



e-ISSN: 2149-3367

e-ISSN: 2149-3367

CİLT / VOLUME: XXIV

SAYI / NUMBER: 6

ARALIK / DECEMBER 2024

## FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

Afyon Kocatepe Üniversitesi  
Ahmet Necdet Sezer Kampüsü  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
AFYONKARAHİSAR  
Tel: 444 03 03 / 1460-1470  
Belgegeçer: 0 272 218 14 62  
E-posta: fmbd@aku.edu.tr

# Afyon Kocatepe Üniversitesi FEN ve MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ

Afyon Kocatepe University  
Journal of Science and  
Engineering



<http://fmbd.aku.edu.tr>

<http://fmbd.aku.edu.tr>

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN VE MÜHENDİSLİK**  
**BİLİMLERİ**  
**DERGİSİ**

*Afyon Kocatepe University*  
*Journal of Science and Engineering*

Cilt / Volume 24  
Sayı / Number 6

e – ISSN: 2149-3367

ARALIK 2024

DECEMBER 2024



## **Dergi Hakkında**

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi (AKÜ FEMÜBİD), fen ve mühendislik bilimleri alanlarındaki güncel gelişmeleri takip etmek, meslek kuruluşları ve bireylerin ulusal ve uluslararası gelişmelerine katkıda bulunmak ve bu alanlarda nitelikli bir kaynak oluşturmak amacıyla yayımlanmaktadır.

Eski adıyla “Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi”, 1999 yılında yılda 2 sayı olarak Türkçe ve İngilizce makalelerle yayın hayatına başlamıştır. Ocak 2013’ten itibaren isim değiştirerek “Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi” olarak yayın hayatına devam etmiştir. Makale değerlendirme sürecinin şeffaflaştırılması ve optimizasyonu için Şubat 2013 itibarıyla çevrimiçi makale değerlendirme ve takip sistemi uygulamaya alınmıştır. Ocak 2015 itibaren yazarların başvuru işlemlerinin kolaylaştırılması, değerlendirme sürecindeki çalışmaların olabildiğince şeffaf takip edebilmesi, yazar ve editoryal ekip arasındaki iletişimin daha etkin kullanılabilmesi, yayımlanma sürecindeki düzenleme işlemlerinin kolaylaştırılması, okuyucuların yayımlanan makalelere daha kolay ulaşma imkânları gibi avantajlar sağlayan elektronik dergi (e-ISSN: 2149-3367) olarak yayımlanmaktadır. 2015 yılından itibaren yayımlanan sayılarla birlikte TRDizin’de (TÜBİTAK-ULAKBİM) indekslenerek mühendislik ve temel bilimler konularında makaleler yayımlamaya devam etmektedir. Ocak 2020 yılından itibaren AKÜ FEMÜBİD yılda 6 sayı (Şubat, Nisan, Haziran, Ağustos, Ekim ve Aralık) olarak Türkçe ve İngilizce makaleleri Dergi Park aracılığıyla online olarak kabul etmektedir.

Makale göndermek isteyen yazarlarımız, dergi internet sayfamızdan (<https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid>) kayıt yaptırarak, özgün bilimsel araştırma makalelerini çevrimiçi olarak gönderebilir ve süreci takip edebilirler. Dergimize yayımlanmak üzere başvurusu yapılan makaleler Dergi Park arayüzü ile en az iki hakem (çift taraflı kör hakemlik sistemi) tarafından değerlendirilmektedir. Yazıları değerlendiren hakemlerin adları yazarlara bildirilmez. Hakemler de yazarların adlarını göremez.

## **Derginin Amacı**

Ulusal ve uluslararası temel bilimler ve mühendislik ile ilgili çeşitli disiplinler üzerine çalışan akademisyenler, araştırmacılar ve öğrencilerin Türkçe ve İngilizce yayın yapabilmesini sağlamak, ayrıca bu alanda nitelikli akademik yayınların toplumsal ve bilimsel gelişime katkı sağlaması için bir ortam sunmak amacını gütmektedir.

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, özgün bilimsel araştırmalar ile uygulama çalışmalarına yer veren bir dergidir. Dergide, fen ve mühendislik bilimlerinde yapılmış deneysel ve teorik ilerlemeleri içeren bilimsel ve özgün araştırma makalesi türündeki çalışmalara yer verilir. Ayrıca, lisansüstü tezlerden hazırlanan yayınlar veya bu tezlerin bir alt çalışması olarak hazırlanan özgün ve daha önce hiçbir yerde yayımlanmamış olan araştırma makaleleri kabul edilmektedir.

## **Dergideki Yayın Çeşitliliği**

Özellikle araştırma makaleleri, orijinal modelleme ve matematiksel çalışmalar, disiplinlerarası mühendislik uygulamalarını içeren çalışmalar ve son teknoloji araştırmaları dergimize kabul edilmektedir. Teknik notlar, derlemeler, editöre mektuplar ve kısa bildirimler kabul edilmemektedir. Lütfen gönderiminizi yaparken seçenekler listesinden uygun makale türünü seçtiğinizden emin olunuz. Özel sayılara başvuru yapan yazarların, özel sayı makale türünü bu listeden seçtiklerinden emin olmaları gerekmektedir.



**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN VE MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ**

*Afyon Kocatepe University*  
*Journal of Science and Engineering*

**İMTİYAZ SAHİBİ/OWNER**

---

Bekir YALÇIN Mechanical Engineering Afyon Kocatepe University, (Türkiye)  
*e-mail: bekiryalcin@aku.edu.tr*

**EDİTÖRLER / EDITORS-IN-CHIEF**

---

Bekir YALÇIN Mechanical Engineering Afyon Kocatepe University, (Türkiye)  
*e-mail: bekiryalcin@aku.edu.tr*

Ziya Özgür YAZICI Materials Science and Engineering. Afyon Kocatepe University, (Türkiye)  
*e-mail: zyazici@aku.edu.tr*

**YARDIMCI EDİTÖRLER / ASSISTANT EDITORS-IN-CHIEF**

---

Can BAŞARAN Geological Engineering, Afyon Kocatepe University, (Türkiye)  
*cbasaran@aku.edu.tr*

İbrahim YAVUZ Automotive Engineering, Afyon Kocatepe University, (Türkiye)  
*iyavuz@aku.edu.tr*

Şükrü TORTOP Mathematics, Afyon Kocatepe University, (Türkiye)  
*stortop@aku.edu.tr*

**İLETİŞİM VE DESTEK/ CONTACT AND SUPPORT**

Afyon Kocatepe Üniversitesi,  
Fen Bilimleri Enstitüsü,  
Ahmet Necdet Sezer Kampusu,  
03200, Afyonkarahisar/Türkiye

Telefon/Phones: 444 03 03 / 1472-1473  
Belgegeçer/Fax: 0 272 218 14 62  
e-posta/e-mail: fmbd@aku.edu.tr

## ALAN EDİTÖRLERİ/ EDITORIAL BOARD

---

Ayça H. ATLI	Statistics, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) <i>aturkan@aku.edu.tr</i>
Bekir ORUNCAK	Physics, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) <i>boruncak@aku.edu.tr</i>
Can BAŞARAN	Geological Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) <i>cbasaran@aku.edu.tr</i>
Emre AKARSLAN	Renewable Energy Systems, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) <i>akarслан@aku.edu.tr</i>
Erhan ÜNAL	Internet and Info. Technol. Management, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) <i>eunal@aku.edu.tr</i>
Fatih ÖZDİNÇ	Management Information Systems, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) <i>fozdinc@aku.edu.tr</i>
Fatma KAYNARCA	Mathematics, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) <i>fkaynarca@aku.edu.tr</i>
G. Emre GÜRAKSIN	Computer Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) <i>emreguraksin@aku.edu.tr</i>
Güray SONUGÜR	Mechatronics Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) <i>gsonugur@aku.edu.tr</i>
Hakan TERZİ	Molecular Biology and Genetics, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) <i>hterzi@aku.edu.tr</i>
İ. Sinan ATLI	Metallurgical and Materials Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) <i>sinanatli@aku.edu.tr</i>
Mehmet KILINÇ	Food Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) <i>mkilinc@aku.edu.tr</i>
Mürüvvet KURT	Chemistry, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) <i>muruvvetduz@aku.edu.tr</i>
Nevzat OLGUN	Software Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) <i>nolgun@aku.edu.tr</i>
Oğuzhan ALAGÖZ	Chemical Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) <i>oalagoz@aku.edu.tr</i>
Ömer F. GÜLER	Mechanical Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) <i>ofguler@aku.edu.tr</i>
Ömer G. NARİN	Geomatics Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) <i>gokberknarin@aku.edu.tr</i>
Ramazan EROL	Mathematics and Science Education, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) <i>rerol@aku.edu.tr</i>
Recep KURTULUŞ	Materials Science and Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) <i>rkurtulus@aku.edu.tr</i>
Şükrü A. BAYDIR	Automotive Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) <i>abaydir@aku.edu.tr</i>
Şükrü TORTOP	Mathematics, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) <i>stortop@aku.edu.tr</i>
Tolga ÖZER	Electric-Electronic Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) <i>tolgaozer@aku.edu.tr</i>
Tuğba YALÇIN UZUN	Mathematics, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) <i>tyalcin@aku.edu.tr</i>
Uğur FİDAN	Biomedical Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) <i>ufidan@aku.edu.tr</i>
Veli BAŞARAN	Civil Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) <i>vbasaran@aku.edu.tr</i>
Z. Ebru SAYIN	Mining Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkiye) <i>zerkan@aku.edu.tr</i>

## **DANIŞMA KURULU / ADVISORY BOARD**

---

Prof.Dr. Mustafa Bakkal	İstanbul Technical University, Turkey
Prof.Dr. Mustafa Kemal Yıldız	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Jose Manuel Torralba	IMDEA Materials Institute, Spain
Prof.Dr. Bekir Yalçın	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Tai Keun Kwak	Daejin University, Korea
Prof.Dr. Atilla Evcin	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Yüksel Oğuz	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Karl-Henrich Grote	Otto Von Guericke University, Germany
Prof.Dr. Ömer Hazman	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Ahmet Yıldız	Afyon Kocatepe University, Turkey
Assoc.Prof.Dr. Evren Yasa	The University of Sheffield, UK
Prof.Dr. İbrahim Mutlu	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. İbrahim Hakkı Çiğerci	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Oğuzhan Yılmaz	Gazi University, Turkey
Prof.Dr. Mustaque Hossain	Kansas State University, USA
Prof.Dr. İsmail Sedat Büyüksağış	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Cevat İnal	Konya Technical University, Turkey
Prof.Dr. Regita Bendikiene	Kaunas University of Technology, Lithuania
Prof.Dr. Harun Dıraman	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Ersin Kıvrak	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Halil Zeki Gök	Burdur Mehmet Akif Ersoy University, Turkey
Prof.Dr. Mustafa Yılmaz	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Hüseyin Ali Yalın	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Bojan Zlender	University of Maribor, Slovenia
Prof.Dr. İsmail Zorluer	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Mustafa Kurt	Marmara University, Turkey
Prof.Dr. Yusuf Kayalı	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Taher Abuain	University of Tripoli, Libya
Prof.Dr. Abdurrahman Karabulut	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Ulvi Şeker	Gazi University, Turkey
Prof.Dr. Ahmet Serteser	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Fatih Onur Hocoaoğlu	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Levent Özcan	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Cemal Çifci	Afyon Kocatepe University, Turkey
Assoc. Prof.Dr. Ahmad Azmin Mohamad	Universiti Sains Malaysia, Malaysia
Prof. Dr. Afife Binnaz Hazar	Yıldız Technical University, Turkey
Prof.Dr. Kubilay Aslantaş	Afyon Kocatepe University, Turkey
Prof.Dr. Cahit Gürer	Afyon Kocatepe University, Turkey
Assoc.Prof.Dr. Engin Taş	Afyon Kocatepe University, Turkey
Assoc.Prof.Dr. Ahmet Yönetken	Afyon Kocatepe University, Turkey
Assoc.Prof.Dr. Gür Emre Güraksın	Afyon Kocatepe University, Turkey
Assoc.Prof.Dr. Ziya Ozgur Yazici	Afyon Kocatepe University, Turkey

## **DİL EDİTÖRLERİ / LANGUAGE EDITORS**

---

İ. Sinan ATLI Metallurgical and Materials Engineering, Afyon Kocatepe University, (Türkiye)  
*sinanatli@aku.edu.tr*

## **MİZANPAJ EDİTÖRÜ / LAYOUT EDITOR**

---

İbrahim YAVUZ Automotive Engineering, Afyon Kocatepe University, (Türkiye)  
*iyavuz@aku.edu.tr*

Ismail YILDIZ İncehisar Vocational School, Afyon Kocatepe University, (Türkiye)  
*iyildiz@aku.edu.tr*

## İÇİNDEKİLER / CONTENTS

### FEN BİLİMLERİ / SCIENCE

#### BİYOLOJİ / BIOLOGY (10)

Araştırma Makalesi / Research Article

**Seramik Atık Suyunun Bazı Solanaceae Familyası Üyelerinde Çimlenme ve Bitki Gelişimine Etkileri**

Effects of Ceramic Wastewater on Germination and Plant Development in Some Solanaceae Family Members

Ferhan Korkmaz, Ercan Çatak

061001(1260-1266)

Araştırma Makalesi / Research Article

**Muğla'dan Zercon Cinsinin (Acari, Zerconidae) Yeni Bir Türü: Zercon fethiyensis sp.nov.**

A new species of the genus Zercon (Acari, Zerconidae) from Muğla: Zercon fethiyensis sp.nov.

Raşit Urhan, Mehmet Karaca

061002(1267-1274)

Araştırma Makalesi / Research Article

**Immunotherapeutic and Cell-Protective Effects of Probiotic Kefir on Cyclophosphamide-induced Nephrotoxicity and Urotoxicity in Rats**

Probiyotik Kefirin Siçanlarda Siklofosfamid Kaynaklı Nefrotoksisite ve Ürotoksisite Üzerine İmmünoterapötik ve Hücre Koruyucu Etkileri

Songül Çetik Yıldız, Cemil Demir, Mustafa Cengiz, Halit Irmak, Betül Peker Cengiz, Adnan Ayhancı

061003(1275-1284)

Araştırma Makalesi / Research Article

**Determination of Some Phytochemical Properties and Antioxidant Capacity of "Gelincik" Apple (Malus Spp.) and "Hüsnüyusuf" Pear (Pyrus Spp.) Fruit Species of Kütahya**

Kütahya İli "Gelincik" Elma (Malus Spp.) ve "Hüsnüyusuf" Armut (Pyrus Spp.)

Meyve Türlerinin Bazı Fitokimyasal Özelliklerinin ve Antioksidan Kapasitelerinin Belirlenmesi

Saadet Çeliközlü, Merve Dağcı Tekin

061004(1285-1296)

#### FİZİK / PHYSICS (11)

Araştırma Makalesi / Research Article

**Investigation of Some Properties of 4-Amino-2-Methyl-Quinoline and CdS Nano Composite Thin Films for Production of Diodes**

Diyot Üretimi İçin 4-Amino-2-Metil-Kinolin ve CdS Nano Kompozit İnce Filmlerin Bazı Özelliklerinin İncelenmesi

Ramazan Demir, İsmet Kaya

061101(1297-1304)

#### KİMYA / CHEMISTRY (12)

Araştırma Makalesi / Research Article

**Rumex Crispus L.'dan Sekonder Metabolitlerin Kromatografik Yöntemlerle İzolasyonu ve Tayini**

Isolation and Determination of Secondary Metabolites from Rumex Crispus L. by Chromatographic Methods

Elif Günay, Dilek Mutlu, Deniz Küpçük, Gizem Yıldırım Baştemur, Sabriye Perçin Özkorucuklu

061201(1305-1312)

---

Araştırma Makalesi / Research Article

**3,4-Dimetoksifenilasetonitril'in Kuaterner Amonyum Tipi Dimerik Yüzey Aktif Maddeler İle Faz Transfer Katalizli Siklopentilasyonu**

Phase Transfer Catalyzed Cyclopentylation of 3,4-dimethoxyphenylacetoneitrile with Quaternary Ammonium Type Dimeric Surfactants

Ayşen Şuekinci Yılmaz, Mesut Boz

**061202(1313-1322)**

---

*MATEMATİK & İSTATİSTİK / MATHEMATICS & STATISTICS (13)*

---

Araştırma Makalesi / Research Article

**Constructing Uninorms Based on Closure and Interior Operators in Bounded Lattices**

Sınırlı Kafesler Üzerinde Kapanış ve İ Operatörlere Dayanan Uninormların İnşaası

Gül Deniz aylı

**061301(1323-1332)**

---

## MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ / ENGINEERING

### BİLGİSAYAR & BİLİŞİM / COMPUTER & INFORMATICS (51)

---

Araştırma Makalesi / Research Article

#### **Güçlü Temsil Yöntemleri ile Kişi Tanıma ve Takibi için Hibrit Bir Yaklaşım**

A Hybrid Approach to Person Recognition and Tracking with Powerful Representation Methods

Gizem Ortaç Koşun, Seçkin Yılmaz, Rüya Şamlı

065101(1333-1345)

Araştırma Makalesi / Research Article

#### **Bilişsel Radyo Ağlarında Arabellek Tabanlı Kanal Tahsis Yaklaşımı ile İkincil Kullanıcıların Çağrı Başarımlarının İyileştirilmesi**

Improving the Call Performance of Secondary Users by Utilizing a Buffer-Based Channel Allocation Approach in Cognitive Radio Networks

Sedat Atmaca

065102(1346-1354)

Araştırma Makalesi / Research Article

#### **Yapay Zekâ Çağında Duygu Analizi: Büyük Dil Modellerinin Yükselişi ve Klasik Yaklaşımlarla Karşılaştırılması**

Sentiment Analysis in the Age of Artificial Intelligence: The Rise of Large Language Models and Comparison with Classical Approaches

Muhammed Abdulhamid Karabıyık, Asım Sinan Yüksel, Fatma Gülşah Tan

065103(1355-1363)

Araştırma Makalesi / Research Article

#### **Sağlık İstatistiklerinin Veri Madenciliği Teknikleri İle Analizi: Makine Öğrenmesi Algoritmaları Kullanılarak Genel Sağlık Durumunun Sınıflandırılması**

Analysis of Health Statistics With Data Mining Techniques: Classification of General Health Status Using Machine Learning Algorithms

Yunus Emre Gür, Kamil Abdullah Eşidir, Ahmed İhsan Şimşek

065104(1364-1381)

Araştırma Makalesi / Research Article

#### **DAC: Differentiable Auto-Cropping in Deep Learning**

DAC: Derin Öğrenmede Türevlenebilir Oto-Kırpma

Ahmet Esad Top, Mustafa Yeniad, Mahmut Sertaç Özdoğan, Fatih Nar

065105(1382-1394)

---

### ELEKTRİK – ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ (52)

---

Araştırma Makalesi / Research Article

#### **Tunable ultra-wideband band-stop filters based on a metal-insulator-metal waveguide with triangle resonators**

Üçgen rezonatörlü metal-yalıtkan-metal dalga kılavuzu temelli ayarlanabilir ultra-genişbant bant durdurma filtreleri

Semih Korkmaz

065201(1395-1402)

Araştırma Makalesi / Research Article

#### **Sliding Mode Speed Estimation of Induction Motor with MPC Based Flux Weakening Control for Electric Vehicle**

Elektrikli Araç için MÖK Tabanlı Akı Zayıflatma Kontrolü ile Asenkron Motorun Kayan Modlu Hız Tahmini

Barış Çavuş, Mustafa Aktaş

065202(1403-1411)

---

---

Araştırma Makalesi / Research Article

**Enerji Depolama Sistemini İçeren İletim Hattı için Uyarlanabilir Mesafe Koruması Röle Tasarımı**

Design of Adaptive Distance Protection Relay for Transmission Lines  
Incorporating Energy Storage Systems

Medine İzgi, Mehmet Rıda Tür

065203(1412-1420)

---

Araştırma Makalesi / Research Article

**Üniversite Kampüsünde Solar Panel Kullanımının Teknik ve Ekonomik Analizi: ISUBU Örneği**

Technical and Economic Analysis of Solar Panel Use on University Campus:  
ISUBU Example

Betül Zehra Gençgönül, Abdullah Senih Gençgönül, Reşat Selbaş

065204(1421-1430)

---

*GIDA, ÇEVRE & ORMAN / FOOD, ENVIRONMENTAL & FOREST (54)*

---

Araştırma Makalesi / Research Article

**Bal Kabağı Sapı Tozunun Katyonik Tekstil Boyası Gideriminde Biyosorbent Olarak Kullanımı ve Optimum Koşulların Belirlenmesi**

Use of Powdered Pumpkin Stalk as a Biosorbent in Cationic Textile Dye  
Removal and Determination of Optimum Conditions

Sevgi Fersiz

065401(1431-1441)

---

*HARİTA MÜHENDİSLİĞİ (55)*

---

Araştırma Makalesi / Research Article

**30 Ekim 2020 Mw:6.9 Sisam Depremi Sonrası İzmir ve Çevresinde Postsismik Deformasyonların İzlenmesi**

Monitoring Postseismic Deformations in Izmir and Its Surroundings After the 30  
October 2020 Mw:6.9 Samos Earthquake

Halil İbrahim Solak, İbrahim Tiryakioğlu, Sefa Yalvaç, Cemal Özer Yiğit, Bahadır  
Aktuğ, Haluk Özener, Ergin Dönmez, Ertuğrul Demirelli, Eda Esmâ Eyübagil,  
Ece Bengünaz Çakanşimşek, Cemil Gezgin, Furkan Şahiner

065501(1442-1455)

---

*İNŞAAT & ULAŞTIRMA / CIVIL ENGINEERING & TRANSPORTATION (56)*

---

Araştırma Makalesi / Research Article

**Su Kalitesi Gözlem İstasyonlarında Örneklenecek Değişkenlerin Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) Desteği ile Belirlenmesi: Gediz Havzası Örneği**

Determination of Variables to be Sampled at Water Quality Observation  
Stations with Analytical Hierarchy Process (AHP) Support: Gediz Basin Example

Filiz Barbaros

065601(1456-1471)

---

*KİMYA & METALURJİ VE MALZEME / CHEMISTRY & METALLURGY AND MATERIALS (57)*

---

Araştırma Makalesi / Research Article

**ESD Yöntemiyle Zırh Çelikleriyle Kaplanmış Inconel 718 Alaşımının Aşınma Davranışlarının İncelenmesi**

Investigation of Wear Behavior of Inconel 718 Alloy Coated with Armor Steels  
Using ESD

Yusuf Kayalı, Merve Ermak

065701(1472-1481)

---

Araştırma Makalesi / Research Article

**Erenler (Afyonkarahisar) Bölgesinde Yer Alan Killerin Kıvam Özelliklerinin Jeoteknik Davranışlarına Etkisi**

The Effect Of Consistency Properties Of Clays On Their Geotechnical Behavior In The Erenler (Afyonkarahisar)

**Sami Serkan İšođlu, Ahmet Yıldız, Mahmut Mutlutürk**

**065801(1482-1490)**

---

Araştırma Makalesi / Research Article

**Traktör Lastiklerinin Taban İzlerinin Görüntü İşleme Teknikleriyle Otomatik Ölçümü: Geleneksel Yöntemlere Yenilikçi Bir Alternatif**

Automated Measurement of Tractor Tire Tread Patterns Using Image Processing Techniques: An Innovative Alternative to Traditional Methods

**Süleyman Kılıç, Onur Karaçay**

**065901(1491-1498)**

---

Araştırma Makalesi / Research Article

**Miyokard Enfarktüsü Hastalarının Tespitinde Doğrusal Olmayan Özniteliklerin Performans Analizi**

Performance Analysis of Nonlinear Features in Detection of Myocardial Infarction Patients

**Ali Narin, Merve Keser**

**067201(1499-1505)**

Araştırma Makalesi / Research Article

**The Evaluation of Mechanical Properties of Commercial Composite Bones and 3D-Printed Bones Produced Using the CJP Technology**

Ticari Kompozit Kemiklerin ve CJP Teknolojisi Kullanılarak Üretilen 3B Baskılı Kemiklerin Mekanik Özelliklerinin Değerlendirilmesi

**Samet Çıklaçandır, Yalçın İşler**

**067202(1506-1515)**

---



## Seramik Atık Suyunun Bazı *Solanaceae* Familyası Üyelerinde Çimlenme ve Bitki Gelişimine Etkileri

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 13.03.2024

Kabul/Accepted: 05.08.2024

Yayımlandı/Published:02.12.2024

### Effects of Ceramic Wastewater on Germination and Plant Development in Some *Solanaceae* Family Members

Ferhan KORKMAZ \* , Ercan ÇATAK 

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Eskişehir, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Özet

Endüstriyel üretimlerin arttığı günümüzde en önemli konulardan birisi bu üretimler sonucu ortaya çıkan atık suların, çevre ve canlılar üzerindeki etkilerinin belirlenmesidir. Bu atık suların içeriğindeki ağır metaller bitkiler üzerinde olumlu ve olumsuz etkiler gösterebilmektedir. Bu ağır metallerin konsantrasyona bağlı olarak gösterdikleri etkilerin saptanması, bu bitkileri besin olarak tüketen tüm canlılar açısından oldukça önemlidir. Çalışmada kullanılan seramik endüstrisi atık suyu %100'den başlayarak %1'e kadar altı farklı konsantrasyonda hazırlanmış; *Solanaceae* familyasına ait *Lycopersicum esculentum* Mill. cv. H-2274 (domates) ve *Capsicum annuum* L. cv. Ilica 256 (biber) bitki tohumları kullanılarak test edilmiştir. Ağır metallerin bilinen olumsuz etkileri yanında bitkilerin gelişimine olumlu katkılar sağlayabileceği de bilinmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlarda da bazı konsantrasyonların tohum çimlenme oranını arttırdığı belirlenmiştir. Her iki tohumda da %50'lik konsantrasyonlarda en yüksek Vigor indeksi ve kök uzunluk değerlerine ulaşıldığı tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Endüstriyel atık su; Ağır metal; *Lycopersicum esculentum*; *Capsicum annuum*

#### Abstract

As industrial production increases, one of the most important issues today is the determination of the effects of wastewater resulting from these productions on the environment and living things. Heavy metals in this wastewater can have positive and negative effects on plants. Determining the concentration-dependent effects of these heavy metals is very important for all living organisms that consume these plants as food. The ceramic industry wastewater used in the study was prepared in six different concentrations, starting from 100% to 1%. It was tested using plant seeds of *Lycopersicum esculentum* Mill. cv. H-2274 (tomato) and *Capsicum annuum* L. cv. Ilica 256 (pepper), belonging to the *Solanaceae* family. In addition to the known negative effects of heavy metals, it is also known that they can make positive contributions to the development of plants. The results obtained in this study determined that some concentrations increased the seed germination rate. It was determined that the highest Vigor Index and root length values were reached in both seeds at 50% concentrations.

**Keywords:** Industrial waste water; Heavy metal; *Lycopersicum esculentum*; *Capsicum annuum*

#### 1. Giriş

Endüstriyel, tarımsal, evsel ve diğer kullanımlar sonucu açığa çıkan, sağlığa zararlı biyolojik ve kimyasal maddeler içeren sular atık su olarak tanımlanmaktadır. Bu sular yer altı suları ve akarsu, göl, deniz gibi yüzey sularının en önemli kirlilik kaynağını oluştururlar (Dündar vd. 2012, Tabuman 1995). Üretim sürecinde çeşitli kimyasal maddelerin kullanılması nedeniyle endüstriyel atık sular çeşitli kirleticileri içermektedir. Bu suların çevresel etkilerini kontrol etmek amacıyla fiziksel ve kimyasal parametrelerle birlikte toksisitenin de izlenmesi gerekmektedir (Pagano 2013). Tohum çimlenme düzeyi, yüzde canlılık oranı ve bitki boyu üzerine olumsuz fitotoksik etkiler çevre kirleticilerinin etkilerinin izlenmesinde kullanılan yöntemlerdir (Stojanoviç *et al.* 2010). Ülkemizde yaygın bir endüstri olan seramik endüstrisi, üretimi sırasında ağır metal içeren yüksek miktarda atık su oluşturmaktadır. Bunlar alıcı ortama verildiğinde çevresel problemlere neden olmaktadır (Emir

2019). Ağır metaller bitkilerde ağır metalin konsantrasyonu, çeşidi, maruz kalma süresi ve bitki türüne bağlı olarak farklı etkiler göstermektedir (Sevgi ve Leblebici 2022). Diğer taraftan, atık suların düşük konsantrasyonlarda bitki büyüme ve gelişmesinde olumlu katkılar sağlayabileceği göz ardı edilmemelidir. Çünkü atık sular bakır (Cu), çinko (Zn), demir (Fe), mangan (Mn), molibden (Mo), nikel (Ni) ve kobalt (Co) gibi bitkinin büyüme ve gelişmesi için ihtiyaç duyduğu mikro besin elementlerinden bazılarını içerebilmektedirler (Özay ve Mammadov 2013).

Bu çalışmada seramik endüstrisi atık suyunun tohum çimlenmesi ve gelişimi üzerine olan etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

#### 2. Materyal ve Metot

##### 2.1. Atık Su ve Tohum Temini ve Çözelti Hazırlanması

Bu çalışmada, Eskişehir Organize Sanayi Bölgesi'nde faaliyet gösteren seramik fabrikasından alınan atık suyun

tohum çimlenme ve bitki büyümesi üzerine etkileri araştırılmıştır. Tesisten alınan sular kullanılıncaya kadar +4 °C'de saklanmıştır. Atık suyun altı farklı konsantrasyonu ile çalışılmıştır. Kontrol grubu olarak saf su kullanılmıştır. Seramik fabrikasından alınan atık su %100 olarak kabul edilip %75, 50, 25, 10 ve 1 olacak şekilde diğer konsantrasyonlar hazırlanmış ve otoklavda sterilize edilmiştir.

Araştırma materyali olarak, her ikisi de *Solanaceae* familyasına ait ekonomik değerleri yüksek olan; *Lycopersicon esculentum* Mill. cv. H-2274 (domates) ve *Capsicum annuum* L. cv. Ilıca 256 (biber) bitki tohumları kullanılmıştır. Tohumlar, T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Eskişehir Geçit Kuşağı Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü'nden temin edilmiştir.

**Çizelge 1.** Seramik Atık Suyunun ICP/MS Metal analiz sonuçları

ASK*	100%	75%	50%	25%	10%	1%
Ağır Metal Konsantrasyonları (ppm)						
Cr	721,14	540,86	360,57	180,29	72,11	7,21
Pb	56,12	42,09	28,06	14,03	5,61	0,56
Fe	8,31	6,23	4,15	2,08	0,83	0,08
Zn	7,34	5,5	3,67	1,84	0,73	0,07
Mn	3,24	2,43	1,62	0,81	0,32	0,03
As	0,34	0,25	0,17	0,09	0,03	0,00
Ni	0,16	0,12	0,08	0,04	0,02	0,00
Cu	0,08	0,06	0,04	0,02	0,01	0,00
Cd	0,03	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00
Hg	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00

\*ASK: Atık su konsantrasyonları

## 2.2. Seramik Atık Suyu Metal İçerikleri

Çalışmamızda kullanılan seramik atık suyunun içerdiği metaller ve ppm düzeyindeki miktarları, ICP/MS yöntemleri ile analiz edilmiştir ve sonuçları Çizelge 1'de listelenmiştir. Atık su içeriğinde en fazla krom (Cr) elementine rastlanmış olup; kurşun (Pb), demir (Fe), çinko (Zn) ve mangan (Mn) miktarlarının seviyelerinin de yüksek olduğu tespit edilmiştir. İçerikte ayrıca az miktarlarda arsenik (As), nikel (Ni), bakır (Cu), kadmiyum (Cd) ve civa (Hg) elementleri de mevcuttur. Bu ağır metaller bitki için yüksek toksik etkilere sahip olabilmektedir. Ancak bu ağır metaller belli miktarlarda tohumların çimlenmesi ve bitkilerin gelişimleri esnasında olumlu katkılar da yapabilmektedir.

## 2.3. Tohum Sterilizasyon İşlemleri

Bitki tohumları Babaoğlu vd., (2001) ve Başaran (1990)'a göre önerilen standart sterilizasyon işlemleri için ve kabul gören teknikler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tohumlar

öncelikle %96'lık etil alkol içerisinde 1 dakika, ardından %5'lik sodyum hipoklorit çözeltisi içerisinde 25-30 dakika süreyle yüzeysel sterilizasyonuna tabii tutulmuştur. Sonrasında, tohumlar steril saf su ile en az beşer kez yıkanarak, içlerinde steril kurutma kağıtlarının olduğu steril petri kaplarına aktararak sularından arındırılmıştır. Tohum sterilizasyonu ve tohum ekim işlemleri ile birlikte, tohum çimlendirme çalışmalarının tamamı kapalı ve kontrollü ortamda gerçekleştirilmiştir.

## 2.4. Tohum Ekim İşlemleri ve İnkübasyon Şartları

Tohum çimlendirme yüzdelerini belirlemek amacıyla, yükselti oluşturması için, 5x5 cm ebatlarında kare cam ve üzerinde kurutma kağıtlarının yer aldığı sterilize edilmiş petri kaplarına steril tohumlar 100'er adet ekilmiştir. Her seri için ikişer petri kabı kullanılmış, tüm seri için toplamda 1400 adet tohum ekimi yapılmıştır. Her iki çeşit için toplamda 2800 tohum değerlendirmeye alınmıştır. Başlangıçta her petri kutusuna 3'er ml çözelti uygulanmıştır. 24 saatte bir çözelti miktarları ve çimlenme gelişimleri takip edilmiş, gerektiğinde genellikle eşit miktarlarda çözelti ilave edilmiştir. İnkübasyon ortamı olarak 16 saat ışık, 8 saat karanlık şartları oluşturulmuştur. Sıcaklık 25 ±2 °C, ışık şiddeti yaklaşık 8000-9000 lüks olarak uygulanmıştır.

## 2.5. Vigor İndekslerinin Belirlenmesi ve Uzunluk Ölçüm Çalışmaları

Tohumun testasından radikulanın kendini göstermesi çimlenme varlığı olarak değerlendirilmiştir (Başaran 1990). Tüm petrileredeki çimlenen tohumlar sayılarak çimlenme yüzdeleri tespit edilmiş; aynı seriye ait verilerin aritmetik ortalamaları alınmıştır. Çimlenen tohumların sayımı, yüzdelerinin belirlenmesi, kök ve hipokotil uzunluklarının ölçümü domates (H-2274) için 8. gün sonunda, biber (Ilıca 256) için ise 10. günün sonunda yapılmıştır. Bu süreler kontrol grubunda bulunan tohumların kök, hipokotil ve kotiledonlarının oluştuğu ve fidiciklerin petri kabının kapağına değdiği gün olarak belirlenmiştir. Tüm fidiciklerin kök ve hipokotilleri jilet ile kesilerek, milimetrik cetvel yardımıyla hipokotil ve kök uzunlukları ölçülmüştür. Ölçüm ve tartımlar yapıncaya kadar petri kapları +4 °C'de muhafaza edilmiştir. Vigor İndeks değerlerini belirlemek için her seriye ait çimlenen tohumların (fidicik) kök ve hipokotil uzunlukları toplanarak çimlenme oranlarıyla çarpılmıştır (Abdul-Baki and Anderson 1973, Karaer vd., 2021). Fide güç indeksi olarak da bilinen "Vigor İndeksi" çimlenme oranı ile fidenin fiziksel özelliklerinin gelişmişlik derecesini ve bu değerlerin kombinasyonunu gösteren bir ölçüdür (Karaer vd., 2021). Bu değer Eşitlik.1 ile hesaplanmıştır (Hu *et al.* 2005, Tatar vd., 2018):

Vigor İndeks = Çimlenme yüzdesi x (kök uzunluğu + hipokotil uzunluğu). (1)

H-2274 ve Ilica 256 tohumlarına ait Vigor İndeksi (VI) değerleri Çizelge 2’de gösterilmektedir.

### 2.6. Yaş ve Kuru Ağırlık Tayinleri

Her seri için 8 ila 10. günlerin sonunda elde edilen tüm fideliklerin kök, hipokotil, kotiledonları kesilerek birbirinden ayrılmış, hassas terazide ayrı ayrı yaş ve kuru ağırlıkları tespit edilmiştir. Organlara ait toplam ağırlıklar değerlendirilen organların sayılarına bölünerek birim yaş ağırlıkları belirlenmiştir. Sonrasında kök, hipokotil ve kotiledonlar 70 °C’de en az 72 saat süre ile tutularak kurutulmuştur. Toplam kuru ağırlıkları yine hassas terazide tartılmış ve birim kuru ağırlıkları da hesaplanmıştır.

### 2.7. İstatistiksel Analizler

Çalışma verileri IBM SPSS Statistics 26 programına aktararak analizler tamamlanmıştır. Veriler değerlendirilirken sayısal değişkenler için tanımlayıcı istatistikler (ortalama, standart sapma, medyan) verilmiştir. Uygulanacak analizlere karar verebilmek için öncelikle tüm ölçümlere normal dağılım varsayımı için Kolmogorow Smirnov Testi (n>30) uygulanmıştır. Test sonucunda ölçümlerin normal dağılım varsayımını sağladığı görülmüş ve bu nedenle karşılaştırmalarda parametrik testler kullanılmıştır. İki den fazla bağımsız grup arasında ölçümlere göre farklılık olup olmadığı Tek Yönlü Varyans Analizi (ANOVA) ile incelenmiş olup hangi gruplar arasında farklılık olduğuna ise Tukey Testi (Homojenlik sağlandığında) ve Tamhane Testi (Homojenlik sağlanmadığında) ile bakılmıştır.

### 3. Bulgular ve Tartışma

Çalışmamızda kullanılan seramik atık suyunda en fazla bulunan ağır metaller sırasıyla Cr, Pb Fe, Zn ve Mn’dir. Ağır metaller tohum çimlenmesi ve bitki büyüme ve gelişimi açısından genel olarak olumsuz etkiler gösterebilirler de bitkiler bu ağır metalleri tolere ederek olumsuz etkilerini kısmen bertaraf edebilirler. Hatta belli konsantrasyonlara kadar kendi yararlarına kullanabilirler. Örneğin Nedelkoska ve Doran (2000)’in da belirttikleri gibi Zn ağır metaller grubunda yer almasına karşın, bitkiler için mutlak gerekli mikro besin elementidir. Moustakas vd., (1994)’nin de çinkonun bitkiler için mutlak gerekli olan protein ve enzimlerin kofaktörü olarak görev aldığını vurgulamışlardır (Doğanoğlu 2018).

Ayrıca birçok familyaya ait bitkinin ağır metalleri bünyesinde biriktirdikleri bilinmektedir. Hiperakümülatör adı verilen bu bitkiler ağır metalleri toprak üstü

organlarında aşırı miktarda biriktirmelerine rağmen bunları yapraklara taşıyarak orada detoksifiye etmeleri nedeniyle bundan olumsuz etkilenmezler (Doğru vd., 2021). As, Cd, Co, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Tl, Zn gibi ağır metaller için hiperakümülatör olarak tanımlanmış yaklaşık 450 angiosperm türü (bitki türlerinin yaklaşık %0,2’si) bulunmaktadır. Her geçen gün bu özelliğe sahip yeni bitki türleri listeye eklenmektedir (Sun et al. 2006, Doğru vd., 2021). Çalışmamızda kullandığımız domates ve biber bitkileri Sun et al. (2006) ve Doğru vd., (2021)’in hiperakümülatör olarak belirledikleri *Solanum nigrum* gibi *Solanaceae* familyasına ait bitkilerdir.

### 3.1. Vigor İndeksleri (VI)

H-2274 tohumlarının Vigor İndeks değerlerinin tüm konsantrasyonlarda kontrol grubuna göre istatistiksel olarak anlamlı bir şekilde arttığı görülmektedir. Ilica 256 tohumlarında ise istatistiksel olarak kontrole göre tüm konsantrasyonlarda anlamlı bir fark belirlenmiş olsa da H-2274’deki gibi düzenli bir artış ya da azalış gözlemlenmemiştir. Yine Ilica 256’da %75 (810) ve %100’lük konsantrasyonlarda (816) hem kontrol grubuna hem de %50’lik konsantrasyona oranla VI değerlerinde keskin bir düşüş belirlenmiştir. En fazla artışın her iki tohumda da %50’lik konsantrasyonda (H2274 için 6045; Ilica 256 için 1501) olduğu göze çarpmaktadır (Çizelge 2).

**Çizelge 2.** H-2274 ve Ilica 256 çeşitlerine ait Vigor İndeksi (VI) değerleri

Konsantras. (%)	Vigor İndeksi (VI)	
	H-2274	Ilica 256
Kontrol	3738	1098
1	4176*	1280*
10	4410*	663*
25	5278*	1008*
50	6045*	1501*
75	4650*	810*
100	4717*	816*
F	1714,714	2591,429
p	0,000***	0,000***

\*Kontrol grubundan farklı olan gruplar \*\*\*p<0,001

F=Tek Yönlü Varyans Analizi (ANOVA), Fark=Tukey Testi

Yaptığımız çalışmada kullandığımız seramik atık suyunda Cr, Pb, Fe, Zn, Mn, As, Ni, Cu, Cd ve Hg gibi ağır metaller bulunmaktadır. Bu metallerden bazıları (As, Cd, Hg, Pb), La Rocca et al. (2009) ve Doğru vd., (2021)’nin belirttikleri gibi esansiyel değil iken; Cu, Fe, Mn, Ni ve Zn’nin ise bitkilerin büyüme ve gelişmeleri için gereklidir. Bu metallerin fizyolojik etkilerini birbirinden bağımsız olarak değerlendiremediğimiz için ortaya çıkan tohum çimlenmesi ve fizyolojik gelişime olumlu katkılarının seramik atık suyun içinde bulunan söz konusu bazı ağır metallerle ilişkisi olduğunu söyleyebiliriz. Benzer şekilde

yapılan çalışmalarda, bakırın yüksek konsantrasyonlarda toksik olmasına karşın, enzim faaliyetlerinde, karbonhidrat ve lipid metabolizmasında, DNA ve RNA sentezinde, hastalıklara ve zararlılara karşı direnç oluşturmada önemli rol oynayan birçok olumlu etkiye sahip olduğu belirtilmektedir (Yerli vd., 2020; Okçu vd., 2009; Ravent et al, 1999). Aynı zamanda bakır, çinko ve buna benzer ağır metallerin proteinler ve enzimler için katalitik ve yapısal bileşenler olarak önemli oldukları ve normal bitki büyüme ve gelişimi için kofaktör olarak görev aldıkları da bilinmektedir (Vural, 1993; Okçu vd., 2009). Ayrıca bakır, çinko, demir, mangan, molibden ve nikel gibi ağır metallerin, izin verilen sınırları aşmadığı sürece, bitkiler için mikro besin elementi olarak görev yaptıkları da rapor edilmiştir (Yerli vd., 2020).

Bizim çalışmamızda test edilen seramik atık suyun özellikle bazı konsantrasyonlarda bitkinin fizyolojik gelişimine olumlu etkileri belirlenmiştir. Kullandığımız atık su içinde en çok bulunan ağır metalin Cr olduğu yapılan analizlerle belirlenmiştir (Çizelge 1). Kara vd., (2022)'nin yaptığı çalışmada da Cr, Ni, Cu'nun ağır metal olmasına karşın belirli konsantrasyonlarda bitkiye olumlu katkı sağladığı vurgulanmaktadır. Bu da bizim çalışmamızı destekler niteliktedir. Yine aynı çalışmada Pb ve diğer ağır metallerin konsantrasyona bağlı olarak bitkinin farklı fizyolojik büyüme dönemlerinde farklı tepkiler verdiği belirtilmektedir. Ağır metallerin at dişi mısır (*Zea mays* L.)'da çimlenme ve erken fide gelişimi üzerine etkilerini belirlemek için yapılan bir çalışmada 800 ppm'lik kromun %90 çimlenme oranı gösterdiği belirlenmiştir. Benzer şekilde, çalışmamızda kullandığımız atık suyun % 100'lük konsantrasyonunda bulunan krom oranı 721,14 ppm ve H-2274 tohum çimlenme oranı ise %89 olarak belirlenmiştir (Ertekin ve Bilgen, 2021). Yapılan benzer bir çalışmada 64 ppm Pb uygulaması sonucunda Marul (*Lactuca sativa* L.) tohumlarının çimlenme yüzdeleri %60 olarak belirlenmiştir. Bu oran bizim Ilıca 256 tohumları ile yaptığımız çimlendirme deneylerinde %100'lük konsantrasyonda (56,12 ppm Pb) VI hesaplarken kullandığımız çimlenme yüzdesine (%48) benzerdir. Aynı çalışmada 5 ppm Zn' nin çimlenme yüzdesi %45 olarak tespit edilmiştir. Ilıca 256 ile yaptığımız çalışmada kullandığımız atık suyun %75'lik konsantrasyonunda da 5,5 ppm Zn bulunmaktadır. Benzer şekilde çimlenme oranı da %45 olarak tespit edilmiştir (Doğanoğlu 2018).

### 3.2. Uzunluk Ölçümleri (mm)

Kök birim uzunlukları Çizelge 3'te gösterilmiştir. Domates ve biber tohumlarının VI değerlerinde olduğu gibi en yüksek kök birim uzunluk değerlerine de %50'lik konsantrasyonlarda ulaşılmıştır. Ancak Ilıca 256'da %50 konsantrasyonun yanında %1'likte de aynı değere ulaşıldığı görülmektedir. H-2274 fidiciklerinde kontrol grubundan

itibaren %50'lik konsantrasyona kadar olan serilerde genel olarak kök birim ortalama uzunluklarında artışlar belirlenmiştir. %75 ve %100'lük serilerde ise önceki konsantrasyona göre belirgin bir düşüş görülmüştür. Bununla birlikte bu konsantrasyon değerleri kontrole göre anlamlı bir fark oluşturmamıştır. Ilıca 256 da ise tüm serilerde istatistiksel olarak kontrole göre anlamlı bir artış gözlenmemiştir. Ancak, %10 ve %100 konsantrasyonlarda kök uzunluklarının kontrole göre istatistiksel olarak anlamlı bir şekilde düşüş gösterdiği görülmektedir. Elde ettiğimiz bu veriler, Kara vd., (2022), Khan ve Khan (2010)'ın yaptıkları çalışmada da belirttiği gibi nikelin kök ve sürgün gelişimini olumsuz etkilediği yönündeki bulgusunu desteklemektedir. H-2274 tohumlarında %50, %75 ve %100'lük konsantrasyonlarda hipokotil uzunlukları kontrole göre istatistiksel olarak anlamlı bir artış göstermiştir. Ilıca 256 da ise, istatistiksel olarak kontrole göre bir farklılık olmasa da H-2274 de olduğu gibi en yüksek hipokotil birim ortalama uzunluk değerine %100'lük konsantrasyonda ulaşılmıştır (Çizelge 4).

