisi Altında Kalan Alan) değeri, diyabet verileri için GA-DÇF-UÖM kullanılarak 0,983 olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 4.** Diyabet teşhisi için önerilen GA-DÇF-UÖM yönteminin AOK eğrisi.

## 8. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, GA-DÇF-UÖM diyabet teşhisi için akıllı bir teşhis sistemi önerilmektedir. Özellik vektörünün doğrudan kullanımı, hızlı eğitim ve test süresi ve geleneksel sinir ağları üzerinden genelleme yapabilme yeteneği, GA-DÇF-UÖM diyabet tanı sisteminin avantajlarıdır. Diyabet veri tabanından alınan özellik vektörü, DÇF-UÖM

sınıflandırıcılarına girdi olarak verilir. DÇF-UÖM yapısı, DÇF' nin üç adet düzenlenebilir parametresine sahiptir. DÇF-UÖM sınıflandırıcısının içerisindeki UÖM' nin GNS değerleri, q, t, j parametreleri UÖM' nin performansında önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle bu parametrelerin ve GNS değerlerinin dikkatli bir şekilde ayarlanması gerekir. Bu çalışmada, GA ile DÇF-UÖM' deki UÖM' nin GNS değerlerinin ve q, t, j parametrelerinin optimum değerleri elde edilmiştir. GA kullanılarak elde edilen optimal değerler, DÇF-UÖM sınıflandırıcısına verilmiştir. GA-DÇF-UÖM tabanlı akıllı diyabet tanı sistemi, olası diyabet hastalarının iyi düzeyde teşhis edilmesini sağlamaktadır. Bu tatmin edici sonuçlar sayesinde doktorlar, hastalar hakkında nihai karara varabileceklerdir. Böylece, doktorlar diyabet teşhisi konusunda daha doğru karar verebilmek için önerilen yöntemi kullanabileceklerdir.

### Kaynaklar

- [1] American Diabetes Association. (2014). Diagnosis and classification of diabetes mellitus. *Diabetes care*, 37(Supplement 1), S81-S90.
- [2] American Diabetes Association. (2014). Standards of medical care in diabetes—2014. *Diabetes care*, 37(Supplement 1), S14-S80.
- [3] Johnson, R. J., Nakagawa, T., Sanchez-Lozada, L. G., Shafiu, M., Sundaram, S., Le, M., ... & Lanaspas, M. A. (2013). Sugar, uric acid, and the etiology of diabetes and obesity. *Diabetes*, 62(10), 3307-3315.
- [4] K. Polat, S. Gunes and A. Arslan, (2008). A cascade learning system for classification of diabetes disease: Generalized Discriminant Analysis and Least Square Support Vector Machine, *Expert Systems with Applications* 34, p.p.482-487.
- [5] K., Kayaer, & T. Yıldırım, (2003). Medical diagnosis on pima indian diabetes using general regression neural networks, artificial neural networks and neural information processing (ICANN/ICONIP) (pp. 181-184), Istanbul, Turkey, June 26-29.
- [6] K.P. Bennett, J. Blue, A Support Vector Machine Approach to Decision Trees, R.P.I Math Report No. 97-100, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, 1997.
- [7] Friedman N, Geiger D, Goldszmit M (1997). Bayesian networks classifiers. *Machine Learning* 29: p.p.131-163.
- [8] Avci, D. (2016). An Automatic Diagnosis System for Hepatitis Diseases Based on Genetic Wavelet Kernel Extreme Learning Machine. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 11(4), 993-1002.
- [9] G. B. Huang, Q.-Y. Zhu and C.-K. Siew, "Extreme Learning Machine: Theory and Applications", *Neurocomputing*, vol. 70, pp. 489-501, 2006.
- [10] N.-Y. Liang, G.-B. Huang, P. Saratchandran, and N. Sundararajan, "A Fast and Accurate On-line Sequential Learning Algorithm for Feedforward Networks", *IEEE Transactions on Neural Networks*, 17 (2006) 1411-1423.
- [11] Al-Shayea, Qeethara Kadhim. "Artificial neural networks in medical diagnosis", *International Journal of Computer Science Issues* 8.2 (2011): 150-154.
- [12] Whitley, D. (2014). An executable model of a simple genetic algorithm. *Foundations of genetic algorithms*, 2(1519), 45-62.
- [13] Xiong, H. Y., Alipanahi, B., Lee, L. J., Bretschneider, H., Merico, D., Yuen, R. K., ... & Morris, Q. (2015). The human splicing code reveals new insights into the genetic determinants of disease. *Science*, 347(6218), 1254806.
- [14] Goldberg, D. E. (2006). *Genetic algorithms*. Pearson Education India.
- [15] Bin Li, Xuewen Rong and Yibin Li, "An Improved Kernel Based Extreme Learning Machine for Robot Execution Failures", *Hindawi Publishing Corporation The Scientific World Journal*, Volume 2014, Article ID 906546, pp. 7, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/906546>.
- [16] Peng Guan, De-Sheng Huang, Bao-Sen Zhou, Forecasting model for the incidence of hepatitis A based on artificial neural network, *China World Journal of Gastroenterol*; 10(24), 2004, pp. 3579-3582.
- [17] Polat K., Gunes S., Hepatitis disease diagnosis using a new hybrid system based on feature selection (FS) and artificial immune recognition system with fuzzy resource allocation, *Digital Signal Processing* 16 (2006), pp. 889-901.
- [18] J. Beyer, J. Schrezenmeir, G. Schulz, T. Strack, E. Küstner, G. Schulz, The influence of different generations of computer algorithms on diabetes control, *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, Vol. 32, Issues 3-4, July-August 1990, Pages 225-232.
- [19] <http://www.phys.uni.torun.pl/kmk/projects/datasets.html> ((last accessed: April 18, 2011).
- [20] Robin, X., Turck, N., Hainard, A., Tiberti, N., Lisacek, F., Sanchez, J. C., & Müller, M. (2011). pROC: an open-source package for R and S+ to analyze and compare ROC curves. *BMC bioinformatics*, 12(1), 77.
- [21] Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. *Pattern recognition letters*, 27(8), 861-874.
- [22] Smith, S. M., & Nichols, T. E. (2009). Threshold-free cluster enhancement: addressing problems of smoothing, threshold dependence and localisation in cluster inference. *Neuroimage*, 44(1), 83-98.
- [23] Matlab 7.7.0, MATLAB Company, 2011.
- [24] Ertam, F., & Avci, E. (2017). A new approach for internet traffic classification: GA-DÇF-UÖM. *Measurement*, 95, 135-142.
- [25] Ding, S., Zhang, J., Xu, X., & Zhang, Y. (2016). A wavelet extreme learning machine. *Neural Computing and Applications*, 27(4), 1033-1040.



## 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.