**Çizelge 3.** H-2274 ve Ilıca 256 kök uzunlukları

Konsantras. (%)	Kök Uzunlukları (mm)	
	H-2274	Ilıca 256
Kontrol	22±10,025	9±3,668
1	28±11,733*	11±5,594
10	27±15,695	4±2,170*
25	35±16,951*	9±5,999
50	39±21,018*	11±5,641
75	25±9,155	9±4,154
100	24±9,678	6±2,835*
F	18,498	15,551
p	0,000***	0,000***

\*Kontrol grubundan farklı olan gruplar ( p<0,05) \*\*\*p<0,001

F=Tek Yönlü Varyans Analizi (ANOVA),

**Çizelge 4.** H-2274 ve Ilıca 256 hipokotil uzunlukları

Konsantras. (%)	Hipokotil Uzunlukları (mm)	
	H-2274	Ilıca 256
Kontrol	22±5,044	9±3,431
1	20±5,030	9±4,520
10	22±5,763	9±2,940
25	23±5,599	9±5,021
50	26±5,614*	8±4,355
75	25±4,926*	9±4,170
100	29±5,191*	11±4,049
F	24,666	1,66
p	0,000***	0,13

\*Kontrol grubundan farklı olan gruplar ( p<0,05) \*\*\*p<0,001

F=Tek Yönlü Varyans Analizi (ANOVA), Fark=Tukey Testi

### 3.3. Yaş ve Kuru Ağırlık Tayinleri

H-2274 fidicikleri kök yaş ağırlıkları açısından değerlendirildiğinde, kontrol grubuna kıyasla tüm konsantrasyonlarda anlamlı artışlara rastlanmıştır. %75'lik ve 100'lük serilerde ise önceki konsantrasyona göre belirgin düşüşler olmasına rağmen kontrole göre

daha yüksek yaş ağırlık değerlerine ulaşmıştır. İlica 256 tohumları kök yaş ağırlıklarında ise, kontrol grubuna kıyasla, istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunamamıştır. Ancak %75'lik konsantrasyonda en fazla yaş ağırlık değerine ulaşmıştır. En düşük değer ise %100'lük konsantrasyonda gözlemlenmiştir. Sekiz farklı arpa çeşidi ile yapılan bir çalışmada, farklı Cr konsantrasyonlarının (0, 75, 150 ve 225  $\mu\text{M}$ ) konsantrasyon artışına bağlı olarak kök yaş ve kuru ağırlıklarını genellikle önemli düzeyde azalttığı belirtilmiştir (Yıldız vd., 2010). Bizim İlica 256 kök birim yaş ağırlıklarından elde ettiğimiz değerlerde de en yüksek konsantrasyon olan %100'lük seride (721,14 ppm) en düşük kök birim yaş ağırlık değeri (0,0023 gr) belirlenmiştir. Benzer şekilde İlica 256 kotiledon birim yaş ağırlıkları kontrol için 0,0087 iken % 50'lik konsantrasyondan itibaren önemli azalışlar dikkat çekmektedir. % 50'lik konsantrasyon (360,57 ppm Cr) uygulamasında 0,0075 gr, %75'lik konsantrasyon (540,86 ppm Cr) uygulamasında 0,0084 gr ve %100'lük konsantrasyonda (721,17 ppm Cr) uygulamasında ise 0,0066 gr kotiledon birim yaş ağırlığı değerlerine ulaşmıştır.

Kuru ağırlık değerlerine bakıldığında ise, H-2274'te kontrole göre diğer serilerde istatistiksel olarak bir fark görülmemiştir. Ancak İlica 256 serisinde %75'lik konsantrasyonda kontrole göre anlamlı bir artış dikkat çekicidir (Çizelge 5).

**Çizelge 5.** H-2274 ve İlica 256 kök yaş ve kuru ağırlıkları

Konsantras. (%)	Kök Yaş Ağırlığı (g)		Kök Kuru Ağırlığı (g)	
	H-2274	İlica 256	H-2274	İlica 256
Kontrol	0,0014	0,0023	0,0002	0,0005
1	0,0018*	0,0022	0,0003	0,0005
10	0,0018*	0,0013	0,0003	0,0004
25	0,0020*	0,0024	0,0004	0,0005
50	0,0032*	0,0022	0,0004	0,0004
75	0,0021*	0,0030	0,0003	0,0015*
100	0,0022*	0,0010	0,0003	0,0006
F	94,714	12,035	1,429	45,714
p	0,000***	0,061	0,272	0,000***

\*Kontrol grubundan farklı olan gruplar ( $p < 0,05$ ) \*\*\* $p < 0,001$   
F=Tek Yönlü Varyans Analizi (ANOVA), Fark=Tukey Testi

H-2274 hipokotil yaş ağırlıkları kontrol grubuna kıyasla tüm serilerde istatistiksel olarak anlamlı artışlar göstermiştir. En yüksek değerler ise %100'lük konsantrasyonda elde edilmiştir. İlica 256 serilerinde ise en yüksek değerlere %75 ve %100'lük konsantrasyonlarda erişilmekle birlikte, %10'luk konsantrasyon dışındaki tüm konsantrasyonlarda kontrole göre anlamlı bir fark kaydedilmiştir. Hipokotil kuru ağırlıklarında ise, H-2274'te, tüm konsantrasyonlarda bir miktar artış görülse bile bu değerler kontrole göre istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. İlica 256 da ise sadece %100 lük

konsantrasyonda kontrole göre istatistiksel olarak anlamlı bir artış bulunmaktadır (Çizelge 6).

**Çizelge 6.** H-2274 ve İlica 256 hipokotil yaş ve kuru ağırlıkları

Konsantras. (%)	Hipokotil Yaş Ağırlığı (g)		Hipokotil Kuru Ağırlığı (g)	
	H-2274	İlica 256	H-2274	İlica 256
Kontrol	0,0099	0,0052	0,0006	0,0009
1	0,0112*	0,0055*	0,0007	0,0009
10	0,0114*	0,0050	0,0007	0,0010
25	0,0140*	0,0047*	0,0007	0,0008
50	0,0133*	0,0040*	0,0007	0,0009
75	0,0124*	0,0059*	0,0008	0,0011
100	0,0149*	0,0056*	0,0008	0,0014*
F	914,857	121,714	1,429	12
p	0,000***	0,000***	0,272	0,000***

\*Kontrol grubundan farklı olan gruplar ( $p < 0,05$ ) \*\*\* $p < 0,001$   
F=Tek Yönlü Varyans Analizi (ANOVA), Fark=Tukey Testi

Çizelge 7'deki verilere bakıldığında, H-2274 serilerinin kotiledon yaş ağırlıkları, kontrol grubuna oranla, daha yüksek değerlere ulaşmıştır ve istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Ancak %75'lik konsantrasyonun kontrole aynı değerde olduğu görülmüştür. %50'lik konsantrasyonda en yüksek değer tespit edilmiştir. İlica 256 tohumları yaş ağırlıklarında ise, %1'lik konsantrasyonda bir artış görüldükçe, diğerlerinde kontrol grubuna kıyasla azalmalar kaydedilmiştir. Bu azalmalar, %25'lik konsantrasyon hariç, istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. En düşük kotiledon yaş ağırlığına ise %100'lük seride rastlanmıştır. Kotiledon kuru ağırlıklarına bakıldığında ise, hem H-2274'de hem de İlica 256'da sadece %100'lük konsantrasyonlarda kontrole göre istatistiksel olarak anlamlı bir artış ( $p < 0,05$ ) göze çarpmaktadır.

**Çizelge 7.** H-2274 ve İlica 256 kotiledon yaş ve kuru ağırlıkları

Konsantras. (%)	Kotiledon Yaş Ağırlığı (g)		Kotiledon Kuru Ağırlığı (g)	
	H-2274	İlica 256	H-2274	İlica 256
Kontrol	0,0038	0,0087	0,0008	0,0019
1	0,0047*	0,0093*	0,0009	0,0018
10	0,0050*	0,0070*	0,0008	0,0020
25	0,0044*	0,0086	0,0008	0,0019
50	0,0053*	0,0075*	0,0008	0,0018
75	0,0038	0,0084*	0,0008	0,0021
100	0,0041*	0,0066*	0,0015*	0,0022*
F	102,857	295,429	20,429	6,857
p	0,000***	0,000***	0,000***	0,001**

\*Kontrol grubundan farklı olan gruplar ( $p < 0,05$ ). \*\*\* $p < 0,001$   
F=Tek Yönlü Varyans Analizi (ANOVA), Fark=Tukey Testi

#### 4. Sonuç

Bitki gelişimi sürecinde birden fazla ağır metalin birlikte gösterdiği etkiler, tek başına gösterdiği etkilerden farklı olabilmektedir. Yaptığımız çalışma, kullandığımız seramik atık suyunun içeriğinde bulunan her bir ağır metalin, bitki çimlenmesi ve gelişimi üzerinde ayrı ayrı etkilerini göstermese de ağır metallerin birlikte gösterdikleri

etkileri ile ilgili önemli sonuçlar ortaya koymaktadır. Yapılan denemelerde, bitki çimlenmesi ve büyümesi açısından %50'lik konsantrasyonun genel olarak diğerlerinden farklı etkiler oluşturduğu gözle çarpılmaktadır. Bu da atık suyun içerdiği farklı oranlardaki ağır metal içeriklerinin bitkinin büyüme ve gelişimini farklı şekillerde etkileyebileceğini işaret etmektedir. Ayrıca, çalışmamızda elde edilen sonuçların endüstriyel atık suların bitkinin ileri gelişim evrelerindeki etkilerinin araştırılacağı gelecek çalışmalara ışık tutacağı öngörülmektedir.

#### Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Bu makalenin bir kısmı (Vigor İndeklerini hesaplamada kullanılan çimlenme yüzdeleri), 13-14 Mayıs 2023 tarihleri arasında İstanbul'da düzenlenen 1.Uluslararası Boğaziçi Bilimsel Çalışmalar Kongresi'nde sözlü bildiri olarak (online) sunulmuş ve özeti "Seramik Atık Suyunun Tohum Çimlenmesi Üzerine Etkileri" başlığı ile kongre bildiri özet kitabında basılmıştır.

#### Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Kaynaklar, Araştırma, Deney, Yazma – orijinal taslak

Yazar 2: Kaynaklar, Araştırma, Deney, Yazma – orijinal taslak

#### Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

#### Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

#### Teşekkür

Çalışmada kullanılan tohumların temin edildiği T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Eskişehir Geçit Kuşağı Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü'ne teşekkür ederiz.

#### 5. Kaynaklar

- Abdul-Baki, A.A. and Anderson, J.D., 1973. Vigor determination in soybean seed by multiple criteria. *Crop science*, **13(6)**, 630-633.  
<https://doi.org/10.2135/cropsci1973.0011183X001300060013x>
- Babaoğlu, M., Gürel, E. ve Özcan, S., 2001. Bitki Biyoteknolojisi I: Doku Kültürü ve Uygulamaları, Selçuk Üniversitesi Yayınları, 374.
- Başaran, D., 1990. Bitki Doku Kültürleri, Dicle Üniversitesi, 208.
- Doğaroğlu, Z.G., 2018. Kadmiyum, kurşun ve çinko metallerinin marul (*Lactuca sativa*) tohumlarının çimlenme özellikleri üzerine etkisi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, **23(2)**, 299-308.

<https://doi.org/10.17482/uumfd.417228>

- Doğru, A., Altundağ, H. ve Dündar, Ş., 2021. Bitkilerde ağır metal hiperakümülyasyonu ve fitoremediasyon. *Journal of Agricultural Biotechnology*, **2(2)**, 32-55.
- Dündar, M.Ş., Altundağ, H., Kaygaldurak, S., Şar, V. ve Acar, A., 2012. Çeşitli endüstriyel atık sularda ağır metal düzeylerinin belirlenmesi. *Sakarya University Journal of Science*, **16(1)**, 6-12.
- Emir, G., 2019. Seramik endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtılması. Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 5.
- Ertekin, E. N. ve Bilgen, M., 2021. Bazı ağır metallerin at dişi mısır (*Zea mays L.*)'da çimlenme ve erken fide gelişimi üzerine etkileri. *Biological Diversity and Conservation*, **14(2)**, 198-207.  
<https://doi.org/10.46309/biodicon.2021.889901>
- Hu, J., Zhu, Z.Y., Song, W.J., Wang, J.C., and Hu, W. M., 2005. Effects of sand priming on germination and field performance in direct-sown rice (*Oryza sativa L.*). *Seed Science and Technology*, **33(1)**, 243-248.  
<https://doi.org/10.15258/sst.2005.33.1.25>
- Kara, E., Sarıkaya, M. F., Çilesiz, Y., Akkaş, F., Karaköy, T., ve Baktemur, G., 2022. Farklı dozlarda uygulanan ağır metallerin in vitro koşullarda biber (*Capsicum annuum*) bitkisi gelişimi üzerine etkilerinin belirlenmesi. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, **9(4)**, 957-967.  
<https://doi.org/10.30910/turkjans.1141400>
- Karaer, M., Gülümser, E., Başaran, U. ve Mut, H., 2021. Arıtılmış Atık Su Seviyelerinin mürdümük (*Lathyrus sativus L.*) genotiplerinin çimlenme gelişimine etkisi. *ISPEC Journal of Agricultural Sciences*, **5(4)**, 919-926.  
<https://doi.org/10.46291/ISPECJASvol5iss4pp919-926>
- Khan M.R. and Khan M.M., 2010. Effect of varying concentration of nickel and cobalt on the plant growth and yield of chickpea. *Australian Journal of Basic and Applied Science*. **4(6)**, 1036-1046.
- La Rocca, N., Andreoli, C., Giacometti, G.M., Rascio, N. and Moro, I., 2009. Responses of the Antarctic microalga *Koliella antarctica* (Trebouxiophyceae, Chlorophyta) to cadmium contamination. *Photosynthetica*, **47**, 471-479.  
<https://doi.org/10.1007/s11099-009-0071-y>
- Moustakas M., Lanaras T., Symeonidis L. and Karataglis S., 1994. Growth and some photosynthetic characteristics of field grown *Avena sativa* under copper and lead stress. *Photosynthetica*, **30**, 389-396.
- Nedelkoska T.V. and Doran P.M., 2000. Characteristics of heavy metal uptake by plants species with potential for, phytoremediation and phytomining. *Minerals Engineering*, **13**, 549-561.  
[https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(00\)00035-2](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(00)00035-2)

- Okcu M., Tozlu E., Kumlay A.M., Pehlivan M., 2009. Ağır Metallerin Bitkiler Üzerine Etkileri. Alinteri Zirai Bilimler Dergisi, **17(2)**, 14-26.
- Özay, C. ve Mammadov, R., 2013. Ağır metaller ve süs bitkilerinin fitoremediasyonda kullanılabilirliği. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, **15(1)**, 68-77.
- Özay, C., 2018. Bazı ağır metallerin yem şalgamı'nda (Brassica rapa L. var. rapa) tohum çimlenmesi ve fide büyümesi üzerine etkisi. Journal of the Institute of Science and Technology. **8(3)**, 71-76.  
<https://doi.org/10.21597/jist.458578>
- Pagano, S.M., ve Bahadır, E.B., 2013. Türkiye'de endüstriyel atıksularda toksisite izleme yönteminin atıksu parametreleri ile istatistiksel ilişkilendirilmesi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, **2(2)**, 1-8.  
<https://doi.org/10.28948/ngumuh.239378>
- Ravent, J. A., Evans, M. C. and Korb, R. E., 1999. The role of trace metals in photosynthetic electron transport in O<sub>2</sub>-evolving organisms. Photosynthesis research, **60**, 111-150.
- Sevgi, K. ve Leblebici, S., 2022. Bitkilerde ağır metal stresine verilen fizyolojik ve moleküler yanıtlar. Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences, **7(4)**, 528-536.  
<https://doi.org/10.35229/jaes.1160228>
- Stojanović, M.D., Stevanović, D.R., Milojković, J.V., Grubišić, M.S. and Ileš, D.A., 2010. Phytotoxic effect of the uranium on the growing up and development the plant of corn. Water, Air and Soil Pollution, **209**, 401-410.  
<https://doi.org/10.1007/s11270-009-0208-4>
- Sun, R., Zhou, Q. and Jin, C., 2006. Cadmium accumulation in relation to organic acids in leaves of Solanum nigrum L. as a newly found cadmium hyperaccumulator. Plant and Soil, **285**, 125-134.  
<https://doi.org/10.1007/s11104-006-0064-6>
- Tabuman, F.C., 1995. Endüstriyel, Evsel Atıksuların ve Alıcı Ortamların İzlenmesi, İller Bankası Genel Müdürlüğü Yayını, 48.
- Tatar, N., Öztürk, Y. ve Çarpıcı, E.B., 2018. NaCl ön uygulamalarının farklı tuz seviyelerinde çok yıllık çim (Lolium perenne L.)'in çimlenme özellikleri üzerine etkileri. Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi, **5(1)**, 28-33.
- Vural, H., 1993. Ağır Metal İyonlarının Gıdalarda Oluşturduğu Kirlilikler. Ekoloji **8**, 3-8.
- Yerli, C., Çakmakçı, T., Sahin, U. ve Tüfenkçi, Ş., 2020. Ağır metallerin toprak, bitki, su ve insan sağlığına etkileri. Türk Doğa ve Fen Dergisi, **9(Özel Sayı)**, 103-114.  
<https://doi.org/10.46810/tdfd.718449>
- Yıldız, M., Uruşak, B. ve Terzi, H., 2010. Türkiye'de Ekimi Yapılan Bazı Arpa Çeşitlerinin Erken Fide Evresinde Krom (VI) Toleransı Üzerine Bir Ön Çalışma. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, **10(1)**, 1-10.



## Muğla'dan Zercon Cinsinin (Acari, Zerconidae) Yeni Bir Türü: Zercon fethiyensis sp.nov.

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 04.04.2024

Kabul/Accepted: 07.08.2024

Yayımlandı/Published:02.12.2024

### A new species of the genus Zercon (Acari, Zerconidae) from Muğla: Zercon fethiyensis sp.nov.

Raşit URHAN<sup>1\*</sup>, Mehmet KARACA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Pamukkale Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Denizli, Türkiye

<sup>2</sup> Pamukkale Üniversitesi, Denizli Teknik Bilimler MYO, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Denizli, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

Bu çalışmada, Fethiye (Muğla) ilçesinden toplanmış olan zerconid akar örnekleri değerlendirildi. *Zercon fethiyensis* sp. nov. türü bilim dünyası için tanımlandı, teşhisi yapılan fertlerin şekilleri çizildi, ölçümleri alındı ve tanımlanması yapıldı. Cins içindeki diğer türlerle karşılaştırıldı, türler arasındaki benzerlik ve farklılıklar sunuldu. Cinsin ülkemizden kaydedilmiş tüm türlerini kapsayan bir teşhis anahtarı da verildi.

**Anahtar Kelimeler** Acari, Zerconidae, Yeni tür, Sistematik, Muğla, Türkiye.

#### 1. Giriş

Eklembacaklılar şubesinin Arachnida sınıfına ait olan akarlar üzerine sistematik, ekolojik, moleküler ve faunistik çalışmalar günümüzde oldukça yaygınlaşmaya başlamıştır. Zerconid akarlarla ilgili özellikle sistematik araştırmalar bütün dünyada (Marchenko 2020, 2021, 2022) olduğu gibi ülkemizde de son zamanlarda gittikçe artmaktadır (Urhan ve Karaca 2022, 2023a, b, c, 2024). Ülkemizde zerconid akar faunasını ortaya çıkarmak için bölgesel olarak yoğun proje çalışmaları yürütülmektedir. Bu bağlamda, Kıyı Ege Bölümü'nün zerconid akar faunasını belirlemek amacıyla 2018-2021 tarihleri arasında Muğla ilinden örnekler toplanmıştır. Örneklerin incelenmesi sonucunda *Zercon fethiyensis* sp.nov. türü ilk defa tanımlanmıştır. Şimdiye kadar Türkiye'den *Zercon* cinsine ait 91 tür tespit edilmiş (Blaszak 1979, Urhan ve Karaca 2024) ve bu çalışmada verilen *Z. fethiyensis* türü ile bu sayı 92 olmuştur.

#### 2. Materyal ve Metot

Muğla ilinin farklı lokalitelerinden toplanan çeşitli biyolojik materyaller akar ayıklama düzeneğine yerleştirildi. Zerconid akarların toplanmasında, laboratuvara transfer edilmesinde, teşhisinde, ölçüm ve

#### Abstract

In this study, zerconid mite samples collected from Fethiye (Muğla) district within the scope of TÜBİTAK project no. 118Z101 were evaluated. The new species, *Zercon fethiyensis* sp. nov., was identified for the science, the figures of the identified individuals were drawn, their measurements were taken and their description was made. It was compared with other species within the same genus, the similarities and differences between the species were presented. An identification key including all species of the genus recorded in our country was also given.

**Keywords:** Acari, Zerconidae, New Species, Systematic, Muğla, Türkiye.

çizim işlemlerinde ve saklanmasında standart metotlar uygulandı (Bulut vd., 2021). Tüm ölçümler mikrometre ( $\mu\text{m}$ ) olarak verildi.

Zerconidlerin teşhis işlemlerinde morfolojik tanımlamalar Urhan vd. (2020)'ye göre yapıldı. Podonotal kıllar küçük harflerle, opistonotal kıllar ise büyük harflerle gösterilmiştir.

#### 3. Bulgular

**Tür:** *Zercon fethiyensis* sp. nov.

**Holotip:** Dişi

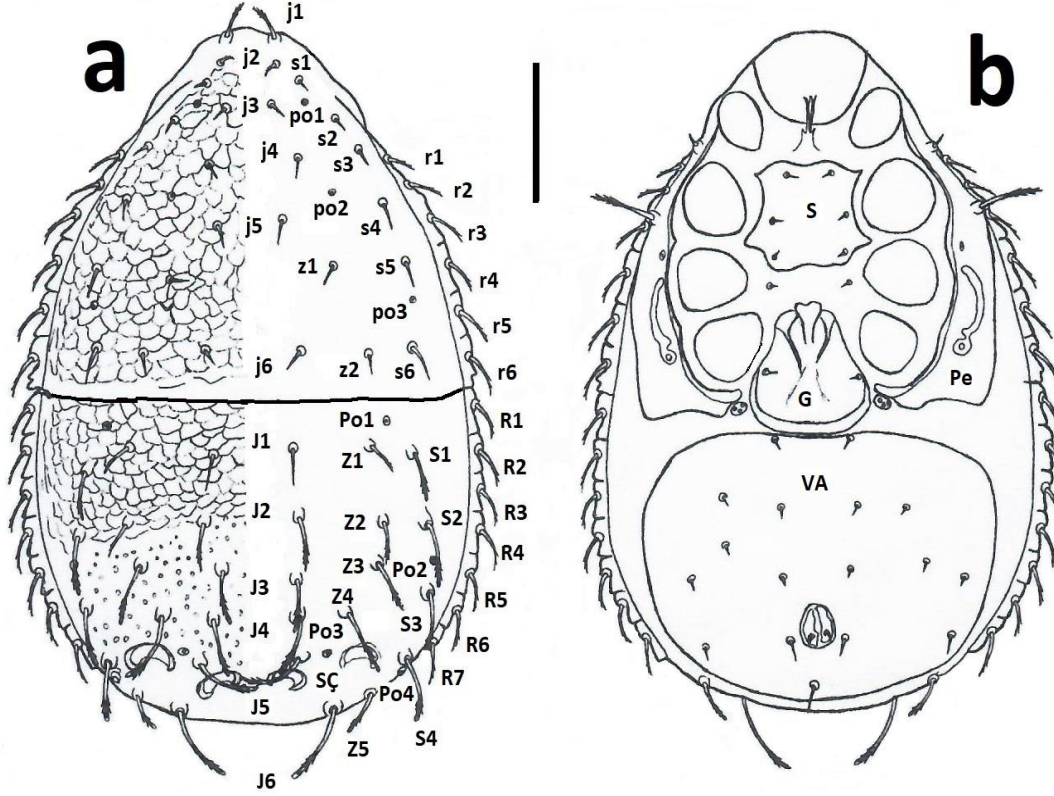
Vücudun boyu 415-465 (442), eni 303-334 (324) (n: 10) (Şekil 1a, b).

Podonotum dorsal bölgesinde *j* serisinde 12, *z* serisinde 4, *s* serisinde 12 ve *r* serisinde de 12 olmak üzere toplam 40 tane kıl bulunmaktadır. *j*<sub>1</sub>-*j*<sub>2</sub> ve *r*<sub>1</sub>-*r*<sub>6</sub> kılları seyrek dikenli, geriye kalan kılların tamamı kısa ve düzdür. Opistonotum dorsal bölgesinde *J* serisinde 12, *Z* serisinde 10, *S* serisinde 8 ve *R* serisinde de 14 olmak üzere toplam 44 tane kıl bulunmaktadır. *J*<sub>1</sub> ve *Z*<sub>1</sub> kılları kısa ve düzdür. *J*<sub>2</sub>, *Z*<sub>2</sub> ve *R*<sub>1</sub>-*R*<sub>7</sub> kılları seyrek dikenlidir. *J*<sub>3</sub>-*J*<sub>6</sub>, *Z*<sub>3</sub>-*Z*<sub>5</sub> ve *S*<sub>1</sub>-*S*<sub>4</sub> kılları uzun, seyrek dikenli ve hiyalin bir uçla sonlanır. *J*<sub>2</sub> kılı *J*<sub>3</sub> kılının, *J*<sub>3</sub> kılı da *J*<sub>4</sub> kılının kaidesine kadar uzanır. *J*<sub>5</sub> kılı



karşılıklı olarak yatay bir şekilde uzanmış ve opistonotumun arka kenarına kadar uzanmaz. J6 kılı opistonotum üzerindeki en uzun kıldır (50). J6 kılı simetrisi olan diğer J6 kılından 87-105 (96) uzaklıktadır. Z2 kılı Z3 kılına, Z3 kılı da Z4 kılına kaidesine kadar uzanır. Z4 kılı opistonotumun arka kenarına kadar uzanmaz. Z5 kılı ise J6

kılından 31-35 (33) uzaklıktadır. S2 kılı opistonotumun yan kenarına kadar uzanmazken, S3 kılı uzanır fakat yan kenardan dışarı uzanmaz. Opistonotal bölgede ölçümü yapılan setalar ve bunlar arasındaki uzunluklar Çizelge 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. *Zercon fethiyensis* sp.nov.: a) Dişi, üstten, b) Dişi, alttan. G: Genital plak, Pe: Peritremal plak, S: Sternal plak, SÇ: Sırt çukurlukları, VA: Ventro-anal plak (Ölçek çizgisi 100).

Çizelge 1. *Zercon fethiyensis* sp.nov. türünde opistonotal bölgedeki setalar ve bunlar arasındaki uzunluklar (dişi, erkek ve deutonimf).

Seta	♀ ♀	♂ ♂	DN	Seta	♀ ♀	♂ ♂	DN	Seta	♀ ♀	♂ ♂	DN
S1	32	24	15	Z1	24	12	14	J1	24	13	14
S1-S2	46	38	27	Z1-Z2	44	28	36	J1-J2	44	36	35
S2	39	31	16	Z2	29	16	12	J2	31	20	11
S2-S3	44	38	27	Z2-Z3	31	32	18	J2-J3	35	31	26
S3	41	35	23	Z3	38	25	25	J3	37	26	9
S3-S4	41	33	40	Z3-Z4	39	32	25	J3-J4	30	23	18
S4	44	42	40	Z4	45	37	42	J4	37	26	9
				Z4-Z5	60	41	16	J4-J5	28	26	18
				Z5	34	26	16	J5	44	18	9
								J5-J6	44	30	35
								J6	50	42	47
								J6-J6	96	83	88

Podonotum üzerindeki po1 gözeneği s1 kılı kaidesinin alt tarafında, po2 gözeneği j4 ile s4 kollarının bağlantı hattının alt tarafında ve po3 gözeneği ise s5 ve s6 kollarının bağlantı hattı üzerinde yer alır. Opistonotum üzerindeki Po1 gözeneği Z1 kılı kaidesinin üst dışyan tarafında, Po2 gözeneği S2 ile S3 kollarının bağlantı hattı üzerinde, Po3

gözeneği J5 ile Z4 kollarının bağlantı hattı üzerinde ve J5 kılına daha yakın ve Po4 gözeneği ise S4 kılı kaidesinin alt tarafındadır. Podonotum kiremitvari desenlidir. Opistonotumun üst yan köşeleri kiremitvari desenlidir ve bu desenler J2 ile Z2 kollarına kadar devam eder. Bu kollar ile sırt çukurlukları arasındaki bölge düzensiz seyrek

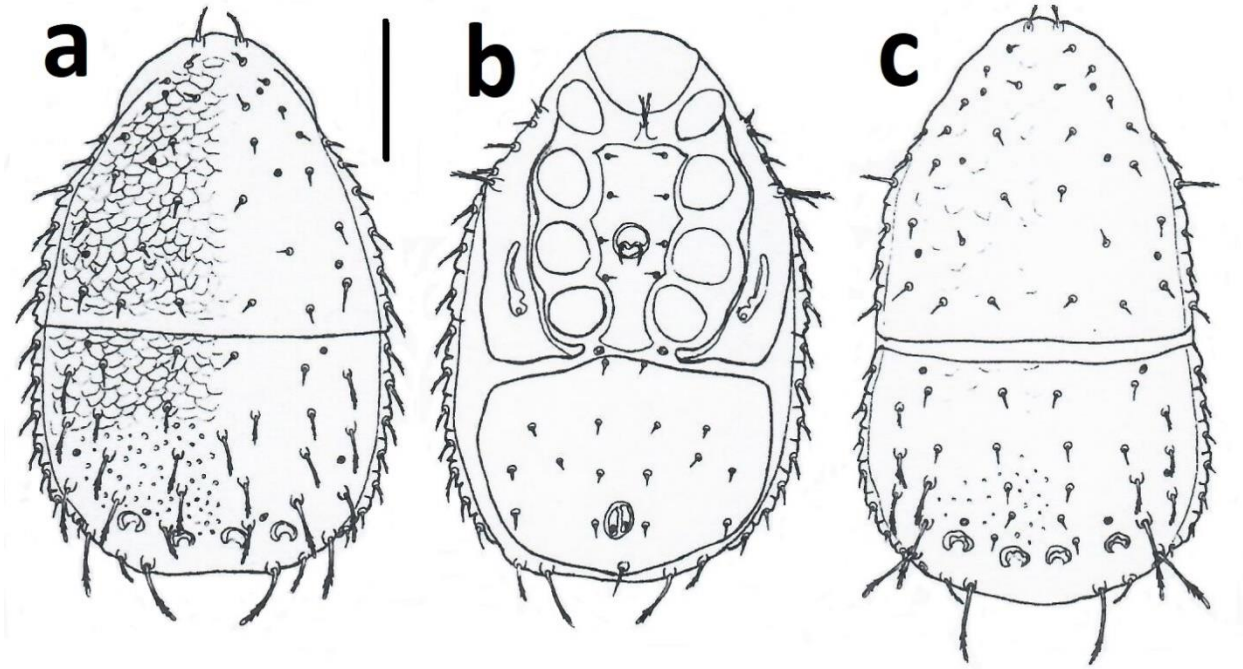
noktacıklı desene sahiptir. Sırt çukurlukları belirgin, iyi kitinleşmiş, yüzük şeklinde, eşit büyüklükte ve vücudun enine eksenine paraleldir (Şekil 1a).

Peritremal plağın biçimi ve ketotaksisi *Zercon* cinsinin tanımlayıcı karakterleriyle örtüşmektedir. 3-4 porlu adgenital plaklar bulunmaktadır. Ventroanal plağın anterior kısmında 1 çift kıl yer almaktadır (Şekil 1b).

#### ERKEK

Vücudun boyu 340-362 (351), eni 232-242 (237) (n:5) (Şekil 2a, b).

Erkek fertlerde idiosomanın yapısı, şekli ve ketotaksisi dişi fertlerdeki gibidir. J6 kılı simetrisi olan diğer J6 kılından 82-84 (83) uzaklıktadır. Z5 kılı ise J6 kılından 18-20 (19) uzaklıktadır. Opistonotal bölgede ölçümü yapılan setalar ve bunlar arasındaki uzunluklar Çizelge 1'de sunulmuştur.



Şekil 2. *Zercon fethiyensis* sp.nov.: a) Erkek, üstten, b) Erkek, alttan, c) Deutonimf, üstten (Ölçek çizgisi 100).

Çizelge 2. *Zercon fethiyensis* sp. nov. türünün *Z. cokelezicus*, *Z. magdae* ve *Z. quadricavum* türlerinden benzer ve ayırt edici özellikleri.

Özellikler	<i>Z. fethiyensis</i> sp. nov.	<i>Z. cokelezicus</i> Urhan, 2009	<i>Z. magdae</i> Ivan ve Călugăr, 2004	<i>Z. quadricavum</i> Urhan, 2001
Ventro-anal plak ön kenarı kıl sayısı	2	4	4	4
J2 kılı	Seyrek dikenli	Düz ve kısa	Seyrek dikenli	Düz ve kısa
J2 kılı	Seyrek dikenli ve uzun	Düz ve kısa	Hiyalin uçlu ve uzun	Düz ve kısa
Z5 kılı	Hiyalin uçlu	Hiyalin uçlu	Hiyalin uçlu	Seyrek dikenli
Z1 ve Z2 kılları	Seyrek dikenli	Düz ve kısa	Z1 kılı seyrek dikenli, Z2 kılı hiyalin uçlu	Düz ve kısa
S1 kılı	Hiyalin uçlu	Düz ve kısa	Seyrek dikenli	Seyrek dikenli
S3 kılı	Hiyalin uçlu	Yok	Yok	Hiyalin uçlu
Vücut büyüklüğü (♀♀) (Boy/en)	415-465 / 303-334	398-430 / 285-313	403-429 / 288-301	390-453 / 294-327

#### DEUTONİMİF

Vücudun boyu 362-370 (366), eni 233-237 (235) (n:4) (Şekil 2c).

Podonotum üzerindeki j1, r3 ve r6 kılları seyrek dikenli, geriye kalan kılların tamamı kısa ve düzdür. Opistonotum üzerindeki J1-J5, Z1-Z2 ve R1-R7 kılları kısa ve düzdür. J6,

Z3-Z4 ve S2-S4 kılları uzun, seyrek dikenli ve hiyalin bir uçla sonlanır. S3 kılı opistonotumun yan kenarına kadar uzanmaz. Z4 kılı opistonotumun arka kenarından dışarı uzanır. Z5 kılı seyrek dikenli ve hiyalin bir uçla sonlanır. J6 kılı simetrisi olan diğer J6 kılından 86-90 (88) uzaklıktadır. Z5 kılı ise J6 kılından 19-22 (21) uzaklıktadır. Opistonotum

üzerindeki Po3 gözeneği J4 ile Z4 kıllarının bağlantı hattı üzerindedir. Opistonotal bölgede ölçümü yapılan setalar ve bunlar arasındaki uzunluklar Çizelge 1'de sunulmuştur.

**İncelenen Örnekler:** *Holotip* (♀); 25.05.2019, 36°30.490' K, 29°08.457' D, 590 m, Fethiye ilçesi, Kirme mahallesi, *Pinus brutia*, *Olea europea* ve *Genista acanthoclada* türleri altından döküntü ve toprak numuneleri. *Paratipler*: 5♀, 2♂, 2DN; holotip ile aynı lokaliteden toplandı. 5♀; 25.05.2019, 36°26.123' K, 29°08.514' D, 492 m, Fethiye ilçesi, Boğaziçi-Karaağaç mahallesi arası, *P. brutia* ve *Quercus coccifera* türleri altından döküntü ve toprak numuneleri. 4♀; 25.05.2019, 36°28.067' K, 29°09.845' D, 1015 m, Fethiye ilçesi, Karaağaç mahallesi, *Q. coccifera* türü altından döküntü, toprak ve yosun numuneleri. 38♀, 1♂; 26.11.2019, 36°45.286' K, 29°27.124' D, 1034 m, Söğüt-Fethiye yolu, Ekinciler mahallesi yol ayrımı, *Q. coccifera* ve *Salvia officinalis* türleri altından döküntü ve toprak numuneleri. 25♀, 2♂, 2DN; 26.11.2019, 36°41.687' K, 29°24.675' D, 624 m, Söğüt-Fethiye yolu, Kızılhörü mahallesi yol ayrımı, *Pinus nigra* ve *Q. coccifera* türleri altından döküntü ve toprak numuneleri. 1♀; 24.05.2021, 36°26.138' K, 29°20.557' D, 69 m, Seydikemer ilçesi, Saklıkent-Palamut köyü yolu, *Q. coccifera* türü altından döküntü, toprak ve yosun numuneleri. 6♀; 24.05.2021, 36°25.752' K, 29°13.553' D, 168 m, Seydikemer ilçesi, Dereboğaz mahallesi, *Q. coccifera* türü altından döküntü, toprak ve yosun numuneleri. 1♀; 24.05.2021, 36°25.172' K, 29°12.162' D, 240 m, Seydikemer ilçesi, Boğaziçi mahallesi, *G. acanthoclada* türü altından döküntü ve toprak numuneleri. Bütün örnekler Prof. Dr. Raşit Urhan tarafından toplandı.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Çalışma kapsamında yeni tür olarak sunulan *Zercon fethiyensis* sp. nov., türünde, opistonotal bölgenin posterior kısmında yer alan iyi kitinleşmiş ve belirgin yapıdaki 4 adet sırt çukurluğu aynı büyüklükte olup vücudun transvers eksenine paralel biçimde ve yüzük şeklindedir. Yeni türe ait bireyler, üstte açıklanan benzer morfolojik özelliklere sahip *Z. cokelezicus*, *Z. magdae* ve *Z. quadricavum* türleri ile genelde yakınlık göstermektedir. Bu dört türün benzer ve ayırt edici özellikleri Çizelge 2'de verilmiştir.

**Etimoloji:** Bu yeni tür "*fethiyensis*" adını, tip örneklerinin toplandığı Fethiye ilçesinden (Muğla) almıştır.

#### 4.1 Türkiye'den Bilinen Zercon Türleri İçin Teşhis Anahtarı (Ergin dişi fertlere göre)

1 (62) Ventroanal plağın ön kenarında 2 kıl bulunur.

- 2 (31) S3 kılı opistonotumun yan kenarından dışarı uzanmaz.
- 3 (10) S3 kılı düz.
- 4 (5) J5 kılları düz ..... *Z. lepurus* Błazsak, 1979
- 5 (4) J5 kılları seyrek dikenli veya hiyalin uçlu.
- 6 (7) J4 kılları kısa ve düz .....  
..... *Z. karacasuensis* Bulut vd., 2021
- 7 (6) J4 kılları uzun, dikenli veya hiyalin uçlu.
- 8 (9) J6, Z4 ve S4 kılları seyrek dikenli .....  
..... *Z. hispanicus* Sellnick, 1958
- 9 (8) J6, Z4 ve S4 kılları hiyalin uçlu .....  
..... *Z. kastamonuensis* Urhan ve Karaca, 2020
- 10 (3) S3 kılı seyrek dikenli veya hiyalin uçlu.
- 11 (24) Z5 kılı hiyalin uçlu.
- 12 (13) R kılları kısa ve tek dişçikli .....  
..... *Z. osmaneliensis* Urhan, 2008
- 13 (12) R kılları uzun, seyrek dikenli veya hiyalin uçlu.
- 14 (17) S1 kılı kısa ve düz.
- 15 (16) J2 kılı uzun ve hiyalin uçlu .....  
..... *Z. istanbulensis* Duran ve Urhan, 2015
- 16 (15) J2 kılı kısa ve düz .....  
..... *Z. marinae* Ivan ve Çalugăr, 2004
- 17 (14) S1 kılı uzun, seyrek dikenli veya hiyalin uçlu.
- 18 (19) R kılları uzun, seyrek dikenli ve hiyalin uçlu .....  
..... *Z. saphenus* Błazsak, 1979
- 19 (18) R kılları uzun ve seyrek dikenli.
- 20 (21) J2 ve Z2 kılları kısa ve düz .....  
..... *Z. dilekensis* Urhan ve Karaca, 2023
- 21 (20) J2 ve Z2 kılları seyrek dikenli veya hiyalin uçlu.
- 22 (23) J2 ve Z2 kılları seyrek dikenli ve Po2 gözeneği S2-S3 kıllarının bağlantı hattının dış yan tarafında ..... *Z. fethiyensis* sp. nov.
- 23 (22) J2 ve Z2 kılları hiyalin uçlu ve Po2 gözeneği S2-S3 kıllarının bağlantı hattının iç yan tarafında ..... *Z. tripolisensis* Urhan vd., 2024
- 24 (11) Z5 kılı hiyalin uç taşımaz.
- 25 (28) S1 kılı kısa ve düz.
- 26 (27) S2 kılı seyrek dikenli .. *Z. colligans* Berlese, 1920
- 27 (26) S2 kılı seyrek dikenli ve hiyalin uçlu .....  
..... *Z. dogani* Bilki vd., 2022
- 28 (25) S1 kılı uzun, seyrek dikenli.
- 29 (30) J2-J5 kılları seyrek dikenli .....  
..... *Z. muglaensis* Bilki vd., 2022
- 30 (29) J2-J5 kılları hiyalin uçlu .....  
..... *Z. marmarisensis* Bilki vd., 2022
- 31 (2) S3 kılı opistonotumun yan kenarından dışarı uzanır.
- 32 (43) J4 kılı hiyalin uçlu.
- 33 (34) J5 kılı opistonotumdan dışarı uzanır .....  
..... *Z. plumatopilus* Athias-Henriot, 1961
- 34 (33) J5 kılı opistonotumdan dışarı uzanmaz.
- 35 (36) Po2 gözeneği S1 ile S2 kıllarının bağlantı hattının dış yan tarafında yer alır .....  
..... *Z. huseyini* Urhan, 2008
- 36 (35) Po2 gözeneği S1 ile S2 kıllarının bağlantı hattının iç yan tarafında yer alır.
- 37 (38) S2 kılı hiyalin uç taşımaz .....  
..... *Z. insperatus* Błazsak, 1979

- 38 (37) S2 kılı hiyalin uçlu.
- 39 (40) Po1 gözeneği Z1 kılı kaidesinin iç yan tarafında yer alır ..... **Z. cretensis** Ujvári, 2008
- 40 (39) Po1 gözeneği Z1 kılı kaidesinin dış yan tarafında yer alır.
- 41 (42) J2 ve S2 kılları düz ..... **Z. laczii** Ujvári, 2010
- 42 (41) J2 ve S2 kılları hiyalin uçlu .....  
..... **Z. salebrosus** Błaszak, 1979
- 43 (32) J4 kılı hiyalin uç taşımaz.
- 44 (49) J3-J5 kılları seyrek dikenli.
- 45 (46) J5 kılı uzun ve opistonotumun ötesine uzanır .....  
..... **Z. longisetosus** Urhan, 2008
- 46 (45) J5 kılı kısa ve opistonotumun ötesine uzanmaz.
- 47 (48) J3 ve J4 kılları bir sonraki kılın kaidesine uzanır, Z5 kılı seyrek dikenli ..... **Z. fragilis** Urhan, 2001
- 48 (47) J3 ve J4 kılları bir sonraki kılın kaidesine uzanmaz, Z5 kılı kısa ve düz .....  
..... **Z. nemoralis** Urhan, 2001
- 49 (44) J3-J5 kılları kısa ve düz.
- 50 (53) R1-R3 kılları kısa ve düz.
- 51 (52) Z3 kılı kısa ve düz, Z4 kılının kaidesine ulaşmaz .....  
..... **Z. ignobilis** Błaszak, 1979
- 52 (51) Z3 kılı uzun, seyrek dikenli ve hiyalin uçlu, Z4 kılının kaidesine uzanır .....  
..... **Z. inonuensis** Urhan, 2007
- 53 (50) R1-R3 kılları seyrek dikenli.
- 54 (55) S2 kılı uzun, seyrek dikenli ve hiyalin uçlu .....  
..... **Z. solenites** Haarløv, 1942
- 55 (54) S2 kılı kısa ve düz.
- 56 (57) J6, Z4, S3 ve S4 kılları hiyalin uçlu .....  
..... **Z. separatus** Urhan, 2001
- 57 (56) J6, Z4, S3 ve S4 kılları seyrek dikenli.
- 58 (59) j2 ve r1-r3 kılları seyrek dikenli .....  
..... **Z. caucasicus** Błaszak, 1979
- 59 (58) j2 ve r1-r3 kılları kısa ve düz.
- 60 (61) Po3 gözeneği Z4-J3 kılları bağlantı hattı üzerinde, opistonotumun arka bölgesi desensiz .....  
..... **Z. adoxyphes** Błaszak, 1979
- 61 (60) Po3 gözeneği Z4-J5 kılları bağlantı hattı üzerinde, opistonotumun arka bölgesi noktacıklı desenli. **Z. hungaricus** Sellnick, 1958
- 62 (1) Ventroanal plağın ön kenarında 4 kıl bulunur.
- 63 (64) J ve Z kıl sıraları arasında ekstra kıllar bulunur..... **Z. trabzonensis** Urhan, 1997
- 64 (63) J ve Z kıl sıraları arasında ekstra kıllar bulunmaz.
- 65 (68) S2 kılı yok.
- 66 (67) J2-J5 kılları kısa ve düz, J6 ile Z5 kıllarının kaideleri yakın ..... **Z. beleviensis** Urhan, 2002
- 67 (66) J2-J5 kılları hiyalin uçlu ve seyrek dikenli, J6 ile Z5 kıllarının kaideleri birbirinden ayrı .....  
..... **Z. imperfectsetosus** Urhan, 2012
- 68 (65) S2 kılı var.
- 69 (72) S4 kılı yok.
- 70 (71) J3-J5, Z3 ve S2 kılları kısa ve düz .....  
..... **Z. sklari** Balan, 1992
- 71 (70) J3-J5, Z3 ve S2 kılları seyrek dikenli ve hiyalin uçlu ..... **Z. sklarsimilis** Karaca ve Urhan, 2016
- 72 (69) S4 kılı var.
- 73 (100) S3 kılı yok.
- 74 (75) Z3 kılı yok ..... **Z. tefenniensis** Urhan, 2010
- 75 (74) Z3 kılı var.
- 76 (85) J3-J5 kılları kısa ve düz.
- 77 (78) Dış sırt çukurlukları içtekilerden beş katından daha büyük ..... **Z. domanicensis** Urhan, 2010
- 78 (77) Sırt çukurlukları yaklaşık olarak aynı büyüklükte.
- 79 (80) Z3 ve Z4 kılları seyrek dikenli .....  
..... **Z. bulancakensis** Urhan, 2012
- 80 (79) Z3 kılı kısa ve düz, Z4 kılı uzun ve hiyalin uçlu.
- 81 (82) r3 ve S2 kılları kısa ve düz .....  
..... **Z. soguticus** Urhan ve Duran, 2017
- 82 (81) r3 ve S2 kılları uzun, seyrek dikenli ve hiyalin uçlu.
- 83 (84) S1 kılı kısa ve düz, J6 ile Z5 kıllarının kaideleri birbirine yakın .....  
..... **Z. afyonensis** Urhan ve Duran, 2017
- 84 (83) S1 kılı uzun ve hiyalin uçlu, J6 ile Z5 kıllarının kaideleri birbirinden ayrı .....  
..... **Z. karacamehmeti** Urhan ve Duran, 2017
- 85 (76) J3-J5 kılları uzun, seyrek dikenli veya hiyalin uçlu.
- 86 (91) J3-J5 kılları hiyalin uçlu.
- 87 (88) R1-R7 kılları hiyalin uçlu .....  
..... **Z. magdae** Ivan ve Călugăr, 2004
- 88 (87) R1-R7 kılları seyrek dikenli.
- 89 (90) J1, J2, Z1, Z2, S1 kılları kısa ve düz .....  
..... **Z. cokelezicus** Urhan, 2009
- 90 (89) J1, J2, Z1, Z2, S1 kılları uzun, seyrek dikenli ve hiyalin uçlu ..... **Z. semizi** Urhan vd., 2020
- 91 (86) J3-J5 kılları seyrek dikenli.
- 92 (93) S4 kılı kısa ve seyrek dikenli .....  
..... **Z. geliboluensis** Karaca ve Urhan, 2016
- 93 (92) S4 kılı uzun, seyrek dikenli ve hiyalin uçlu.
- 94 (95) S2 kılı hiyalin uçlu ..... **Z. alattini** Urhan, 2010
- 95 (94) S2 kılı seyrek dikenli.
- 96 (97) Z3 kılı hiyalin uçlu .....  
..... **Z. tekirdagensis** Karaca ve Urhan, 2016
- 97 (96) Z3 kılı seyrek dikenli.
- 98 (99) Sırt çukurlukları yıldız şeklinde, J2-J4 kılları sonraki kılın kaidesine uzanmaz .....  
..... **Z. uludagicus** Urhan, 2008
- 99 (98) Sırt çukurlukları yarım ay şeklinde, J2-J4 kılları sonraki kılın kaidesine uzanır .....  
..... **Z. yusufi** Urhan, 2010
- 100 (73) S3 kılı var.
- 101 (112) Podonotum ve opistonotum üzerindeki kılların tamamı düz.
- 102 (105) J5 kılı uzun ve opistonotumun arka kenarının ötesine uzanır.
- 103 (104) Dış sırt çukurlukları içtekilerden 3-4 kat daha büyük ..... **Z. bulgaricus** Balogh, 1961
- 104 (103) Sırt çukurlukları yaklaşık aynı büyüklükte .....  
..... **Z. filiformis** Karaca ve Urhan, 2016
- 105 (102) J5 kılı kısa ve opistonotumun arka kenarına kadar uzanmaz.
- 106 (107) s1 kılı yok, dış sırt çukurlukları içtekilerden 2 kat daha büyük ..... **Z. cabylus** Athias-Henriot, 1961

- 107 (106)** s1 kılı var, Sirt çukurlukları yaklaşık olarak aynı büyüklükte.
- 108 (109)** Po3 gözeneği J ile Z kıl dişileri arasında yer alır ..... **Z. berlesei** Sellnick, 1958
- 109 (108)** Po3 gözeneği Z ile S kıl dişileri arasında yer alır.
- 110 (111)** Z3 kılı uzun ve Z4 kılının kaidesine kadar uzanır, S2 ve S3 kılları uzundur ve opistonotumun yan kenarına kadar uzanır ..... **Z. montanus** Willmann, 1943
- 111(110)** Z3 kılı kısa ve Z4 kılının kaidesine kadar uzanmaz, S2 ve S3 kılları kısadır ve opistonotumun yan kenarına kadar uzanmaz ..... **Z. perforatulus** Berlese, 1904
- 112 (101)** Podonotum ve opistonotum üzerindeki kıllar çeşitli yapıdadır.
- 113 (136)** R kıllarının tamamı düz.
- 114 (125)** J4 ve J5 kılları kısa ve düz.
- 115 (116)** J6 kılı çok uzun, seyrek dikenli ve hiyalin uç taşımaz ..... **Z. honazicus** Urhan, 2009
- 116 (115)** J6 kılı uzun ve hiyalin uçlu.
- 117 (120)** S3 kılı kısa ve düz.
- 118 (119)** Sirt çukurlukları semer şeklinde, aynı doğrultuda ve iyi kitinleşmiş ..... **Z. carpathicus** Sellnick, 1958
- 119 (118)** Sirt çukurlukları dalgalı yıldız şeklinde, dıştakiler içtekilerden daha üst seviyede ve zayıf kitinleşmiş ..... **Z. anatolicus** Urhan, 2008
- 120 (117)** S3 kılı uzun ve hiyalin uçlu.
- 121 (122)** S1 ve S2 kılları kısa ve düz ..... **Z. emirdagicus** Urhan vd, 2016
- 122 (121)** S1 ve S2 kılları uzun ve hiyalin uçlu.
- 123 (124)** Z3 kılı kısa ve düz ..... **Z. ozkani** Urhan ve Ayyıldız, 1993
- 124 (123)** Z3 kılı uzun, seyrek dikenli ve hiyalin uçlu ..... **Z. andrei** Sellnick, 1958
- 125 (114)** J4 ve J5 kılları seyrek dikenli veya hiyalin uçlu.
- 126 (131)** J4 ve J5 kılları seyrek dikenli
- 127 (128)** S2 kılı hiyalin uçlu **Z. septemporus** Urhan, 2001
- 128 (127)** S2 kılı kısa ve düz.
- 129 (130)** i2 kılı kısa ve düz, Z3 kılı Z4 kılının kaidesine kadar uzanır ..... **Z. foveolatus** Halašková, 1969
- 130 (129)** i2 uzun ve seyrek dikenli, Z3 kılı Z4 kılının kaidesine kadar uzanmaz ..... **Z. pinicola** Halašková, 1969
- 131 (126)** J4 ve J5 kılları hiyalin uçlu.
- 132 (133)** J2, J3, Z2, S1 ve S2 kılları kısa ve düz ..... **Z. similifoveolatus** Ivan ve Čalugăr, 2004
- 133 (132)** J2, J3, Z2, S1 ve S2 kılları uzun, seyrek dikenli ve hiyalin uçlu.
- 134 (135)** i2 ve Z5 kılları kısa ve düz ..... **Z. delicatus** Urhan ve Ekiz, 2002
- 135 (134)** i2 kılı seyrek dikenli, Z5 kılı seyrek dikenli ve hiyalin uçlu ..... **Z. mehmeturhani** Urhan, 2009
- 136 (113)** R kılları seyrek dikenli veya hiyalin uçlu.
- 137 (170)** R kılları seyrek dikenli.
- 138 (149)** J3 kılı kısa ve düz.
- 139 (142)** S2 kılı uzun, seyrek dikenli ve hiyalin uçlu.
- 140 (141)** Z5 ve J6 kıllarının kaideleri bitişik ..... **Z. kezbaniremae** Urhan, 2007
- 141 (140)** Z5 ve J6 kıllarının kaideleri ayrı ve arasındaki mesafe 22 µm ..... **Z. izmirensis** Urhan vd., 2020
- 142 (139)** S2 kılı kısa ve düz.
- 143 (146)** J4 ve J5 kılları kısa ve düz.
- 144 (145)** Z4, S3 ve S4 kılları seyrek dikenli ve hiyalin uç yok ..... **Z. serratus** Urhan, 2001
- 145 (144)** Z4, S3 ve S4 kılları hiyalin uç var ..... **Z. manisaensis** Urhan vd., 2020
- 146 (143)** J4 ve J5 kılları tüylü veya hiyalin uçlu.
- 147 (148)** Z5 kılı düz, J3 kılı J4 kılı kaidesine kadar uzanır ..... **Z. peltatus** C. L. Koch, 1836
- 148 (147)** Z5 kılı seyrek dikenli, J3 kılı J4 kılı kaidesine kadar uzanmaz ..... **Z. burdurensis** Urhan, 2001
- 149 (138)** J3 kılı seyrek dikenli veya hiyalin uçlu.
- 150 (155)** J3 kılı seyrek dikenli.
- 151 (152)** J5 kılı hiyalin uçlu ..... **Z. thracicus** Karaca ve Urhan, 2016
- 152 (151)** J5 kılı seyrek dikenli.
- 153 (154)** S3 kılı uzun ve hiyalin uçlu ..... **Z. mirabilis** Urhan, 2013
- 154 (153)** S3 kılı kısa ve seyrek dikenli ..... **Z. kackaricus** Urhan ve Ekiz, 2002
- 155 (150)** J3 kılı hiyalin uçlu.
- 156 (159)** S1 kılı kısa ve düz.
- 157 (158)** Z5 kılı hiyalin uçlu, J3 kılı J4 kılının kaidesine ve Z3 kılı Z4 kılının kaidesine uzanmaz ..... **Z. ekizi** Urhan vd., 2015
- 158 (157)** Z5 kılı seyrek dikenli, J3 kılı J4 kılının kaidesine ve Z3 kılı Z4 kılının kaidesine uzanır..... **Z. quadricavum** Urhan, 2001
- 159 (156)** S1 kılı seyrek dikenli veya hiyalin uçlu.
- 160 (165)** S1 kılı seyrek dikenli.
- 161 (162)** Z3 kılı yok ..... **Z. kadiri** Karaca, 2019
- 162 (161)** Z3 kılı var.
- 163 (164)** j2 kılı kısa ve düz, S2 kılı seyrek dikenli ..... **Z. denizliensis** Urhan, 2009
- 164 (163)** j2 kılı seyrek dikenli, S2 kılı hiyalin uçlu ..... **Z. turcicus** Urhan ve Ayyıldız, 1994
- 165 (160)** S1 kılı hiyalin uçlu.
- 166 (167)** j2 kılı seyrek dikenli, Z5 kılı hiyalin uçlu ..... **Z. kallimcii** Urhan, 2009
- 167 (166)** j2 kılı kısa ve düz, Z5 kılı seyrek dikenli.
- 168 (169)** J2 kılı kısa ve düz, J3 kılı J4 kılının kaidesine uzanmaz ... **Z. encarpatus** Athias-Henriot, 1961
- 169 (168)** J2 kılı seyrek dikenli, J3 kılı J4 kılının kaidesine uzanır ..... **Z. apladellus** Błaszak, 1979
- 170 (137)** R kılları hiyalin uçlu.
- 171 (172)** Po3 gözeneği Z ve S kıl dizileri arasında ..... **Z. notabilis** Błaszak, 1979
- 172 (171)** Po3 gözeneği J ve Z kıl dizileri arasında.
- 173 (176)** s6, J1 ve Z1 uzun ve hiyalin uçlu.
- 174 (175)** j3-j6, z1, z2, s2-s5 kılları seyrek dikenli ..... **Z. arslani** Duran vd., 2016
- 175 (174)** j3-j6, z1, z2, s2-s5 kılları kısa ve düz ..... **Z. ayyildizi** Urhan, 1997
- 176 (173)** s6, J1 ve Z1 kısa ve düz.
- 177 (178)** J2 ve Z5 kılları düz ..... **Z. karadaghiensis** Balan, 1992
- 178 (177)** J2 ve Z5 kılları seyrek dikenli ve hiyalin uçlu.

- 179 (180)** Po3 gözeneği Z4-J5 kılırları bağlantı hattının alt tarafında, J4 kılı kaidesi Z4-Z4 kılırları bağlantı hattının üst tarafında .....  
..... **Z. juvarae** Ivan ve Călugăr, 2004
- 180 (179)** Po3 gözeneği Z4-J4 kılırları bağlantı hattı üzerinde, J4 kılı kaidesi Z4-Z4 kılırları bağlantı hattının alt tarafında.
- 181 (182)** S3 kılı opistonotumun yan kenarına kadar uzanmaz, J2 kılı J3 kaidesine kadar uzanır .....  
..... **Z. agnostus** Błaszak, 1979
- 182 (181)** S3 kılı opistonotumun yan kenarından dışarı uzanır, J2 kılı J3 kaidesine kadar uzanmaz .....  
..... **Z. salmani** Urhan, 2001

#### Etik Standartlar Bildirgesi

Bu çalışmanın hazırlanma sürecinde bilimsel ve etik ilkelere uyulduğu ve yararlanılan tüm çalışmaların kaynakçada belirtildiği beyan olunur.

#### Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Proje yöneticisi, Fikir sahibi, Araştırma, Analiz, Yazma  
Yazar 2: Kaynaklar, Araştırma, Analiz, Yazma

#### Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

#### Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

#### Teşekkür

Bu çalışma, "Kıyı Ege Bölümü'nde Zerconidae Familyası (Acari, Mesostigmata) Üzerine Sistemik Araştırmalar" başlıklı araştırma projesinin bir çıktısı olup, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir (Proje No: 118Z101).

#### 5. Kaynaklar

- Bilki, K., Urhan, R., Karaca, M., 2022. Mites of the family Zerconidae (Acari: Mesostigmata) from Southwestern Turkey, with description of three new species. *Acarological Studies*, **4 (2)**: 89-103.  
<https://doi.org/10.47121/acarolstud.1129248>
- Błaszak, C., 1979. Systematic studies on the family Zerconidae IV. Asian Zerconidae (Acari, Mesostigmata). *Acta Zoologica Cracoviensia*, **24**: 3-112.
- Bulut, D.R., Urhan, R., Karaca, M., 2021. Zerconid mites (Acari, Zerconidae) from eastern parts of Aydın Province (Turkey), with description of *Zercon karacasuensis* sp.nov. *Acarological Studies*, **3 (2)**: 73-81.  
<https://doi.org/10.47121/acarolstud.911415>

- Ivan, O.A., Călugăr, A., 2004. Studiul familiilor Zerconidae Canestrini, 1891 și Scheloribatidae Grandjean, 1933 (Acari: Gamasina, Oribatida): morfologia, taxonomia, ecologia și raspandirea speciilor din fauna României. *Revista de Politica Stiintei și Scientometric* (Numar Special); p. 54.
- Marchenko, I. I., 2019. Three new species of Halozercon (Acari: Mesostigmata: Zerconidae) from Altai Mountains in South Siberia (Russia). *Zootaxa*, **4568 (3)**: 401-434.  
<https://doi.org/10.11646/zootaxa.4568.3.1>
- Marchenko, I. I., 2021. Four new species of Halozercon (Acari: Mesostigmata: Zerconidae) from South Siberia Mountains (Russia) with a key to all known species. *Zootaxa*, **4941 (2)**: 151-185.  
<https://doi.org/10.11646/zootaxa.4941.2.1>
- Marchenko, I. I., 2022. Description of new genus Baikalozercon (Acari: Mesostigmata: Zerconidae) with two new species from South Siberia Mountains (Russia). *Zootaxa*, **5120 (3)**: 301-333.  
<https://doi.org/10.11646/zootaxa.5120.3.1>
- Urhan, R. 2001. Descriptions of two new species of the genus Zercon Koch (Acari, Gamasida, Zerconidae) from Turkey. *Zoology in the Middle East*, **23 (1)**: 107-112.
- Urhan, R. 2009. Zerconid mites (Acari, Mesostigmata, Zerconidae) from Turkey. *Turkish Journal of Zoology*, **33**: 321-329.
- Urhan, R., Karaca, M., 2022. Manisa ilinin zerconid akar faunası (Acari: Mesostigmata: Zerconidae). In: Manisa akademik araştırmalar ışığında (Fen Bilimleri & Coğrafya & İktisat), 4. Abalı, Y., Minareci, O., Kaynar, S.Ç. and İncedere, L. (Editörler). Berikan Yayınevi, Ankara, Türkiye, 208-234.
- Urhan, R., Karaca, M., 2023a. Contributions to the Zerconidae (Acari: Mesostigmata) fauna of Dilek Peninsula-Büyük Menderes Delta National Park, Türkiye. *Acarological Studies*, **5 (1)**: 21-33.  
<https://doi.org/10.47121/acarolstud.1226687>
- Urhan, R., Karaca, M., 2023b. Species diversity of the mite family Zerconidae (Acari: Mesostigmata) in İzmir Province. In: Multifaceted academic perspective: Science research, 1. Demirer, A. (Editör). SRA Academic Publishing, Klaipėda, Lithuania, 1-26.
- Urhan, R., Karaca, M., 2023c. Aydın ilinin zerconid akar faunası (Acari: Mesostigmata: Zerconidae). In: Çok yönlü akademik perspektif: Fen Bilimleri Araştırmaları 5., Beram, R.C. (Editör). SRA Academic Publishing, Klaipėda, Lithuania, 89-116.
- Urhan, R., Karaca, M., Duran, E.H., 2020. Description of *Prozercon miraci* sp. nov. (Acari: Mesostigmata: Zerconidae) from Coastal Aegean Section in Turkey, with a key to the Turkish species. *Acarological Studies*, **2 (1)**: 18-23.

Urhan, R., Karaca, M., Kassen, Z., 2024. A new zerconid mite (Mesostigmata: Zerconidae) from Southwestern Türkiye: *Zercon tripolisensis* sp. nov. *Acarological Studies*, **6 (1)**: 52-59.  
<https://doi.org/10.47121/acarolstud.1382338>



## Immunotherapeutic and Cell-Protective Effects of Probiotic Kefir on Cyclophosphamide-induced Nephrotoxicity and Urotoxicity in Rats

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 23.01.2024

Kabul/Accepted: 11.08.2024

Yayımlandı/Published: 02.12.2024

### Probiyotik Kefirin Sıçanlarda Siklofosfamid Kaynaklı Nefrotoksisite ve Ürotoksisite Üzerine İmmünoterapötik ve Hücre Koruyucu Etkileri

Songül ÇETİK YILDIZ<sup>1</sup>, Cemil DEMİR<sup>1</sup>, Mustafa CENGİZ<sup>2\*</sup>, Halit IRMAK<sup>3</sup>, Betül PEKER CENGİZ<sup>4</sup>, Adnan AYHANCİ<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Mardin Artuklu University, Health Services Vocational School, Department of Medical Services and Techniques, Mardin, Türkiye

<sup>2</sup> Siirt University, Faculty of Education, Department of Elementary Education, Siirt, Türkiye

<sup>3</sup> Mardin Artuklu University, Faculty of Engineering And Architecture, Department of Computer Sciences, Mardin, Türkiye

<sup>4</sup> Eskişehir Yunus Emre State Hospital, Department of Pathology, Eskişehir, Türkiye

<sup>5</sup> Eskişehir Osmangazi University, Faculty of Science, Department of Biology, Eskişehir, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Abstract

To evaluate kefir, a naturally occurring fermented dairy product, with pharmacological and therapeutic qualities including antioxidant, anti-apoptotic, and anti-inflammatory effects against cyclophosphamide (CP)-induced hemorrhagic cystitis and nephrotoxicity in rats. For this purpose, experimental rats were divided into 6 groups; control (Group 1), 150 mg/kg CP (Group 2), 5 mg/kg kefir (Group 3), 10 mg/kg kefir (Group 4), 5 mg/kg kefir+150 CP (Group 5), 10 mg/kg kefir+150 CP (Group 6). Since there was no difference in kefir fermented on different days, kefir from the 1st, 2nd, and 3rd days were mixed and given to the rats for 12 days, while CP was given as an only dose and i.p. on the 12th day of the experiment. Histologic evaluations revealed that CP caused toxicity in the kidney and bladder. On the other hand, biochemical evaluations showed a significant increase in serum blood urea nitrogen (BUN) and creatinine (Cre) levels, which are tissue toxicity markers, and a significant decrease in catalase (CAT), glutathione (GSH), superoxide dismutase (SOD) and glutathione peroxidase (GPx) levels, which are intracellular antioxidant system markers, in the CP-treated experimental group. However, all values were reversed as a result of kefir (5 and 10 mg/kg) treatment. These results showed that kefir is an effective protective agent against CP-induced hemorrhagic cystitis and nephrotoxicity.

**Keywords:** Cyclophosphamide; Hemorrhagic cystitis; Immunotherapy; Kefir; Nephrotoxicity.

#### Öz

Doğal olarak oluşan fermente bir süt ürünü olan kefirin, sıçanlarda siklofosfamid (CP) ile indüklenen hemorajik sistit ve nefrotoksisiteye karşı antioksidan, anti-apoptotik ve anti-inflamatuar etkileri gibi farmakolojik ve terapötik niteliklerini değerlendirmek. Bu amaçla, deneysel sıçanlar 6 gruba ayrılmıştır; kontrol (Grup 1), 150 mg/kg CP (Grup 2), 5 mg/kg kefir (Grup 3), 10 mg/kg kefir (Grup 4), 5 mg/kg kefir+150 CP (Grup 5), 10 mg/kg kefir+150 CP (Grup 6). Farklı günlerde fermente edilen kefirlerde farklılık olmadığı için 1., 2. ve 3. gün kefirleri karıştırılarak sıçanlara 12 gün boyunca verilmiş, CP ise deneyin 12. gününde tek doz ve i.p. olarak verilmiştir. Daha sonra elde edilen parametreler değerlendirilmiştir. Histolojik değerlendirmeler sonucunda CP'nin böbrek ve mesane de toksisiteye neden olduğu belirlenmiştir. Öte yandan biyokimyasal değerlendirme ile CP uygulanan deney grubunda, doku toksisite belirteçleri olan serum kan üre nitrojen (BUN) ve kreatinin (Cre) seviyelerindeki önemli artış görülürken hücre içi antioksidan sistem belirteçlerinden olan katalaz (CAT), glutatyon (GSH), superoksit dismutaz (SOD) ve glutatyon peroksidaz (GPx) düzeylerinde ise önemli azalma olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, kefir (5 ve 10 mg/kg) tedavisi neticesinde meydana gelen tüm değerler tersine dönmüştür. Bu sonuçlar kefirin CP kaynaklı hemorajik sistit ve nefrotoksisiteye karşı etkili bir koruyucu olduğunu göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Siklofosfamid; Hemorajik sistit; İmmünoterapi; Kefir; Nefrotoksisite.

#### 1. Introduction

An essential tactic in the treatment of cancer is conventional chemotherapy. Anticancer medications interact with the DNA of cancer cells to regulate apoptosis and stop the cell cycle mechanism (Mills *et al.* 2019). Off-target organ damage, however, is a known drawback and catastrophic side effect of anticancer medication therapy. Undesirable developments can occasionally throw off

treatment plans and patients' adherence to medicines (Ayhanci *et al.* 2020). Cyclophosphamide (CP) is a common chemotherapeutic and immunosuppressive agent widely used in the treatment of chronic autoimmune disorders and numerous cancer types (Cengiz *et al.* 2020). Bladder toxicity is the main factor restricting the use of CP and can cause potentially fatal hemorrhagic cystitis. Additionally, CP causes multi-organ toxicity in many tissues such as liver, kidney and heart in



cancer patients (Cengiz 2018b, Çetik Yıldız *et al.* 2024, Qiu *et al.* 2023, Wróbel *et al.* 2019). Hemorrhagic cystitis is a bladder urotoxicity occurring in approximately 10-40% of patients receiving CP (Akbaş *et al.* 2022, Cengiz *et al.* 2022, Qiu *et al.* 2023, Wróbel *et al.* 2019). Studies have reported that the bladder-toxic hepatic metabolite of CP, acrolein, is linked to CP urotoxicity (Aboulhoda *et al.* 2020). Accumulating research evidence has shown that acrolein disrupts the antioxidant mechanism and bladder epithelium, aggravating the inflammatory responses and production of reactive oxygen species (ROS) (Cengiz *et al.* 2018, Fatima *et al.* 2022, Peng *et al.* 2022). Before utilizing hepatic microsomal cytochrome P450, most especially CYP2B6, to exert its therapeutic benefits, CP must first undergo metabolic activation (Haghi-Aminjan *et al.* 2018). When CP biotransformation occurs, acrolein is produced, and it has a wide range of toxicity. Because the kidneys express CYP2B6, the renal injury could result from the local production of poisonous acrolein (Cengiz 2018, Knights *et al.* 2013, Zanger and Klein 2013). CP-related nephrotoxicity may cause glomerular and tubular dysfunction with a decreased rate of glomerular filtration (Sugumar *et al.* 2007). Lipid peroxidation, cellular defense depletion, and ROS generation have been identified as the primary causes of glomerular injury and renal failure observed after CP treatment (Rehman *et al.* 2012). Many studies have reported a pro-oxidant effect of CP in experimental animals, increasing oxidative stress, inflammatory state, and apoptosis (Alhaithloul *et al.* 2019, Can *et al.* 2022, Cengiz *et al.* 2017, Germoush and Mahmoud 2014). It is noteworthy that the adverse effects of CP can be reduced by natural compounds (Gözüoğlu 2021, Yıldız 2020). Among these functional products, kefir has been found as a prebiotic with health-promoting properties in both experimental and clinical studies.

Kefir is an acidic and slightly alcoholic fermented dairy product originating from the Caucasus mountains (Cetik Yıldız *et al.* 2024, Urdaneta *et al.* 2007). Unlike other fermented milk products, this beverage is produced through fermentation using a mixed microflora contained within a matrix of individual "kefir grains," rather than the metabolic activity of an evenly distributed microflora (Kahraman *et al.* 2021; Marshall and Cole 1985). Grain microbial makeup varies depending on where the grain comes from. The genera that are most frequently reported are acetic acid bacteria, leuconostoc, lactobacilli, lactococci, and homofermentative and heterofermentative yeasts (Angulo *et al.* 1993, Toba 1987). The microorganisms that make up kefir grains include the production of antibiotics, bactericides, and lactic acid which prevent the growth of pathogens and

unwanted microorganisms in kefir (Angulo *et al.* 1993). It has been stated that kefir positively affects antioxidant variables and reduces lipid peroxidation in carbon tetrachloride toxicity in mice (Cetik Yıldız *et al.* 2024; Güven *et al.* 2003). Kefir exhibits activities such as antioxidative, hematoprotective, cytoprotective (Yıldız and Gözüoğlu 2021), antimicrobial, and anticarcinogenic properties, and protection against apoptosis (Cetik Yıldız *et al.* 2019). Besides, Kefir protects kidney tissue in diabetic animal renal tissue by dramatically up-regulating Nrf2, modifying CAT and SOD, and significantly lowering NO, superoxide anion, and 3-NT (Pugliero *et al.* 2021). In another study, it was reported that kefir can prevent damage due to its protective properties on tissue and serum functions in ischemia/reperfusion-induced kidney injury (Yener *et al.* 2015). However, no study showing the effect of kefir on the urinary system was found in the literature. This experimental study was designed to demonstrate the adverse side effects of CP on the kidney as well as to demonstrate the possible protective role of kefir against CP-caused hemorrhagic cystitis and nephrotoxicity in rats. To our knowledge, no study has been found in the literature showing the effects of kefir on CP-caused urotoxicity and nephrotoxicity in rats.

## **2. Materials and Methods**

### **2.1 Fermentation of kefir**

In our study, commercially supplied and freeze-dried kefir yeast and 1 liter of cow's milk were preferred for kefir fermentation. Three groups of kefirs were created, with fermentation at 24-26 °C temperature at intervals of 24, 48, and 72 hours and days 1, 2, and 3. It was kept at +4 °C ready for use. We gave kefir to rats by gavage method for 12 days. Kefirs from the 1st, 2nd, and 3rd days were mixed and given by gavage method for 12 days Yıldız and Gözüoğlu 2021).

### **2.2 Chemicals and injections**

Cyclophosphamide (CP) (Sigma-Aldrich) was commercially available. 500 mg CP was dissolved in 25 ml bidistilled water to prepare for injection of 150 mg/kg CP. The injection was performed as a single dose intraperitoneally (i.p.) / body-weight (b.w.) on the 12th day of the experiment, using sterile disposable syringes.

### **2.3 Experimental setup**

In our experimental study, healthy, males, 200±20 gr, about 3 months age Wistar albino rats were used. During the experiment, the animals were kept in rooms with 12;12 light/dark lighting, 45-50% humidity, and 22±2 C° temperature. And were given tap water and normal pellet feed. The 42 rats used in this study were divided into 6 groups, each group including 7 rats. Kefir gavage method

as mg/kg/body weight (b.w.) for 12 days was given. CP is a single dose and i.p. was given on the last day of the experiment (day 12). Group 1 was designated as control (0.5 mL, saline), 150 mg/kg/bw CP to rats in Group 2, 5 mg/kg/bw kefir was given to the rats in Group 3, 10 mg/kg/bw kefir to experimental animals of Group 4, 5 mg/kg/bw kefir + 150 mg/kg/bw CP for Group 5, and finally, 10 mg/kg/bw kefir + 150 mg/kg/bw CP was administered to the rats of Group 6. Following the research study, anesthesia was used to remove tissues (the kidney and bladder) and blood (for biochemical markers).

#### 2.4 Biochemical analysis

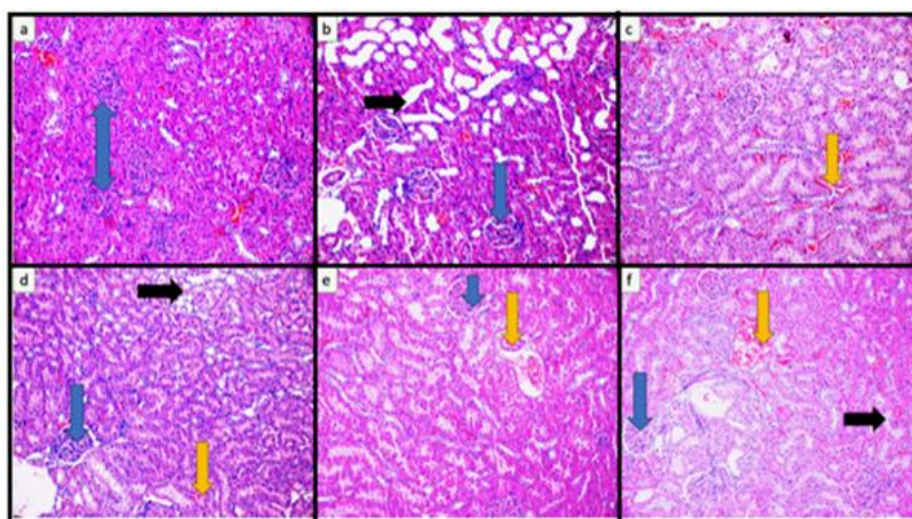
Using the thiobarbituric acid (TBA) reagent method, MDA and GSH levels were measured with a spectrophotometer set at 520 nm and 412 nm respectively (Sedlak and Lindsay 1968). With the support of commercially available kits, the activity of the SOD enzyme was evaluated spectrophotometrically. Sun *et al.*'s (1988) protocol was followed when measuring the activity of the SOD enzyme (Sun *et al.* 1988). Using the Beers and Sizer method as reported by Usoh *et al.* (2005) serum CAT activity was measured by detecting the drop in absorbance at 240 nm caused by the breakdown of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Usoh *et al.* 2005). GPX was measured by Rotruck *et al.* and showed no discernible change. Tris-HCl buffer, hydrogen peroxide, glutathione, DNTB, TCA, Tris-EDTA, a homogenous tissue serum sample, and sodium azide were used in this experiment. Then, using an ELISA reader (AWARENESS STAT FAX-2100, USA), absorption was measured at 420 nm (Valibeik *et al.* 2020). The concentration of serum Cre was measured using the Jaffe technique (Kojima *et al.* 2013), and BUN was measured using the autoanalyzer (BT 3000) UV method.

#### 2.5 Statistical Analysis

The quantitative values obtained at the end of the study were evaluated by applying the Duncan test after one-way ANOVA, which is used in the statistical analysis of more than two independent groups, using the SPSS 26.00 statistical data program.

#### 3. Results

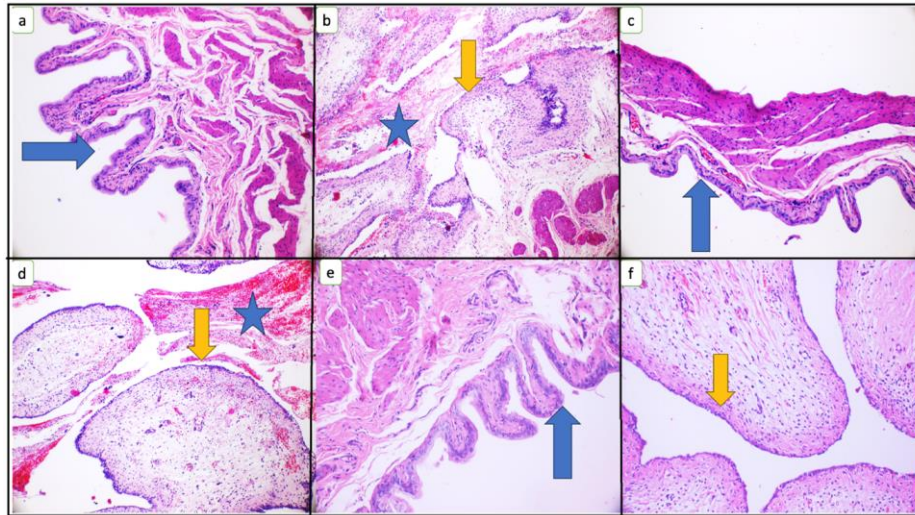
As seen in Figure 1, the control group's rats had normal kidney structures. In contrast, the glomerular structure was atrophic and deformed in the CP group (Figure 1b), some cells were shed into the renal microcapsule, and there was a clear infiltration of inflammatory cells on one side. Also, there were discontinuities in the parietal cells and an incomplete renal microcapsule structure. In the proximal convoluted tubule lumen, there were exfoliated cells as well as some denatured cells that developed edema. Moreover, distal convoluted tubules with discrete and irregularly arranged cells were also visible. However, it was observed that the structure of the kidney in the kefir-given groups was importantly improved compared to the CP-induced group's animals. Especially in the 10mg/kg kefir + CP group (Figure 1e), there was no evidence of inflammatory cell infiltration, and the glomerular structure was largely normal. In the 10 mg/kg kefir + CP group, the proximal convoluted tubules featured prominent brush-like borders and a tiny, irregular lumen. Capillaries in the interstitium were visible, as were the borders of the distal convoluted tubules. In conclusion, the 10 mg/kg kefir dose was more effective than the 5 mg/kg kefir dose in ameliorating CP-induced kidney damage.



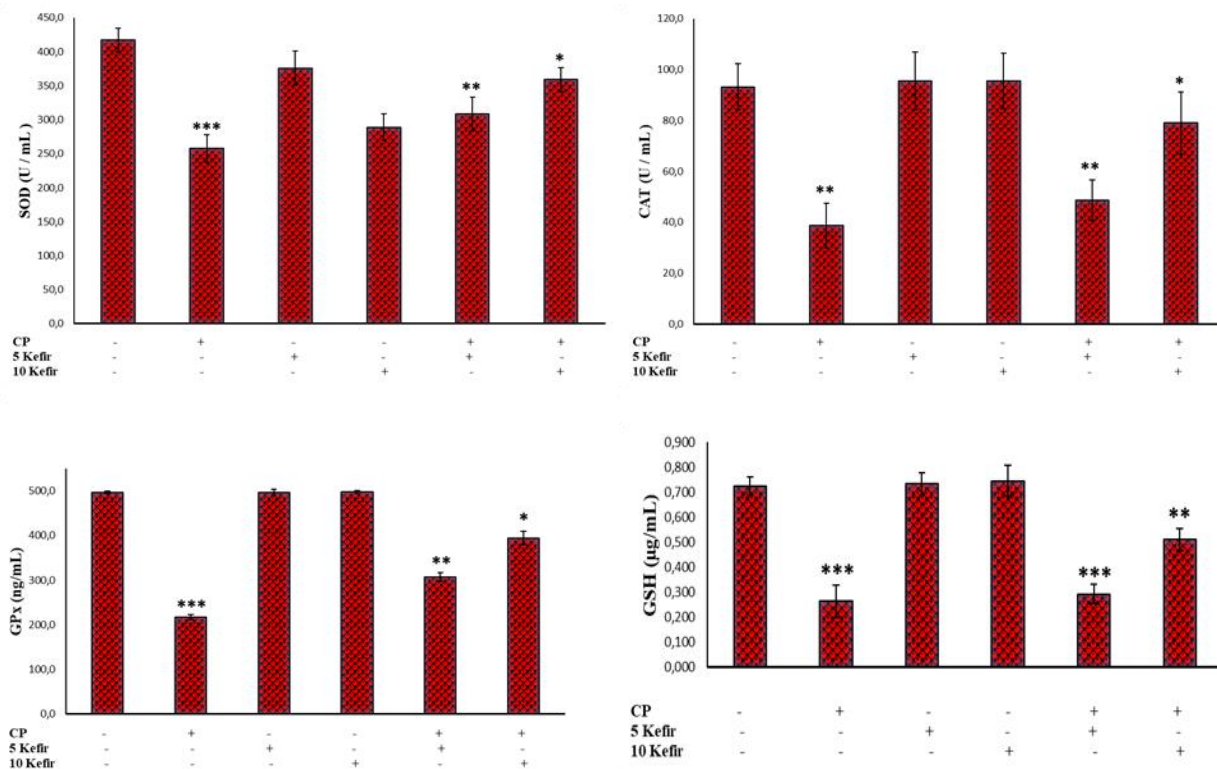
**Figure 1.** (a) Normal-looking tubules and glomeruli (blue arrow) in the kidney parenchyma of rats in the control group, (b) Glomeruli (blue arrow) and thyroidization (black arrow) in the kidney parenchyma of rats administered CP, (c) Congestion (yellow arrow) in the kidney parenchyma of rats given kefir, (d) Glomeruli (blue arrow), congestion (yellow arrow) and focal area thyroidization (black arrow) in the renal parenchyma of rats administered CP and kefir, (e) Congestion (yellow arrow) and glomeruli (blue arrow) in the renal parenchyma of rats administered kefir, (f) CP and congestion (yellow arrow), glomeruli (blue arrow) and thyroidization (black arrow) in the kidney parenchyma of rats administered kefir. (H&E, X200).

As seen in Figure 2, the bladder structure of the rats in the control and kefir groups appeared normal (Figure 2a). However, in the CP group (Figure 2b), widespread ulceration in the bladder epithelium, edema on the wall, inflammation, congestion, and blood and fibrin mass in the lumen were observed. However, it was observed that the bladder structure in the groups given kefir improved

significantly compared to the CP group. Especially in the 10 mg/kg kefir + CP group (Figure 2e), regeneration in the bladder epithelium, mild edema on the wall, and mild inflammation were observed. As a result, the 10 mg/kg kefir dose was more effective than the 5 mg/kg kefir dose in improving CP-induced bladder damage.



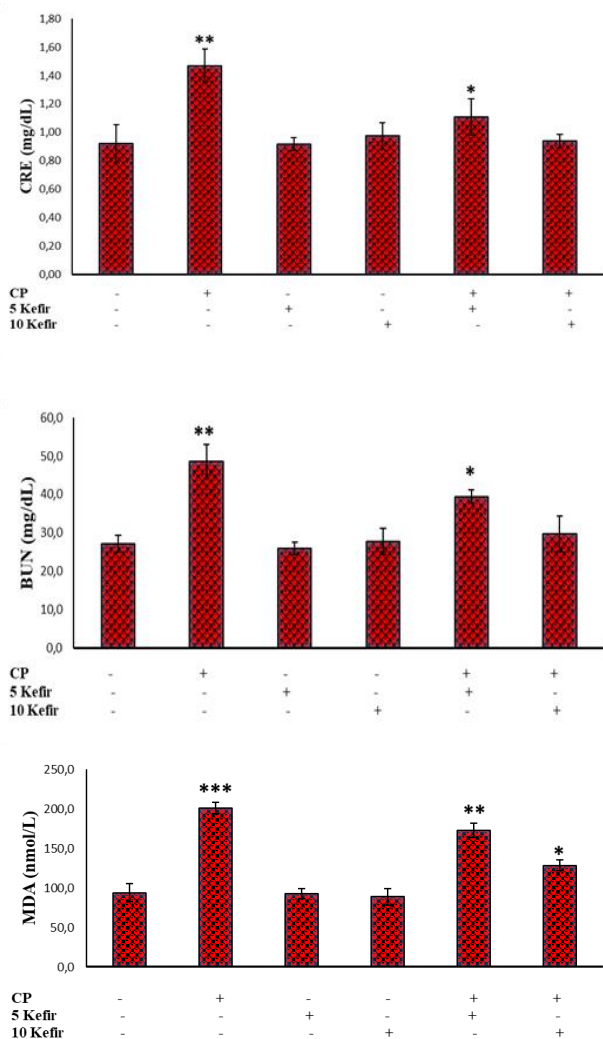
**Figure 2.** (a) Bladder epithelium (blue arrow) and bladder wall within normal limits, (b) Widespread ulceration in the bladder epithelium (yellow arrow), wall edema, inflammation, congestion, and blood and fibrin mass in the lumen (blue star), (c) Bladder epithelium (blue arrow). and bladder wall within normal limits, (d) Bladder epithelium (blue arrow) and bladder wall within normal limits, (e) Widespread erosion of the bladder epithelium (yellow arrow), edema on the wall, mild inflammation, congestion, and blood and fibrin mass in the lumen (blue star), (f) Regeneration in the bladder epithelium (yellow arrow), mild edema and mild inflammation on the wall. (H&E; X200)



**Figure 3.** Showing the effect of CP and kefir on the levels of SOD, CAT, GPx, and GSH (\*\*\*)  $P < 0.001$ ; \*\*  $P < 0.05$ ; \*  $p < 0.01$ )



CAT, SOD, GPx and GSH parameters have antioxidant effects in CP-induced toxicity. By measuring CAT, GPx, GSH, and SOD activity in the serum of control and CP-induced rats, the impact of kefir on the antioxidant system was observed. Figure 3 illustrates how the CP group's GSH, SOD, CAT, and GPx activities were importantly lower ( $P<0.01$ ) than those of the control group. CAT, GSH-Px, and SOD activity rose in the CP-induced rats when they were given kefir at different dosages (5 and 10 mg/kg) as opposed to the CP group.



**Figure 4.** Showing the effect of CP and kefir on the levels, CRE (A), BUN (B), and MDA (C) (\*\* $P<0.05$ ; \* $P<0.01$ ; \*\*\* $P<0.001$ ).

Serum CRE and BUN levels were measured to assess the preventive impact of kefir against CP-induced nephrotoxicity. As shown in Figure 4, When the CP group was compared to the control and kefir-treated groups, there was a substantial increase in both CRE and BUN levels ( $P<0.05$ ). This indicates that CP may cause cell toxicities. These findings were in line with previous research on kidneys (Lin *et al.* 2020, Rehman *et al.* 2012, Sinanoglu *et al.* 2012). It's interesting to note that CRE and BUN levels were considerably lower in CP-induced rats

treated with different kefir dosages than in the CP group ( $P<0.01$ ). This suggests that kefir can effectively ameliorate CP-caused nephrotoxicity in rats. An essential indicator of endogenous lipid peroxidation is MDA. In comparison to the control and kefir groups, the CP group's MDA levels were considerably higher ( $P<0.001$ ). Rats given 5 and 10 mg/kg kefir showed significantly lower MDA levels than those in the CP group ( $P<0.05$  and  $0.01$ ). This shows that kefir can reduce MDA levels in CP-induced lipid peroxidation in rats (Figure 4).

#### 4. Discussion and Conclusions

The kidneys are crucial for controlling blood volume and eliminating medications and poisons from the body. However, because of their great absorptive capacity, kidneys are susceptible to toxicity and damage. Despite the effectiveness of CP, which is widely used in the treatment of neoplastic diseases, its use is associated with nephrotoxicity and urotoxicity (bladder), which are the main limitations of CP-induced therapy (Alshahrani *et al.* 2022). Kefir is an acidic and slightly alcoholic fermented dairy product with antioxidant, antiapoptotic, anti-lipid peroxidation, and anti-inflammatory activities (Can *et al.* 2012, Hadisaputro 2011, Hadisaputro *et al.* 2012). So far, there are no reports on the use of kefir against CP-induced nephrotoxicity and bladder toxicity. Therefore, the purpose of this study was to examine the protective effect of kefir against CP-caused nephrotoxicity and bladder damage through the antioxidant response pathway. Drugs' ability to protect the kidneys is frequently assessed using two key renal function markers, CRE and BUN (Aladaileh *et al.* 2019, Alhaithloul *et al.* 2019). The increased serum CRE and BUN levels after CP administration observed in this study are consistent with reports published in the literature (Abraham and Isaac 2011, Alhaithloul *et al.* 2019, Caglar *et al.* 2002, Temel *et al.* 2020). The increase in the serum levels of these enzymes may be due to the leakage of these cytosolic enzymes into the circulatory system as a result of kidney damage after CP administration. This is indicative of the onset of kidney damage due to renal dysfunction and change in membrane permeability due to impairment in the biosynthesis of these enzymes. With kefir administration, a sharp decrease in serum BUN and CRE levels was seen, preserving renal cellular membrane integrity, and subsequently preventing CP-induced renal toxicity. This is indicative of the possible nephroprotective activity offered by kefir compared to the untreated and CP-treated groups.

Histopathological studies also provided supporting validation for biochemical parameters demonstrated by photomicrographs. In the kidney tissue of CP-treated rats (Figure 1), There was clear inflammatory cell infiltration on one side, the glomerular structure was atrophic and

deformed, and some cells were lost into the kidney microcapsule. Additionally, the renal microcapsule lacked some structural integrity, and the parietal cells were irregularly shaped. In the proximal convoluted tubule lumen, there were exfoliated cells as well as some denatured cells that developed edema. Furthermore, distal convoluted tubules with discrete and irregularly arranged cells were also visible. These histopathological findings were compatible with findings in the literature (Caglayan *et al.* 2018, Lin *et al.* 2020, Rehman *et al.* 2012). The main histological finding of this study was that kefir affected the recovery of CP-induced renal structure. One of the most significant side effects of CP chemotherapy is bladder damage (Davis and Kuttan 2000, Manesh and Kuttan 2005, Lin *et al.* 2020). The acute effect of CP is necrosis of the urothelium, with only a few cells surviving after 24 hours. Since the bladder is the place where urine accumulates, the level of toxic metabolites of CP is higher in the bladder than in other organs (Beyer-Boon *et al.* 1978, Valibeik *et al.* 2020). CP-induced bladder damage is mainly associated with renal excretion of acrolein, which is known to be a urotoxic metabolite of CP (Gray *et al.* 1986, Cengiz *et al.* 2018). Urothelial damage has been shown to occur in direct contact with acrolein, causing necrosis, edema, ulceration, bleeding, and leukocyte infiltration. Acrolein causes highly reactive free radicals, consumes cellular thiol, and disrupts the antioxidant defense mechanism of tissues (Mythili *et al.* 2004, Ayhanci *et al.* 2020). In addition to these side effects, it has also been reported that CP application causes oxidative stress by producing free radicals and ROS (McDermott and Powell 1996, Cetik Yildiz *et al.* 2024). These findings are compatible with our study results. In this study, the level of MDA was examined using it as a key indicator for lipid peroxidation. MDA level, which indicates oxidative stress caused by CP, increased in the CP group compared to the control group. On the other hand, the significant decrease in plasma MDA level with kefir therapy compared to the CP group indicates that its protective effects on kidney and bladder tissues may be due to the antioxidant properties of kefir. This study is also compatible with the literature results (El-Shabrawy *et al.* 2020, Ijaz *et al.* 2022, Jiang *et al.* 2020). Kidney and bladder damage caused by CP is commonly associated with the pro-oxidant qualities of acrolein due to its ability to collect ROS, leading to oxidative stress and depression of the antioxidant functions (Jiang *et al.* 2020, Mahmoud *et al.* 2017). Numerous studies have shown that CP depletes antioxidative enzymes like SOD, GSH, CAT, and GPx and increases lipid peroxidation and ROS in the kidneys and bladder of CP-exposed animals (Jiang *et al.* 2020, Lin *et al.* 2020). Similarly, results from this study showed important decreases in renal activities of GSH, SOD, GPx, and CAT in CP-administered rats indicating oxidative damage. Kefir exhibited significant antioxidant

activity through the restoration of antioxidative activities (high SOD, CAT, GPx, and GSH capacities). This result is consistent with previous reports on the antioxidant activity of kefir (El Golli-Bennour *et al.* 2019, Punaro *et al.* 2014).

The results of this study showed that oxidative stress, decreased antioxidant capacity, and lipid peroxidation are closely related to CP-caused bladder and kidney toxicity, and kefir has protective effects on these CP-caused toxicities. The protective effects of kefir are probably thanks to increasing the decreasing antioxidant capacity and reducing oxidative stress and lipid peroxidation.

#### Declaration of Ethical Standards

This study was approved by the Ethics Committee of Eskisehir Osmangazi University Animal Experiments Local Ethics Committee (784-145/2020). The authors declare that they comply with all ethical standards.

#### Credit Authorship Contribution Statement

Author-1: Methodology / Study design, Software, Validation, Formal analysis, Investigation

Author-2: Methodology / Study design, Software, Validation, Formal analysis, Investigation

Author-3: Writing – original draft, Writing – review and editing, Visualization, Supervision

Author-4: Investigation, Resources, Data curation, Writing – original draft

Author-5: Visualization, Project administration, Funding acquisition

Author-6: Project administration, Funding acquisition

#### Declaration of Competing Interest

The authors have no conflicts of interest to declare regarding the content of this article.

#### Data Availability

All data generated or analyzed during this study are included in this published article.

#### Acknowledgment

This experimental research was financed by Mardin Artuklu University / Coordination Unit of Scientific Research Project (MAU.BAP.20. SHMYO.004).

#### 5. References

- Aboulhoda, B.E., Amin, S.N., Thomann, C., Youakim, M., and Hassan, S.S., 2020. Effect of thymoquinone on cyclophosphamide-induced injury in the rat urinary bladder. *Archives of Medical Science*, 16, 1-12 <https://doi.org/10.5114/aoms.2020.97061>
- Abraham, P. and Isaac, B., 2011. The effects of oral glutamine on cyclophosphamide-induced nephrotoxicity in rats. *Human & experimental toxicology*, 30, 616-623. <https://doi.org/10.1177/0960327110376552>

- Akbaş, N., Suleyman, B., Mammadov, R., Yazıcı, G. N., Bulut, S., Süleyman, H., 2022. Effect of taxifolin on cyclophosphamide-induced oxidative and inflammatory bladder injury in rats. *Experimental Animals*, **71** (4), 460-467. <https://doi.org/10.1538/expanim.22-0030>
- Aladaileh, S.H., Hussein, O.E., Abukhalil, M.H., Saghir, S.A., Bin-Jumah, M., Alfuwaires, M. A., Mahmoud, A.M., 2019. Formononetin upregulates Nrf2/HO-1 signaling and prevents oxidative stress, inflammation, and kidney injury in methotrexate-induced rats. *Antioxidants*, **8** (10), 430. <https://doi.org/10.3390/antiox8100430>
- Alhaithloul, H.A.S., Alotaibi, M.F., Bin-Jumah, M., Elgebaly, H., Mahmoud, A.M., 2019. Olea europaea leaf extract up-regulates Nrf2/Are/HO-1 signaling and attenuates cyclophosphamide-induced oxidative stress, inflammation and apoptosis in rat kidney. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, **111**, 676-685. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2018.12.112>
- Alshahrani, S., Ali Thubab, H.M., Ali Zaeri, A.M., Anwer, T., Ahmed, R.A., Jali, A.M., Alam, M.F., 2022. The protective effects of sesamin against cyclophosphamide-induced nephrotoxicity through modulation of oxidative stress, inflammatory-cytokines and apoptosis in rats. *International Journal of Molecular Sciences*, **23** (19), 11615. <https://doi.org/10.3390/ijms231911615>
- Angulo, L., Lopez, E. and Lema, C., 1993. Microflora present in kefir grains of the galician region (north-west of spain). *Journal of Dairy Research*, **60**(2), 263-267. <https://doi.org/10.1017/S002202990002759X>
- Ayhancı, A., Tanriverdi, D.T., Sahintürk, V., Cengiz, M., Appak-Baskoy, S., Sahin, I.K., 2020. Protective effects of boron on cyclophosphamide-induced bladder damage and oxidative stress in rats. *Biological Trace Element Research*, **197**(1), 184-191. <https://doi.org/10.1007/s12011-019-01969-z>
- Beyer-Boon, M.E., De Voogt, H.J. and Schaberg, A. (1978). The effects of cyclophosphamide treatment on the epithelium and stroma of the urinary bladder. *European Journal of Cancer* (1965), **14**(10), 1029-1035. [https://doi.org/10.1016/0014-2964\(78\)90057-9](https://doi.org/10.1016/0014-2964(78)90057-9)
- Caglar, K., Kinalp, C., Arpacı, F., Turan, M., Sağlam, K., Öztürk, B., Vural, A., 2002. Cumulative prior dose of cisplatin as a cause of the nephrotoxicity of high-dose chemotherapy followed by autologous stem-cell transplantation. *Nephrology Dialysis Transplantation*, **17**(11), 1931-1935. <https://doi.org/10.1093/ndt/17.11.1931>
- Caglayan, C., Temel, Y., Kandemir, F.M., Yildirim, S., Kucukler, S., 2018. Naringin protects against cyclophosphamide-induced hepatotoxicity and nephrotoxicity through modulation of oxidative stress, inflammation, apoptosis, autophagy, and DNA damage. *Environmental Science and Pollution Research*, **25**(21), 20968-20984. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2242-5>
- Can, E., Kurtoğlu, İ.Z., Benzer, F., Erişir, M., Kocabaş, M., Kızak, V., Çelik, H.T., 2012. The effects of different dosage of kefir with different durations on growth performances and antioxidant system in the blood and liver tissues of çoruh trout (salmo coruhensis). *Turkish Journal of Fisheries Aquatic Sciences*, **12**(2), 277-283. [https://doi.org/10.4194/1303-2712-v12\\_2\\_12](https://doi.org/10.4194/1303-2712-v12_2_12)
- Can, S., Çetik Yıldız, S., Keskin, C., Şahintürk, V., Cengiz, M., Appak Başköy, S., Akıncı, G., 2022. Investigation into the protective effects of hypericum triquetrifolium turra seed against cyclophosphamide-induced testicular injury in sprague dawley rats. *Drug and Chemical Toxicology*, **45**(4), 1679-1686. <https://doi.org/10.1080/01480545.2020.1856130>
- Cengiz, M., 2018a. Boric acid protects against cyclophosphamide-induced oxidative stress and renal damage in rats. *Cellular and Molecular Biology*, **64**(12), 11-14. <https://doi.org/10.14715/cmb/2018.64.12.3>
- Cengiz, M., 2018b. Ratlarda siklofosfamid nedenli kardiyotoksisite üzerine borik asitin koruyucu etkileri. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, **7**(1), 113-118. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.415381>
- Cengiz, M., Ayhancı, A. and Kutlu, H.M., 2020. Investigation into the protective effects of escin on blood cells and cyclophosphamide-induced bone marrow toxicity in rats. [Siklofosfamid Nedenli Kan Hücreleri ve Kemik İliği Toksikitesi Üzerine Escinin Koruyucu Etkilerinin Sıçanlarda Araştırılması]. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, **7**(2), 730-738. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.677193>
- Cengiz, M., Ayhancı, A., Lafçı, N., Musmul, A., Gür, F., Veyselova Sezer, C., Onur, S., 2022. The protective effects of selenium and boron against cyclophosphamide-induced bone marrow and blood toxicity: An in vivo study. *Biological Diversity and Conservation*, **15**(2), 256-264. <https://doi.org/10.46309/biodicon.2022.1124346>
- Cengiz, M., Tekin, Y., İnal, B., Ayhancı, A., 2017. Kekik bitkisinin temel bileşeni olan karvakrolün sıçanlarda siklofosfamid nedenli üreme sistemi hasarı üzerine koruyucu etkileri. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*, **4**(2), 171-175. <https://doi.org/10.19159/tutad.295505>
- Cengiz, M., Yeşildağ, Ö. and Ayhancı, A., 2018. Siklofosfamid nedenli hematoksisite üzerine

- karvakrolün sitoprotektif etkileri. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*, **5**(2), 125-130.  
<https://doi.org/10.19159/tutad.378717>
- Cetik Yildiz, S., Demir, C., Cengiz, M., & Ayhanci, A. (2019). Protective properties of kefir on burn wounds of mice that were infected with *S. Aureus*, *P. Auroginasa* and *E. Coli*. *Cellular and Molecular Biology*, **65**(7), 60-65.  
<https://doi.org/10.14715/cmb/2019.65.7.11>
- Cetik Yildiz, S., Demir, C., Cengiz, M., Irmak, H., Cengiz, B. P., Ayhanci, A., 2024. In vitro antitumor and antioxidant capacity as well as ameliorative effects of fermented kefir on cyclophosphamide-induced toxicity on cardiac and hepatic tissues in rats. *Biomedicines*, **12**(6), 1199.  
<https://doi.org/10.3390/biomedicines12061199>
- Cetik Yildiz, S., Demir, C., Cengiz, M., Irmak, H., Peker Cengiz, B., Ayhanci, A., 2024. The protection afforded by kefir against cyclophosphamide induced testicular toxicity in rats by oxidant antioxidant and histopathological evaluations. *Scientific Reports*, **14**(1), 18463.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-024-67982-y>
- Çetik Yıldız, S., Demir, C., Cengiz, M., Peker Cengiz, B., Ayhanci, A., 2024. Evaluation of in vitro antioxidative and protective effects of kefir on cyclophosphamide-upon oxidative stress and lung damage in rats. *Bingöl Üniversitesi Sağlık Dergisi*, **5**(1), 11-18.  
<https://doi.org/10.58605/bingolsaglik.1436057>
- Davis, L. and Kuttan, G., 2000. Effect of withania somnifera on cyclophosphamide-induced urotoxicity. *Cancer letters*, **148**(1), 9-17.  
[https://doi.org/10.1016/S0304-3835\(99\)00252-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3835(99)00252-9)
- El-Shabrawy, M., Mishriki, A., Attia, H., Emad Aboulhoda, B., Emam, M., Wanas, H., 2020. Protective effect of tolvaptan against cyclophosphamide-induced nephrotoxicity in rat models. *Pharmacology Research & Perspectives*, **8**(5), e00659.  
<https://doi.org/10.1002/prp2.659>
- El Golli-Bennour, E., Timoumi, R., Annaibi, E., Mokni, M., Omezzine, A., Bacha, H., Abid-Essefi, S., 2019. Protective effects of kefir against deltamethrin-induced hepatotoxicity in rats. *Environmental Science and Pollution Research*, **26**(18), 18856-18865.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-019-05253-4>
- Fatima, M., Anjum, I., Abdullah, A., Abid, S. Z., & Malik, M. N. H. (2022). Boswellic acids, pentacyclic triterpenes, attenuate oxidative stress, and bladder tissue damage in cyclophosphamide-induced cystitis. *ACS Omega*, **7**(16), 13697-13703.  
<https://doi.org/10.1021/acsomega.1c07292>
- Germoush, M. O., & Mahmoud, A. M. (2014). Berberine mitigates cyclophosphamide-induced hepatotoxicity by modulating antioxidant status and inflammatory cytokines. *Journal of Cancer Research and Clinical Oncology*, **140**(7), 1103-1109.  
<https://doi.org/10.1007/s00432-014-1665-8>
- Gözüoğlu, G. (2021). Sıçanlarda siklofosfamid ile oluşturulmuş hematoksisite ve myelotoksisite üzerine kefirin olası hücre koruyucu etkileri. Mardin Artuklu Üniversitesi,
- Gray, K.J., Engelmann, U.H., Johnson, E.H., Fishman, I.J., 1986. Evaluation of misoprostol cytoprotection of the bladder with cyclophosphamide (cytoxan) therapy. *The Journal of Urology*, **136**(2), 497-500.  
[https://doi.org/10.1016/S0022-5347\(17\)44929-9](https://doi.org/10.1016/S0022-5347(17)44929-9)
- Güven, A., Güven, A. and Gülmez, M., 2003. The effect of kefir on the activities of gsh-px, gst, cat, gsh and lpo levels in carbon tetrachloride-induced mice tissues. *Journal of Veterinary Medicine, Series B*, **50**(8), 412-416.  
<https://doi.org/10.1046/j.1439-0450.2003.00693.x>
- Hadisaputro, S., 2011. Effects of oral clear kefir probiotics on glycemic status, lipid peroxidation, antioxidative properties of streptozotocin induced hyperglycemia wistar rats. *Gizi Indonesia*, **34**(1).
- Hadisaputro, S., Djokomoeljanto, R. and Soesatyo, M., 2012. The effects of oral plain kefir supplementation on proinflammatory cytokine properties of the hyperglycemia wistar rats induced by streptozotocin. *Acta Medica Indonesiana*, **44**(2), 100-104.
- Haghi-Aminjan, H., Asghari, M.H., Farhood, B., Rahimifard, M., Hashemi Goradel, N., Abdollahi, M., 2018. The role of melatonin on chemotherapy-induced reproductive toxicity. *Journal of Pharmacy Pharmacology*, **70**(3), 291-306.  
<https://doi.org/10.1111/jphp.12855>
- Ijaz, M.U., Mustafa, S., Batool, R., Naz, H., Ahmed, H., and Anwar, H., 2022. Ameliorative effect of herbacetin against cyclophosphamide-induced nephrotoxicity in rats via attenuation of oxidative stress, inflammation, apoptosis and mitochondrial dysfunction. *Human & Experimental Toxicology*, **41**, 09603271221132140.  
<https://doi.org/10.1177/09603271221132140>
- Jiang, S., Zhang, Z., Huang, F., Yang, Z., Yu, F., Tang, Y., Ding, G., 2020. Protective effect of low molecular weight peptides from solenocera crassicornis head against cyclophosphamide-induced nephrotoxicity in mice via the keap1/nrf2 pathway. *Antioxidants*, **9**(8), 745.  
<https://doi.org/10.3390/antiox9080745>
- Jiang, X., Ren, Z., Zhao, B., Zhou, S., Ying, X., Tang, Y., (-2020). Ameliorating effect of pentadecapeptide derived from cyclina sinensis on cyclophosphamide-induced nephrotoxicity. *Marine Drugs*, **18**(9), 462.  
<https://doi.org/10.3390/md18090462>

- Kahraman, M., Ertekin, Y.H. and Satman, İ., 2021. The effects of kefir on kidney tissues and functions in diabetic rats. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, **13**(2), 375-382.  
<https://doi.org/10.1007/s12602-020-09698-9>
- Knights, K.M., Rowland, A. and Miners, J.O., 2013. Renal drug metabolism in humans: The potential for drug–endobiotic interactions involving cytochrome p450 (cyp) and udp-glucuronosyltransferase (ugt). *British Journal of Clinical Pharmacology*, **76**(4), 587-602.  
<https://doi.org/10.1111/bcp.12086>
- Kojima, N., Slaughter, T.N., Paige, A., Kato, S., Roman, R. J., Williams, J.M., 2013. Comparison of the development diabetic induced renal disease in strains of goto-kakizaki rats. *Journal of diabetes & metabolism*, Suppl **9**(5): S9-005.  
<https://doi.org/10.4172/2155-6156.S9-005>
- Lin, X., Yang, F., Huang, J., Jiang, S., Tang, Y., Li, J., 2020. Ameliorate effect of pyrroloquinoline quinone against cyclophosphamide-induced nephrotoxicity by activating the Nrf2 pathway and inhibiting the nlrp3 pathway. *Life Sciences*, **256**, 117901.  
<https://doi.org/10.1016/j.lfs.2020.117901>
- Mahmoud, A.M., Germoush, M.O., Alotaibi, M.F., Hussein, O.E., 2017. Possible involvement of nrf2 and ppar $\gamma$  up-regulation in the protective effect of umbelliferone against cyclophosphamide-induced hepatotoxicity. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, **86**, 297-306.  
<https://doi.org/10.1016/j.biopha.2016.12.047>
- Manesh, C. and Kuttan, G., 2005. Effect of naturally occurring isothiocyanates in the inhibition of cyclophosphamide-induced urotoxicity. *Phytomedicine*, **12**(6), 487-493.  
<https://doi.org/10.1016/j.phymed.2003.04.005>
- Marshall, V.M. and Cole, W.M., 1985. Methods for making kefir and fermented milks based on kefir. *Journal of Dairy Research*, **52**(3), 451-456.  
<https://doi.org/10.1017/S0022029900024353>
- McDermott, E.M. and Powell, R.J., 1996. Incidence of ovarian failure in systemic lupus erythematosus after treatment with pulse cyclophosphamide. *Annals of the Rheumatic Diseases*, **55**(4), 224.  
<https://doi.org/10.1136/ard.55.4.224>
- Mills, K.A., Chess-Williams, R. and McDermott, C., 2019. Novel insights into the mechanism of cyclophosphamide-induced bladder toxicity: Chloroacetaldehyde's contribution to urothelial dysfunction in vitro. *Archives of Toxicology*, **93**(11), 3291-3303.  
<https://doi.org/10.1007/s00204-019-02589-1>
- Mythili, Y., Sudharsan, P.T., Selvakumar, E., Varalakshmi, P., 2004. Protective effect of dl- $\alpha$ -lipoic acid on cyclophosphamide induced oxidative cardiac injury. *Chemico-Biological Interactions*, **151**(1), 13-19.  
<https://doi.org/10.1016/j.cbi.2004.10.004>
- Peng, X., Zhang, X., Wang, C., Olatunji, O.J., 2022. Protective effects of asperuloside against cyclophosphamide-induced urotoxicity and hematotoxicity in rats. *Open Chemistry*, **20**(1), 1444-1450.  
<https://doi.org/10.1515/chem-2022-0234>
- Puglierio, S., Lima, D.Y., Rodrigues, A.M., Bogsan, C.S.B., Rogero, M.M., Punaro, G.R., Higa, E.M.S., 2021. Kefir reduces nitrosative stress and upregulates nrf2 in the kidney of diabetic rats. *International Dairy Journal*, **114**, 104909.  
<https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2020.104909>
- Punaro, G.R., Maciel, F.R., Rodrigues, A.M., Rogero, M.M., Bogsan, C.S.B., Oliveira, M.N., Higa, E.M.S., 2014. Kefir administration reduced progression of renal injury in stz-diabetic rats by lowering oxidative stress. *Nitric Oxide*, **37**, 53-60.  
<https://doi.org/10.1016/j.niox.2013.12.012>
- Qiu, H., Li, J., Huang, Y., Shen, C., Dai, L., Su, Q., Li, W., 2023. Sulfhydryl functionalized hyaluronic acid hydrogels attenuate cyclophosphamide-induced bladder injury. *Biomedical Materials*, **18**(1), 015026.  
<https://doi.org/10.1088/1748-605X/acadc2>
- Rehman, M.U., Tahir, M., Ali, F., Qamar, W., Lateef, A., Khan, R., Sultana, S., 2012. Cyclophosphamide-induced nephrotoxicity, genotoxicity, and damage in kidney genomic DNA of swiss albino mice: The protective effect of ellagic acid. *Molecular and Cellular Biochemistry*, **365**(1), 119-127.  
<https://doi.org/10.1007/s11010-012-1250-x>
- Sedlak, J. and Lindsay, R.H., 1968. Estimation of total, protein-bound, and nonprotein sulfhydryl groups in tissue with ellman's reagent. *Analytical biochemistry*, **25**, 192-205.
- Sinanoglu, O., Yener, A.N., Ekici, S., Midi, A., Aksungar, F. B., 2012. The protective effects of spirulina in cyclophosphamide induced nephrotoxicity and urotoxicity in rats. *Urology*, **80**(6), 1392.e1391-1392.e1396.  
<https://doi.org/10.1016/j.urology.2012.06.053>
- Sugumar, E., Kanakasabapathy, I. and Abraham, P., 2007. Normal plasma creatinine level despite histological evidence of damage and increased oxidative stress in the kidneys of cyclophosphamide treated rats. *Clinica chimica acta; international journal of clinical chemistry*, **376**(1-2), 244-245.  
<https://doi.org/10.1016/j.cca.2006.04.006>
- Sun, Y., Oberley, L.W. and Li, Y., 1988. A simple method for clinical assay of superoxide dismutase. *Clinical chemistry*, **34**(3), 497-500.
- Temel, Y., Kucukler, S., Yıldırım, S., Caglayan, C., Kandemir, F.M., 2020. Protective effect of chrysin on cyclophosphamide-induced hepatotoxicity and



nephrotoxicity via the inhibition of oxidative stress, inflammation, and apoptosis. *Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology*, **393**(3), 325-337.

<https://doi.org/10.1007/s00210-019-01741-z>

Toba, T., 1987. Comparative study of polysaccharides from kefir grains, an encapsulated homofermentative lactobacillus species and lactobacillus kefir. *Milchwissenschaften*, **42**, 565-568.

Urdaneta, E., Barrenetxe, J., Aranguren, P., Irigoyen, A., Marzo, F., Ibáñez, F.C., 2007. Intestinal beneficial effects of kefir-supplemented diet in rats. *Nutrition Research*, **27**(10), 653-658.

<https://doi.org/10.1016/j.nutres.2007.08.002>

Usoh, I., Akpan, E., Etim, E., Farombi, E., 2005. Antioxidant actions of dried flower extracts of hibiscus sabdariffa L. On sodium arsenite-induced oxidative stress in rats. *Pakistan Journal of Nutrition*, **4**(3), 135-141.

Valibeik, A., Naderi, N., Amini, A., Dastjerd, N.T., Monfared, S.R., Jafaripour, L., Ahmadvand, H., 2020. Effect of camphor on biochemical factors and gene expression of antioxidant enzymes, inflammatory and apoptotic factors against gentamicin-induced nephrotoxicity in rats. *Journal of Renal Injury Prevention*, **10**(3), e21-e21.

<https://doi.org/10.34172/jrip.2021.21>

Wróbel, A., Serefko, A., Bańczerowska-Górska, M., Szopa, A., Dudka, J., Poleszak, E., 2019. Intravesical administration of blebbistatin prevents cyclophosphamide-induced toxicity of the urinary bladder in female wistar rats. *Neurourology and urodynamics*, **38**(4), 1044-1052.

<https://doi.org/10.1002/nau.23973>

Yener, A., Sehitoglu, M., Ozkan, M., Bekler, A., Ekin, A., Cokkalender, O., Ozcan, S., 2015. Effects of kefir on ischemia-reperfusion injury. *European Review for Medical Pharmacological Sciences*, **19**(5), 887-896.

Yıldız, S.C. 2020. Properties and health benefits of probiotic and prebiotic kefir. *Academic Studies in Science Mathematics-II*, **59**.

Yildiz, S.Ç. and Gözüoğlu, G., 2021. Myeloprotective and hematoprotective role of kefir on cyclophosphamide toxicity in rats. *Archives of Clinical Experimental Medicine*, **6**(2), 77-82.

<https://doi.org/10.25000/acem.903843>

Zanger, U. and Klein, K., 2013. Pharmacogenetics of cytochrome p450 2b6 (cyp2b6): Advances on polymorphisms, mechanisms, and clinical relevance. *Frontiers in genetics*, **4** (24).

<https://doi.org/10.3389/fgene.2013.00024>

## Determination of Some Phytochemical Properties and Antioxidant Capacity of “Gelincik” Apple (*Malus Spp.*) and “Hüsnüyusuf” Pear (*Pyrus Spp.*) Fruit Species of Kütahya

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 23.05.2024

Kabul/Accepted: 20.08.2024

Yayımlandı/Published:02.12.2024

### Kütahya İli “Gelincik” Elma (*Malus Spp.*) ve “Hüsnüyusuf” Armut (*Pyrus Spp.*) Meyve Türlerinin Bazı Fitokimyasal Özelliklerinin ve Antioksidan Kapasitelerinin Belirlenmesi

Saadet ÇELİKÖZLÜ<sup>1</sup> , Merve DAĞCI TEKİN<sup>2\*</sup> 

<sup>1</sup> Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Altıntaş Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, Kütahya, Türkiye

<sup>2</sup> Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Kimya ve Kimyasal İşleme Teknolojileri Bölümü, Kütahya, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

Bu çalışmanın amacı Kütahya’ya has meyvelerden olan Gelincik elması ve Hüsnüyusuf armudunun bazı fitokimyasal özelliklerini ve antioksidan aktivitesini belirlemektir. Çalışmada fitokimyasal özellikler olarak meyvelerin kuru madde miktarı, suda çözünür kuru madde miktarı (SÇKM), pH, titre edilebilir asitlik (TEA), C vitamini, toplam ve indirgen şeker miktarları tespit edilmiştir. Ayrıca DPPH deneyi ile antioksidan aktivite düzeyleri belirlenmiştir. Çalışma bulgularına göre, Gelincik elması ve Hüsnüyusuf armudu örneklerinin SÇKM miktarları sırasıyla %12,8-13,3 ve %11,8-12,9, arasında değişmiştir. Gelincik elması pH ve TEA değerleri sırasıyla 4,73±0,21 ile 4,65±0,44 ve %0,13±0,05 ile 0,17±0,09 aralığında, Hüsnüyusuf armudunun pH ve TEA değerleri sırasıyla 3,56-3,90 ve %0,32-0,59 aralığında bulunmuştur. Gelincik elmasının toplam şeker değerleri 9,14-11,10 g/100mL aralığında değişmekte iken, invert şeker miktarının 7,45-9,09 g/100mL arasında değiştiği tespit edilmiştir. Hüsnüyusuf armudunun toplam şeker içeriği 7,72-9,10 g/100mL arasında, invert şeker miktarı 5,98-7,05 g/100mL arasında değişmiştir. Gelincik elması ve Hüsnüyusuf armudunun DPPH radikal süpürme deneyi sonucu antioksidan aktiviteleri sırasıyla %63,91-72,18 ve %56,42-39,83 değerleri arasında bulunmuştur. Gelincik elması ve Hüsnüyusuf armudunun C vitamini miktarları ise sırasıyla 7,52-8,44 mg/100mL ve 6,60-5,84 mg/100mL arasındadır. Bu çalışma, Kütahya’nın botanik zenginliklerinden ikisi olan Gelincik elması ve Hüsnüyusuf armudunun tanıtılması, değerlendirilmesi ve mevcut genetik kaynakların korunması için farkındalık oluşturmak amacıyla yapılan ilk çalışmadır. Bu konudaki daha sonra yapılacak çalışmalara kaynak oluşturacağı düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Antioksidan etki; Fitokimyasal özellikler; Gelincik elması; Hüsnüyusuf armudu; Kütahya; Malus; Pyrus.

#### Abstract

This study aims to determine some phytochemical properties and antioxidant activities of Gelincik apple and Hüsnüyusuf pear, which are native to Kütahya. Dry matter and water-soluble dry matter amount (WDSM), pH, titratable acidity (TA), vitamin C, total and reducing sugars were determined as phytochemical properties. In addition, antioxidant activity level was determined by DPPH assay. According to this study, the WSDM content of Gelincik apple and Hüsnüyusuf pear samples ranged between 12.8-13.3%, and 11.8-12.9%, respectively. Gelincik apple pH and TA values were between 4.73-4.65 and 0.13-0.17%, respectively; Hüsnüyusuf pear pH and TA values were 3.56-3.90 and 0.32-0.59%, respectively. Total sugar values of Gelincik apple ranged between 9.10-11.10 g/100 mL, the reducing sugar content ranged between 7.45-9.09 g/100mL. The total sugar content of Hüsnüyusuf pear varied between 7.72-9.10 g/100mL, and reducing sugar content varied between 5.98-7.05 g/100 mL. As a result of the DPPH assay, the antioxidant activities of Gelincik apple and Hüsnüyusuf pear were found between 63.91-72.18 %, and 56.42-39.83 %, respectively. The vitamin C contents of Gelincik apple and Hüsnüyusuf pear were between 7.52-8.44 mg/100mL, and 6.60-5.84 mg/100mL, respectively. This study is the first study to raise awareness for the promotion and evaluation, and conservation of existing genetic resources of the Gelincik apple and the Hüsnüyusuf pear, two of the botanical riches of Kütahya. It is thought to be a source for future studies on this subject.

**Keywords:** Antioxidant activity; Gelincik apple; Hüsnüyusuf pear; Kütahya; Malus; Phytochemical properties; Pyrus.

#### 1. Giriş

As the purchasing habits of environmentally aware consumers gradually change, the demand for healthy foods is also increasing. Traditionally grown indigenous fruit varieties are increasingly demanded by consumers due to their excellent taste, high nutritional value, and

their traditionally known health benefits (Bvenura and Sivakumar 2017). This study determined some phytochemical properties of the Gelincik apple and the Hüsnüyusuf pear. These fruits are indigenous to Kütahya province. Kütahya province is located in the Aegean Region of Türkiye It is 966 m above sea level and is located between 28 37' 38"-30 18' 11" east longitude and 39 00'

30"-39 56' 24" north latitude (Sahin et al. 2017). In Kütahya, the most precipitation is observed in the spring season, the winter season is cold and the first frosts of the year begin in September. For this reason, fruit orchards are concentrated in the valley floors and plains, which are milder and have less elevation (Akbaş and Sevindi 2019). The main fruits grown in Kütahya and its districts are grapes, apples, cherries, sour cherries, strawberries, chestnuts, walnuts, and pears. In addition to these, quince, apricot, nectarine, loquat, cranberry, spindle, raspberry, strawberry, blackberry, mulberry, almond, hazelnut, pistachio, medlar, and pomegranate is grown. However, the production of these fruits only meets people's own needs and does not go beyond the local market.

When we look at apple and pear cultivation, which is the subject of our study, according to FAO (Food and Agriculture Organization) 2020 data, apple cultivation ranks first in the world in terms of production area (4,717 thousand ha) and production amount (79.4 million tons). Türkiye is among the important countries in apple production in the world and ranks fourth in the world with a production of 3.6 million tons (Bayav and Karlı 2021). Apple cultivation in the world is followed by pears with a production area of 1,385 thousand ha and a production amount of 24,010 million tons. Türkiye ranks fourth with 531 thousand tons of pear production on 26.3 thousand hectares (Patel et al. 2012).

Apple, a type of fruit whose culture dates back to ancient times, is a plant belonging to the *Malus* genus from the Rosaceae family. Apple is the most produced and consumed type of temperate climate fruit due to its high ability to adapt to climate and soil conditions and many species. It contains many bioactive substances that are beneficial to human health, therefore it is very useful in human nutrition. Apples contain high concentrations of flavonols and antioxidant substances. The amount of these phytochemicals may vary depending on the apple variety, harvesting and storage method, climate, soil, and water characteristics (Patocka et al. 2020). Apples also contain vitamins C and E,  $\beta$ -carotene, and essential minerals such as zinc, sulfur, manganese, iron, calcium, magnesium, potassium, and copper (Yang et al. 2021). The main soluble sugars in apples are fructose, sucrose, and sorbitol, while the majority of organic acids are malic acid and citric acid (Ma et al. 2014; Kalkisim et al. 2018). Since ancient times, apples have been used for various disorders such as asthma, arthritis, diarrheal, stomach aches, obesity, headaches, skin diseases, and respiratory conditions (Patocka et al. 2020).

Apple ranks second among the most cultivated fruits in Kütahya. Golden, Starking, Amasya, and Granny Smith apple varieties are widely grown in Kütahya. Gelincik apple is one of the apple varieties unique to this region

(Figure 1). Gelincik apple, which has a unique taste and odor, is known as medicinal in the region. It is an endemic species. Its production is far from commercial concerns and is only intended to meet the needs of families.



Figure 1. Gelincik apple.

The culture of the pear dates back to ancient times, grows in the temperate zone and belongs to the genus *Pyrus* of Rosaceae family. Since Turkey has very different ecological conditions, more than 600 local pear varieties are grown (Erbil et al. 2018). The total and reducing sugar and organic acid content in pears plays a role in determining the taste, nutritional value, and quality of pears (Chen et al. 2007; Nour et al. 2010). Pear contains sucrose, reducing sugars, and sorbitol as sugar. As organic acids, it contains fumaric, malic, shikimic, and citric acid (Kırca et al. 2022; Öztürk et al. 2010). Pear fruit has high vitamins C, E, and B. It is a very good source of fiber, copper, and potassium (Cyril et al. 2023). Pears and their products have been traditionally used since ancient ages for their pain relieving, antidepressant, antibiotic, antimicrobial, resistance enhancing, and wound healing properties (Öztürk et al. 2015a).

A wide variety of pear varieties are grown in Kütahya. These are Hüsnyusuf, İstanbul Akça, prickly Akça, and İstanbul pear. The most well-known of these pear varieties is Hüsnyusuf. Hüsnyusuf pear is a juicy, thin-skinned, yellow, and fleshy variety with a unique taste and smell (Figure 2). The fruit is small, short-necked and expands towards the lower part. It is harvested at the beginning of July. The production of Hüsnyusuf pear, an endemic species, is decreasing day by day in Kütahya. It is only grown on old trees in the small gardens of those living in the city and no new trees are planted. While the pears produced are mostly consumed in local markets, there is no commercial production (Akbaş and Sevindi 2019).



**Figure 2.** Hüsniyusuf pear (Internet resources-3).

The number of Gelincik apple and Hüsniyusuf pear trees grown in Kütahya and their share in total fruit production is quite small. Today, many genetic resources, especially endemic ones, are about to be lost. The conservation and development of the genotypes of these endemic species and the improvement of their phytochemical content are important for botanical science. For this reason, several research has been studied define the phytochemical content of existing genetic resources (Gundoğdu et al. 2018; Acero et al. 2019; Mertoğlu and Evrenosoğlu 2019). Local genotypes are also preferred by consumers as they are used for processing of healthy and commercially valuable fruit products (juice, nectar, dried fruit, pure, jam, and pulp). This diversifies agricultural production. Therefore, more information on these local species could improve the conservation of their genetic traits and their processing in the food industry and craftsmanship, thus making them more competitive.

For these reasons, the aim of this study is; (a) to determine some phytochemical values (water-soluble dry matter, pH, titratable acidity, sugar, vitamin C) of traditionally grown Gelincik apple and Hüsniyusuf pear and (b) to determine their antioxidant properties and to reveal their health benefits. In addition, this study is thought to contribute to the literature as it is the first study to examine these two local fruit varieties.

## 2. Materials and Methods

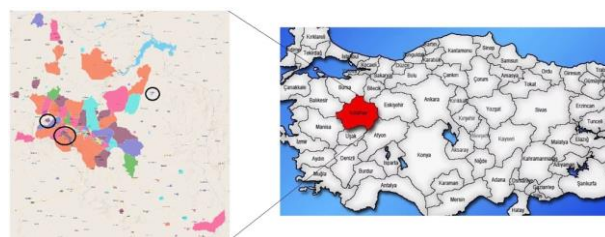
### 2.1. Fruit material

This study was conducted on samples of Gelincik apple and Hüsniyusuf pear grown in the centre of Kütahya province in 2022. The fruits were obtained from local producers from 4 different regions of Kütahya in August and September when they were fully ripe. These regions are Aydoğdu, Demirciören, Doğuluşah and Kumarı (Figure 3).

### 2.2. Preparation of fruits for phytochemical analysis

The fruits from each tree were harvested separately and juiced with a juicer for phytochemical analysis. This juice was filtered with coarse filter paper. Analyses were performed using this filtrate and in 3 replicates (Mertoğlu

and Evrenosoğlu 2019). In statistical analyses, results were expressed as mean±standard deviation.



**Figure 3.** Fruit sampling regions on the map of Kütahya (circled) (Internet resources-1; Internet resources-2).

#### 2.2.1. Titratable acidity (TA) determination

For titratable acidity determination, the juices were titrated with 0.1N NaOH solution in the presence of phenolphthalein indicator. The results were calculated by the following formula and expressed as % malic acid (Mertoğlu and Evrenosoğlu 2019).

$$\text{Acidity \%} = \frac{N_{(\text{NaOH})} \times V_{(\text{titrant})} \times 0,067}{\text{sample quantity}} \times 100$$

#### 2.2.2. Vitamin C determination

The titrimetric method was used to determine the amount of vitamin C. For this purpose, 25 mL of pure water, 5 mL of 10 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and 0.2 % starch indicator were added to 10 mL of filtered juice and titrated with 0.005 N iodine solution until a blue-black colour was formed. The calculation was made using the following formula (Sri et al. 2022).

$$\text{Vitamin C content (mg/100 mL)} = \frac{N_{(\text{iodine solution})} \times V_{(\text{titrant})}}{\text{sample amount}} \times 88,07$$

#### 2.2.3. Determination of water-soluble dry matter (WSDM) amount (brix degree)

After the temperature of the strained juice was brought to 20°C, the amount of dry matter dissolved in water was determined as % by hand refractometer (Dzoljic 2021).

#### 2.2.4. pH determination

The filtered juice was measured with a pH meter (Mettler Toledo).

#### 2.2.5. Determination of total sugar, reducing sugar and sucrose

Sugar determination was performed using the Lane-Eynon method as described by Sewwandi et al. (Sewwandi et al. 2020). For this, the filtered juice was first clarified with Carrez solution. Then the clear filtrate was subjected to acid hydrolysis and acid neutralization, then titrated with Fehling solution for sugar determination. The results were calculated in g/100 mL.

### 2.2.6. Determination of total dry matter

Approximately 2 g pieces cut from the fruits were dried in an oven at 70°C. After cooling in a desiccator, they were weighed again. The % dry matter content was determined according to the weight change.

### 2.2.7. Determination of antioxidant activity

DPPH (2,2 Diphenyl 1 picrylhydrazyl) (abcr GmbH, Germany) radical scavenging assay was performed to determine the amount of antioxidant substances (Topuz and Bakkalbaşı 2022). First of all, the fruits were grated with a glass grater to ensure the extraction of antioxidant substances. 10 mL of methanol was added to 5 g of fresh fruit sample and mixed with a magnetic stirrer at room temperature and in the dark for 2 hours. It was then centrifuged at 8000 rpm at 10°C for 10 min and the supernatant was collected.

For DPPH analysis, 3.6 mL DPPH solution (0.025 g/L methanol) and 0.4 mL fruit extract were added to the test tube and incubated for 60 min at room temperature and

in the dark. Absorbance values were then read at 515 nm wavelength on a spectrophotometer (Agilent Technologies Cary 60 UV-Vis). The witness sample was prepared by adding 0.4 mL methanol to 3.6 mL DPPH solution. DPPH radical scavenging ability was calculated by the following formula and the results were expressed as percentage (%).

$$\% \text{ DPPH radical scavenging activity} = \frac{\text{ABS}_{(\text{witness})} - \text{ABS}_{(\text{sample})}}{\text{ABS}_{(\text{witness})}} \times 100$$

### 2.3. Statistical analysis

The mean  $\pm$  standard deviation values of the results were determined using the IBM SPSS Statistics 20 (IBM, New York, USA) package program.

### 3. Results and discussion

The results of the phytochemical and antioxidant properties of Gelincik apple and Hüsnyüsusuf pear are given in Tables 1 and 2.

**Table 1.** Results of phytochemical and antioxidant properties of Gelincik apple.

Location	Aydoğdu	Demirciören	Doğuluşah	Kumarı
WSDM*(%)	13.3 $\pm$ 0.71	12.8 $\pm$ 0.24	13.1 $\pm$ 0.48	13.0 $\pm$ 0.09
% Dry matter	18.81 $\pm$ 0.29	18.63 $\pm$ 0.39	19.84 $\pm$ 0.66	18.47 $\pm$ 0.81
pH	4.73 $\pm$ 0.21	4.68 $\pm$ 0.39	4.7 $\pm$ 0.62	4.65 $\pm$ 0.44
TA**(%)	0.13 $\pm$ 0.05	0.17 $\pm$ 0.09	0.13 $\pm$ 0.16	0.15 $\pm$ 0.13
Vitamin C (mg/100 mL)	7.71 $\pm$ 0.68	8.16 $\pm$ 0.28	7.52 $\pm$ 0.41	8.44 $\pm$ 0.32
Total sugar (g/100 mL)	10.60 $\pm$ 0.41	9.78 $\pm$ 0.17	11.10 $\pm$ 0.38	9.14 $\pm$ 0.29
Reducing sugar (g/100 mL)	8.39 $\pm$ 0.47	7.89 $\pm$ 0.38	9.09 $\pm$ 0.81	7.45 $\pm$ 0.26
Sucrose (g/100 mL)	2.21 $\pm$ 0.33	1.89 $\pm$ 0.49	2.01 $\pm$ 0.43	1.69 $\pm$ 0.36
Antioxidant activity (%)	70.80 $\pm$ 1.72	63.91 $\pm$ 0.74	67.90 $\pm$ 0.48	72.18 $\pm$ 2.12

\*WSDM: Water-Soluble Dry Matter. \*\*TA: Titratable Acidity

**Table 2.** Results of phytochemical and antioxidant properties of Hüsnyüsusuf pear.

Location	Aydoğdu	Demirciören	Doğuluşah	Kumarı
WSDM*(%)	12.9 $\pm$ 0.33	12.2 $\pm$ 0.19	11.8 $\pm$ 0.26	12.5 $\pm$ 0.41
% Dry matter	18.58 $\pm$ 0.19	18.22 $\pm$ 0.72	17.95 $\pm$ 0.64	18.14 $\pm$ 0.56
pH	3.56 $\pm$ 0.56	3.72 $\pm$ 0.07	3.83 $\pm$ 0.52	3.9 $\pm$ 0.17
TA**(%)	0.47 $\pm$ 0.02	0.32 $\pm$ 0.12	0.37 $\pm$ 0.07	0.59 $\pm$ 0.09
Vitamin C (mg/100 mL)	6.03 $\pm$ 0.73	6.60 $\pm$ 0.42	6.32 $\pm$ 0.14	5.84 $\pm$ 0.08
Total sugar (g/100 mL)	8.13 $\pm$ 0.23	7.72 $\pm$ 0.64	9.10 $\pm$ 0.68	8.68 $\pm$ 0.53
Reducing sugar (g/100 mL)	6.72 $\pm$ 0.28	5.98 $\pm$ 0.54	7.05 $\pm$ 0.66	7.03 $\pm$ 0.53
Sucrose (g/100 mL)	1.41 $\pm$ 0.21	1.74 $\pm$ 0.92	2.05 $\pm$ 0.47	1.65 $\pm$ 0.64
Antioxidant activity (%)	56.42 $\pm$ 1.26	47.64 $\pm$ 0.92	52.50 $\pm$ 2.07	39.83 $\pm$ 1.32

\*WSDM: Water-Soluble Dry Matter. \*\*TA: Titratable Acidity.

### 3.1. Water-soluble dry matter (WSDM)

The chemical properties of fruits are a factor that determines the nutritional and taste characteristics of the fruit in this respect, it directs consumer preferences. According to the data of this study, the average WSDM amount of Gelincik apple samples obtained from different regions of Kütahya was between 12.8 $\pm$ 0.24% and 13.3 $\pm$ 0.71%, the average % dry matter amount was between 19.84 $\pm$ 0.66% and 18.47 $\pm$ 0.81%. It was

determined that the average WSDM amount of Hüsnyüsusuf pear was between 11.8 $\pm$ 0.26% and 12.9 $\pm$ 0.33%, the average % dry matter amount was between 17.95 $\pm$ 0.64% and 18.58 $\pm$ 0.19%. Karşı and Aslantaş (Karşı and Aslantaş 2016) found the WSDM amount of 13 standard apple varieties grown in Erzurum (Türkiye) to be 7.73-14.60%. Baydır et al. (Baydır et al. 2019) found the WSDM of 5 commercial apples grown in Afyonkarahisar (Türkiye) between 12.36% and 14.04%.

Karlıdağ and Eşitken (Karlıdağ and Eşitken 2006) determined the WSDM amount of 11 apple cultivars grown in İspir (Erzurum, Türkiye) to be 9.10-13.80%. Güteryüz et al. (Güteryüz et al. 2001) found that the WSDM values of apples in Erzincan (Türkiye) were between 11.22% and 14.28%. Bostan and Acar (Bostan and Acar 2009) reported that the WSDM of 12 local apple cultivars grown in Ünye (Ordu, Türkiye) was between 9.5% and 13.5%.

Similarly, Soylu et al. (Soylu et al. 2003) reported that 7 apple cultivars grown in Görükle (Bursa, Türkiye) had the highest amount of 15.8% WSDM, Tekintaş et al. (Tekintaş et al. 2006) determined the average WSDM values of 4 apple cultivars grown in Aydın (Türkiye) varied between 13.01% and 14.90%, Balta et al. (Balta et al. 2015) reported that the WSDM values of local apples grown in Ordu (Türkiye) were between 9.40% and 13.60%. It was determined by Özrenk et al. (Özrenk et al. 2011) that 15 local apple cultivars grown in Çatak (Van, Türkiye) and Tatvan (Bitlis, Türkiye) had a WSDM content between 15.4% and 10.0%. In addition, Şenyurt et al. (Şenyurt et al. 2015) reported that the WSDM of some standard and local apple species grown in Gümüşhane (Türkiye) ranged between 11.50% and 15.25%, Öztürk et al. (Öztürk et al. 2015b) reported that the WSDM of Breaburn apple grown in Tokat (Türkiye) ranged between 11.6% and 13.3%.

There have been many studies on this subject around the world. Schmutzler and Huck (Schmutzler et al. 2016) reported that the average amount of WSDM of 7 apple varieties grown in West Virginia (USA) was 13.2%, Kim et al. (Kim et al. 2017) reported that the average amount of WSDM of Fuji apples grown in Gyeongsang Province in South Korea was 13.32%, Zhang et al. (Zhang et al. 2019) found that the average amount of WSDM and dry matter of 8 apple varieties grown in New York (USA) were between 12.7% and 16.9% and 138.7 g/kg and 201.5 g/kg, respectively, while McGlone et al. (McGlone et al. 2003) found the average amount of WSDM and % dry matter of Royal Gala apples to be 11.5% and 13.73%, respectively. In a study conducted with apples grown in Aarslev (Denmark), Travers et al. (Travers et al. 2014) found that the average value of the average WSDM was 14.2% and the average value of the average dry matter was 14.9%.

Bayazit et al. (Bayazit et al. 2016) found the average WSDM content of 25 local pear varieties grown in Hatay (Türkiye) between 10.00% and 18.50%, Topuz and Bakkalbaşı (Topuz and Bakkalbaşı 2022) found the average amount of WSDM between 13.30% and 15.40% in 4 pear varieties grown in Van (Türkiye), Kırca et al. (Kırca et al. 2022) found the average amount of WSDM

between 12.22% and 13.40% in 4 pear varieties grown in Tavas (Denizli, Türkiye). It was determined that 20 local pear cultivars grown in the Van Lake basin (Türkiye) had WSDM contents between 8.7% and 15.7% and 15 local pear cultivars grown in Adilcevaz (Bitlis, Türkiye) had WSDM contents between 9.8% and 16.0% (Yarılgaç and Yıldız, 2001; Özrenk et al. 2010). In a study on Alişar pear, a local pear cultivar grown in Şebinkarahisar (Giresun, Türkiye), an average of WSDM was found 16.9% (Balta et al. 2019). The WSDM contents were found between 11.0-17.1% in pears grown in Iskilip (Çorum, Türkiye) by Karadeniz and Çorumlu (Karadeniz and Çorumlu 2012), were found between 10.58-16.33% in Eğirdir (Isparta, Türkiye) by Polat and Bağbozan (Polat and Bağbozan, 2017), were found between 10.00-24.90% in Diyarbakır (Diyarbakır, Türkiye) by Oturmak et al. (Oturmak et al. 2017), were found between 9.7-16.6% in Çaykara (Trabzon, Türkiye) by Çubukçu and Bostan (Çubukçu and Bostan 2018).

Chen et al. (Chen et al. 2007) found that the WSDM of 8 pear cultivars grown in Beijing (China) was between 8.09% and 12.5%, Hussain et al. (Hussain et al. 2013), found that the WSDM of 4 pear cultivars grown in Hunga and Nagar Valley of Pakistan was between 11.03% and 14.42%, Fourie et al. (Fourie et al. 1991) found that the SCC of 6 pear cultivars grown in South Africa was between 13.98% and 17.63%.

### 3.2. pH and titratable acidity (TA)

Ecological conditions, soil structure, and irrigation are thought to have a direct effect on the pH values of local apple and pear varieties. pH value affects the taste and flavor characteristics of fruits. This is important in determining the ripeness of the fruit for eating and preservation.

According to our study, it was determined that the average pH values of Gelincik apple were between  $4.73 \pm 0.21$  and  $4.65 \pm 0.44$ , and the average TA values were between  $0.13 \pm 0.05\%$  and  $0.17 \pm 0.09\%$ . The pH values of Hüsnüyusuf pear were found in the range of  $3.56 \pm 0.56$ - $3.9 \pm 0.17$  and TA values were found in the range of  $0.32 \pm 0.12\%$ - $0.59 \pm 0.09\%$ .

In the study of Karşı and Aslantaş (Karşı and Aslantaş 2016), it was determined that TA was between 1.12 g/L and 4.06 g/L and pH value was between 2.9 and 3.9. It was reported that TA values of apples grown in İspir region were between 0.26% and 0.73%, TA values of Erzincan apples were between 0.235%-0.713%, and pH was between 3.24-3.99 (Güteryüz et al. 2001; Karlıdağ and Eşitken 2006). Similarly, Soylu et al. (Soylu et al. 2003)



reported that the pH of apples grown in Görükle varied between 3.15 and 4.04 and the highest TA value was 0.96%, Tekintaş et al. (Tekintaş et al. 2006) reported that the pH values of apples grown in Aydın varied between 3.35 and 4.03. The pH values of 5 commercial apple varieties in Afyonkarahisar were between 4.22-4.92, the pH values of local apples grown in Ünye were between 3.09 and 4.17, the pH values of local apple varieties grown in Kumru (Ordu) were between 2.83 to 4.11, pH values of local apple species grown around Çatak and Tatvan ranged between 4.6 and 3.4, and pH values of apples grown in Gümüşhane ranged between 3.53 and 4.87 (Bostan and Acar 2009; Özrenk et al. 2011; Balta et al. 2015; Şenyurt et al. 2015; Baydır et al. 2019).

Kim et al. (Kim et al. 2017) found the average pH value of Fuji apples in South Korea to be 4.14, Nour et al. (Nour et al. 2010) found the average TA value of 15 apple varieties grown in Romania to be 0.265%, Harker et al. (Harker et al. 2002) found TA values of apples grown in Havelock North (New Zealand) to be between 0.15-0.95%.

Bayazit et al. (Bayazit et al. 2016) found the pH values of 25 pear varieties between 3.00 and 4.94 and TA values between 0.1% and 0.87%, Kirca et al. (Kirca et al. 2022) found the pH of pears in Tavas between 3.51-7.01 and TA values between 0.17-0.34%. Öztürk et al. (Öztürk et al. 2015a) found that the pH values of 13 local and 4 standard pear species grown in the Western Black Sea region of Türkiye were 4.46 on average in the peel, 4.03 on average in the flesh, and TA values were 0.26g/100g on average in the peel and 0.33g/100g on average in the flesh. Yarılgaç and Yıldız (Yarılgaç and Yıldız 2001) reported that the pH and TA amounts of 11 different pears were between 3.02-5.62 % and 0.25-2.45 %, respectively, and Kalkışım et al. (Kalkışım et al. 2018) reported that the pH and TA values of 20 different pear varieties were between 4.08-5.57% and 0.13-1.33%, respectively. In other studies, pH and TA amounts of Devci pear were determined as 4.29% and 0.60%, respectively, and TA values of 9 pear varieties grown in Van were determined as 11.48%-16.27% (Ozturk et al. 2009; Karadeniz and Kalkışım 1996). Balta et al. (Balta et al. 2019) reported that the average TA value of Alişar pear in Giresun was 1.19% and the average pH was 4.85.

Michailidis et al. (Michailidis et al. 2021) reported mean TA values of 2 pear cultivars in Greece between 0.28%-0.43%, Đurić et al. (Đurić et al. 2015) reported TA values of 10 local pear cultivars grown in Bosnia and Herzegovina between 0.16%-0.44% and pH values between 3.97-4.85, Galvis Sanchez et al. (Galvis Sanchez et al. 2003) determined the average TA values of 6 pear cultivars in

southern Chile between 0.06%-0.23% and pH between 4.31-5.26, Li et al. (Li et al. 2013) determined the average pH of 3 pear cultivars widely grown in China as 4.89. Chen et al. (Chen et al. 2007) reported TA values of pears grown in China between 0.10% and 0.46%, Hussain et al. (Hussain et al. 2013) reported TA values between 0.12% and 0.26% and pH between 4.12-5.24 for 4 pear varieties in Pakistan. Similarly, TA values of some pear varieties grown in the Srebrenik region of Bosnia and Herzegovina were found between 0.61 g/kg and 3.89 g/kg (Akagic et al. 2022).

There are some differences between the pH and acidity results of our study and the results reported in the literature. pH and acidity characteristics of pear cultivars are genotype-specific, they may vary according to the soil conditions too (Ozturk et al. 2009).

### 3.3. Total and reducing sugar amount

Most of the water-soluble solids in fruit are sugars, and the entire sugar content of fruit is usually composed of reducing sugars (glucose-fructose). The sugars, organic acids, and trace elements present in fruit determine the quality of sensory and nutritional fruit. Fruits with a higher sugar and organic acid content and optimum mineral content are better quality. The sugar content of the fruit varies depending on climate, soil structure, and nutrient amount (Sestras et al. 2009).

According to the results of the sugar analysis of this study, it was determined that the total sugar values of Gelincik apples varied between  $9.14 \pm 0.29$  g/100 mL and  $11.10 \pm 0.38$ , reducing sugar ranged between  $7.45 \pm 0.26$  g/100 mL and  $9.09 \pm 0.81$  g/100 mL, and sucrose ranged between  $1.69 \pm 0.36$  g/100 mL and  $2.21 \pm 0.33$  g/100 mL. The total sugar content of Hüsnüyusuf pear varied between  $7.72 \pm 0.64$  g/100 mL and  $9.10 \pm 0.68$  g/100 mL, reducing sugar content varied between  $5.98 \pm 0.54$  g/100 mL and  $7.05 \pm 0.66$  g/100 mL, sucrose content varied between  $1.41 \pm 0.21$  g/100 mL and  $2.05 \pm 0.47$  g/100 mL.

Karşı and Aslantaş (Karşı and Aslantaş 2016) determined that the total sugar amount of 13 standard apple varieties grown in Erzurum was between 5.84%-11.80%, and Alamur (Alamur 1997) found that the total sugar amount of Erzincan apples was between 9.04%-11.84%. Mordoğan and Ergun (Mordoğan and Ergun 2002) found the total sugar content of Golden Delicious and Starking Delicious apples grown in Denizli-Çivril (Türkiye) between 49.07% and 79.08% and sucrose content between 12.58% and 25.87%. Reducing sugars of 3 apple cultivars in Osmaniye (Türkiye) were found between 9.13% and 10.09% and total sugars between 12.38% and 13.74%

(Bolat et al. 2019). Studies conducted with different apple varieties in various regions of Türkiye show differences in reducing and total sugar contents. Reducing sugar content was found to be between 6.96%-8.97% in Erzincan apples, between 8.38%-12.72% in apple varieties grown in Çoruh Valley, and between 377.72 g/kg-425.28 g/kg in 5 apple varieties grown in Malatya (Güleriüz et al. 2001; Erdoğan and Bolat 2002; Turan and Karlıdağ 2022). The total sugar content of Malatya apples was determined as 543.20 g/kg and 612.40 g/kg (Turan and Karlıdağ 2022).

When we look at the studies in other countries, the total sugar number of apples in Romania was 12.129% on average, the total sugar amount in New Zealand was between 76.5 mg/g-105.0 mg/g, and the total sugar amount of 7 apple varieties in West Virginia (USA) was between 12.5% and 14.7% (Harker et al. 2002; Nour et al. 2010; Schmutzler and Huck 2016). Karadeniz (Karadeniz 1999) determined that the average total sugar content of 7 pear varieties grown in Bursa and Ankara was 7.99% and the average sucrose amount was 0.52%, Öz and Aslantaş (Öz and Aslantaş 2015) found that the total sugar amount of 17 pear varieties grown in Erzincan was between 107 mg/L and 257 mg/L. Chen et al. (Chen et al. 2007) determined that the total sugar amount of 8 pear varieties in Beijing was between 65 g/kg and 120 g/kg and sucrose content was between 3.3 g/kg and 21.4 g/kg, Hussain et al. (Hussain et al. 2013) reported that the total sugar content of pears in Pakistan was between 10.19% and 11.12% and reducing sugar content was between 5.14% and 5.37%.

### 3.4. Antioxidant activity

Antioxidants reduce or eliminate free radicals that negatively affect human health. Antioxidants are found in many natural food products and are protective against chronic diseases and oxidative stress. There is considerable evidence for the role of antioxidant components of fruits and vegetables in maintaining health and preventing diseases (Galvis Sanchez et al. 2003). According to the antioxidant activity results of this study, the antioxidant activity of Gelincik apple by DPPH radical scavenging assay was found between 63.91±0.74% and 72.18±2.12%, the antioxidant activity of Hüsnüyusuf pear was found between 56.42±1.26% and 39.83±1.32%.

Baydır et al. (Baydır et al. 2019) found DPPH antioxidant activity of 5 apple varieties in Afyonkarahisar between 4.46% and 17.24%. Karadeniz et al. (Karadeniz et al. 2005) found the antioxidant activity of 8 apple varieties grown in Ankara to be 25.7% on average, and Abacı et al. (Abacı et al. 2016) found the antioxidant activity of 26 apple

varieties in Ardahan to be 30.5%-73.4% in fruit peel and 22.5%-57.8% in fruit flesh. Chong et al. found the average antioxidant activity of apples grown in Semenyih (Selangor, Malaysia) to be 26.29% by DPPH assay (Chong et al. 2013). It was reported that the antioxidant activity values of 15 different apple varieties grown in Prague (Czech Republic) were between 7.04% and 17.52%, and the DPPH values of 67 apple varieties grown in Western Europe were between 10.1 µmolTE/100 g-129 µmolTE/100 g (Lanchman et al. 2006; Wojdylo et al. 2008).

Antioxidant activities of various pear varieties have also been determined in previous studies. The DPPH antioxidant activity of 4 pear varieties grown in Van was found to be in the range of 149.49-366.07 mmol Trolox eq/g and that of 3 pear varieties grown in Ankara was found to be 13.7% (Karadeniz et al. 2005; Topuz and Bakkalbaşı 2022). Erecevit and Kırbağ (Erecevit and Kırbağ 2017) examined the DPPH free radical scavenging effect of pears grown in Elazığ and found that pear extract showed an increasing antioxidant activity starting from 100 µL concentrations. The highest effect was found at 250 µL. Kirca et al. found the % inhibition values between 28.56% and 48.78% by DPPH assay (Kirca et al. 2022).

The antioxidant activity level in pears by DPPH assay was found between 24.3% and 48.6% by Galvis Sanchez et al. (Galvis Sanchez et al. 2003), between 27.96% and 46.73% by Hussain et al. (Hussain et al. 2013), between 664.91 µg trolox/g and 779.05 µg trolox/g by Michailidis et al. Wang et al. (Wang et al. 2015) found DPPH antioxidant activity in the peel and pulp of pears grown in China to be between 17.1% and 73.0% and 61.7% and 81.8%, respectively, while the values in fruit flesh were between 94.6% and 465.4% and 500.3% and 867.3%, respectively. Although there are differences in the results obtained in the studies, it has been determined that apples and pears have antioxidant activity in all studies. Previous studies have already shown that the antioxidant level may vary depending on fruit variety, growing and storage conditions, care and pruning methods, and measuring methods.

### 3.5. Vitamin C

Vitamin C is important antioxidant in many fruits. For this reason, the amount of vitamin C was also investigated in our study. In this study, the average vitamin C content of the Gelincik apple was between 7.52±0.41 mg/100 mL and 8.44±0.32 mg/100 mL, and the average vitamin C content of the Hüsnüyusuf pear was between 6.60±0.42 mg/100 mL and 5.84±0.08 mg/100 mL. The amount of vitamin C in apples was found to be between 33 mg/L and



124 mg/L by Karşı and Aslantaş (Karşı and Aslantaş 2016), between 2.87 mg/100 g and 4.58 mg/100 g by Kirca et al. (Kirca et al. 2022) between 4.2 mg/100 g and 17.5 mg/100 g by Abacı and Sevindik (Abacı and Sevindik 2014). Similarly, Nour et al. (Nour et al. 2010) reported that the average vitamin C amount of 15 apple varieties in Romania was 6.18 mg/100 g, Planchon et al. (Planchon et al. 2004) determined that the average vitamin C amount of 30 local apple varieties grown in Belgium was 14.2 mg/100 g.

In the study of Erbil et al. (Erbil et al. 2018), the vitamin C content of 5 different varieties of pears collected from Posof, Ardahan (Türkiye) varied between 9.03 mg/100 g and 16.02 mg/100 g. Öz and Aslantaş (Öz and Aslantaş 2015) determined the vitamin C content of 17 pear varieties grown in Erzincan between 30 mg/L and 195 mg/L, Abacı et al. (Abacı et al. 2016) determined the vitamin C content of Gugum and Banda pears grown in Ardahan as 10.2 mg/100 g and 8.8 mg/100 g, respectively. Öztürk et al. (Öztürk et al. 2015b) found the vitamin C values of 17 pear varieties in the average range of 21.1 mg/100 g in the peel and 19.3 mg/100 g in the fruit flesh.

Vitamin C contents of pear varieties in different regions of the world were found to be between 2.6-5.3 mg/100 g in southern Chile, between 1.30-4.55 mg/100 mL in Beijing, between 2.80-4.30 mg/100 g in Pakistan and between 0.77-1.61 mg/100 g in Bosnia and Herzegovina (Galvis Sanchez et al. 2003; Chen et al. 2007; Ozturk et al. 2009; Hussain et al. 2013).

The results of phytochemical analyses of apple and pear cultivars, both in our study and in previous studies, show a wide range of distribution. The main reasons for this are genetic differences and changing ecological factors. Differences in cultivars and cultivation conditions have increased the range of variation of the findings. In previous studies, there were no satisfactory findings on the extent to which quantitative characters were affected by ecological factors. In this respect, different researches need to be planned.

#### 4. Conclusion

In our country, there are apple and pear populations that have been grown locally for many years and used in the production of different valuable products. Many of these populations have not yet been introduced to large markets. It would be useful to reveal the content differences between local and standard varieties to form the basis for selection studies. This study is the first to introduce and evaluate the locally grown Gelincik apple and Hüsnüyusuf pear in Kütahya and to raise awareness

for conserving existing genetic resources. In the study, the phytochemical properties of Gelincik apple and Hüsnüyusuf pear were determined in terms of WSDM, % dry matter, pH, TA, total and reducing sugar amount, vitamin C values, and antioxidant activity level.

The traits examined in our study are highly dependent on ecological conditions as they are quantitative in nature. Therefore, it is useful to investigate and repeat such studies under different environmental conditions periodically. In addition, since the heritability of quantitative traits is low, the genetic characteristics of local species should be determined and a basis should be prepared for the correct planning of breeding studies.

#### Declaration of Ethical Standards

The authors declare that they comply with all ethical standards.

#### Credit Authorship Contribution Statement

**Author 1:**The author performed the conceptualization, formal analysis, investigation, validation, writing-original draft, writing-review and editing.

**Author 2:**The author performed the conceptualization, formal analysis, investigation, validation, writing-original draft, writing-review and editing.

#### Declaration of Competing Interest

The authors have no conflicts of interest to declare regarding the content of this article.

#### Data Availability

All data studied or analyzed during this study are included in this published article.

#### Acknowledgement

This study is dedicated to the memory of our dear Zekeriyya DAĞCI, who inspired us to choose this research topic and devoted himself to Kütahya.

#### 5. References

- Abacı, Z.T., and Sevindik, E., 2014. Ardahan bölgesinde yetiştirilen elma çeşitlerinin biyoaktif bileşiklerinin ve toplam antioksidan kapasitesinin belirlenmesi. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Bilimleri Dergisi*, **24(2)**, 175-184. <https://doi.org/10.29133/yyutbd.235931>
- Abacı, Z.T., Sevindik, E., and Ayvaz, M., 2016. Comparative study of bioactive components in pear genotypes from Ardahan/Turkey. *Biotechnology and Biotechnological Equipment*, **30(1)**, 36-43. <https://doi.org/10.1080/13102818.2015.1095654>
- Acero, N., Gradillas, A., Beltran, M., Garcia, A., and Mingarro, D.M., 2019. Comparison of Phenolic Compounds Profile and Antioxidant Properties of

- Different Sweet Cherry (*Prunus avium* L.) Varieties. *Food Chemistry*, **279**, 260-271.
- Akagić, A., Oras, A., Gaši, F., Meland, M., Drkenda, P., Memić, S., Spaho, N., Žuljević, S.O., Jerković, I., Musić, O., Hudina, M., 2022. A comparative study of ten pear (*Pyrus communis* L.) cultivars in relation to the content of sugars, organic acids, and polyphenol compounds. *Foods*, **11(19)**, 3031.  
<https://doi.org/10.3390/foods11193031>
- Akbaş, F., and Sevindi, C., 2019. Kütahya İlinde Meyvecilik. Atatürk Üniversitesi Türkiyat Araştırmaları Enstitüsü Dergisi, (65), 521-532.
- Alamur, U., 1997. Çoruh Vadisinde Yetiştirilen Bazı Elma Çeşitlerinin Fenolojik, Pomolojik ve Biyolojik Özelliklerinin İncelenmesi. [Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bahçe Bitkileri Ana Bilim Dalı], 107 s. Yüksek Öğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.
- Balta, M.F., Karakaya, O., Kaya, T., and Kırkaya, H., 2015. Kumru (Ordu) yöresinde yetiştirilen mahalli elma genotiplerinin fenolojik, morfolojik ve pomolojik özellikleri. *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpaşa University*, **32(1)**, 47-56.  
<https://doi.org/10.13002/jafag782>
- Balta, M.F., Üç, L., and Karakaya, O., 2019. Şebinkarahisar (Giresun) ilçesinde seçilen Alişar armut klonlarının bazı meyve özellikleri. *Uluslararası Tarım ve Yaban Hayatı Bilimleri Dergisi*, **5(1)**, 31-37.  
<https://doi.org/10.24180/ijaws.512840>
- Bayav, A., and Karlı, B., 2021. Economic performance of apple farms: a case of Isparta and Karaman provinces of Turkey. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, **9(4)**, 837-842.
- Bayazit, S., Caliskan, O., and Sumbul, A., 2016. Morpho-pomological diversity of Turkish pear (*Pyrus communis* L.) accessions in eastern mediterranean region of Turkey. *Acta Scientiarum Polonorum. Hortorum Cultus*, **15(5)**, 157-171.
- Baydır, A.T., Diraman, H., Palamutoğlu, R., and Kasnak, C., 2019. Afyonkarahisar'da Tüketilen Önemli Yabancı Elma Çeşitlerinin Bazı Kalite ve Antioksidan Özellikleri. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, **17**, 927-932.  
<https://doi.org/10.31590/ejosat.617237>
- Bolat, İ., Yılmaz, M., and İkinci, A., 2019. Akdeniz geçit kuşağında farklı dönemlerde olgunlaşan bazı elma çeşitlerinin performanslarının belirlenmesi. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Bilimleri Dergisi*, **29(2)**, 258-267.  
<https://doi.org/10.29133/yyutbd.471552>
- Bostan, S.Z., and Acar, Ş., 2009. Ünye (Ordu) ve çevresinde yetiştirilen mahalli elma çeşitlerinin pomolojik özellikleri. *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi*, **2(15)**, 15-24.
- Bvenura, C., and Sivakumar, D., 2017. The role of wild fruits and vegetables in delivering a balanced and healthy diet. *Food Research International*, **99**, 15-30.
- Chen, J., Wang, Z., Wu, J., Wang, Q., and Hu, X., 2007. Chemical compositional characterization of eight pear cultivars grown in China. *Food Chemistry*, **104(1)**, 268-275.
- Chong, C.H., Law, C.L., Figiel, A., Wojdyło, A., and Oziembłowski, M., 2013. Colour, phenolic content and antioxidant capacity of some fruits dehydrated by a combination of different methods. *Food Chemistry*, **141(4)**, 3889-3896.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.06.042>
- Çubukçu, G.Ç., and Bostan, S.Z., 2018. Çaykara ilçesinde yetiştirilen yerel armut (*Pyrus* spp.) genotiplerinin seleksiyon yoluyla ıslahı: I-meyve özellikleri. *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpaşa University (JAFAG)*, **35(Ek Sayı)**, 75-88.  
<https://doi.org/10.13002/jafag4511>
- Cyril, K., Rahman, M. M., Singh, G., Joseph, A., and Mathew, M., 2023. The impact of pear on nutrition and health: A review. *Energy (kJ)*, **264(209)**, 227.
- Đurić, G., Žabić, M., Rodić, M., Stanivuković, S., Bosančić, B., and Pašalić, B. (2015). Biochemical and pomological assessment of European pear accessions from Bosnia and Herzegovina. *Horticultural Science*, **42(4)**, 176-184.  
<https://doi.org/10.17221/53/2015-HORTSCI>
- Dzoljic, J., 2021. Quality of raspberries varieties grown on the territory of vranje city as raw material for obtaining fruit juice. *Knowledge*, **45(3)**, 611-614.
- Erbil, N., Murathan, Z. T., Arslan, M., Ilcim, A., and Sayin, B., 2018. Antimicrobial, Antioxidant, and Antimutagenic Activities of Five Turkish Pear Cultivars. *Erwerbs-Obstbau*, **60(3)**, 203-209.  
<https://doi.org/10.1007/s10341-017-0359-1>
- Erdoğan, Ü.G., and Bolat, İ., 2002. Çoruh Vadisinde yetiştirilen bazı elma çeşitlerinin fenolojik ve pomolojik özelliklerinin incelenmesi. *Bahçe*, **31(1-2)**, 25-32.
- Erecevit, P., and Kırbağ, S., 2017. Probiyotik Maya Olarak *Saccharomyces cerevisiae*'nin Gelişimi Üzerine *Pyrus communis* L.'nin (Armut) Bazı Fitokimyasal Etkileri. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, **3(1)**, 13-23.
- Fourie, P.C., Hansmann, C.F., and Oberholzer, H.M., 1991. Sugar content of fresh apples and pears in South Africa. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **39(11)**, 1938-1939.  
<https://doi.org/10.1021/jf00011a008>
- Galvis Sanchez, A.C., Gil-Izquierdo, A., and Gil, M.I., 2003. Comparative study of six pear cultivars in terms of their phenolic and vitamin C contents and

- antioxidant capacity. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **83(10)**, 995-1003.  
<https://doi.org/10.1002/jsfa.1436>
- Güleryüz, M., Ercişli, S., and Erkan, E., 2001. Erzincan ovasında yetiştirilen bazı elma çeşitlerinin meyve gelişimi dönemlerinde meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişimler ile bunlar arasındaki ilişkiler. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, **32(1)**, 51-59.
- Gundogdu, M., Canan, I., and Okatan, V., 2018. Bioactive Contents and Some Horticultural Characteristics of Local Apple Genotypes from Turkey. *JAPS: Journal of Animal and Plant Sciences*, **28(3)**: 865-874.
- Harker, F.R., Marsh, K.B., Young, H., Murray, S.H., Gunson, F.A., and Walker, S.B., 2002. Sensory interpretation of instrumental measurements 2: sweet and acid taste of apple fruit. *Postharvest Biology and Technology*, **24(3)**, 241-250.  
[https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(01\)00157-0](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(01)00157-0)
- Hussain, S., Masud, T., Ali, S., Bano, R., and Ali, A., 2013. Some physico-chemical attributes of pear (*Pyrus communis* L.) cultivars grown in Pakistan. *International Journal of Biosciences*, **3(12)**, 206-215.  
<http://dx.doi.org/10.12692/ijb/3.12.1-7>
- Kalkisim, O., Okcu, Z., Karabulut, B., Ozdes, D., and Duran, C., 2018. Evaluation of Pomological and Morphological Characteristics and Chemical Compositions of Local Pear Varieties (*Pyrus communis* L.) Grown in Gumushane, Turkey. *Erwerbs-Obstbau*, **60(2)**, 173-181.  
<https://doi.org/10.1007/s10341-017-0354-6>
- Karadeniz, F., 1999. Armut suyunun kimyasal bileşimi üzerine araştırma. *J. of Agriculture and Forestry*, **23**, 355-358.
- Karadeniz, F., Burdurlu, H.S., Koca, N., and Soyer, Y., 2005. Antioxidant activity of selected fruits and vegetables grown in Turkey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, **29(4)**, 297-303.
- Karadeniz, T., and Çorumlu, M.S., 2012. İskilip armutları. *Akademik Ziraat Dergisi*, **1(2)**, 61-66.
- Karadeniz, T., and Kalkışım, Ö., 1996. Görele ve çevresinde yetiştirilen mahalli yazlık armut çeşitleri üzerinde pomolojik çalışmalar. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Bilimleri Dergisi*, **6(1)**, 81-86.
- Karlıdağ, H., and Eşitken, A., 2006. Yukarı Çoruh vadisinde yetişen elma ve armut çeşitlerinin bazı pomolojik özelliklerinin belirlenmesi. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Bilimleri Dergisi*, **16(2)**, 93-96.
- Karşı, T., and Aslantaş, R., 2016. Erzurum'da yetiştirilen bazı elma (*Malus communis* L.) çeşitlerinin fenolojik, pomolojik ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesi. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, **47(1)**, 11-21.
- Kim, A.N., Kim, H.J., Kerr, W.L., and Choi, S.G., 2017. The effect of grinding at various vacuum levels on the color, phenolics, and antioxidant properties of apple. *Food Chemistry*, **216**, 234-242.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.08.025>
- Kırca, L., Kırca, S., and Aygün, A., 2022. Organic Acid, Phenolic Compound and Antioxidant Contents of Fresh and Dried Fruits of Pear (*Pyrus Communis* L.) Cultivars. *Erwerbs-Obstbau*, **65**, 677-691.  
<https://doi.org/10.1007/s10341-022-00760-0>
- Lachman, J., Šulc, M., Sus, J., and Pavlíková, O., 2006. Polyphenol content and antiradical activity in different apple varieties. *Horticultural Science (Prague)*, **33(3)**, 95-102.
- Li, J., Huang, W., Zhao, C., and Zhang, B., 2013. A comparative study for the quantitative determination of soluble solids content, pH and firmness of pears by Vis/NIR spectroscopy. *Journal of Food Engineering*, **116(2)**, 324-332.  
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.11.007>
- Ma, C., Sun, Z., Chen, C.B., Zhang, L.L., and Zhu, S.H., 2014. Simultaneous separation and determination of fructose, sorbitol, glucose and sucrose in fruits by HPLC-ELSD. *Food Chemistry*, **145**, 784-788.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.08.135>
- McGlone, V.A., Jordan, R.B., Seelye, R., and Clark, C.J., 2003. Dry-matter-a better predictor of the post-storage soluble solids in apples?. *Postharvest Biology and Technology*, **28(3)**, 431-435.  
[https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(02\)00207-7](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(02)00207-7)
- Mertoğlu, K., and Evrenosoğlu, Y., 2019. Bazı elma ve armut çeşitlerinde fitokimyasal özelliklerin belirlenmesi. *Ziraat Fakültesi Dergisi*, **14(1)**, 11-20.
- Michailidis, M., Karagiannis, E., Nasiopoulou, E., Skodra, C., Molassiotis, A., and Tanou, G. (2021). Peach, apple, and pear fruit quality: To peel or not to peel?. *Horticulturae*, **7(4)**, 85.  
<https://doi.org/10.3390/horticulturae7040085>
- Mordoğan, N., and Ergun, S., 2002. Golden ve Starking elma çeşitlerinin şeker içerikleri ve bitki besin elementleri ile olan ilişkileri. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, **39(1)**, 103-110.
- Nour, V., Trandafr, I., and Ionica, M.E., 2010. Compositional characteristics of fruits of several apple (*Malus domestica* Borkh.) cultivars. *Natulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, **39(3)**, 228-233.  
<https://doi.org/10.15835/nbha3834762>
- Oturmak, İ., Özrenk, K., and Çavuşoğlu, Ş., 2017. Diyarbakır (Silvan, Kulp, Hazro) yöresindeki bazı mahalli armut (*Pyrus communis* L) gen kaynaklarının belirlenmesi. *Uluslararası Tarım ve Yaban Hayatı Bilimleri Dergisi*, **3(2)**, 61-67.  
<https://doi.org/10.24180/ijaws.353966>

- Öz, M.H., and Aslantaş, R., 2015. Doğu Anadolu Bölgesi armut genotiplerinin morfolojik karakterizasyonu. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, **46(2)**, 93-106.
- Özrenk, K., Gündoğdu, M., and Kan, T., 2010. Van Gölü havzası yerel armutları. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Bilimleri Dergisi, **20(1)**, 46-51.
- Özrenk, K., Gündoğdu, M., Kaya, T., and Kan, T., 2011. Çatak ve Tatvan yörelerinde yetiştirilen yerel elma çeşitlerinin pomolojik özellikleri. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Bilimleri Dergisi, **21(1)**, 57-63.
- Öztürk, A., Demirsoy, L., Demirsoy, H., Asan, A., and Gül, O., 2015a. Phenolic compounds and chemical characteristics of pears (*Pyrus Communis L.*). International Journal of Food Properties, **18(3)**, 536-546.  
<https://doi.org/10.1080/10942912.2013.835821>
- Öztürk, B., Özkan, Y., Kılıç, K., Uçar, M., Karakaya, O., and Karakaya, M., 2015b. Braeburn elmasının (*Malus domestica Borkh.*) hasat önu dökümü ve meyve kalitesi üzerine hasat öncesi bitki gelişim düzenleyici uygulamalarının etkisi. Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpaşa University (JAFAG), **32(1)**, 68-76.  
<https://doi.org/10.13002/jafag808>
- Ozturk, I., Ercisli, S., Kalkan, F., and Demir, B., 2009. Some chemical and physico-mechanical properties of pear cultivars. African journal of Biotechnology, **8(4)**, 687-693.
- Patel, V., Kaswala, R., Chakraborty, M., and Kamath, J.V., 2012. Phytochemical and pharmacological profile of *Malus domestica*: An Overview. International Journal of Current Biomedical and Pharmaceutical Research, **2(2)**: 334– 338.
- Patocka, J., Bhardwaj, K., Klimova, B., Nepovimova, E., Wu, Q., Landi, M., Kuca, K., Valis, M., and Wu, W., 2020. *Malus domestica*: A review on nutritional features, chemical composition, traditional and medicinal value. Plants, **9(11)**, 1408.  
<http://dx.doi.org/10.3390/plants9111408>
- Planchon, V., Lateur, M., Dupont, P., and Lognay, G., 2004. Ascorbic acid level of Belgian apple genetic resources. Scientia Horticulturae, **100(1-4)**, 51-61.  
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2003.08.003>
- Polat, M., and Bağbozan, R., 2017. Eğirdir (Isparta) ekolojisinde yetiştirilen erkenci yerli armut (*Pyrus communis L.*) tiplerinin bazı meyve özelliklerinin belirlenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, **21(1)**, 9-12.  
<https://doi.org/10.19113/sdufbed.36032>
- Sahin, L., Hafizoğlu, N., Çetinkaya, H., Manisa, K., Bozkurt, E., and Biçer, A., 2017. Assessment of radiological hazard parameters due to natural radioactivity in soils from granite-rich regions in Kütahya Province, Turkey. Isotopes in environmental and health studies, **53(2)**, 212-221.  
<https://doi.org/10.1080/10256016.2016.1207640>
- Schmutzler, M., and Huck, C. W., 2016. Simultaneous detection of total antioxidant capacity and total soluble solids content by Fourier transform near-infrared (FT-NIR) spectroscopy: A quick and sensitive method for on-site analyses of apples. Food Control, **66**, 27-37.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.01.026>
- Şenyurt, M., Kalkışım, Ö., and Karadeniz, T., 2015. Gümüşhane yöresinde yetiştirilen bazı standart ve mahalli elma (*Malus communis L.*) çeşitlerinin pomolojik özellikleri. Akademik Ziraat Dergisi, **4(2)**, 59-64.
- Sestras, A., Sestras, R., Lazar, V., Mitre, V., Mitre, I., Ropan, G., and Barbos, A., 2009. The influence of fruit position in the crown of trees on the sugar content and morphological traits of apple fruits. Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Horticulture, **66(1)**, 170-176.
- Sewwandi, S.D.C., Arampath, P.C., Silva, A.B.G., and Jayatissa, R., 2020. Determination and comparative study of sugars and synthetic colorants in commercial branded fruit juice products. Journal of Food Quality. 7406506  
<https://doi.org/10.1155/2020/7406506>
- Soylu, A., Ertürk, Ü., Mert, C., and Öztürk, Ö., 2003. MM 106 anacı üzerine aşılı elma çeşitlerinin Görükle koşullarındaki verim ve kalite özelliklerinin incelenmesi-II. Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, **17(2)**, 57-65.
- Sri, K.B., Srija, G., and Sumakanth, M., 2022. Quantification of vitamin C by titrimetric method in different marketed fruit juices. World Journal of Pharmaceutical Research, **12(4)**, 1125-1130.  
<https://doi.org/10.20959/wjpr20234-27231>
- Tekintaş, F.E., Kankaya, A., Ertan, E., and Seferoğlu, H.G., 2006. M9 anacı üzerine aşılı bazı elma çeşitlerinin Aydın ili koşullarındaki performanslarının belirlenmesi. Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, **3(2)**, 27-30.
- Topuz, F.C., and Bakkalbaşı, E., 2022. Physical, Chemical and Bioactive Properties of Four Different Pears (*Pyrus communis L.*) Varieties Grown in Turkey. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, **27(2)**, 303-314.  
<https://doi.org/10.53433/yyufbed.1086370>
- Travers, S., Bertelsen, M.G., and Kucheryavskiy, S.V., 2014. Predicting apple (cv. Elshof) postharvest dry matter and soluble solids content with near infrared spectroscopy. Journal of the Science of Food and Agriculture, **94(5)**, 955-962.

<https://doi.org/10.1002/jsfa.6343>

Turan, S., and Karlıdağ, H. (2022). Bazı elma çeşitlerinin Malatya ili Battalgazi ilçesi ova koşullarında performanslarının belirlenmesi. *Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, **26(2)**, 169-180.

<https://doi.org/10.29050/harranziraat.1078373>

Wang, T., Li, X., Zhou, B., Li, H., Zeng, J., and Gao, W., 2015. Anti-diabetic activity in type 2 diabetic mice and  $\alpha$ -glucosidase inhibitory, antioxidant and anti-inflammatory potential of chemically profiled pear peel and pulp extracts (*Pyrus* spp.). *Journal of Functional foods*, **13**, 276-288.

<https://doi.org/10.1016/j.jff.2014.12.049>

Wojdyło, A., Oszmiański, J., and Laskowski, P., 2008. Polyphenolic compounds and antioxidant activity of new and old apple varieties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **56(15)**, 6520-6530.

<https://doi.org/10.1021/jf800510j>

Yang, S., Meng, Z., Li, Y., Chen, R., Yang, Y., and Zhao, Z., 2021. Evaluation of physiological characteristics, soluble sugars, organic acids and volatile compounds in 'Orin' apples (*Malus domestica*) at different ripening stages. *Molecules*, **26(4)**, 807.

<https://doi.org/10.3390/molecules26040807>

Yarılgaç, T., and Yıldız, K., 2001. Adilcevaz ilçesinde yetiştirilen mahalli armut çeşitlerinin bazı pomolojik özellikleri. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Bilimleri Dergisi*, **11(2)**, 9-12.

Zhang, L., Xu, Q., You, Y., Chen, W., Xiao, Z., Li, P., and Ma, F., 2018. Characterization of Quercetin and Its Glycoside Derivatives in *Malus* germplasm. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, **59(6)**: 909-917.

<https://doi.org/10.1007/s13580-018-0051-x>

Zhang, Y., Nock, J. F., Al Shoffe, Y., and Watkins, C.B., 2019. Non-destructive prediction of soluble solids and dry matter contents in eight apple cultivars using near-infrared spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*, **151**, 111-118.

<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.01.009>

### **Internet References**

1- Map of Kütahya.

<https://www.milliyet.com.tr/egitim/haritalar/kutahya-haritasi-kutahya-ilceleri-nelerdir-kutahya-ilinin-nufusu-kactir-kac-ilcesi-vardir-6310007>  
(19.05.2024)

2- Map of Kütahya.

<https://www.atlasbig.comtrkutahyanin-mahalleleri>  
(10.07.2023)

3- Figure of Hüsnü Yusuf pear.

<https://kutahya.tarimorman.gov.tr/Sayfalar/Detay.aspx?Sayfald=38> (19.05.2024)

## Investigation of Some Properties of 4-Amino-2-Methyl-Quinoline and CdS Nano Composite Thin Films for Production of Diodes

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 21.09.2023

Kabul/Accepted: 01.08.2024

Yayımlandı/Published: 02.12.2024

### Diyot Üretimi İçin 4-Amino-2-Metil-Kinolin ve CdS Nano Kompozit İnce Filmlerin Bazı Özelliklerinin İncelenmesi

Ramazan DEMİR<sup>1\*</sup>, İsmet KAYA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Çanakkale Onsekiz Mart University, Faculty of Education, Department of Mathematics and Physics Education, Çanakkale, Türkiye

<sup>2</sup>Çanakkale Onsekiz Mart University, Faculty of Science, Department of Chemistry, Polymer Synthesis and Analysis Laboratory, Çanakkale, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Abstract

The aim of this study is to produce a diode, which is a basic electronic circuit element, and analyze its physical characterization. In this study, a diode was produced from CdS and  $C_{10}H_{10}N_2$  films, and its structural, optical, and electrical properties were investigated. First, a thin CdS film was deposited on an ITO substrate using the CBD method. Then, a  $C_{10}H_{10}N_2$  film was coated on this CdS film by the spin coating method. The CdS film has n-type semiconductor properties, whereas the  $C_{10}H_{10}N_2$  film has p-type semiconductor properties. XRD, SEM, AFM, UV-Vis spectroscopy, and IV measurements were performed on the produced films. According to the XRD result, a sharp peak at  $27.07^\circ$  was observed in the hexagonal phase of CdS. At this angle, a grain size of 33.3 nm was calculated according to the XRD result. Based on the SEM and AFM measurement results, it was determined that the film surface was uniform and dotted. According to the UV-Vis results, in addition to the  $d \rightarrow d^*$  transition,  $\pi \rightarrow \pi^*$  and  $n \rightarrow \pi^*$  transitions were also observed. From the I-V diagram, it was seen that the heterojunction structure of the CdS/ $C_{10}H_{10}N_2$  films had a diode property. The value of rectification factor was calculated as  $2.91 \times 10^2$  from the I-V data. In addition, the ideality factor was calculated as 1.93 using the traditional method.

**Keywords:** Diode; CdS; 4-amino-2-methylquinoline;  $C_{10}H_{10}N_2$ ; Thin Film

#### Öz

Bu çalışmanın amacı elektronik temel devre elemanı olan bir diyot üretmek ve bununla ilgili olarak fiziksel karakterizasyonunu araştırmaktır. Yapılan bu çalışmada CdS ve  $C_{10}H_{10}N_2$  filmlerinden bir diyot üretilerek yapısal, optik ve elektriksel özellikleri incelendi. İlk olarak ITO altta üzerine CBD yöntemiyle CdS ince filmi üretildi. Daha sonra bu CdS filmin üzerine spin coating yöntemiyle  $C_{10}H_{10}N_2$  filmi kaplandı. CdS filmi n-tipi ve  $C_{10}H_{10}N_2$  filmi ise p-tipi yarı iletken özelliğine sahiptir. Üretilen filmlerin XRD, SEM, AFM, UV-Vis Spektroskopisi ve IV ölçümleri alındı. XRD sonucuna göre CdS'in heksagonal fazda  $27,07^\circ$  de keskin bir pik gözlemlendi. Bu açıdan tanecik büyüklüğü XRD sonucuna göre 33,3 nm olarak hesaplandı. SEM ve AFM ölçüm sonuçlarına göre düzenli ve boşluklu bir film yüzeyinin olduğu gözlemlendi. UV-Vis sonucuna göre  $d \rightarrow d^*$  geçişinin yanısıra  $\pi \rightarrow \pi^*$  ve  $n \rightarrow \pi^*$  geçişleri de gözlemlendi. I-V grafiğinden CdS/ $C_{10}H_{10}N_2$  filmlerinin hetero junction yapısının diyot özelliğine sahip olduğu gözlemlendi. I-V verilerinden düzeltme faktörünün değeri  $2.91 \times 10^2$  olarak hesaplandı ve ilgili grafiği çizildi. Ayrıca idealite faktörü geleneksel yöntemle 1,93 olarak hesaplandı.

**Anahtar Kelimeler:** Diyot; CdS; 4-amino-2-metilkinolin;  $C_{10}H_{10}N_2$ ; İnce Film

#### 1. Introduction

Group II–VI semiconductor compounds have attracted great interest due to their potential applications in photovoltaic devices, photoresistors, heterojunction diodes, electroluminescent films, and surface acoustic wave devices (Frag et al., 2009). Schottky barrier diodes (SBDs) are one of the most commonly used rectifier diodes in the electronics industry. The rectifying property of metal-semiconductor diodes was first described by Schottky in the 1930s (Karataş, 2010). The most commonly studied binary II-VI compound semiconductors

for photovoltaic applications are cadmium telluride (CdTe) and cadmium sulfide (CdS) thin films. Both materials have been used to develop a p-n heterojunction device structure for solar cell applications (Olusola et al., 2016).

CdS is one of the essential technological materials used as II-VI compound semiconductors due to its large direct band gap, optical absorption and good stability. The fundamental bandgap value of CdS is 2.42 eV (Ramaiah Subba Kodigala, 2001). Various methods have been used to produce CdS nanoparticles, such as chemical vapor

deposition, chemical sol-gel solution growth, ultrasonic spray pyrolysis, screen printing sintering technology, and chemical bath deposition (CBD). Among these deposition methods, the CBD technique is one of the most cost-effective and simple methods, which makes it very attractive for obtaining reproducible and uniform CdS nanoparticles. There are many potential electronic and photonic applications of CdS nanoparticles such as solar cells, photosensors, DNA sensors, and gas sensors. (Demir et al., 2012).

In recent years, much attention has been paid to the production and characterization of Schottky diodes, organic light-emitting diodes, organic field effect transistors, photovoltaics (PV), and solar cells using organic semiconductors and their derivatives due to their stability and barrier height improvement properties (Güllü et al., 2008). Organic materials have a wide range of applications in thin-film electronics. The production and characterization of the Schottky diode barrier using organic semiconductors and their derivatives has received considerable attention in recent years. Organic semiconductors can be used as active components in electronic devices. These materials offer potential advantages due to ease of processing, low cost, and large-scale device characterization. This has opened a new opportunity to replace traditional inorganic devices with organic ones (Yakuphanoglu, 2007).

The diode we produced is made of CdS and 4-amino-2-methylquinoline ( $C_{10}H_{10}N_2$ ), which has a CAS number of 6628-04-2 and is known by various names in the literature.  $C_{10}H_{10}N_2$  is a quinoline derivative, an organic compound with amine and methyl functional groups (Braun et al., 2015).  $C_{10}H_{10}N_2$  is a quinoline derivative similar to naphthalene. It consists of a fused benzene ring and a pyridine ring. The geometric structure of  $C_{10}H_{10}N_2$  is shown in Figure 1.

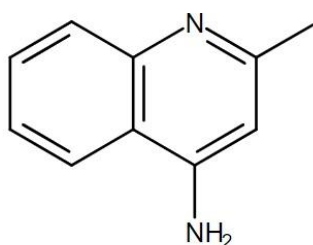


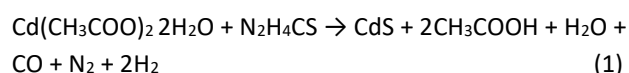
Figure 1. Structure of 4-amino-2-methyl-quinoline.

In this study, we produced a diode consisting of CdS and  $C_{10}H_{10}N_2$ , and investigated some physical properties of this diode. For this purpose, we prepared the CdS film using the CBD method and the  $C_{10}H_{10}N_2$  film using the spin-coating method.

## 2. Materials and Methods

### 2.1. Preparation of thin films

Using the CBD method, a thin CdS film was deposited on an indium tin oxide (ITO) substrate measuring  $76 \times 26 \times 1 \text{ mm}^3$ . The substrates were subjected to a cleaning process that included washing with a soap solution and then rinsing with deionized water and ethanol. They were then rinsed again with deionized water and allowed to air dry. To deposit the thin CdS films, a solution was prepared consisting of 0.2 M 10 mL cadmium acetate dihydrate ( $Cd(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ ), 1 M 10 mL thiourea ( $CS(NH_2)_2$ ) and 8 mL ammonia/Ammonium chloride buffer solution ( $NH_3/NH_4Cl$ ;  $pH=11.50$ ) which was then diluted with deionized water to reach a total volume of 50 ml. To prepare the CdS film, we chose thiourea as the sulfur source (S),  $82 \text{ }^\circ\text{C}$  as the solution temperature value, and 60 minutes as the deposition time (Demir, 2010; Demir & Gode, 2015; Demir & Göde, 2018). The CdS/ITO films accumulated in this way were then annealed in ambient air at  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  for 30 minutes. The chemical reactions involved in the CBD technique for producing the CdS films can be summarized as follows:



The Source of  $C_{10}H_{10}N_2$  was Fluka Chemika (07330, EC No. 2296044) and used in its original form. This organic compound with the chemical formula  $C_{10}H_{10}N_2$  belongs to the group of heterocyclic quinoline derivatives with a methyl group at position 2 of the quinoline ring. It is commercially available as a beige powder and is also known as 4-quinolinamine and 2-methyl-4-quinolinamine. CdS is characterized as an n-type semiconductor material (Aybek A. Ş., 2018), while  $C_{10}H_{10}N_2$  behaves as a p-type semiconductor material due to the same functionality as 8-hydroxyquinoline (Demir et al., 2015).  $C_{10}H_{10}N_2$  has an optical band gap energy of 3.5 eV (Kaya et al., 2015).

The next phase of the experiment involved depositing a  $C_{10}H_{10}N_2$  film onto a CdS film to produce a diode. To prepare the solution for the spin-coating process used to create the  $C_{10}H_{10}N_2$  film, powdered  $C_{10}H_{10}N_2$  with a molecular weight of 158.20 g/mol was dissolved in ethanol at room temperature for 90 minutes ( $22 \text{ }^\circ\text{C}$ ). The solution concentration was 0.2 M, and the total solution volume was 30 mL. Before each rotation, 10 drops of  $C_{10}H_{10}N_2$  solution were dropped onto the CdS film using a plastic dropper. The CdS film onto which a  $C_{10}H_{10}N_2$  solution was dropped was attached to the spin coater.

Then, the spin coater was activated. When the spin coater stopped after 60 seconds, the produced film was left at room temperature for 5 minutes. After 5 minutes, the spin coater was activated again, and this process was repeated 8 times. For each rotation, the rotation speed of the spin coater was 1100 rpm, and the rotation time was 1 minute. Therefore, the previously prepared CdS film on ITO was coated with a  $C_{10}H_{10}N_2$  film.

## 2.2. Characterization of the Thin Film's Structure

The topography, crystalline arrangement, and spectral properties of the coatings were evaluated using X-ray diffraction (XRD), UV-Vis spectroscopy, scanning electron microscopy (SEM), and atomic force microscopy (AFM), respectively.

The XRD analysis was performed using a PANalytical Empyrean instrument with  $\lambda=1.5418 \text{ \AA}$  Cu-K $\alpha$  radiation within a  $2\theta$  range between  $20^\circ$  and  $70^\circ$ . The surface morphology was examined using a JEOL JSM-7100F SEM. The optical measurements of the films were carried out at room temperature using a UV-Vis spectrophotometer, specifically the Analytik Jena Specord S600, in the wavelength range between 300 and 1000 nm. The electrical characterization of the diodes was conducted using a Keithley 2400 sourcemeter under atmospheric

conditions. The current-voltage characteristics of the CdS/ $C_{10}H_{10}N_2$  diodes were fully characterized using a Keithley 2400 sourcemeter. The AFM measurements of the films were performed at room temperature using a WITec Alpha 300A AC mode instrument (console 42 N/m 285 kHz) to obtain topographic images. The system was enclosed in an acoustic chamber to prevent electromagnetic interference that could interfere with the measurements.

## 3. Results and Discussions

### 3.1. Composition of Thin Films

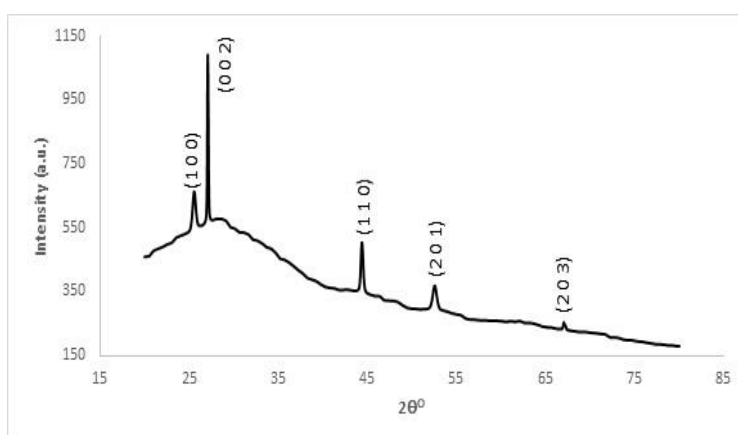
The XRD spectrum illustrating the CdS/ $C_{10}H_{10}N_2$  films is depicted in Figure 2. The structural characteristics of the CdS/ $C_{10}H_{10}N_2$  heterojunction were explored via XRD analysis. Table 1 presents the XRD analysis data, including information regarding crystal structure, interlayer spacing, and particle size. The Debye-Scherrer equation was used to calculate the D particle size of the prepared heterojunction structures from the diffraction data.

$$D=(0.9\lambda)/(\beta.\cos\theta) \quad (2)$$

In this equation, ( $\lambda$ ) represents the X-ray wavelength ( $1.5406 \text{ \AA}$ ), ( $\theta$ ) is the Bragg diffraction angle, and ( $\beta$ ) is the half-width of the diffraction peak (Reddy & Kumar, 2016).

**Table 1.** XRD parameters for CdS/ $C_{10}H_{10}N_2$  pattern.

	Peak position [ $2\theta^\circ$ ]	d-spacing [ $\text{\AA}$ ]	$\beta$ (FWHM) [rad]	Grain size [nm]	Cos $\theta$	Micro Strain ( $\epsilon$ ) x $10^{-3}$
Maximum peaks	27.0774	3.2931	0.0042	33.3524	0.9722	<b>0.0595</b>
	44.3515	2.0424	0.0084	17.6519	0.9260	<b>0.1125</b>
	25.5425	3.4874	0.0033	42.6482	0.9752	<b>0.0465</b>
	52.4988	1.7431	0.0074	20.8908	0.8968	<b>0.0950</b>
	67.0258	1.3963	0.0028	59.1816	0.8337	<b>0.0335</b>



**Figure 2.** XRD pattern of CdS/ $C_{10}H_{10}N_2$  sample.

The microstrain ( $\epsilon$ ) was determined using the following formula (Reddy & Kumar, 2016).

$$\epsilon=(\beta.\cos\theta)/4 \quad (3)$$

Although the CdS peaks do not exactly match the standard peaks, they are close to the PDF map (greenockite, hexagonal structure) 41-1049. By comparing it with PDF Cards, it is possible to fully



understand which elements the X-ray peaks belong to. For this reason, the corresponding PDF Card number corresponding to the relevant peaks is written as in other studies (Assili et al., 2019; Demir & Gode, 2015). Interactions between CdS and  $C_{10}H_{10}N_2$  cause some deviations in the actual values of this CdS film, resulting in a discrepancy between the measured and standard peaks. Figure 2 presents the XRD pattern of the thin film on the ITO substrate, revealing the hexagonal phase of CdS with lattice parameters of  $a=4.141 \text{ \AA}$  and  $c=6.719 \text{ \AA}$ . The sharp diffraction peak at  $2\theta=27.07^\circ$  of the (002) plane indicates

preferred orientation. However, the  $C_{10}H_{10}N_2$  film exhibits an amorphous structure, as evidenced by the absence of any discernible peaks.

### 3.2. Optical Characterization

The optical measurements were carried out on the prepared films. Later, the UV-Vis spectra of the CdS film with a coating of  $C_{10}H_{10}N_2$  were worked out using the "Analytik Jena Specord S600" single-beam spectrophotometer. Figure 3 shows the measured UV-Vis spectra for CdS and CdS/ $C_{10}H_{10}N_2$ .

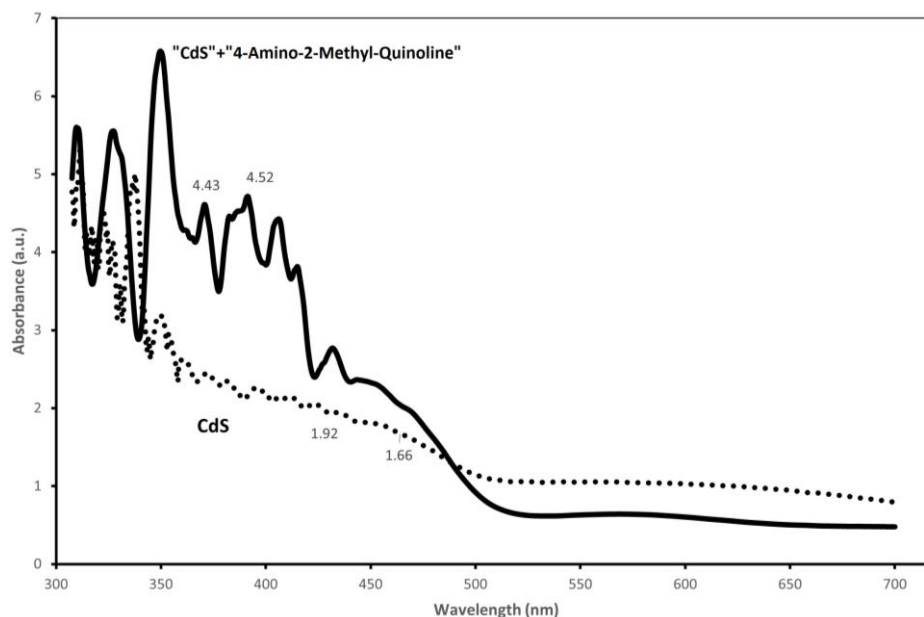


Figure 3. UV-Vis spectra of CdS and CdS/ $C_{10}H_{10}N_2$

To examine the structure of the produced device, UV examination was carried out. UV-Vis spectroscopy is a cost-effective, simple, flexible, and non-destructive analytical method suitable for a broad class of organic compounds and some inorganic species. UV-Vis spectrophotometers measure the absorption or transmission of light passing through a medium as a function of wavelength. UV-visible spectroscopy is based on electronic transitions of organic molecules that absorb light and excite electrons from a lower energy orbital (highest occupied molecular orbital - HOMO) to a higher energy unoccupied orbital (lowest unoccupied molecular orbital - LUMO) (Rocha et al., 2018). By measuring the wavelength of these transitions, we gain insight into the nature of the transition and obtain information about the film. Based on the UV-Vis measurements, absorption bands associated with  $d \rightarrow d^*$  transitions of metal atoms were observed in the wavelength range of 440–500 nm. These bands indicate the presence of metal atoms within the film structure. In the CdS/ $C_{10}H_{10}N_2$  films, the electronic transitions of the phenyl ring (-NH<sub>2</sub> group) to

$\pi \rightarrow \pi^*$  and  $n \rightarrow \pi^*$  were observed at wavelengths of 310 nm and 328 nm, respectively.

### 3.3. Current-Voltage Characterization

Current-voltage (I-V) characterizations were performed on CdS/ $C_{10}H_{10}N_2$  heterojunction structures using a two-point probe technique with a Keithley 2400 sourcemeter, as shown in Figure 4. The specialist computer software connected to the Keithley 2400 source meter recorded the current values (I) corresponding to the applied voltage (V).

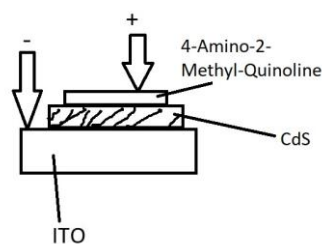


Figure 4. Measurement of current-voltage measurement of CdS/ $C_{10}H_{10}N_2$  heterojunction structure

The current (I) was obtained by applying a direct voltage (V) ranging between -3 and 3 volts. The purpose of this study was not to investigate the photosensitivity of the heterojunction diode we produced. For this reason, I-V measurements were performed only in daylight in a laboratory environment at a laboratory temperature of 22°C. Figure 5 shows the I-V diagram of the CdS/C<sub>10</sub>H<sub>10</sub>N<sub>2</sub> heterojunction diode under forward and reverse bias.

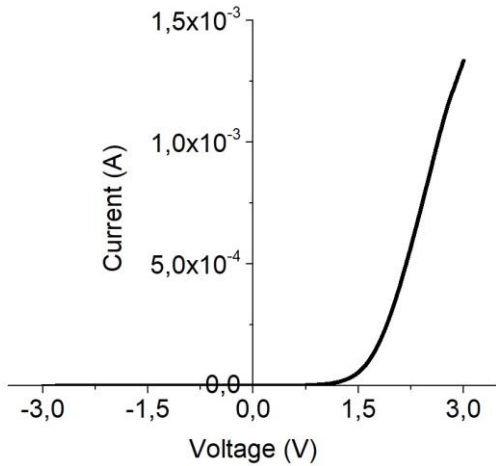


Figure 5. I-V graph of CdS/C<sub>10</sub>H<sub>10</sub>N<sub>2</sub> heterojunction

From Figure 5, it can be seen that the CdS/C<sub>10</sub>H<sub>10</sub>N<sub>2</sub> heterojunction structure exhibits diode-like characteristics in terms of current behavior and has a threshold voltage value of 1.5 volts. If there was no rectification, the graph for values between -3 and +3 volts would be the  $y=m.x$  graph.

The rectification factor (RF) is defined as the ratio of forward and reverse currents ( $I_F/I_R$ ) (Kaleli et al., 2011) and is calculated as  $2.91 \times 10^2$  as a maximum value at 2.66 volts. If there was no rectification, the  $I_F/I_R$  value would be 1. The relationship between the rectification factor and the voltage at room temperature is shown in Figure 6.

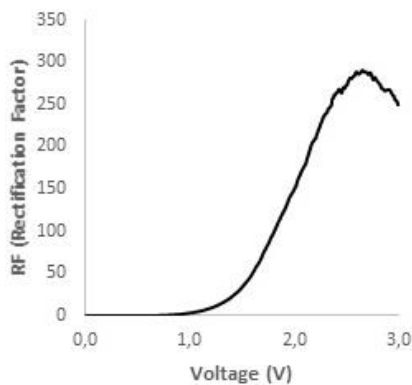


Figure 6. Plot of rectification factor (RF) versus V at room temperature.

The relationship between the voltage applied to the contact and the current flowing through a Schottky barrier is given in Equation 4, which considers the series resistance ( $R_S$ ) effect. This is expressed as follows (Durmuş & Karataş, 2019; Karataş et al., 2007) :

$$I = I_0 \left[ \exp \left( q \frac{(V - IR_S)}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (4)$$

The ideality factor, denoted by  $n$ , is equal to 1 for an ideal diode. The value 1 can be neglected in the equation if  $V > 3kT/q$ .  $T$  represents the ambient temperature in Kelvin,  $I_0$  is the extrapolated saturation current,  $q$  is the elementary charge ( $=1.6 \times 10^{-19}$  C),  $V$  is the applied voltage, and  $k$  is the Boltzmann constant.

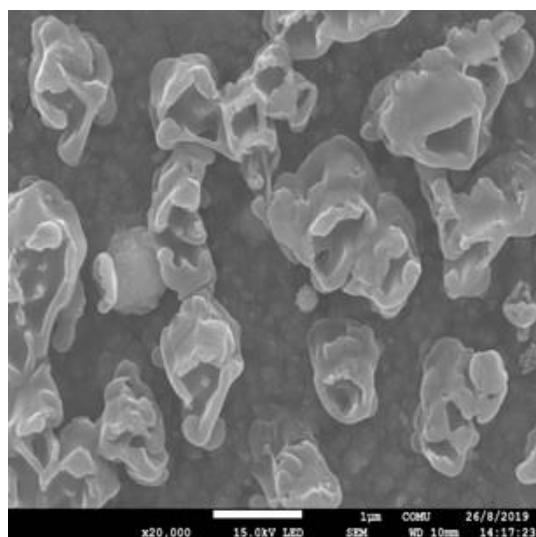
Using Equation 4 to calculate the ideality factors of the diodes, the following expression can be obtained (Yakuphanoglu, 2007):

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (5)$$

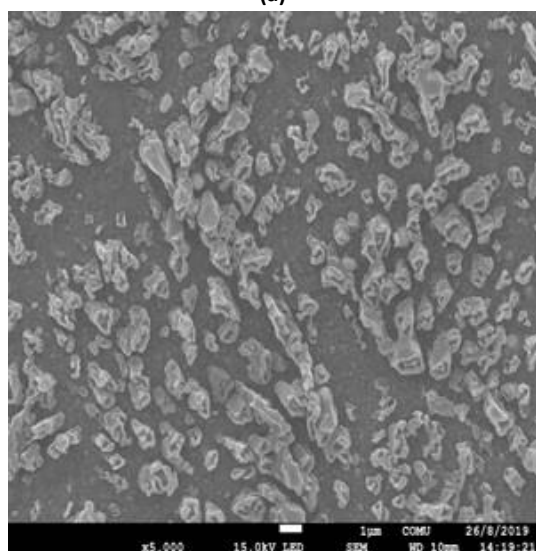
The value of the term  $\frac{dV}{d(\ln I)}$  in this expression is determined from the slope of the forward bias region of the  $I-V$  characteristic. The ideality factor  $n$  was calculated to be 1.93 using the traditional method.

### 3.4. SEM and AFM Analyses

The morphological features of the CdS/C<sub>10</sub>H<sub>10</sub>N<sub>2</sub> film were analyzed by SEM measurements, as shown in Figure 7 a–b. Charging effects induce the deflection of the incident beam and emitted secondary electrons due to the external electric field, resulting in image distortion and, in some cases, rendering their capture impossible. To prevent such false effects, various methods have been developed. One of them is the reduction of beam energy in low voltage scanning electron microscopy (LVSEM) (Cazaux, 2004). For SEM analysis, gold-palladium plating (80–20%) was performed by first applying a vacuum of  $8 \times 10^{-1}$  mbar/Pa and then applying a voltage of 10 mA in the Quorum coating device for 60 seconds to prevent charging on the surface of the samples and to increase the conductivity properties of the samples. The palladium layer thickness is approximately 3–4 nm. In another study by Nallathambi et al. Palladium was used as a coating material (Nallathambi et al., 2018). The SEM images show that the film surface had irregularities and did not have a periodic arrangement of the grains. The CdS/C<sub>10</sub>H<sub>10</sub>N<sub>2</sub> film showed an irregular and hollow structure.



(a)



(b)

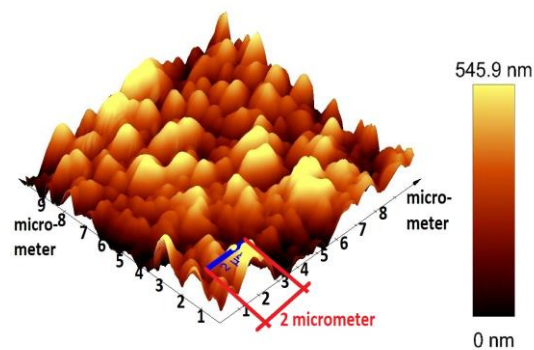
Figure 7 a-b. SEM images of CdS/C<sub>10</sub>H<sub>10</sub>N<sub>2</sub> film.

The AFM images of the CdS/C<sub>10</sub>H<sub>10</sub>N<sub>2</sub> film in three dimensions (9 µm × 9 µm) are shown in Figure 8 (a–c). These images, taken at different locations on the film, show irregularly shaped grains ranging in size from 195 nm to 240 nm.

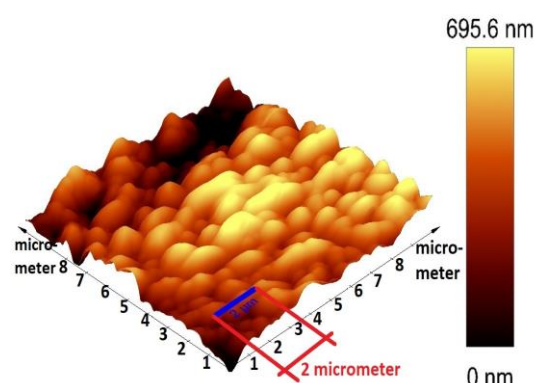
#### 4. Conclusion

The study began with the preparation of a CdS film on an ITO substrate using the CBD method. Then, a C<sub>10</sub>H<sub>10</sub>N<sub>2</sub> film was spin-coated on the CdS film to produce a diode device. Comprehensive characterization procedures, SEM, AFM, XRD, and I-V measurements were carried out. According to the SEM and AFM analyses, the CdS/C<sub>10</sub>H<sub>10</sub>N<sub>2</sub> film exhibited an irregular and hollow structure. The XRD results showed peaks for the CdS/C<sub>10</sub>H<sub>10</sub>N<sub>2</sub> films in the 2θ range of 27.00–67.00 degrees. Current-voltage measurements showed that the diode device had a threshold voltage value of 1.5 volts

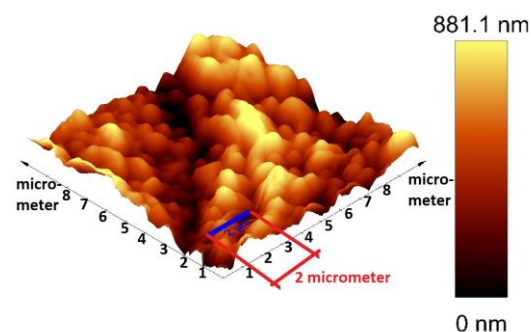
and conducted current in one direction with a rectification factor of  $2.91 \times 10^2$ , confirming its diode properties.



(a)



(b)



(c)

Figure 8 a-c. AFM images of CdS/C<sub>10</sub>H<sub>10</sub>N<sub>2</sub> film.

The *n* value, calculated using Equation 5, was found to be 1.93, indicating non-ideal behavior of the diode. This observation is significant as it marks the absence of prior applications of aminoquinolines as basic electronic switching elements such as diodes. Our study aimed to demonstrate the feasibility of producing a diode using the organic compound 4-amino-2-methyl-quinoline in conjunction with cadmium sulfide. By introducing this diode to the literature, we aim to provide researchers with an alternative avenue for specific studies in this domain.

#### Declaration of Ethical Standards

The authors declare that they comply with all ethical standards.

#### Credit Authorship Contribution Statement

Author-1: Conceptualization, investigation, methodology and software, visualization and writing – original draft.

Author-2: Conceptualization, investigation, methodology and software, supervision and writing – review and editing.

#### Declaration of Competing Interest

The authors have no conflicts of interest to declare regarding the content of this article.

#### Data Availability Statement

All data generated or analyzed during this study are included in this published article.

## 5. References

- Assili, K., Selmi, W., Alouani, K., & Vilanova, X. (2019). Computational study and characteristics of In<sub>2</sub>S<sub>3</sub> thin films: effects of substrate nature and deposition temperature. *Semiconductor Science and Technology*, 34(4).  
<https://doi.org/10.1088/1361-6641/ab0446>
- Aybek A. Ş., R. H. (2018). Some Physical Properties of FTO/n-CdS/Au Structure. *Chalcogenide Letters*, 15, 583-590.
- Braun, D. E., Gelbrich, T., Kahlenberg, V., & Griesser, U. J. (2015). Solid state forms of 4-aminoquinoline - From void structures with and without solvent inclusion to close packing. *CrystEngComm*, 17(12), 2504-2516.  
<https://doi.org/10.1039/C5CE00118H>
- Cazaux, J. (2004). About the Mechanisms of Charging in EPMA, SEM, and ESEM with Their Time Evolution. *Microscopy and Microanalysis*, 10, 670-684.  
<https://doi.org/10.1017/S1431927604040619>
- Demir, H. Ö., Meral, K., Aydoğan, Ş., Bozgeyik, M. S., & Bayır, E. (2015). Synthesis, characterization and diode application of poly(4-(1-(2-phenylhydrazono)ethyl)phenol). *Journal of Materials Chemistry C*, 3(22), 5803-5810.  
<https://doi.org/10.1039/c5tc00857c>
- Demir, R. (2010). *The study on some physical properties of CdS thin films obtained by chemical bath deposition method* (Publication Number 269644) [Doctorate, Anadolu University, TURKEY]. Council of Higher Education Thesis Center.
- Demir, R., & Gode, F. (2015). Structural, optical and electrical properties of nanocrystalline CdS thin films grown by chemical bath deposition method. *Chalcogenide Letters*, 12, 43-50.
- Demir, R., & Göde, F. (2018). Preparation and Characterization of Polycrystalline CdS Thin Films Deposited by Chemical Bath Deposition. *Materials Focus*, 7(3), 351-355.  
<https://doi.org/10.1166/mat.2018.1525>
- Demir, R., Okur, S., & Şeker, M. (2012). Electrical Characterization of CdS Nanoparticles for Humidity Sensing Applications. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(8), 3309-3313.  
<https://doi.org/10.1021/ie201509a>
- Durmuş, H., & Karataş, Ş. (2019). The analysis of the electrical characteristics and interface state densities of Re/n-type Si Schottky barrier diodes at room temperature. *International Journal of Electronics*, 106, 507-520.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1080/00207217.2018.1545145>
- Farag, A. A. M., Yahia, I. S., & Fadel, M. (2009). Electrical and photovoltaic characteristics of Al/n-CdS Schottky diode. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(11), 4906-4913.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.03.034>
- Güllü, Ö., Aydoğan, Ş., & Türüt, A. (2008). Fabrication and electrical characteristics of Schottky diode based on organic material. *Microelectronic Engineering*, 85, 1647-1651.  
<https://doi.org/10.1016/j.mee.2008.04.003>
- Kaleli, M., Parlak, M., & Erçelebi, Ç. (2011). Studies on device properties of an n-AgIn<sub>5</sub>Se<sub>8</sub>/p-Si heterojunction diode. *Semiconductor Science and Technology*, 26(105013), 1-7.  
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1088/0268-1242/26/10/105013>
- Karataş, Ş. (2010). Effect of series resistance on the electrical characteristics and interface state energy distributions of Sn/p-Si (MS) Schottky diodes. *Microelectronic Engineering*, 87, 1935-1940.  
<https://doi.org/10.1016/j.mee.2009.11.168>
- Karataş, Ş., Altındal, Ş., Türüt, A., & Çakar, M. (2007). Electrical transport characteristics of Sn/p-Si schottky contacts revealed from I-V-T and C-V-T measurements. *Physica B*, 392, 43-50.  
<https://doi.org/doi:10.1016/j.physb.2006.10.039>
- Kaya, İ., Kolcu, F., Demiral, G., Ergül, H., & Kiliç, E. (2015). Synthesis and characterization of imine polymers of aromatic aldehydes with 4-amino-2-methylquinoline via oxidative polycondensation. *Designed Monomers and Polymers*, 18(1), 89-104.  
<https://doi.org/10.1080/15685551.2014.971395>
- Nallathambi, P., Lal, S. K., Boopalakrishnan, G., Kumar, A., Umamaheswari, C., Gogoi, R., Yadav, S. K., Gupta, A., Meshram, N. M., & Ilangovan, R. (2018). Scanning Electron Microscopy and PCR based methods for detection of False Smut [Ustilagoideae virens (Cooke) Takahashi] Chlamydo spores associated with Rice (Oryza sativa) seeds. *Vegetos*, 31(1), 20-27.  
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5958/2229-4473.2018.00003.4>
- Olusola, O. I., Salim, H. I., & Dharmadasa, I. M. (2016). One-sided rectifying p-n junction diodes fabricated

from n-CdS and p-ZnTe:Te semiconductors. *Mater. Res. Express*, 3(095904), 1-15.  
<https://doi.org/10.1088/2053-1591/3/9/095904>

Ramaiah Subba Kodigala, P. R. D., Hill A.E., Tomlinson R.D., Bhatnagar A.K. (2001). Structural and optical investigations on CdS thin films grown by chemical bath technique. *Materials Chemistry and Physics*, 68, 22-30.

Reddy, T. S., & Kumar, M. C. S. (2016). Effect of substrate temperature on the physical properties of co-evaporated Sn<sub>2</sub>S<sub>3</sub> thin films. *Ceramics International*, 42(10), 12262-12269.  
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.04.172>

Rocha, F. S., Gomes, A. J., Lunardi, C. N., Kaliaguine, S., & Patience, G. S. (2018). Experimental Methods in Chemical Engineering: Ultraviolet Visible Spectroscopy—UV-Vis. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 96, 2512-2517.  
<https://doi.org/10.1002/cjce.23344>




Yakuphanoglu, F. (2007). Electrical characterization and interface state density properties of the ITO/C-70/Au Schottky diode. *Journal of Physical Chemistry C*, 111(3), 1505-1507.  
<https://doi.org/10.1021/jp066912q>





## *Rumex crispus* L.'dan Sekonder Metabolitlerin Kromatografik Yöntemlerle İzolasyonu ve Tayini

### Isolation and Determination of Secondary Metabolites from *Rumex crispus* L. by Chromatographic Methods

Elif GÜNAY<sup>1</sup> , Dilek MUTLU<sup>2</sup> , Deniz KÜPÇÜK<sup>1</sup> , Gizem YILDIRIM BAŞTEMUR<sup>2</sup> ,  
Sabriye PERÇİN ÖZKORUCUKLU<sup>2\*</sup> 

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 14.05.2024

Kabul/Accepted: 27.08.2024

Yayımlandı/Published:02.12.2024

<sup>1</sup> İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Moleküler Biyoteknoloji ve Genetik Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü, İstanbul, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

İnsanlar binlerce yıldır bitkilerin sağlık açısından faydalı özelliklerinden yararlanmaktadır. Günümüzde, tıp biliminin yanı sıra başta kozmetik endüstrisinde olmak üzere birçok sektörde bitkiler kullanılmaktadır ve bitkilerin fitokimyasal içeriklerinin belirlenmesine ilişkin çalışmalar da hızla artmaktadır. Halk arasında çeşitli amaçlarla kullanılan *Rumex crispus* L. bitkisi özellikle fenolik bileşikler ve antrakinonlar olmak üzere zengin sekonder metabolit içeriğinden dolayı dikkat çekmektedir. Bu çalışmada Türkiye’de yetişen *Rumex crispus* L. bitkisinden katma değere sahip fenolik bileşik ve antrakinonların izolasyonu pratik ve ekonomik bir metot olan gravity kolon kromatografisi ile gerçekleştirilmiştir. Ekstrakt apolar çözücü sistemden polar çözücü sistemine doğru fraksiyonlara ayrılmış ve bu fraksiyonlardaki fenolik bileşik ve antrakinon miktarları ters faz sıvı kromatografisi (RPLC) yöntemi ile belirlenmiştir. Protocateşik asit, gentisik asit, kafeik asit, p-kumarik asit, polydatin, kumarin, resveratrol ve ellajik asit izolasyonu için etil asetat-metanol (6:4) çözücü sisteminin uygun olduğuna karar verilmiştir. Sonuç olarak, bitkilerdeki sekonder metabolitlerin araştırılmasında maliyeti düşük olan gravity kolon kromatografisi kullanılarak fenolik bileşiklerin ve antrakinonların saflaştırılabileceği ortaya konulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** *Rumex crispus* L.; Gravity kolon kromatografisi; RPLC; Fenolik bileşik; Antrakinon.

#### Abstract

People have been benefiting from the health benefits of plants for thousands of years. Nowadays, plants are used in many sectors, especially in the cosmetic industry, as well as medical science, and studies on the determination of the phytochemical contents of plants are rapidly increasing. *Rumex crispus* L., a plant commonly used for various purposes by the public, attracts attention due to its rich secondary metabolite content, especially phenolic compounds and anthraquinones. In this study, the isolation of valuable phenolic compounds and anthraquinones from the *Rumex crispus* L. plant grown in Turkey was carried out by gravity column chromatography, which is a practical and economical method. The extract was divided into fractions from the nonpolar solvent system to the polar solvent system, and the amounts of phenolic compounds and anthraquinones in these fractions were determined by the reverse phase liquid chromatography (RPLC) method. It was decided that the ethyl acetate-methanol (6:4) solvent system was suitable for the isolation of protocatechuic acid, gentisic acid, caffeic acid, p-coumaric acid, polydatin, coumarin, resveratrol and ellagic acid. Consequently, it has been revealed that phenolic compounds and anthraquinones can be purified by using low-cost gravity column chromatography in the investigation of secondary metabolites in plants.

**Keywords:** *Rumex crispus* L.; Gravity column chromatography; RPLC; Phenolic compound; Anthraquinone.

#### 1. Giriş

Bitkiler, insanlığın başlangıcından beri tedavi edici güçlerinden yararlanmak için ilaç olarak kullanılmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından yayınlanan bir rapora göre dünya üzerindeki insanların yaklaşık %80'i, hastalıkları tedavi etmek için geleneksel bilgilere dayanarak bitki ve bitki özlerini kullanmaktadır (WHO, 1993). Bu amaçla kullanılan ve üzerinde çalışmalar yürütülen bir bitki olan *Rumex crispus* L., Türkiye’de yetişen çok yıllık yabani bir bitki olup genellikle nehir kıyıları, bataklıklar ve boş araziler gibi çeşitli ekosistemlerde yetişen, 30-150 cm arasında değişen boylara sahip bir bitkidir (Yıldırım vd. 2001). *Rumex*

*crispus* L., geleneksel tıpta gastrointestinal sistem, antiinflamatuvar ve artrit gibi bozuklukların düzenlenmesinde, dermatolojik sorunlarda, ateşli hastalıkların tedavisinde kullanılan ve antioksidan, antitripanozomal (Orban-Gyapai vd. 2017) ve antimikrobiyal (Çoruh vd. 2008) özelliklerinden de yararlanan önemli bir bitki olarak kabul edilmektedir (Başkan vd. 2007, İdris vd. 2017).

Ayrıca bu bitkinin kurutulmuş kökleri kabızlık şikayetlerinde, mesane enfeksiyonlarında, safra kesesi hastalıklarında ve dermatolojik sorunların tedavisinde kullanılmaktadır (Vasas vd. 2015, Larayetan vd. 2019). Sekonder metabolitler çevresel adaptasyonda, üreme

süreçlerinde, bitki savunmasında ve çevresel etkileşimlerde önemli işlevlere sahip organik bileşiklerdir. Fenolik bileşikler, bitkilerde bulunan en yaygın sekonder metabolitler arasında yer alır ve çeşitli kimyasal yapılar ve aktiviteler sergileyerek (Barba vd. 2014) anti-enflamatuar, antiviral, antibakteriyel, antioksidan, anti-aterojenik, antikolinesteraz, antimutajenik ve antikanser gibi çeşitli biyolojik etkilere katkıda bulunurlar (Sarıkahya vd. 2019, Fan vd. 2019). Antrakınonlar ise sekonder metabolitler içerisinde doğal pigmentlerin en büyük grubunu oluştururlar ve genellikle bitkilerde serbest formda veya glikozitler şeklinde bulunurlar (Fouillaud vd. 2016, Duval vd. 2016, Seigler, 2012). Antrakınonlar, antikanser, laksatif ve antimikrobiyal aktivitelere (Smolarz vd. 2013, Li-Weber vd. 2013, Huang vd. 2013) sahip oldukları bilinen bileşiklerdir ve özellikle physcion, chrysophanol, emodin, aloe-emodin ve rhein gibi bileşiklerin bu aktivitelere katkı sağladığı gösterilmiştir (Simoes vd. 2007).

*Rumex crispus* L. bitkisi, fenolik ve antrakınon bileşikleri bakımından zengin bir kaynak olarak literatürde tanımlanmıştır (Idris vd. 2017, Saoudi vd. 2021). Bu bitkinin biyoaktif bileşenlerini daha iyi anlamak ve farmakolojik etkilerini belirlemek, bitkilerden elde edilen bileşiklerin daha etkin bir şekilde kullanılmasını sağlayarak ilaç ve kozmetik endüstrisi gibi alanlarda yeni ürünlerin geliştirilmesine katkıda bulunabilmesi açısından önemli bir adımdır. Bitkilerdeki bu metabolitlerin türü ve miktarı, bitkinin genetik yapısına ve bitkinin yetiştiği çevresel şartlara bağlı olarak değişebilmektedir (Yıldırım Baştemur vd. 2024). Bu nedenle bu bitkinin bileşenlerinin tıbbi ve dermokozmetiğe yapabileceği katkıları tanımlayabilmek için basit ve etkin bir şekilde izolasyonun gerçekleştirilmesi ve güvenilir bir analiz yöntemi ile içeriklerinin belirlenmesi gereklidir.

Bitkilerin izolasyonu ve kantitatif analizlerinde kullanılan teknikler arasında kromatografik yöntemler öne çıkmaktadır. Kromatografik teknikler arasında ise gravity kolon kromatografisi ve yüksek performanslı sıvı kromatografisi (HPLC) çalışmaları yaygın olarak yer almaktadır (Guo vd. 2011, Nazeam vd. 2020, Pham vd. 2020, Tsamo vd. 2021, Abdisa ve Zelalem, 2022). Kolon kromatografisi, bitkisel özütlerdeki bileşenleri izolasyonu için etkili bir yöntemdir. Bitki özütleri, çeşitli polariteye sahip bileşenleri içerdiğinden dolayı gravity kolon kromatografisi bu aşamada ideal bir ayırım sağlamaktadır (Skoog, 2009). HPLC ise yüksek tespit hassasiyeti, etkin ayırım ve hızlı analiz süresi nedeniyle sekonder metabolitlerin kantitatif tayinlerinde yaygın olarak kullanılan bir analiz yöntemi olarak öne çıkmaktadır

(Arora vd. 2022, Ntemafack vd. 2023, Yıldırım Baştemur vd. 2024).

Bu çalışmada, Türkiye'de yetişen *Rumex crispus* L. bitki kök örneğinden elde edilen ekstraktan fenolik bileşiklerin ve antrakınonların gravity kolon kromatografisi ile izolasyonu gerçekleştirilmiştir. Elde edilen fraksiyonlardaki bileşiklerin miktar tayinleri ters faz sıvı kromatografisi (RPLC) yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışma ile *Rumex crispus* L. bitki kök örneğinden uygun solvent sisteminin kullanılmasıyla fenolik bileşiklerin ve antrakınonların etkin bir şekilde tespit edilerek izolasyonunun yapılabileceği gösterilmektedir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Kullanılan Kimyasallar

Metanol, hekzan, etil asetat, orto-fosforik asit ve silika jel 60 (70-230 mesh ASTM) Merck Pvt. Ltd.; standart bileşikler (protokateşik asit, kateşin, gentisik asit, kafeik asit, p-kumarik asit, polydatin, kumarin, resveratrol, ellajik asit, kuersetin, aloe-emodin, rhein, emodin, chrysophanol, physcion) ve tiyüre Sigma-Aldrich; ayırımı yapılacak bitki kök örneği miktarına göre 3 cm çapa sahip 60 cm uzunluğunda kullanılan musluklu cam kolon Isolab firmasından temin edilmiştir. Çalışma boyunca Milli-Q (Millipore, Bedford, MA, ABD) su filtreleme sisteminde filtrelenen su (direnc  $\geq 18,2$  M $\Omega$  cm) kullanılmıştır.

### 2.2. Bitkilerin Toplanması ve Ekstraksiyonu

Bu çalışmada, 2023 yılının Nisan ayında Başakşehir/İstanbul konumundan toplanan *Rumex crispus* L. bitkisi kullanılmıştır. Bitkiler toplandıktan sonra İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Botanik Anabilim Dalında Doç. Dr. İbrahim Sırrı Yüzbaşıoğlu tarafından tür tayinleri yapılmış ve örnek numarası (ISTE 118534) verilmiştir. Bitki laboratuvar ortamında kurutulmuş ve kök kısmı ayrılarak öğütücü yardımıyla parçalanmıştır. Öğütücü yardımıyla küçük parçalar haline getirilen bitki kök örneği havanda sıvı azot yardımıyla toz haline getirilmiştir. Elde edilen bitki kökü tozundan 2,5 gram tartılarak üzerine 50 mL metanol eklenmiştir. Ekstraksiyon işlemi, %40 güç ile 10 dakika boyunca +4°C'de prob destekli ultrasonik homojenizatör cihazı (Bandelin, Sonopuls HD 4100) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen karışım 9500 rpm'de 15 dakika santrifüjlenerek süpernatant kısmı toplanmıştır. Vakumlu santrifüj yoğunlaştırıcı (Savant, Speedvac SC110) kullanılarak çözücü ekstraktan uzaklaştırılmış ve ham ekstrakt elde edilmiştir. Ekstrakt metanolde çözülmüş ve membran filtreden (Sartorius model 0,45  $\mu$ m politetrafloroetilen) geçirilerek kromatografik analizler için +4°C'de saklanmıştır.

### 2.3. Gravity Kolon Kromatografisi

Fenolik bileşiklerin ve antrakınonların en iyi şekilde elüsyon ve ayrılmanın sağlanması amacıyla polaritesi düşükten yükseğe doğru değişen ikili gradient solvent sistemleri kullanılmış ve Bajpai vd. (2016) tarafından uygulanan yöntem modifiye edilerek uygulanmıştır. Hekzan-etil asetat ve etil asetat-metanol ikili gradient solvent sisteminin çalışmada kullanılan oranları ve elde edilen fraksiyon numaraları Çizelge 1'de verilmiştir. Kolonun hazırlanması için dolgu malzemesi olarak kullanılan silika jel kolona hekzan yardımıyla yüklenmiş ve üst yüzeyine kurutulmuş ince bir kum tabakası ilave edilmiştir. Bitki kök örneği için her bir solvent sisteminden 30 mL geçirilerek fraksiyonlar elde edilmiştir.

**Çizelge 1.** İkili gradient solvent sisteminden elde edilen fraksiyonlar.

Solvent Sistemi	Oran	Fraksiyon Numarası
Hekzan-Etil Asetat	10:0	1
Hekzan-Etil Asetat	8:2	2
Hekzan-Etil Asetat	6:4	3
Hekzan-Etil Asetat	4:6	4
Hekzan-Etil Asetat	2:8	5
Hekzan-Etil Asetat	0:10	6
Etil Asetat-Metanol	8:2	7
Etil Asetat-Metanol	6:4	8
Etil Asetat-Metanol	4:6	9
Etil Asetat-Metanol	2:8	10
Etil Asetat-Metanol	0:10	11

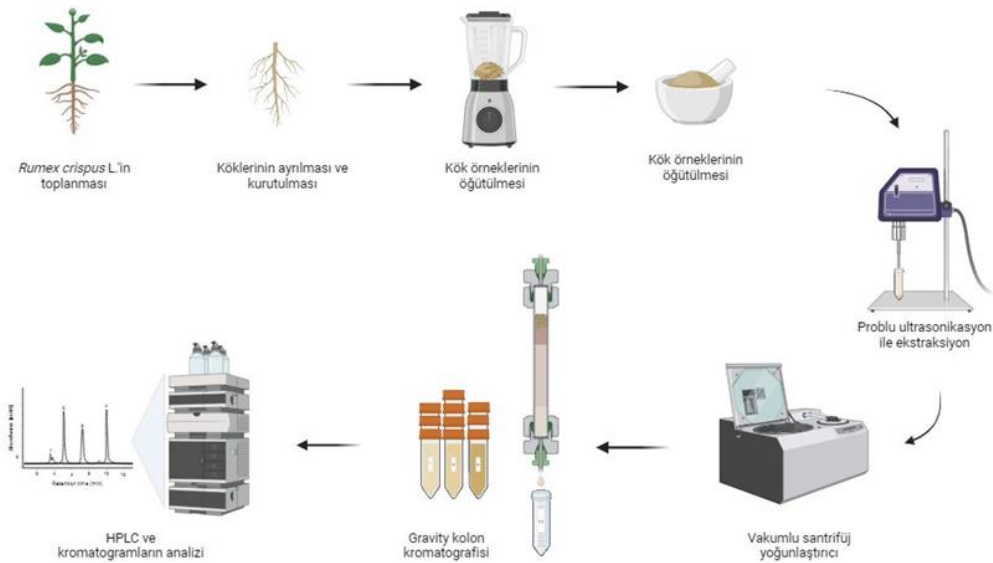
### 2.4. HPLC Analizi

Kromatografik çalışma için LC-10AD VP pompası, SIL-20A autosampler, bir CTO-10AS kolon fırını, DGU-20A gaz

giderme ünitesi ve bir SPD-M20A diyot dizi detektöründen (DAD) oluşan Shimadzu HPLC sistemi ve 25 cm x 4,6 mm, 5 µm boyutlarına sahip ZORBAX Eclipse Plus C18 kolonu kullanılmıştır. RPLC analizleri Akpınar vd. (2024) ve Yıldırım Baştemur vd. (2024) tarafından uygulanan yöntemler üzerinde düzenlemeler yapılarak gerçekleştirilmiştir. Gradient program uygulanan çalışmada A mobil fazı olarak %0,5 (v/v) fosforik asit-deiyonize su karışımı, B mobil fazı olarak ise metanol kullanılmıştır. Gradient programındaki zaman-hacim değişiklikleri şöyledir: 0–2 dk, %20 B; 2–7 dk, %20–%30 B; 7–15 dk, %30–%45 B; 15–33 dk, %45–%90 B; 33–35 dk, %90 B; 35–45 dk, %90–%20 B. Hareketli faz akış hızı 1,0 mL/dakika, kolon sıcaklığı 25 °C, enjeksiyon hacmi 20 µL, çalışma dalga boyu 210 nm ve enjeksiyon süresi 45 dakikadır.

### 2.5. Stok Çözeltilerin Hazırlanması

Standart bileşikler (protokateşik asit, kateşin, gentisik asit, kafeik asit, p-kumarik asit, polydatin, kumarin, resveratrol, ellajik asit, kuersetin, aloe-emodin, rhein, emodin, chrysophanol, physcion) metanol ortamında çözülerek 25 µg/mL'lik stok çözeltileri hazırlanmıştır. Stok çözeltilerden her bir bileşik için belirlenen konsantrasyonda metanol ile seyreltme yapılarak kalibrasyon çözeltileri hazırlanmıştır. Kalibrasyon çözeltileri; protokateşik asit, polydatin, resveratrol, rhein ve emodin bileşikleri için 0,25-2 µg/mL derişim aralığında; kateşin, gentisik asit, kafeik asit, p-kumarik asit, kumarin, ellajik asit, kuersetin ve aloe-emodin bileşikleri için 0,5-2 µg/mL derişim aralığında; chrysophanol bileşiği için 0,25-5 µg/mL derişim aralığında; physcion bileşiği için 0,025-1 µg/mL derişim aralığında çalışılmıştır.

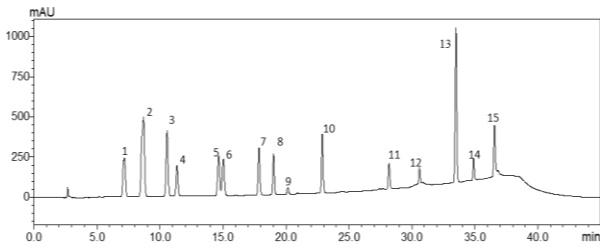


**Şekil 1.** Çalışmanın grafiksel özeti



### 3. Bulgular ve Tartışma

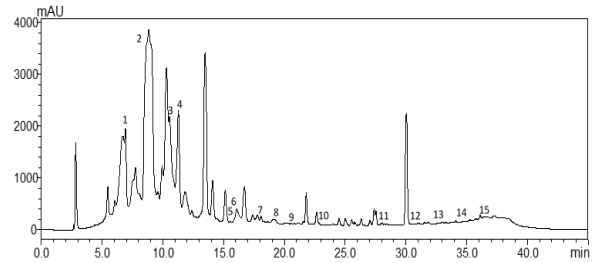
*R. crispus* L. bitki kök örneğinin ekstraksiyonu prob destekli ultrasonik homojenizatör ile gerçekleştirilmiştir. Ekstrakte edilmiş örneğe apolardan polara 3 farklı çözücünün çeşitli oranlarında 11 farklı çözücü sisteminde gravity kolon kromatografisi prosedürü uygulanmış ve 11 fraksiyon elde edilmiştir. Fraksiyonlardaki fenolik bileşik ve antrakinon miktarları RPLC ile tayin edilmiştir (Şekil 1). RPLC çalışmasında ilk olarak bileşiklerin HPLC profilleri ve alıkonma süreleri belirlenmiştir. Standart bileşiklerin alıkonma süreleri belirlendikten sonra 15 bileşiğin bir arada bulunduğu karışımın enjeksiyonu gerçekleştirilmiş ve bileşiklerin aynı anda kantitatif analize uygun olduğunu gösteren kromatogram Şekil 2'de verilmiştir. Her bir bileşiğin doğrusal aralığının belirlenmesi için 6 farklı derişimde üç tekrarlı RPLC analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen pik alanı değerlerine karşı derişimlerin grafiğe geçirilmesiyle kalibrasyon eğrileri oluşturulmuştur. Bileşiklerin korelasyon katsayıları 0,9990-0,9999 aralığında bulunmuştur ve kabul kriterini ( $r \geq 0,999$ ) sağlamaktadır (Bulduk ve Gökçe, 2021). *R. crispus* L. bitki kök örneğindeki fenolik bileşiklerin ve antrakinonların kantitatif tayini bileşiklere ait pik alanlarına karşı derişim verileri ile oluşturulan kalibrasyon doğrusundan elde edilen regresyon denklemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 2.** Fenolik bileşikler ve antrakinonların standart karışımına ait kromatogram. (1) Protokateşik asit, (2) Kateşin, (3) Gentisik asit, (4) Kafeik asit, (5) p-Kumarik asit, (6) Polydatin, (7) Kumarin, (8) Resveratrol, (9) Ellajik asit, (10) Kuersetin, (11) Aloe-emodin, (12) Rhein, (13) Emodin, (14) Chrysophanol, (15) Physicon.

Gravity kolon kromatografisinden elde edilen her bir çözücü sistemindeki fraksiyonların üç tekrarlı olacak şekilde RPLC ile analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre *R. crispus* L. bitki kök örneğinin fenolik bileşik ve antrakinon içeriği Çizelge 2'de gösterilmiştir. Buna göre protokateşik asit (9,802 µg/mg), gentisik asit (5,437 µg/mg), kafeik asit (84,124 µg/mg), p-kumarik asit (0,865 µg/mg), polydatin (0,561 µg/mg), kumarin (3,289 µg/mg), resveratrol (0,42 µg/mg), ve ellajik asit (2,194 µg/mg) için etil asetat-metanol (6:4) solvent sistemine sahip 8 numaralı fraksiyondan en yüksek bileşik miktarları elde edilmiştir. Kateşin (37, 238 µg/mg) ve kuersetin (0,513 µg/mg) için en yüksek miktarlar 7 numaralı fraksiyonda; aloe-emodin (11,308 µg/mg) ve rhein (4,379

µg/mg) için ise 11 numaralı fraksiyonda bulunmuştur. Emodin (0,279 µg/mg) 4 numaralı heksan-etil asetat (4:6) çözücü sistemindeki fraksiyonda, chrysophanol (11,522 µg/mg) 3 numaralı heksan-etil asetat (6:4) çözücü sistemindeki fraksiyonda ve physicon (1,97 µg/mg) 2 numaralı heksan-etil asetat (8:2) çözücü sistemindeki fraksiyonda en yüksek miktarlarda tespit edilmiştir. Elde edilen kromatogramlar ve her bileşik için tespit edilen miktarlar karşılaştırılmış, sonuç olarak 8 numaralı fraksiyonda protokateşik asit, gentisik asit, kafeik asit, p-kumarik asit, polydatin, kumarin, resveratrol ve ellajik asit dahil olmak üzere sekiz fenolik bileşiğin en yüksek miktarda bulunduğu tespit edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda etil asetat-metanol (6:4) oranında kullanılan çözücünün sekiz metabolitin izolasyonu için en uygun çözücü sistemi olduğuna karar verilmiştir. Sekiz numaralı fraksiyonun RPLC kromatogramı Şekil 3'de verilmektedir.



**Şekil 3.** 8 numaralı fraksiyona ait kromatogram (1) Protokateşik asit, (2) Kateşin, (3) Gentisik asit, (4) Kafeik asit, (5) p-Kumarik asit, (6) Polydatin, (7) Kumarin, (8) Resveratrol, (9) Ellajik asit, (10) Kuersetin, (11) Aloe-emodin, (12) Rhein, (13) Emodin, (14) Chrysophanol, (15) Physicon.

Amarowicz vd. (2003), yeşil çaydan sekonder metabolit izolasyonu için kloroform-metanol-su (65:35:10) solvent sistemini kullanarak fraksiyonlama sonucunda kateşin tespit etmişlerdir. Nuzula vd. (2023) *Curcuma aeruginosa* bitkisinden sekonder metabolitlerin izolasyonu için gravity kolon kromatografisinde fraksiyonlama ve alt fraksiyonlama yaparak çeşitli solvent sistemleri üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Curdione metabolitini elde etmek için ideal solvent sistemi n-hekzan-diklorometan (9:1) olarak belirlenmiştir. Guo vd. (2011), *Rumex japonicus*'den emodini n-hekzan-etanol-su (18:22:3), chrysophanolu n-hekzan-etanol-su (18:12:3) ve physiconu aynı solvent sisteminde (18:10:3) oranlarında izolasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Minh vd. (2019)'nın *R. crispus* L. kök örneklerini kullanarak yaptıkları çalışmada antrakinon grubundan chrysophanol ve physicon bileşiklerini, çalışmamızda kullanılan çözücü sistemi ve oranı ile benzer olan heksan-etil asetat (9:1) çözücü sisteminde izole etmişlerdir. Karaduttan (*Morus nigra* L.) antioksidan özellik gösteren bileşiklerin izolasyonu için kromatografik yöntemler kullanılmış ve ideal çözücü sistemi su-metanol (20:80) olarak belirlenmiştir (Aybastier, 2021).

Çizelge 2. R. crispus L. bitki kök örneğinde bulunan fenolik bileşiklerin ve antrakinonların miktarları (µg/mg)

TE : Tespit Edilemedi.

Bileşik (µg/mg)	Fraksiyon No										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Protokateşik Asit	TE	TE	TE	TE	0,059 ± 0,007	TE	2,736 ± 0,212	9,802 ± 0,564	0,160 ± 0,078	0,223 ± 0,089	0,323 ± 0,103
Kateşin	TE	TE	TE	TE	1,023 ± 0,132	0,111 ± 0,034	37,238 ± 2,297	14,922 ± 1,658	0,885 ± 0,117	0,478 ± 0,043	0,059 ± 0,006
Gentisik Asit	TE	TE	TE	TE	TE	TE	2,304 ± 0,789	5,437 ± 1,432	0,005 ± 0,001	0,084 ± 0,011	0,225 ± 0,073
Kafeik Asit	TE	TE	TE	TE	3,275 ± 0,875	0,982 ± 0,231	47,645 ± 1,658	84,124 ± 2,348	18,485 ± 1,777	17,03 ± 0,431	25,29 ± 0,875
p-Kumarik Asit	TE	TE	TE	TE	TE	0,069 ± 0,007	0,012 ± 0,003	0,865 ± 0,065	0,001 ± 0,000	TE	TE
Polydatin	TE	TE	TE	TE	TE	TE	0,065 ± 0,008	0,561 ± 0,069	0,129 ± 0,005	0,190 ± 0,013	0,437 ± 0,003
Kumarin	TE	TE	TE	TE	TE	TE	1,131 ± 0,056	3,289 ± 0,009	0,160 ± 0,013	0,140 ± 0,008	0,033 ± 0,004
Resveratrol	TE	TE	TE	TE	TE	0,010 ± 0,003	0,100 ± 0,023	0,420 ± 0,032	0,083 ± 0,005	0,032 ± 0,006	TE
Ellajik Asit	TE	TE	TE	TE	0,016 ± 0,006	0,006 ± 0,001	1,433 ± 0,073	2,194 ± 0,874	0,142 ± 0,031	0,100 ± 0,004	0,641 ± 0,234
Kuersetin	TE	TE	TE	TE	TE	0,047 ± 0,007	0,513 ± 0,012	0,398 ± 0,007	0,005 ± 0,001	TE	0,071 ± 0,003
Aloe-Emodin	0,078 ± 0,008	0,194 ± 0,043	0,249 ± 0,065	0,057 ± 0,013	0,138 ± 0,007	0,331 ± 0,009	0,589 ± 0,039	1,139 ± 0,098	0,691 ± 0,065	3,384 ± 0,976	11,308 ± 2,985
Rhein	0,658 ± 0,023	0,056 ± 0,006	0,509 ± 0,009	TE	TE	TE	TE	0,191 ± 0,003	0,660 ± 0,045	1,182 ± 0,017	4,379 ± 0,029
Emodin	0,056 ± 0,007	0,100 ± 0,018	0,210 ± 0,076	0,279 ± 0,042	1,730 ± 0,671	0,170 ± 0,034	0,236 ± 0,023	0,263 ± 0,045	TE	TE	TE
Chrysophanol	0,014 ± 0,003	6,716 ± 1,745	11,522 ± 1,543	2,184 ± 0,698	2,144 ± 0,433	1,262 ± 0,112	0,977 ± 0,234	2,194 ± 0,194	0,396 ± 0,018	0,540 ± 0,200	1,198 ± 0,192
Physcion	0,857 ± 0,222	1,970 ± 0,083	0,726 ± 0,072	0,806 ± 0,042	0,317 ± 0,017	0,715 ± 0,031	0,584 ± 0,520	0,602 ± 0,059	0,324 ± 0,022	0,239 ± 0,093	0,145 ± 0,035

*Rumex crispus* L. bitkisinde fenolik bileşiklerin ve antrakınonların izolasyonuna ilişkin çalışmalar mevcut olup bu bileşiklerin eş zamanlı izolasyonuna ilişkin bir çalışma literatürde mevcut değildir. Bu çalışmanın sonuçları, *Rumex crispus* L. bitki kökünün gravity kolon kromatografisi ile çeşitli çözücü sistemlerinden katma değere sahip olan fenolik bileşikler ve antrakınonların izolasyonuna ilişkin bir bilimsel bulgu olarak sunulmaktadır. *R. crispus* L. köklerinin etil asetat ekstraktının nitrik oksit üretimini inhibe etmede ve sitokinlerin salgılanmasını azaltmada antiinflamatuvar etki gösterdiğinin ifade edilmesi ve *R. crispus* L.'nin diklorometan ve etil asetat ekstraktlarının, çeşitli metabolitlerin konsantrasyonu ile ilişkili olan daha güçlü antioksidan aktivite gösterdiği ile ilgili çalışmalar, yaptığımız çalışmada kullanılan etil asetat-metanol ekstraksiyonu ile fenolik bileşiklerin iyi bir şekilde izole edildiğini sergileyen verilerle uyumludur (Eom vd. 2020).

Farklı solvent sistemlerinin gravity kolon kromatografisine uygulanarak araştırılması sonucu, bileşenlerin ekstraksiyonu esnasında farklı solvent sistemlerinin farklı oranlarda etkin bir ayrımı, basit ve ucuz şekilde sağladığı sergilenmektedir. Bu çalışma ile uygun solvent sisteminin kullanılmasıyla fenolik bileşikler ve antrakınonlar gibi bileşenlerin etkin bir şekilde tespit edilerek izolasyonun yapılabileceği gösterilmektedir.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, *Rumex crispus* L. bitki köklerindeki fenolik bileşikler ve antrakınonların izolasyonu için gravity kolon kromatografisinde ikili gradient çözücü sistemleri (hekzan-etil asetat, etil asetat- metanol) ile çalışılmış ve elde edilen fraksiyonlar RPLC yöntemi ile analiz edilmiştir. Elde edilen verilere göre; etil asetat-metanol (6:4) çözücü sisteminden elde edilen fraksiyonun protokateşik asit, gentisik asit, kafeik asit, p-kumarik asit, polydatin, kumarin, resveratrol ve ellajik asit olmak üzere 8 adet sekonder metaboliti yüksek miktarlarda (0,42 µg/mg-84,124 µg/mg) içerdiği tespit edilmiştir. Fenolik bileşiklerin ve antrakınonların aynı anda izolasyonu için en uygun çözücü sisteminin etil asetat-metanol (6:4) olduğu sonucuna varılmış ve biyolojik olarak aktif sekonder metabolitlerin izolasyonu için gravity kolon kromatografisinin başarılı bir şekilde uygulandığı gösterilmiştir. Ayrıca ülkemizde yetişen *Rumex crispus* L. bitkisinde fenolik bileşik ve antrakınon miktarının fazla olması, izolasyonunun kolay olması gibi avantajları ile ilaç, gıda, boya ve kozmetik sektörlerinde ham madde olarak kullanılabileceği öngörülmektedir. Elde edilen bulgulara göre, bitkilerden sekonder metabolitlerin izolasyonu için

hem pratik hem de ekonomik bir yöntem sağlayan bu çalışma, ileride yapılacak olan araştırmalara faydalı olacağı düşünülmektedir.

#### Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

#### Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Araştırma, Deney tasarımı, Metodoloji, Analiz, Yazma –orijinal taslak

Yazar 2: Metodoloji, Görselleştirme, Yazma –orijinal taslak

Yazar 3: Araştırma, Deney tasarımı, Metodoloji, Yazma –orijinal taslak

Yazar 4: İnceleme ve düzenleme, Analiz ve yorumlama, Yazma –orijinal taslak

Yazar 5: İnceleme ve düzenleme, Denetleme/danışmanlık, Proje Yöneticisi,

#### Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

#### Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

#### Teşekkür

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir (Proje numarası: FLO-2023-40354). İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Botanik Anabilim Dalından Doç. Dr. İbrahim Sırrı Yüzbaşıoğlu'na bitki tür tayinindeki katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

#### 5. Kaynaklar

- Abdisa Z. ve Zelalem G. (2022). Phytochemical Investigation of *Rumex Abyssinicus* Root Barks and In Vitro Evaluation of Its Antibacterial Activities. *Journal of the Turkish Chemical Society Section A Chemistry*, 9(4), 1063-1072. <https://doi.org/10.18596/jotcsa.1035039>
- Arora, M., Mahajan, A., ve Sembi, J. K. (2022). Extraction and characterization of secondary metabolites from *Crepidium acuminatum* (D. Don) Szlach: A miraculous orchid. *South African Journal of Botany*, 149, 693-700. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.06.014>
- Akpınar, R., Yıldırım Baştemur, G., Bıçak, B., Sanli, N. O., Mertoğlu Kamalı, E., Pekmez, M., Kececi Gündüz, S., ve Perçin Özkorucuklu, S. (2024). Phytochemical profiling, in vitro biological activities, and in silico (molecular docking and absorption, distribution, metabolism, excretion, toxicity) studies of *Polygonum cognatum* Meissn. *Journal of Separation Science*, 47(1), 2300750. <https://doi.org/10.1002/jssc.202300750>
- Amarowicz, R., Shahii, F., ve Wiczowski, W. (2003). Separation of individual catechins from green tea using silica gel column chromatography and HPLC. *Journal of Food Lipids*, 10(2), 165–177.

- <https://doi.org/10.1111/j.1745-4522.2003.tb00013.x>
- Aybastır, Ö., (2021). Karaduttan (*Morus Nigra* L.) antioksidan bileşiklerin kromatografik yöntemlerle izolasyonu ve tayini. *Gıda*, 46 (1), 32-41. <https://doi.org/10.15237/gida.GD20114>
- Bajpai, V. K., Majumder, R., ve Park, J. G. (2016). Isolation and purification of plant secondary metabolites using column-chromatographic technique. *Bangladesh Journal of Pharmacology*, 11(4), 844-848. <https://doi.org/10.3329/bjp.v11i4.28185>
- Barba, F. J., Esteve, M. J., ve Frígola, A. (2014). Bioactive Components from Leaf Vegetable Products, Studies in Natural Products Chemistry, In: Atta ur, R. (ed.), Chapter 11, Elsevier, ISBN: 1572-5995, 321-346.
- Başkan, S., Daut-Ozdemir, A., Günaydin, K., ve Erim, F. B. (2007). Analysis of anthraquinones in *Rumex crispus* by micellar electrokinetic chromatography. *Talanta*, 71(2), 747-750. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2006.05.018>
- Bulduk İ. ve Gökçe S., (2021). Farmasötik Formülasyonlarda Levodopa ve Karbidopa Miktarının Belirlenmesi için Etkili ve Güvenilir bir HPLC Yönteminin Geliştirilmesi ve Validasyonu. *Hacettepe Journal of Biology and Chemistry*, 49 (4), 413-422. <https://doi.org/10.15671/hjbc.773988>
- Çoruh, I., Gormez, A., Ercisli, S., ve Sengul, M. (2008). Total phenolic content, antioxidant, and antibacterial activity of *Rumex crispus* grown wild in Turkey. *Pharmaceutical Biology*, 46(9), 634-638. <https://doi.org/10.1080/13880200802182240>
- Duval, J., Pecher, V., Poujol, M., ve Lesellier, E. (2016). Research advances for the extraction, analysis and uses of anthraquinones: A review. *Industrial Crops and Products*, 94, 812-833. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.09.056>
- Eom T, Kim E, ve Kim J.S. (2020), In vitro antioxidant, antiinflammation, and anticancer activities and anthraquinone content from *Rumex crispus* root extract and fractions. *Antioxidants (Basel)*, 9(726), 1-13. <https://doi.org/10.3390/antiox9080726>
- Fan, M., Ding, H., Zhang, G., Hu, X., ve Gong, D. (2019). Relationships of dietary flavonoid structure with its tyrosinase inhibitory activity and affinity. *LWT - Food Science and Technology*, 107, 25-34. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.02.076>
- Fouillaud, M., Venkatachalam, M., Girard-Valenciennes, E., Caro, Y., ve Dufossé, L. (2016). Anthraquinones and derivatives from marine-derived fungi: Structural diversity and selected biological activities. *Marine Drugs*, 14(4), 64. <https://doi.org/10.3390/md14040064>
- Guo, S., Feng, B., Zhu, R., Ma, J., ve Wang, W. (2011). Preparative isolation of three anthraquinones from *Rumex japonicus* by high-speed counter-current chromatography. *Molecules*, 16(2), 1201-1210. <https://doi.org/10.3390/molecules16021201>
- Huang, P-H., Huang, C-Y., Chen, M-C., Lee, Y-T., Yue, C-H., Wang, H-Y., ve Lin, H. (2013). Emodin and aloe-emodin suppress breast cancer cell proliferation through ER alpha Inhibition. *Evidence-based Complementary and Alternative Medicine*, 376123. <https://doi.org/10.1155/2013/376123>
- Idris, O. A., Wintola, O. A., ve Afolayan, A. J. (2017). Phytochemical and antioxidant activities of *Rumex crispus* L. in treatment of gastrointestinal helminths in Eastern Cape Province, South Africa. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 7(12), 1071-1078. <https://doi.org/10.1016/j.apjtb.2017.10.008>
- Larayetan, R., Ojemaye, M.O., Okoh, O.O., ve Okoh, A.I. (2019). Silver nanoparticles mediated by *Callistemon citrinus* extracts and their antimalaria, antitrypanosoma and antibacterial efficacy. *Journal of Molecular Liquids*, 273, 615-625. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.10.020>
- Li-Weber, M. (2013). Targeting apoptosis pathways in cancer by Chinese medicine. *Cancer Letters*, 332(2), 304-312. <https://doi.org/10.1016/j.canlet.2010.07.015>
- Minh, T. N., Van, T. M., Andriana, Y., Vinh, L. T., Hau, D. V., Duyen, D. H., ve Guzman-Gelani, C. D. (2019). Antioxidant, xanthine oxidase,  $\alpha$ -amylase and  $\alpha$ -glucosidase inhibitory activities of bioactive compounds from *Rumex crispus* L. root. *Molecules*, 24(21), 3899. <https://doi.org/10.3390/molecules24213899>
- Nazeam, J. A., Al-Shareef, W. A., Helmy, M. W., & El-Haddad, A. E. (2020). Bioassay-guided isolation of potential bioactive constituents from pomegranate agrifood by-product. *Food Chemistry*, 326, 126993. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126993>
- Nuzula, A. F., Kristanti, A. N., Aminah, N. S., Takaya, Y., Sahadatin, M. N., ve Wardana, A. P. (2023). Isolation and structure elucidation of secondary metabolite compounds from *Curcuma aeruginosa*. *Jurnal Kimia Riset*, 8(1), 81-91. <https://doi.org/10.20473/jkr.v8i1.44073>
- Ntemafack, A., Sabeena, A., Aristide, D., Ravi, S., Serge, A., Jules-Roger, K., Alain, W., Asha, Chaubey. (2023). Chemical profile, biological potential, bioprospection and biotechnological application of endophytes of *Rumex*: A systematic review. *Industrial Crops & Products*, 195, 116474. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116474>
- Orban-Gyapai, O., Liktör-Busa, E., Kusz, N., Stefko, D., Urban, E., Hohmann, J., ve Vasas, A. (2017). Antibacterial screening of *Rumex* species native to the Carpathian Basin and bioactivity-guided isolation of

- compounds from *Rumex aquaticus*. *Fitoterapia*, 118, 101-106.  
<https://doi.org/10.1016/j.fitote.2017.03.009>
- Pham, D. Q., Han, J. W., Dao, N. T., Kim, J.-C., Pham, H. T., Nguyen, T. H., Choib G.J., Vu H.D., Le Dang, Q. (2020). In vitro and in vivo antimicrobial potential against various phytopathogens and chemical constituents of the aerial part of *Rumex chinensis* Campd. *South African Journal of Botany*, 133, 73–82.  
<https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.07.006>
- Saoudi, M. M., Bouajila, J., Rahmani, R., ve Alouani, K. (2021). Phytochemical Composition, Antioxidant, Antiacetylcholinesterase, and Cytotoxic Activities of *Rumex crispus* L. *International Journal of Analytical Chemistry*, 6675436.  
<https://doi.org/10.1155/2021/6675436>
- Sarikahya, N. B., Goren, A. C., ve Kirmizigul, S. (2019). Simultaneous determination of several flavonoids and phenolic compounds in nineteen different *Cephalaria* species by HPLC-MS/MS. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 173, 120-125.  
<https://doi.org/10.1016/j.jpba.2019.05.019>
- Seigler, D. S. (2012). Plant secondary metabolism. *Springer Science & Business Media*.
- Simoes, C.M.O., Schenkel, E.P., Gosman, G., Mello, J.C.P., Mentz, L.A., ve Petrovick, P.R. (2007). Farmacognosia: da planta ao medicamento. Editora da UFSC, Florianópolis, 1102.
- Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2013). Fundamentals of Analytical Chemistry. Cengage learning.
- Smolarz, H.D., Swatko-Ossor, M., Ginalska, G., ve Medynska, E. (2013). Antimycobacterial effect of extract and its components from *Rheum rhaponticum*. *Journal of AOAC International*, 96(1), 155-160.  
<https://doi.org/10.5740/jaoacint.12-010>
- Tsamo, L. D. F., Yimgang, L. V., Wouamba, S. C. N., Mkounga, P., Nkengfack, A. E., Voutquenne-Nazabadioko, L., ve Sewald, N. (2021). A new ceramide (*Rumexamide*) and other chemical constituents from *Rumex abyssinicus* Jacq (Polygonaceae): isolation, characterization, antibacterial activities and chemophenetic significance. *Advances in Biological Chemistry*, 11(05), 266-282.  
<https://doi.org/10.4236/abc.2021.115018>
- Vasas, A., Orbán-Gyapai, O., ve Hohmann, J. (2015). The genus *Rumex*: review of traditional uses, phytochemistry, and pharmacology. *Journal of Ethnopharmacology*, 175, 198-228.  
<https://doi.org/10.1016/j.jep.2015.09.001>
- WHO. (1993) Summar WHO guidelines for the assessment of herbal medicines. *Herbal Grom*. 28:13–4.
- Yıldırım Baştemur, G., Akpınar, R., Kır, E., ve Perçin Özkorucuklu, S., (2024). Development and Validation of the HPLC-DAD Method for the Simultaneous Determination of Anthraquinones in *Rumex crispus* L. and *Rumex acetosella* L. Plants and Evaluation of Their Antioxidant Capacities. *Journal of Analytical Chemistry*, 79(2), 179-189.  
<https://doi.org/10.1134/S1061934824020035>
- Yıldırım, A., Mavi, A., ve Kara, A.A. (2001). Determination of Antioxidant and Antimicrobial Activities of *Rumex crispus* L. Extracts. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49, 4083–4089.  
<https://doi.org/10.1021/jf0103572>



## 3,4-Dimetoksifenilasetonitril'in Kuaterner Amonyum Tipi Dimerik Yüzey Aktif Maddeler İle Faz Transfer Katalizli Siklopentilasyonu

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 15.02.2024

Kabul/Accepted: 28.08.2024

Yayımlandı/Published:02.12.2024

### Phase Transfer Catalyzed Cyclopentylation of 3,4-dimethoxyphenylacetoneitrile with Quaternary Ammonium Type Dimeric Surfactants

Ayşen ŞUEKİNCİ YILMAZ\* , Mesut BOZ 

Trakya Üniversitesi, Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, 22030, Merkez, Edirne, Türkiye

© Ayfon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

Bir organik sentezde genellikle uygun bir baz ile C, O, N gibi atomlara bağlı asidik karakterde bir protonun koparılması gerekir. Bu amaçla uygun baz ve çözücü sisteminin seçimi önemlidir ki sıklıkla güçlü bazlar ve kurutulmuş çözücüler kullanılması gerekir. Kimya Endüstrisinin gelişmesiyle birlikte artan çevre sorunları sebebiyle, kimyasalların ve kimyasal proseslerin çevreye olumsuz etkilerini azaltmayı veya ortadan kaldırmayı amaç edinen "Yeşil Kimya" kavramı gitgide önem kazanmaktadır. Daha ılımlı bazlar, daha zararsız çözücüler içeren çevre dostu organik sentez prosedürlerinin uygulanması hayati derecede önemlidir. Bu prosesler arasında farklı fazlarda çözünebilir reaktiflerin etkileşmesini sağlayarak, reaksiyonların daha kısa sürede ve yüksek verimlerle gerçekleşmesini sağlayan faz transfer katalizli reaksiyonlar öne çıkmaktadır. Faz transfer katalizi sistemleri enerji sarfiyatını azaltmanın yanı sıra, yan ürün oluşumunu da baskılayarak saflaştırma aşamasında daha az çözücü kullanılması gibi ekonomik avantajlarda sunmaktadır. Organik sentezlerde sıklıkla bir kuaterner amonyum tuzu olan tetrabutylamonyum bromür (TBAB) faz transfer katalizörü olarak kullanılır. Son yıllarda kuaterner amonyum bileşiklerinin dimerik yapıda olanları monomerik olanlara göre üstün yüzey aktif özellikleriyle dikkat çekmekte ve bu bileşikler "gemini sürfaktan" olarak adlandırılmaktadır. Bilim insanları bu bileşiklerin fizikokimyası ve yüzey aktif özellikleri ile ilgili çok sayıda araştırma ortaya koymuşlardır. Fakat bu bileşiklerin tetrabutylamonyum bromür gibi faz transfer katalizli organik sentezlere uygulanması ile ilgili çalışmalar sınırlıdır. Bu çalışmada sekiz farklı dimerik kuaterner amonyum bileşiği sentezlenerek, bu bileşiklerin 3,4-dimetoksifenilasetonitril'in siklopentilasyonunda faz transfer katalizörü olarak davranışı incelenmiştir. Dimerik sürfaktanların 3,4-dimetoksifenilasetonitril'in siklopentilasyon reaksiyonunu geleneksel faz transfer katalizörü TBAB kadar iyi verimlerle katalizlediği, hatta bazı dimerik sürfaktanların TBAB'den daha yüksek verimler oluşturduğu tespit edilmiştir.

#### Abstract

Generally, in an organic synthesis, an acidic proton bonded to atoms such as C, O, N must be removed with a suitable base. For this purpose, the selection of the appropriate base and solvent system is important that strong bases and dried solvents often need to be used. Due to the increasing environmental problems depending on development of the Chemical Industry, the concept of "Green Chemistry", which aims to reduce or prevent the harmful effects of chemicals and chemical processes on the environment, has gradually gained importance. It is vitally important to implement environmentally friendly organic synthesis procedures that include mild bases and more harmless solvents. Among these processes, phase transfer catalyzed reactions which enable the reactions to occur in a shorter time and with higher yields by enabling the interaction of reagents that can be dissolved in different phases, come into prominence. In addition to reducing energy consumption, phase transfer catalysis systems also offer economic advantages such as using less solvent in the purification stage by suppressing by-product formation. Tetrabutylammonium bromide (TBAB), a quaternary ammonium salt, is frequently used as a phase transfer catalyst in organic syntheses. In recent years, dimeric quaternary ammonium compounds have attracted attention with their superior surface active properties compared to monomeric ones, and these compounds are called "gemini surfactants". Scientists have conducted numerous studies on the physicochemistry and surface active properties of these compounds. However, studies on the application of these compounds to phase transfer catalyzed organic syntheses such as tetrabutylammonium bromide are limited. In this study, eight different dimeric quaternary ammonium compounds (gemini surfactant) were synthesized and the behavior of these compounds as phase transfer catalysts in the cyclopentylation of 3,4-dimethoxyphenylacetoneitrile was examined. It has been determined that dimeric surfactants catalyze the cyclopentylation reaction of 3,4-dimethoxyphenylacetoneitrile with yields as good as the traditional phase transfer catalyst TBAB, and some dimeric surfactants even produce higher yields than TBAB.

#### Anahtar Kelimeler

Faz transfer katalizi; Dimerik yüzey aktif madde; Nükleofilik yerdeğiştirme; Yeşil kimya.

#### Keywords

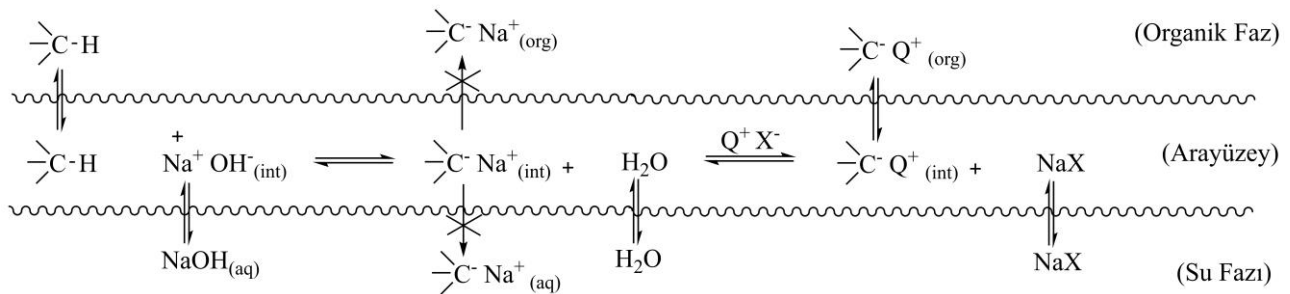
Phase transfer catalysis; Dimeric surfactant; Nucleophilic substitution; Green chemistry.

## 1. Giriş

Organik sentez belirli bir başlangıç maddesinden yola çıkılarak çeşitli reaktifler ve çözücüler kullanılmasıyla ilaç etken maddeleri, biyoaktif bileşikler, boyar maddeler, monomerler vb. gibi çeşitli kimyasal ürünleri elde etmenin temel yoludur. Farklı kimyasal karakterde iki reaktif söz konusu olduğunda, bu reaktiflerin aynı fazdaki çözünürlükleri verimli şekilde reaksiyona girmek için uygun konsantrasyona ulaşamayabilir. Birçok reaksiyonda hidrofilik karaktere sahip bir nükleofil ile hidrofobik bir elektrofilin reaksiyon ortamında etkileşmesini sağlamak gerekir. Her iki türü de reaksiyona girmeye yetecek derecede iyi çözecek bir çözücü ortamı sağlamak her zaman mümkün olmayabilir. Substrat organik çözücülerde iyi çözünme yeteneğine sahip olduğunda, nükleofil ise aynı ortamda yeterince çözünemediği takdirde reaksiyonlar verimsizdir (Zosha 1977). Örneğin bir nükleofilik yer değiştirme reaksiyonunda, nükleofil organik çözücülerde çözünmeyen hidrofilik bir anyon olduğunda lipofilik substrat ile yeterince etkileşemez. Tek fazlı reaksiyonlarda çözünürlük problemi alkol gibi hem hidrofilik hem de lipofilik karaktere sahip bir çözücünün kullanılmasıyla giderilmeye çalışılsa bile reaksiyon hızı yeterli düzeye ulaşmayabilir (Naik ve Doraiswamy 1998). Alternatif bir yöntem, reaksiyonları N,N-dimetilformamid (DMF) veya dimetil sülfoksit (DMSO) gibi polar aprotik çözücülerde gerçekleştirmektir. Bu durumda reaksiyon hızı yükselir. Fakat bu çözücülerin üründen ayrılması ve geri kazanılması zor olup bu durum çevresel açıdan dezavantaj oluşturmaktadır (Makosza 2000). Diğer pek çok prosedürde, nükleofilik anyon genellikle reaksiyon ortamında C, O ya da N atomuna bağlı asidik bir protonun uygun bir baz ile koparılması sonucu elde edilir ve sonrasında substratla reaksiyona girmesi beklenir. Bu nükleofilik anyonun eşlik eden katyonu  $\text{Na}^+$  veya  $\text{K}^+$  olduğunda ( $-\text{C}^-\text{Na}^+$ ), katyonun hidrofilik olmasından dolayı organik çözücülerde yeterince çözünme olmaz. Bu durumda iki fazlı reaksiyon sisteminin ve hidrofilik katyonla yer değiştirerek lipofilik iyon çifti oluşturabilen ( $-\text{C}^-\text{Q}^+$ ) kuaterner amonyum tipi ( $\text{Q}^+\text{X}^-$ ) bir faz transfer katalizörünün (FTK) kullanılması gerekir. Jarousse

tarafından 1951 yılında keşfedilen bu yöntem, inorganik anyonlar ve organik reaktifler içeren çok sayıda reaksiyona uygulanabildiği ve oluşan ürünler kolaylıkla saflaştırılabildiği için sıklıkla başvurulan bir yöntem olmuştur (Jarousse 1951).

Bu yöntemlerin temel çalışma prensibi, iki fazlı sistemlerde katalizörün inorganik fazdaki bir reaktif veya iyonu organik faza taşıyıp reaksiyonların oluşmasını sağlaması esasına dayanır ki bu tip reaksiyonlar bu sebeple faz transfer katalizi olarak adlandırılır. Reaksiyona doğrudan giren anyonlar inorganik fazda, reaksiyon ortamında oluşturulan organik yapıları anyonlar fazlar arası bölgede, organik substratlar ise organik fazda yer alır. Katyonik faz transfer katalizörü bu anyonların organik faza taşınmasını sağlar. Faz transfer katalizli reaksiyonların genel mekanizması Şekil 1'de gösterilmiştir. Sıvı-sıvı sistemlerde sulu NaOH veya KOH, katı sıvı sistemlerde alkali metal karbonatları ya da hidroksitleri inorganik fazı oluştururken, organik faz ise anyonun öncüsünü ve elektrofilik substratı içerir. Suda kuvvetli çözünen (hidrofilik) sodyum ve potasyum katyonlarının organik anyonlarla oluşturduğu tuzlar ( $-\text{C}^-\text{Na}^+$ ) ne organik faza ne de su fazına geçemediklerinden dolayı faz sınırında kalırlar. Bu nedenle çok reaktif değildirler ve sadece kuvvetli elektrofillerle reaksiyona girebilirler. Tetrabutilamonyum bromür (TBAB) gibi bir faz transfer ajanından gelen kuaterner amonyum katyonu ( $\text{Q}^+$ ) varlığında ara yüzeyde meydana gelen iyon değişimiyle anyona eşlik eden alkali metal katyonu  $\text{Q}^+$  ile yer değiştirir. Bunun sonucunda lipofilik iyon çifti ( $-\text{C}^-\text{Q}^+$ ) oluşur ve daha sonra bu iyon çifti faz sınırından organik faza transfer olur (Naik ve Doraiswamy 1998). Lipofilik iyon çiftinin ( $-\text{C}^-\text{Q}^+$ ) faz sınırından ayrılmasıyla denge bileşenlerinden biri ayrıldığı için denge sağa kayar. Nükleofilik anyonun organik faza transfer edilmesiyle, nükleofilik yer değiştirme, katılma gibi daha ileri reaksiyonlar organik fazda gerçekleşir. Oksidasyon (Baj vd. 2011), polimerizasyon (Tagle vd. 1994), yer değiştirme (Wilk vd. 2008) katılma (Rajendran ve Wang 2008), kondenzasyon (Lin vd. 1991) gibi birçok reaksiyon faz transfer katalizör sistemleri kullanılarak iki fazlı reaksiyonlarla gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 1. İki fazlı sistemlerde faz transfer katalizli reaksiyon mekanizması

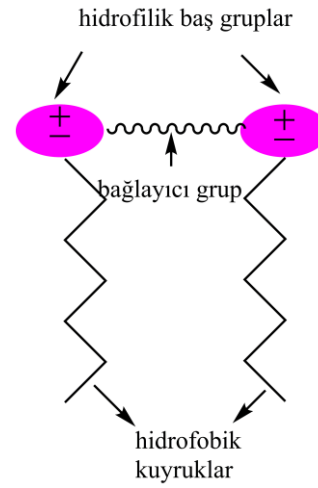


İki fazlı ortamda gerçekleştirilen reaksiyonlara uygulanan bu kataliz tipinin potansiyeli, Starks (1971), Liotta (Starks ve Liotta 1978), Dehmlow (1974) ve Makosza'nın (1975) 1970'lerde başlayan çalışmaları ile ortaya çıkmıştır. Faz transfer katalizörleri, bir molekülün veya iyonun bir fazdan diğerine transferini kolaylaştıran ve bunu yaparken reaksiyonun hızını büyük ölçüde atırabilen kimyasal maddelerdir. 1971'de Starks, birbirine karışmayan farklı fazlarda bulunan iki madde arasındaki reaksiyonda tetraalkilamonyum veya fosfonyum tuzlarının kritik rolünü açıklamak için "faz transfer katalizi" terimini ilk defa tanıtmıştır (Starks 1971).

Bu bileşikler genellikle ucuz, organik çözücülerde ve suda kolaylıkla çözünebilen, basit yöntemlerle sentezlenebilen bileşikler olup, ürünün ayrılıp saflaştırılma aşamalarını daha basit hale getirdikleri için tercih edilirler. Bu avantajlardan dolayı faz transfer reaksiyonları birçok homojen reaksiyon prosesine "yeşil" alternatifler olarak kabul edilmiş ve endüstride yaygın uygulama alanı bulmuştur (Makosza 2000).

Organik sentezlerde kuaterner amonyum ve fosfonyum tuzları, taç eterler, kriptanlar vb. gibi pek çok faz transfer katalizörü kullanılabilir de, en sık kullanılan faz transfer katalizörleri kuarterner amonyum tuzlarıdır. Bir çok faz transfer katalizli reaksiyon tetrabutilamonyum bromür (TBAB), benziltriethylamonyum bromür (TEBA) gibi kuaterner amonyum tuzları kullanılarak gerçekleştirilir. Bu tuzların kiral yapıda olanları kullanılarak stereoseçici ve stereoözümlü sentezler de gerçekleştirilmektedir (Shirakawa ve Maruoka 2013).

Son yıllarda dimerik yüzey aktif maddeler (gemini sürfaktanlar) olarak bilinen ve üstün yüzey aktif özelliklere sahip katyonik kuaterner amonyum tuzları ilgi çekmekte ve bu alanda yapılan araştırmaların sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Dimerik yüzey aktif maddeler yapısal olarak, spacer olarak adlandırılan bir ara zincir ile bağlanmış iki hidrofilik baş grup ve baş gruplara bağlı iki hidrofobik alkil zincirinden meydana gelir (Menger ve Littau 1991). Şekil 2'de gösterilen bu kuaterner amonyum tipi dimerik yüzey aktif maddelerin yapısı  $[C_mH_{2m+1}(CH_3)_2-N^+-C_sH_{2s}-N^+(CH_3)_2C_mH_{2m+1}]$ ,  $2X^-$  ( $X^-$  = karşı iyon) şeklindedir ve hidrofobik zincirlerdeki karbon sayısı (m) ve spacer grubundaki karbon sayısı (s) kullanılarak m-s-m- şeklinde sembolize edilirler. Kuaterner amonyum tipi katyonik gemini sürfaktanların sentezi, fizikokimyasal özellikleri ve değişik kullanım alanları hakkında birçok çalışma yapılmıştır (Ahmady vd. 2022, Batıgöç vd. 2011, Deng vd. 2021, Kasapoğlu vd. 2023, Khalaf vd. 2020, Mu'azu vd. 2023, Sarıkaya vd. 2021, Vasileva vd. 2023, Wu vd. 2020, Zhang vd. 2021).



Şekil 2. Dimerik yüzey aktif maddenin yapısı

Bu yüzey aktif maddeler düşük kritik misel konsantrasyonu (KMK), düşük Krafft sıcaklığı ( $T_K$ ), yüksek yüzey aktivitesi, üstün ıslatma ve köpürtme kapasitesi, korozyon inhibitörü gibi eşsiz karakteristik özellikleri sebebiyle yiyecek, kozmetik, ilaç sanayi, yağ sanayi, polimer sanayii gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Das vd. 2014, Menger ve Keiper 2000). Ayrıca KMK değerlerinin geleneksel (monomerik) yüzey aktif maddelerden daha düşük olmasından dolayı, daha az miktarda madde kullanılarak daha iyi sonuçlar elde edildiği için yeşil yüzey aktif maddeler olarak da adlandırılmaktadırlar (Chai vd. 2015).

Bu bileşiklerin organik sentezde iki fazlı reaksiyonlarda faz transfer katalizörü olarak kullanımlarına dair örneklerin sayısı ise sınırlıdır (Jayachandran ve Wang 2000). Bu çalışmalardan biri kuarterner amonyum tipi dimerik yüzey aktif maddelerin faz transfer katalizörü olarak kullanıldığı izovanilin O-alkilasyon reaksiyonudur (Boz ve Baştürk 2016)

İlaç endüstrisinde  $\alpha$ -arilalkannitrillerin sentezi için arilasetonitrillerin alkilasyonu önemli bir yöntemdir. Karamifen, Yarı-sentetik Penisilin, Anastrozol, Sibutramin, ve Verapamil gibi ilaçların öncüsü  $\alpha$ -arilalkannitrillerdir (Fedorynski vd. 2008). Arilasetonitrilden elde edilen karbanyonların alkil halojenürler ile yapılan alkilasyonu ile  $\alpha$ -arilalkannitriller elde edilebilir. Bu dönüşüm, geleneksel yöntemlerle gerçekleştirildiğinde, kuvvetli bazların kullanıldığı ve susuz çözücüler gerektiren çok basamaklı sentezler karşımıza çıkmaktadır. Başlangıç maddesi nitril bileşiği  $NaNH_2$  veya  $NaH$  gibi güçlü bir bazla, mutlak kuru çözücüler içinde muamele edilerek ara ürün olan karbanyon elde edilebilir. Bu şekilde elde edilen karbanyonun karşı iyonu  $Na^+$  iyonudur. Bu iyon çiftinin organik fazdaki çözünürlüğünün sınırlı olması alkilasyonun verimini düşürür (Makosza ve Serafinowa 1966). Ayrıca

ürünün izolasyonu karışımın su ile ekstraksiyonunu ve çözücünün uzaklaştırılarak yeniden kullanılmak üzere geri kazanılması aşamalarını içerir.  $\text{NaNH}_2$  veya  $\text{NaH}$  çalışılması ilave güvenlik önlemleri gerektirir. Reaksiyon esnasında susuz koşulların korunması gerekliliği daha fazla enerji kullanımı ve daha fazla atık üretilmesine sebep olur. Aynı proses FTK teknolojisi kullanılarak, fenilasetonitril ve alkil halojenürün %50  $\text{NaOH}$  çözeltisi ile %1 eşdeğer mol katalizör varlığında gerçekleştirilebilir.

Bu çalışmada, 3,4-dimetoksifenilasetonitril'in C-alkilasyonu ile halka oluşum reaksiyonunda dimerik kuaterner amonyum bileşiklerinin faz transfer katalizörü olarak davranışları incelenmiştir. Oldukça iyi faz transfer özelliği göstereceğini düşünülen spacer zincirinin uzunluğu  $s=2$  ve 10, hidrofobik alkil zincirinin uzunluğu ise  $m=8,10,12$  ve 16 olan sekiz farklı kuaterner amonyum tipi gemini sürfaktan laboratuvarımızda sentezlenmiştir. Bu dimerik yüzey aktif maddelerin 3,4-dimetoksi fenilasetonitril'in 1,4-dibrombütan ile sikloalkilasyon reaksiyonunda faz transfer katalizörü olarak davranışı ve oluşturdukları verimler belirlenmiş, TBAB kadar iyi verimlerle reaksiyonu katalizledikleri, hatta bazılarının daha iyi verimler oluşturduğu gözlenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Materyal

Faz transfer katalizörü olarak kullanılacak tüm dimerik kuaterner amonyum bileşikleri laboratuvarımızda sentezlendi. Sentezlerde kullanılan N,N,N',N'-tetrametiletildiamin, 1-bromooktan, 1-bromodekan, 1-bromododekan, 1-bromoheksadekan, 1,4-dibromobütan, 1,10-dibromodekan, 3,4-dimetoksifenilasetonitril, N,N-dimetiloktilamin, N,N-dimetildesilamin, N,N-dimetildodesilamin, N,N-dimetilheksadesilamin, aseton, heksan, toluen ve etilasetat ticari kaynaklardan satın alındı ve daha fazla saflaştırılmadan doğrudan kullanıldı. Sentezlenen kuaterner amonyum tipi dimerik yüzey aktif maddeler aseton veya metanol-dietileter karışımından yeniden kristallendirilerek saflaştırıldı. Siklopentilasyon ürünleri dolgu maddesi olarak silika jel (0,063-0,200 mm), yürütücü solvent olarak etil asetat:heksan (1:3) çözücü sistemi kullanılarak kolon kromatografisi ile saflaştırıldı. İnce tabaka kromatografisi (TLC), silika jel 60F-254 ile önceden kaplanmış tabakalar üzerinde gerçekleştirildi. İnce tabaka kromatografisinin sonuçları 254 nm'de UV ışığının absorbe edilmesiyle görselleştirildi. IR spektrumları Perkin Elmer FT-IR marka spektrofotometrede kaydedildi ve absorpsiyon bandları dalga sayısı ( $\text{cm}^{-1}$ ) cinsinden rapor edildi.  $^1\text{H}$  NMR spektrumları  $\text{CDCl}_3$  içerisinde Varian Mercury Plus 400 MHz spektrometrede kaydedildi; kimyasal kaymalar ve

bağlanma sabitleri (Hz), dahili standart tetrametilsilan (TMS) ( $\delta$  (H) = 0,00 ppm) veya  $\text{CDCl}_3$  ( $\delta$  (H) = 7,25 ppm) ile ilgili olarak standart şekilde rapor edildi.  $^{13}\text{C}$  NMR spektrumları,  $\text{CDCl}_3$  içerisinde 100 MHz'lik bir spektrometrede kaydedildi;  $\text{CDCl}_3$ 'e ( $\delta$  (C) = 77,00 ppm (üçlü merkez çizgisi) göre kimyasal kaymalar rapor edildi. Yalnızca izole edilen verimler hesaplandı.

### 2.2. Metot

#### 2.2.1. Bağlayıcı zincir uzunluğu $s=2$ olan geminilerin sentezi

2.32 g N,N,N',N'-tetrametiletildiamin (**2**) (20 mmol) ve 40 mmol alkil bromürün (**1a-1d**) 150 mL asetonda çözünmesiyle elde edilen çözelti 24 saat süreyle kaynama sıcaklığında refluks edildi. Süre sonunda ısıtma işlemi durduruldu ve çözelti soğumaya bırakılarak kristallerin çökmesi beklendi. Çöken kristaller süzülerek çözülden ayrıldı. Elde edilen kristaller 5 ml metanolde çözülüp, 50 ml dietileter içine dökülerek yeniden kristallendirildi. Saflaştırılan ürünler vakum etüvünde kurutulduktan sonra, NMR spektrumları alınarak yapıları aydınlatıldı.

#### *N,N'-dioktil-N,N,N',N'-tetrametil-N,N'-etandiil-diamonyum dibromür (8-2-8) (3a)*

Beyaz katı, verim: 66%,  $^1\text{H}$  NMR (400 MHz,  $\text{CDCl}_3$ ):  $\delta$  = 4.62 (s, 4H), 3.63 (m, 4H), 3.44 (s, 12H), 1.77 (br s, 4H), 1.32-1.21 (m, 20H), 0.80 (t,  $J$  = 6.6 Hz, 6H);  $^{13}\text{C}$  NMR (100 MHz,  $\text{CDCl}_3$ ):  $\delta$  = 65.8, 56.7, 51.0, 31.6, 29.2, 29.1, 26.2, 22.9, 22.5, 14.0.

#### *N,N'-didesil-N,N,N',N'-tetrametil-N,N'-etandiil-diamonyum dibromür (10-2-10) (3b)*

Beyaz katı, verim: 71%,  $^1\text{H}$  NMR (400 MHz,  $\text{CDCl}_3$ ):  $\delta$  = 4.56 (s, 4H), 3.68 (m, 4H), 3.45 (s, 12H), 1.8 (br s, 4H), 1.35-1.22 (m, 28H), 0.84 (t,  $J$  = 6.7 Hz, 6H);  $^{13}\text{C}$  NMR (100 MHz,  $\text{CDCl}_3$ ):  $\delta$  = 65.6, 56.6, 51.3, 31.8, 29.52, 29.50, 29.3, 29.28, 26.2, 23.0, 22.6, 14.0.

#### *N,N'-didodesil-N,N,N',N'-tetrametil-N,N'-etandiil-diamonyum dibromür (12-2-12) (3c)*

Beyaz katı, verim: 82%,  $^1\text{H}$  NMR (400 MHz,  $\text{CDCl}_3$ ):  $\delta$  = 4.73 (s, 4H), 3.68 (m, 4H), 3.49 (s, 12H), 1.82 (br s, 4H), 1.35-1.23 (m, 36H), 0.85 (t,  $J$  = 6.7 Hz, 6H);  $^{13}\text{C}$  NMR (100 MHz,  $\text{CDCl}_3$ ):  $\delta$  = 65.9, 56.7, 51.2, 31.9, 29.7, 29.6, 29.56, 29.5, 29.3, 26.2, 23.1, 22.7, 14.1.

#### *N,N'-diheksadesil-N,N,N',N'-tetrametil-N,N'-etandiil-diamonyum dibromür (16-2-16) (3d)*

Beyaz katı, verim: 90%,  $^1\text{H}$  NMR (400 MHz,  $\text{CDCl}_3$ ):  $\delta$  = 4.64 (s, 4H), 3.68 (m, 4H), 3.48 (s, 12H), 1.8 (br s, 4H), 1.36-1.24 (m, 44H), 0.85 (t,  $J$  = 6.1 Hz, 6H);  $^{13}\text{C}$  NMR (100 MHz,

CDCl<sub>3</sub>): δ= 65.8, 56.7, 51.5, 31.9, 29.8, 29.74, 29.7, 29.6, 29.5, 29.4, 29.3, 26.3, 23.1, 22.7, 14.1.

### 2.2.2. Bağlayıcı zincir uzunluğu s=10 olan geminilerin sentezi

3.00 g 1,10-dibromobütan (**5**) (10 mmol) ve 20 mmol ilgili alkil halojenür (**4a-4d**)'ün 150 mL aseton da çözünmesiyle elde edilen çözelti 24 saat süreyle kaynama sıcaklığında refluks edildi. Süre sonunda ısıtma işlemi durduruldu ve çözelti soğumaya bırakıldı. Çöken kristaller süzülerek ayrıldı ve aseton dan yeniden kristallendirilerek saflaştırıldı. NMR spektrumları alınarak yapıları aydınlatıldı.

#### *N,N'*-dioktil-*N,N,N',N'*-tetrametil-*N,N'*-dekandiil-diamonyum dibromür (8-10-8) (**6a**)

Rensiz sıvı, verim: 56%, <sup>1</sup>H NMR (400 MHz, CDCl<sub>3</sub>): δ= 3.5 (m, 4H), 3.41 (m, 4H), 3.26 (s, 12H), 1.65 (m, 8H), 1.33-1.2 (m, 32H), 0.81 (t, *J* = 6.8 Hz, 6H); <sup>13</sup>C NMR (100 MHz, CDCl<sub>3</sub>): δ= 64.3, 64.2, 51.1, 31.6, 29.2, 29.0, 28.2, 28.0, 26.3, 25.8, 22.8, 22.6, 22.4, 14.0.

#### *N,N'*-didesil-*N,N,N',N'*-tetrametil-*N,N'*-dekandiil-diamonyum dibromür (10-10-10) (**6b**)

Rensiz sıvı, verim: 60%, <sup>1</sup>H NMR (400 MHz, CDCl<sub>3</sub>): δ= 3.47 (m, 4H), 3.40 (m, 4H), 3.24 (s, 12H), 1.65 (m, 8H), 1.30-1.16 (m, 40H), 0.78 (t, *J* = 6.6 Hz, 6H); <sup>13</sup>C NMR (100 MHz, CDCl<sub>3</sub>): δ= 64.3, 64.1, 51.1, 31.8, 29.4, 29.2, 28.5, 28.4, 28.3, 28.1, 26.3, 25.8, 22.8, 22.6, 22.4, 14.1.

#### *N,N'*-didodesil-*N,N,N',N'*-tetrametil-*N,N'*-dekandiil-diamonyum dibromür (12-10-12) (**6c**)

Beyaz katı, verim: 60%, <sup>1</sup>H NMR (400 MHz, CDCl<sub>3</sub>): δ= 3.64 (s, 4H), 3.47 (m, 4H), 3.32 (s, 12H), 1.74 (m, 4H), 1.68 (m, 4H), 1.38-1.21 (m, 48H), 0.84 (t, *J* = 6.5 Hz, 6H); <sup>13</sup>C NMR (100 MHz, CDCl<sub>3</sub>): δ= 64.4, 64.2, 51.0, 31.9, 29.6, 29.4, 29.3, 29.27, 29.22, 28.4, 28.1, 26.3, 25.8, 22.8, 22.6, 22.4, 14.1.

#### *N,N'*-diheksadesil-*N,N,N',N'*-tetrametil-*N,N'*-dekan diil-diamonyum dibromür (16-10-16) (**6d**)

Beyaz katı, verim: 72%, <sup>1</sup>H NMR (400 MHz, CDCl<sub>3</sub>): δ= 3.64 (s, 4H), 3.47 (m, 4H), 3.32 (s, 12H), 1.74 (m, 4H), 1.68 (m, 4H), 1.38-1.22 (m, 64H), 0.85 (t, *J* = 6.7 Hz, 6H); <sup>13</sup>C NMR (100 MHz, CDCl<sub>3</sub>): δ= 64.4, 64.2, 51.0, 31.9, 29.7, 29.6, 29.5, 29.46, 29.4, 29.3, 29.2, 28.3, 28.1, 26.3, 25.8, 22.8, 22.7, 22.4, 14.1.

### 2.2.3. 3,4-dimetoksifenilasetonitrilin 1,4-dibrom bütan ile siklopentilasyon reaksiyonu

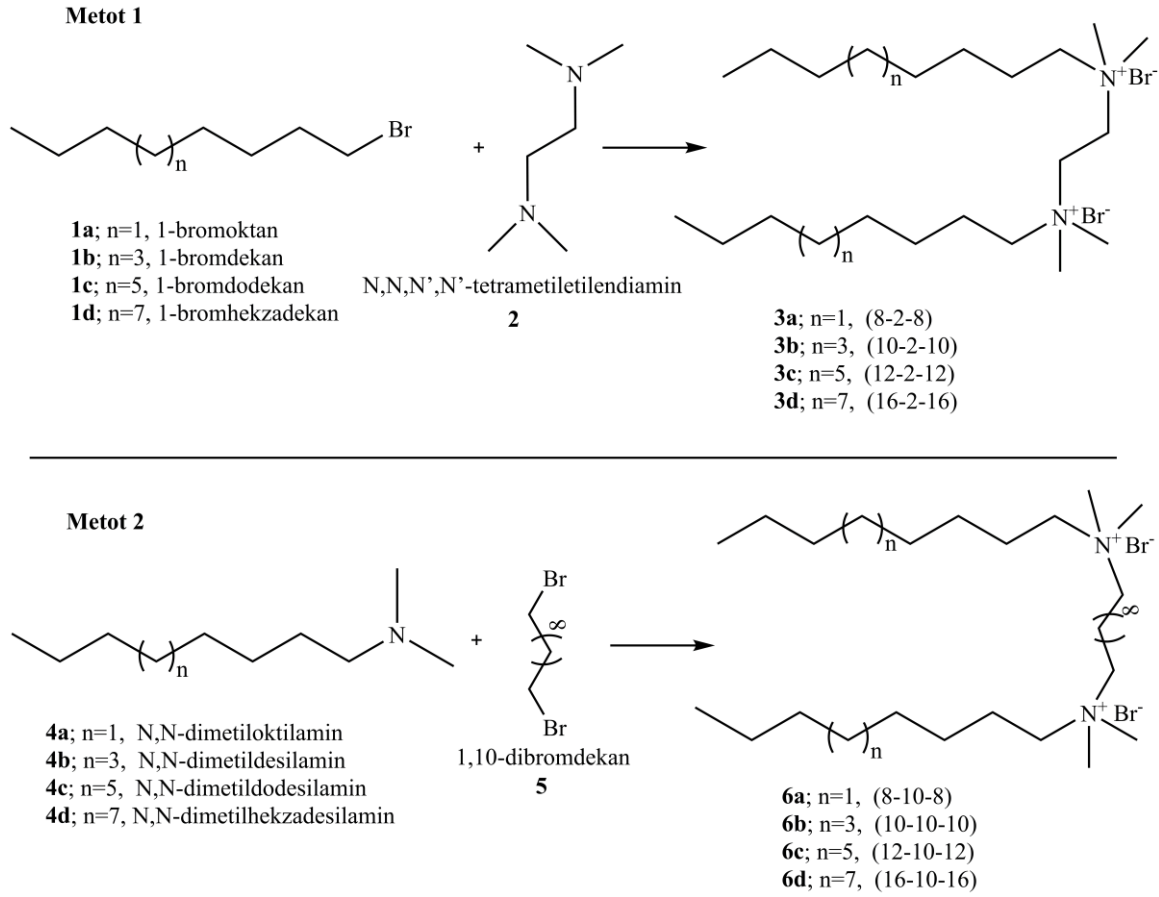
0.53 g 3,4-dimetoksi-fenilasetonitril (**7**) (3 mmol), 0.65 g 1,4-dibrombütan (**8**) (3 mmol) 1.1 g potasyum hidroksit (24 mmol), 0.46 ml su, 8 ml toluen ve TBAB (0.03 mmol, %1 ekivalent) karışımı, üç saat süreyle kaynama sıcaklığında refluks edildi. Reaksiyonun tamamlandığı ince tabaka kromatografisiyle izlendi. Toluen ve su döner buharlaştırıcıda uçurulduktan sonra, bakiye diklorometan ile ekstrakte edildi. Diklorometan fazı sodyum sülfat ile kurutulup, diklorometan döner buharlaştırıcıda uzaklaştırıldı. Elde edilen ham ürün 1:3 etil asetat:heksan çözücü sistemi kullanılarak kolon kromatografisi ile saflaştırıldı. 0.62 g 1-(3,4-dimetoksifenil)siklopentan-1-karbonitril (**9**) saf olarak elde edildi (%89). Reaksiyon aynı şartlar altında faz transfer katalizörü bulunmaksızın ve sentezlenen sekiz adet dimerik yüzey aktif madde ile ayrı ayrı uygulandı ve verimler kaydedildi.

#### 1-(3,4-dimetoksifenil)siklopentan-1-karbonitril (**9**)

Rensiz sıvı, <sup>1</sup>H NMR (400 MHz, CDCl<sub>3</sub>): δ= 6.98-6.83 (m, 3H), 3.90 (s, 3H), 3.87 (s, 3H), 2.45 (q, 2H), 2.08-1.91 (m, 6H); <sup>13</sup>C NMR (100 MHz, CDCl<sub>3</sub>): δ= 149.1, 148.6, 132.2, 124.0, 118.0, 111.2, 109.6, 55.99, 55.9, 47.36, 40.4, 24.1. FT-IR (cm<sup>-1</sup>): 2958, 2231, 1605, 1453, 1332, 1146. HRMS: *m/z* calcd for C<sub>14</sub>H<sub>18</sub>O<sub>2</sub>N:232.1338 [M+H]<sup>+</sup>, found: 232.1332.

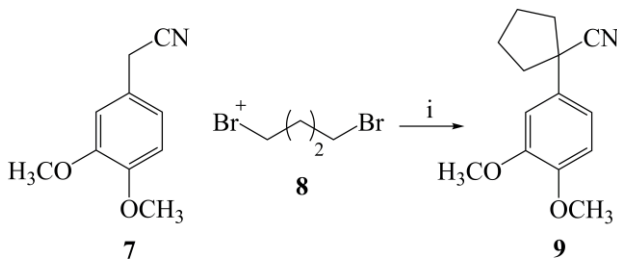
### 3. Bulgular

Dimerik kuarterner amonyum bileşiklerinin sentezi için Şekil 3'de verilen iki genel yöntem kullanıldı (Menger & Keiper, 2000). İlk yöntem bağlayıcı zincir uzunluğu 2 olan bileşiklerin sentezi için *N,N,N',N'*-tetrametiletildiamin (**2**)'in uygun alkil bromür (**1a-1d**) ile S<sub>N</sub>2 tipi nükleofilik yer değiştirme reaksiyonudur. Bu yöntemle sentezi hedeflenen gemini yüzey aktif maddeler 8-2-8, 10-2-10, 12-2-12 ve 16-2-16 (**3a-3d**) 66%-90% arasında verimlerle elde edildi. Bağlayıcı zincir uzunluğu 10 olan bileşiklerin sentezi için kullanılan ikinci yöntemde ise; uygun *N,N*-dimetilalkilaminler (**4a-4d**)'in, 1,10-dibromdekan (**5**) ile S<sub>N</sub>2 tipi nükleofilik yer değiştirme reaksiyonu gerçekleştirildi. Bu yöntemle hedeflenen bileşikler 8-10-8, 10-10-10, 12-10-12 ve 16-10-16 (**6a-6d**)'nın sentezi başarılı (56%-72%). Tüm gemini sürfaktanlar yeniden kristallendirilerek saflaştırıldıktan sonra <sup>1</sup>H ve <sup>13</sup>C NMR spektrumları alınarak oldukça yüksek saflıkta oldukları belirlendi.



**Şekil 3.** Faz transfer katalizörü olarak kullanılan dimerik kuarterner amonyum bileşiklerinin sentezinde kullanılan yöntemler

Bu aşamadan sonra, sentezlenen geminiler Şekil 4'te gösterilen 3,4-dimetoksi fenilasetonitril (**7**)'in 1,4-dibrom bütan (**8**) ile siklopentilasyon reaksiyonunda faz transfer katalizörü olarak kullanıldı. Faz transfer katalizli reaksiyon, baz olarak potasyum hidroksit kullanılarak 3,4-dimetoksi-fenilasetonitril ve 1,4-dibrombütan ile su-toluen heterojen çözücü karışımında gerçekleştirildi (Barbasiewicz vd. 2006). Reaksiyon katalizör kullanılmaksızın da denendi ve katalizörsüz koşullarda verimsiz olduğu doğrulandı. Reaksiyon hem geleneksel faz transfer katalizörü tetrabutylamonyum bromür (TBAB) varlığında hem de



**Şekil 4.** 3,4-dimetoksi fenil asetonitrin siklopentilasyonu

sentezlenen gemini yüzey aktif maddeler (**3a-3d**, **6a-6d**) varlığında gerçekleştirildi. Reaksiyonlardan elde edilen verimler Çizelge 1'de gösterilmiştir. 3,4-

dimetoksifenilasetonitril'in 1,4-dibrom bütan ile siklopentilasyonu oldukça yüksek verimler ile faz transfer katalizli reaksiyon koşullarında gerçekleştirilerek 1-(3,4-diimetoksifenil)siklopentan-1-karbonitril (**9**) elde edilmiştir.

**Çizelge 1.** 3,4-dimetoksi fenil asetonitril'in siklopentilasyonundan elde edilen verimler

Faz transfer katalizörü	Elde edilen verimler (%)
-	0
TBAB	89
8-2-8	92
10-2-10	57
12-2-12	51
16-2-16	79
8-10-8	95
10-10-10	87
12-10-12	82
16-10-16	72

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Makosza ve Serafinova'nın (1966) arilasetonitril ve 1,3-dibromopropandan siklobütan türevlerini sentezledikleri çalışmada %18 olan verim Barbasiewicz vd. tarafından geliştirilen reaksiyon koşulları ile daha yüksek değerlere ulaştırılmıştır. Barbasiewicz vd. (2016) fenilasetonitril'in

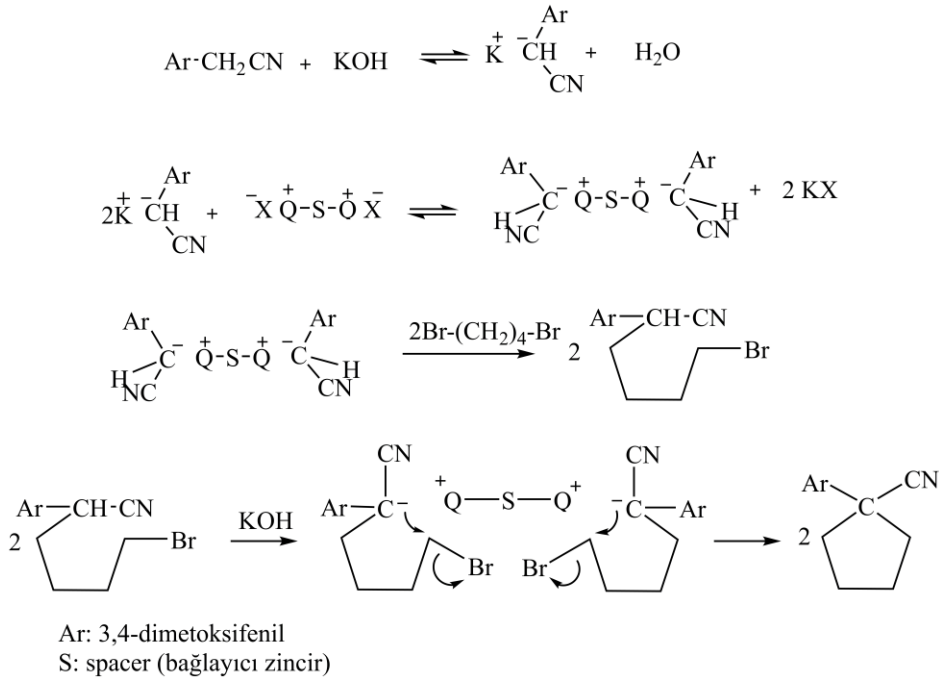
1,3-dibromopropan ile alkilasyonunu, geleneksel faz transfer katalizörü TBAB varlığında, %55-75 konsantrasyonlarında KOH çözeltisi ile çalışmışlardır. Çalışmalarında polimerleşmeden sakınmak ve halka oluşumunu favori kılmak için reaksiyonu toluen içinde gerçekleştirmişler ve %46-64 arası verimler elde etmişlerdir. Yan ürün olarak mono- ve diallifenilasetonitril oluştuğunu da belirlemişlerdir.

Bu çalışmada yan ürün oluşumunu engellemek için allilik sistemi oluşturmaya yatkın olmayan 1,4-dibromobütan seçildi. TBAB yerine daha iyi yüzey aktif özelliklere sahip dimerik kuarternler amonyum bileşikler sentezlenerek katalizör olarak kullanıldı. Fenilasetonitril'in 1,4-dibromobütan ile FTK'li alkilasyonu sonucunda dimerik kuarternler amonyum bileşiklerinin monomerik katalizör TBAB'ye göre oldukça yüksek verimlerle (%51-95) siklopentilasyonu katalizlediği belirlendi. Ayrıca allilleme gibi yan reaksiyonların geliştiği görülmedi.

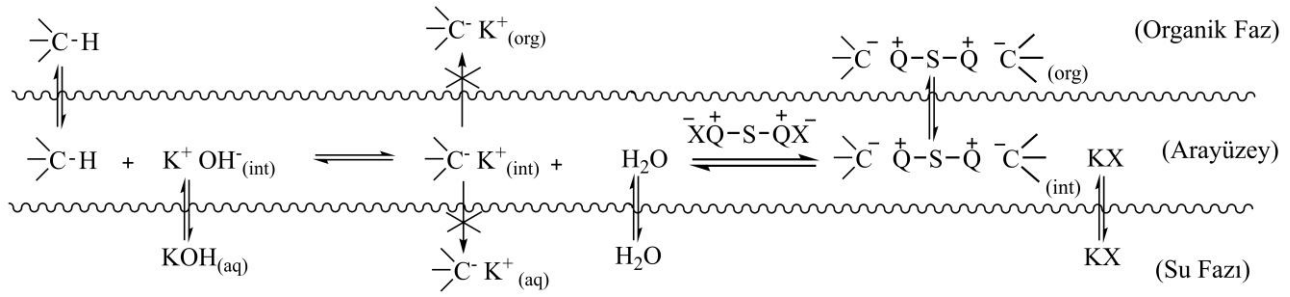
Sentezlenen dimerik yüzey aktif maddelerin faz transfer katalizörü olarak kullanıldığı reaksiyonların verimleri, geleneksel faz transfer katalizörü TBAB kullanılan reaksiyonunki ile karşılaştırıldığında; dimerik yüzey aktif maddelerin oldukça iyi katalitik etki gösterdikleri görülmektedir. 10-2-10, 12-2-12 ve 16-10-16 TBAB'ye göre daha düşük katalitik etki göstermiştir yine de faz transferi kullanılmadığında reaksiyonda ürün elde edilemediği göz önünde bulundurulduğunda, katalitik etkileri azımsanamayacak kadar iyidir (51%-72%). 16-2-

16, 10-10-10 ve 12-10-12 geminileri TBAB ile yakın verimlerle ürün elde edilmesini sağlarken, 8-2-8 ve 8-10-8 geminileri ise TBAB'den daha yüksek verimlerle ürün elde edilmesini sağlamıştır.

Bu sonuçlar göstermektedir ki, dimerik yüzey aktif maddeler geleneksel faz transfer katalizörü TBAB kadar etkili faz transfer katalizörü olarak davranmıştır. Dimerik kuarternler amonyum bileşikleriyle 3,4-dimetoksifenilasetonitril'in faz transfer katalizli sikloalkilasyonunun olası mekanizma Şekil 5'de önerilmiştir. Dimerik kuarternler amonyum bileşikleri ara hal karbanyonlarla lipofilik iyon çifti oluşturarak daha fazla nükleofilik organik faza taşıma kabiliyetine sahiptir. Şekil 6'da dimerik kuarternler amonyum bileşiklerinin faz transfer davranışı ve nükleofil olan karbanyonu faz sınırından organik faza taşıma kapasitesi gösterilmiştir. Bu da reaksiyon verimini olumlu yönde etkilemiştir. Hidrofobik alkil zinciri kısa olan dimerik katalizörler faz sınırına daha kolay yaklaşarak oluşan nükleofilik anyonu organik faza daha verimli şekilde taşımışlardır. Ayrıca, bağlayıcı ara zincirin kısa (s=2) olduğu dimerik yüzey aktif maddelerin ara yüzeye kolaylıkla yaklaşıp anyonu organik faza transfer ettikleri; bağlayıcı ara zincirin uzun olduğu (s=10) durumda ise hidrofobik ara zincirin su fazından yeterince uzaklaşabilecek konformasyonu gösterebilmesi sayesinde dimerik yüzey aktif maddenin yine ara yüzeye anyonu transfer edebilecek kadar iyi yaklaşabildiği ve katalitik etkisini sergileyebildiği görülmüştür.



Şekil 5. Dimerik faz transfer katalizörlü sikloalkilasyonunun olası mekanizması



Şekil 6. Dimerik kuaterner amonyum bileşiklerinin faz transfer katalizörü olarak davranışı

DeneySEL çalışmalarında gerek çevresel, gerekse ekonomik açıdan faz transfer katalizinin kullanılması pek çok avantaj sağlamaktadır. Faz transfer katalizli siklopentilasyon çalışmamız, alkali metal hidrürleri veya amitleri gibi kuvvetli bazların değil de daha ılımlı baz KOH'ın kullanıldığı daha güvenli reaksiyon koşulları sunmaktadır. Sınırlı miktarda organik çözücü kullanılması, çözücülerin kurutulmasına ihtiyaç duyulmaması açısından enerji sarfiyatı en aza indirilmiştir. Reaksiyonların yan ürün oluşturmadan yüksek verimlerle gerçekleşmesi saflaştırma aşamasını kolaylaştırmakta, tüm bunların sonucu olarak daha az atık oluşması çevresel açıdan avantaj sağlamaktadır.

Sonuç olarak bu çalışmada,

- Hidrofobik alkil zincirlerinin ve spacer zincirinin uzunlukları farklı 8 adet dimerik kuaterner amonyum bileşiği sentezlenmiştir.
- Bu dimerik bileşikler 3,4-dimetoksifenilasetonitrilin siklopentilasyonunda başarılı bir şekilde faz transfer ajanı olarak kullanılmış, Karamifen, Yarı-sentetik Penisilin, gibi ilaçların sentezinde ara ürün olan 1-fenil-1-siyanosiklopentan iskeleti sentezlenmiştir.
- Dimerik kuaterner amonyum bileşiklerinin organik sentezlerde faz transfer katalizörleri olarak kullanılabileceği ortaya konulmuştur.

Dimerik kuaterner amonyum bileşikleri düşük maliyetli olmaları, kolaylıkla sentezlenebilmeleri ve reaksiyon sonunda üründen kolaylıkla ayrılabilmeleri nedeniyle faz transfer katalizörü olarak ilgi çekme potansiyeline sahiptirler. Sunulan çevre dostu metodoloji klasik prosedürlere bir alternatif sunmaktadır. Çalışmamız, faz transfer katalizinde dimerik yüzey aktif maddelerin katalizör olarak kullanımının önünü açacak ve bu bileşiklerle yapılan faz transfer katalizli reaksiyonların sayısının giderek artmasını sağlayacaktır.

#### Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

#### Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar-1: Araştırma, Metodoloji, Deney, Yazma Görselleştirme, Biçimsel analiz, Kaynaklar

Yazar-2: Fikir Sahibi, Araştırma, Metodoloji, Yazma, Görselleştirme, Biçimsel analiz, Kaynaklar

#### Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

#### Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

#### 5. Kaynaklar

- Ahmady, A. R., Hosseinzadeh, P., Solouk, A., Akbari, S., Szulc, A. M. ve Brycki, B. E., 2022. Cationic gemini surfactant properties, its potential as a promising bioapplication candidate, and strategies for improving its biocompatibility: A review. *Advances in colloid and interface science*, **299**, 102581. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102581>
- Baj, S., Chrobok, A. ve Siewniak, A., 2011. New and efficient technique for the synthesis of  $\epsilon$ -caprolactone using KHSO<sub>5</sub> as an oxidising agent in the presence of a phase transfer catalyst. *Applied Catalysis A: General*, **395** 49-52. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2011.01.022>
- Barbasiewicz, M., Marciniak, K. ve Fedoryński, M., 2006. Phase transfer alkylation of arylacetone nitriles revisited. *Tetrahedron Letters*, **47**, 3871-3874. <https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2006.03.176>
- Batıgöç, Ç., Akbaş, H. ve Boz, M., 2011. Thermodynamics of non-ionic surfactant Triton X-100-cationic surfactants mixtures at the cloud point. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, **43**, 1800-1803. <https://doi.org/10.1016/j.jct.2011.06.005>
- Boz, M. ve Baştürk S. S., 2016. Phase Transfer Catalysis with Quaternary Ammonium Type Gemini Surfactants: O-Alkylation of Isovanillin. *Journal of Surfactants and Detergents*, **19**, 663-671.
- Chai, J., Zhang, H., Liu, N., Liu, N., Chai, H. ve Liu, Z., 2015. Comparison between phase behavior of gemini imidazoliums and monomeric ionic liquid surfactants in W/O microemulsion systems. *Journal of Dispersion Science and Technology*, **36**, 129-135. <https://doi.org/10.1080/01932691.2014.890108>

- Das, S., Mukherjee, I., Paul, B. K. ve Ghosh, S. 2014. Physicochemical behaviors of cationic gemini surfactant (14-4-14) based microheterogeneous assemblies. *Langmuir*, **30**, 12483-12493. <https://doi.org/10.1021/la5025923>
- Dehmlow, E. V., 1974. Phase-Transfer Catalyzed Two-Phase Reactions in Preparative Organic Chemistry. *Angewandte Chemie International Edition in English*, **13**, 170-179. <https://doi.org/10.1002/anie.197401701>
- Deng, X., Kamal, M. S., Patil, S., Hussain, S. M. S., Zhou, X., ve Mahmoud, M., 2021. Wettability alteration of locally synthesized cationic gemini surfactants on carbonate rock. *Journal of Molecular Liquids*, **344**, 117817. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117817>
- Fedorynski, M., Jezierska-Zieba, M.; Kakol, B., 2008. Phase transfer catalysis in pharmaceutical industry - Where are we? *Acta Poloniae Pharmaceutica - Drug Research*, **65**, 647-654.
- Jarrouse, J., 1951. The Influence of Quaternary Ammonium Chloride on the Reaction of Labile Hydrogen Compounds and Chlorine Substituted-Chlorine Derivatives. *Seances Acad. Sci., Series C*, **232**, 1424-1426.
- Jayachandran, J. P. Wang, M. L., 2000. Cycloalkylation of phenylacetonitrile with 1,4-dibromobutane catalyzed by aqueous sodium hydroxide and a new phase transfer reagent, Dq-Br, *Applied Catalysis A: General*, **198** 127-137 [https://doi.org/10.1016/S0926-860X\(99\)00503-7](https://doi.org/10.1016/S0926-860X(99)00503-7)
- Kasapoğlu, S., Batıgöç, Ç., Boz, M. ve Tetik, Ö., 2023. Experimental Investigation of Cationic Gemini Surfactants: Self-Assembly, Corrosion Inhibition, Foaming and Dye Solubilization Properties. *ChemistrySelect*, **8**, e202301309. <https://doi.org/10.1002/slct.202301309>
- Khalaf, M. M., Tantawy, A. H., Soliman, K. A. ve Abd El-Lateef, H. M., 2020. Cationic gemini-surfactants based on waste cooking oil as new 'green' inhibitors for N80-steel corrosion in sulphuric acid: A combined empirical and theoretical approaches. *Journal of Molecular Structure*, **1203**, 127442. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.127442>
- Lin, Y., Huangshu, L., Junhua, Z., ve Xiujian, X., 1991. The Mannich reaction between aromatic ketones, aromatic aldehydes and aromatic amines. *Synthesis*, **1991**, 717-718. <https://doi.org/10.1055/s-1991-26554>
- Makosza, M., 1975. Two-phase reactions in the chemistry of carbanions and halocarbenes—a useful tool in organic synthesis. *First International Conference on Organic Synthesis (Elsevier)*, 439-462. <https://doi.org/10.1016/B978-0-408-70725-1.50012-4>
- Makosza, M., Bialecka, E., 1977. Reactions of organic anions. 11. alkylation of phenylacetonitrile at the interface with aqueous sodiumhydroxide *Tetrahedron Letters*, **18**, 183-186.
- Makosza, M., 2000. Phase-transfer catalysis. A general green methodology in organic synthesis. *Pure and Applied Chemistry*, **72**, 1399-1403. <https://doi.org/10.1351/pac200072071399>
- Makosza, M., ve Serafinowa, B. 1966. Reactions of organic anions. VII. Catalytic alkylation of diphenyl acetonitrile and 2-phenyl butyronitrile with dichloroalkanes in an aqueous medium *Rocz. Chem*, **40**, 1647-1655.
- Menger, F. M. ve Littau, C., 1991. Gemini-surfactants: synthesis and properties. *Journal of the American Chemical Society*, **113**, 1451-1452. <https://doi.org/10.1021/ja00004a077>
- Menger, F. M. ve Keiper, J. S., 2000. Gemini surfactants. *Angewandte Chemie International Edition*, **39**, 1906-1920. [https://doi.org/10.1002/1521-3773\(20000602\)39:11<1906::AID-ANIE1906>3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/1521-3773(20000602)39:11<1906::AID-ANIE1906>3.0.CO;2-Q)
- Mu'azu, N. D., Haladu, S. A., AlGhamdi, J. M., Alqahtani, H. A., Manzar, M. S., Zubair, M., Odewunmi, N. A., Aldossary, N. E., alareefi, H. S. ve Alshaer, Z. H., 2023. Inhibition of low carbon steel corrosion by a cationic gemini surfactant in 10wt.% H2SO4 and 15wt.% HCl under static condition and hydrodynamic flow. *South African Journal of Chemical Engineering*, **43**, 232-244.
- Naik, S. D. ve Doraiswamy, L., 1998. Phase transfer catalysis: Chemistry and engineering. *AIChE Journal*, **44**, 612-646. <https://doi.org/10.1002/aic.690440312>
- Rajendran, V., ve Wang, M.-L., 2008. Dichlorocarbene addition to allyl phenyl ether under phase-transfer catalysis conditions—a kinetic study. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, **288**, 23-27. <https://doi.org/10.1016/j.molcata.2008.03.015>
- Sarıkaya, İ., Bilgen, S., Ünver, Y., İnan Bektaş, K. ve Akbaş, H., 2021. Synthesis, characterization, antibacterial activity, and interfacial and micellar features of novel cationic gemini surfactants with different spacers. *Journal of Surfactants and Detergents*, **24**, 909-921. <https://doi.org/10.1002/jsde.12532>
- Shirakawa, S. ve Maruoka, K. (2013). Recent Developments in Asymmetric Phase-Transfer Reactions. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **52**, 4312 – 4348. <https://doi.org/10.1002/anie.201206835>



- Starks, C. M., 1971. Phase-transfer catalysis. I. Heterogeneous reactions involving anion transfer by quaternary ammonium and phosphonium salts. *Journal of the American Chemical Society*, **93**, 195-199.  
<https://doi.org/10.1021/ja00730a033>
- Starks, C. M. ve Liotta, C. L., 1978. Phase transfer catalysis: Principles and Techniques (Vol. 326). Academic Press.
- Tagle, L., Diaz, F., ve Fuenzalida, R. 1994. Polymerization by Phase-Transfer Catalysis. 18.‡ Polycarbonates and Polythiocarbonates from Chlorinated Diphenols. *Journal of Macromolecular Science—Pure and Applied Chemistry*, **31**, 283-290.  
<https://doi.org/10.1080/10601329409351518>
- Vasileva, L., Gaynanova, G., Valeeva, F., Romanova, E., Pavlov, R., Kuznetsov, D., Belyaev, G., Zueva, I., Lyubina, A. ve Voloshina, A., 2023. Synthesis, Properties, and Biomedical Application of Dicationic Gemini Surfactants with Dodecane Spacer and Carbamate Fragments. *International Journal of Molecular Sciences*, **24**, 12312.
- Wilk, B. K., Mwisiya N. ve Helom, N. J., 2008. Solving a scale-up problem in the o-alkylation of isovanillin under phase-transfer catalysis conditions, *Organic Process Research and Development*, **12**, 785-786.  
<https://doi.org/10.1021/op800058n>
- Wu, J., Gao, H., Shi, D., Yang, Y., Zhang, Y. ve Zhu, W., 2020. Cationic gemini surfactants containing both amide and ester groups: Synthesis, surface properties and antibacterial activity. *Journal of Molecular Liquids*, **299**, 112248.  
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.112248>
- Zhang, Y., Pan, Y., Li, P., Zeng, X., Guo, B., Pan, J., Hou, L. ve Yin, X., 2021. Novel Schiff base-based cationic Gemini surfactants as corrosion inhibitors for Q235 carbon steel and printed circuit boards. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **623**, 126717.  
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126717>



## Constructing Uninorms Based on Closure and Interior Operators on Bounded Lattices

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 18.02.2024

Kabul/Accepted: 06.08.2024

Yayımlandı/Published: 02.12.2024

### Sınırlı Kafeslerde Kapanış ve İç Operatörlere Dayanan Uninormların İnşası

Gül Deniz ÇAYLI\*

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Fakültesi, Matematik Bölümü, Trabzon, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Abstract

Uninorms generalizing triangular norms and triangular conorms on bounded lattices have attracted considerable attention recently. In this article, two new approaches are suggested to generate uninorms with an identity element on a bounded lattice. These approaches exploit the existences of a triangular norm (triangular conorm) and a closure operator (interior operator) on a bounded lattice. Meanwhile, two structures of idempotent uninorms on bounded lattices are obtained. In addition, the relationship between the proposed approaches and the existing constructions is investigated.

**Keywords:** Bounded lattice; Uninorm; Closure operator; Interior operator

#### Öz

Sınırlı kafesler üzerinde üçgensel normları ve üçgensel konormları genelleştiren uninormlar son zamanlarda oldukça ilgi çekmiştir. Bu makalede bir sınırlı kafes üzerinde bir birim elemanlı uninormları üreten iki yeni yaklaşım önerilmektedir. Bu yaklaşımlar, bir sınırlı kafes üzerinde bir üçgensel normun (üçgensel konormun) ve bir kapanış operatörün (iç operatörün) varlıklarından yararlanmaktadır. Bu esnada, sınırlı kafesler üzerinde idempotent uninormların iki yapısı elde edilmektedir. Ayrıca, önerilen yaklaşımlar ve mevcut inşaaalar arasındaki ilişki araştırılmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Sınırlı kafes; Uninorm; Kapanış operatörü; İç operatör

#### 1. Introduction

Menger (1942) developed the notions of triangular norms, also known as t-norms, and triangular conorms, also known as t-conorms. Their thorough investigations were conducted on the unit interval by Schweizer and Sklar (1963,1983). Additionally, they applied t-norms and t-conorms to expand the familiar triangle inequality on metric spaces to probabilistic metric spaces. Numerous fields have demonstrated the significance of t-norms and t-conorms, including fuzzy systems modeling, decision-making, probabilistic metric spaces, information aggregation, fuzzy set theory, fuzzy logic (Beliakov et al. 2007, Dubios and Prade 1995, 2000, Klement et al. 2000, 2004a, 2004b). Yager and Rybalov (1996) proposed uninorms on the unit interval  $[0, 1]$ , which constitute substantial expansions of t-norms and t-conorms. Fodor et al. (1997) performed an extensive research on them. As opposed to point 1 (the circumstance that exists for t-norms) or point 0 (the circumstance that exists for t-conorms), uninorms permit the position of their identity anywhere on the unit interval. The composition of these operators is closely associated with that of t-norms and t-conorms. This characteristic has been invaluable in theoretical (De Baets 1999, De Baets et al. 2009, Drewniak and Drygaś 2002) and practical examinations of uninorms,

especially neural networks (Benítez 1997), fuzzy system modeling (Takács 2008, Yager 1994, 2001), image processing (González-Hidalgo et al. 2015), decision-making (Yager 2003).

Recent works address uninorms as a component of fuzzy logic and fuzzy set theory, substituting bounded lattices for the unit interval. Bounded lattices were included in the description of uninorms on the unit interval by Karaçal and Mesiar (2015). They also determined that on a bounded lattice, there are always the greatest and smallest uninorms. Hitherto, a great deal of examination has concentrated on uninorms, specifically on how to generate uninorms, on bounded lattices with more intricate framework than the unit interval. Some generation techniques for uninorms exploiting t-norms and t-conorms were provided on a bounded lattice by Bodjanova and Kalina (2018, 2019). Afterward, two types of approaches were suggested by Çaylı et al. (2019) to acquire uninorms being internal and locally internal that have an identity on a bounded lattice. Idempotent uninorms were examined on bounded lattices structurally by Çaylı (2019). In further research, Dan et al. (2019) demonstrated on bounded lattices the availability of different forms of uninorms composed of t-norms and t-conorms. Two methods for receiving uninorms by way of

only one of the t-conorm and the t-norm were enhanced on a bounded lattice by Dan and Hu (2020). Numerous studies have been conducted about uninorms on bounded lattices (Çaylı 2019, 2020, 2021, He and Wang 2021, Hua and Ji 2022, Sun and Liu 2022, Zhao and Wu 2021).

Ouyang and Zhang (2020) suggested two ways to build uninorms that possess the identity  $i \in T \setminus \{0,1\}$  through interior and closure operators on a bounded lattice  $T$ . Their techniques generated by only one of the t-conorm  $\Psi$  on  $[i, 1]^2$  and the t-norm  $\Phi$  on  $[0, i]^2$  can be seen as expansions of the findings from (Karaçal and Mesiar 2015). We describe two new techniques in this study that present uninorms possessing an identity  $i$ , provided that certain necessary and sufficient requirements are fulfilled. When examining the closure and interior operators  $\delta, \sigma: T \rightarrow T$ , we identify two forms of the uninorms  $N_{(\delta)}$  and  $N_{(\sigma)}$  by means of a t-conorm  $\Psi$  on  $[i, 1]^2$  or a t-norm  $\Phi$  on  $[0, i]^2$ , respectively. As an efficient result, two forms of idempotent uninorms are presented on bounded lattices. We explore the correspondence between the uninorms developed by our techniques and those outlined in (Çaylı 2019, 2021, Zhao and Wu 2021). Specifically, when we permit the interior operator  $\sigma$  on  $T$  to be  $\sigma(l) = l$  for all  $l \in T$ , the uninorm  $N_{(\sigma)}$  matches up to the uninorms found in (Çaylı 2021) with the infimum t-norm on  $[0, i]^2$ . Furthermore, if we take account of the closure operator  $\delta$  on  $T$  defined by  $\delta(l) = l$  for all  $l \in T$ , the uninorm  $N_{(\delta)}$  matches up to the uninorms in (Çaylı 2021) on the basis of supremum t-conorm on  $[i, 1]^2$ . To further demonstrate that our methods do not need to match up to the established ones in (Çaylı 2019, 2021, Zhao and Wu 2021), we also provide a few illustrated cases. Interior and closure operators on bounded lattices are important tools for generating new forms of uninorms. Thereupon, from a mathematical standpoint, such forms of uninorms are highly fascinating analyses on bounded lattices.

This article is drawn up as follows for the remainder: Main characteristics and definition of uninorms on bounded lattices are given in Part 2. Part 3 indicates two innovative techniques for providing uninorms on a bounded lattice  $T$ , considering an additional criteria on the element  $i \in T \setminus \{0,1\}$  that serves as an identity. These techniques utilize a t-conorm  $\Psi$  on  $[i, 1]^2$  and an interior operator on  $T$ , or a t-norm  $\Phi$  on  $[0, i]^2$  and a closure operator on  $T$ . Two forms of idempotent uninorms are acquired on bounded lattices instantaneously. Moreover, we discuss on how our approaches relate to the established ones in literature. To highlight the distinctions between our tools and the structures suggested in (Çaylı 2019, 2021, Zhao

and Wu 2021), we correspondingly offer a few instances. The findings drawn from our discussion are reviewed in the concluding part.

## 2. Preliminaries

The basic ideas and findings of bounded lattices (for further detail, see, for example, (Birkhoff 1967)) and uninorms on them are reviewed in this part. A binary relation  $\leq$  is an order relation if it is reflexive, antisymmetric and transitive. A nonempty set  $T$  with an order relation  $\leq$  is said to be a poset that is written as  $(T, \leq)$ . For the elements  $f, l \in T$ , if  $f \leq l$  and  $f \neq l$ , then the notation  $f < l$  is used. If  $f$  and  $l$  are incomparable (that is neither  $f \leq l$  nor  $l < f$ ), the notation  $f \parallel l$  is used. The set of all elements incomparable to  $f$  is denoted as  $H_f$  (that is  $H_f = \{u \in T : f \parallel u\}$ ). For a subset  $A$  of  $T$ , the element  $k \in A$  is said to be a greatest (resp. smallest) element of  $A$  when  $u \leq k$  (resp.  $u \leq k$ ) for all  $u \in A$ . If a poset  $(T, \leq)$  has smallest (also known as bottom) and greatest (also known as top) elements, then it is said to be a bounded poset.

A poset  $(T, \leq)$  is said to be a lattice if, for any two elements  $f, l \in T$ , they have a smallest upper bound (called join or supremum), written as  $f \vee l$ , and a greatest lower bound (called meet or infimum), written as  $f \wedge l$ . Unless otherwise indicated in this article,  $T$  represents a bounded lattice  $(T, \leq, 0, 1)$  that possesses the bottom and the top elements, which are represented by 0 and 1, respectively.

Given the elements  $f, l \in T$  satisfying that  $f \leq l$ , the subinterval  $[f, l]$  of  $T$  is stated by  $[f, l] = \{u \in T : f \leq u \leq l\}$ .

Similarly, we can give the subintervals  $[f, l]$ ,  $]f, l[$ , and  $]f, l[$  of  $T$ . Notice that  $([f, l], \leq)$  is a bounded lattice that possesses the top and bottom elements, represented by  $l$  and  $f$ , respectively.

**Definition 2.1.** (Çaylı et al. 2019, Karaçal and Mesiar 2015) A binary operation  $N: T^2 \rightarrow T$  is called a uninorm if, for any  $f, l, k \in T$ , the requirements listed below are met:

- (i)  $N(l, f) = N(f, l)$  (commutativity);
- (ii) If  $l \leq f$ , then  $N(l, k) \leq N(f, k)$  (increasingness);
- (iii)  $N(l, N(f, k)) = N(N(l, f), k)$  (associativity);
- (iv) An element  $i \in T$  exists, called an identity, satisfying that  $N(l, i) = l$  (identity).

In especial, a uninorm  $N$  becomes a t-conorm  $\Psi$  when  $i = 0$  and a t-norm  $\Phi$  when  $i = 1$ .

**Example 2.1.** (i) The greatest t-norm  $\Phi^\wedge: [f, l]^2 \rightarrow [f, l]$  is delineated by  $\Phi^\wedge(u, k) = u \wedge k$  for all  $u, k \in [f, l]$ . The fact remains that the smallest t-norm  $\Phi^w: [f, l]^2 \rightarrow [f, l]$

gets the value of  $u \wedge k$  if  $l \in \{u, k\}$  and  $f$  otherwise. Accordingly, for any t-norm  $\Phi$  on  $[f, l]^2$ , the inequality  $\Phi^W \leq \Phi \leq \Phi^\wedge$  is obtained.

(ii) The smallest t-conorm  $\Psi^V: [f, l]^2 \rightarrow [f, l]$  is delineated by  $\Psi^V(u, k) = u \vee k$  for all  $u, k \in [f, l]$ . The fact remains that the greatest t-conorm  $\Psi^W: [f, l]^2 \rightarrow [f, l]$  gets the value of  $u \vee k$  if  $f \in \{u, k\}$  and  $l$  otherwise. Accordingly, for any t-conorm  $\Psi$  on  $[f, l]^2$ , the inequality  $\Psi^V \leq \Psi \leq \Psi^W$  is obtained.

**Definition 2.2.** (Drossos 1999, Drossos and Navara 1996, Everett 1994) A operation  $\delta: T \rightarrow T$  is called a closure operator if, for any elements  $f, l \in T$ , the requirements listed below are met:

- (i)  $l \leq \delta(l)$  (expansion);
- (ii)  $\delta(l \vee f) = \delta(l) \vee \delta(f)$  (preservation of join);
- (iii)  $\delta(\delta(l)) = \delta(l)$  (idempotence).

**Definition 2.3.** (Drossos 1999, Drossos and Navara 1996, Everett 1994) A operation  $\sigma: T \rightarrow T$  is called an interior operator if, for any elements  $f, l \in T$ , the requirements listed below are met:

- (i)  $\sigma(l) \leq l$  (contraction);
- (ii)  $\sigma(f \wedge l) = \sigma(f) \wedge \sigma(l)$  (preservation of meet);
- (iii)  $\sigma(\sigma(l)) = \sigma(l)$  (idempotence).

### 3. Construction techniques for uninorms

This part presents a novel technique for creating the uninorm  $N_{(\delta)}$  on a bounded lattice  $T$  that possesses an identity  $i$ , as shown in Theorem 3.1. Notably, it makes use of both a closure operator  $\delta: T \rightarrow T$  and a t-norm  $\Phi: [0, i]^2 \rightarrow [0, i]$ . Additionally, we suggest an alternative approach in Theorem 3.10 for building uninorm  $N_{(\sigma)}$  on a bounded lattice  $T$  that possesses an identity  $i$ . This approach uses the presences of an interior operator  $\sigma: T \rightarrow T$  and a t-conorm  $\Psi: [i, 1]^2 \rightarrow [i, 1]$ .

**Theorem 3.1.** Assume that  $i \in T \setminus \{0, 1\}$  and  $\Phi: [0, i]^2 \rightarrow [0, i]$  is a t-norm. The undermentioned operation  $N_{(\delta)}: T^2 \rightarrow T$  is a uninorm that possesses an identity  $i$  for every closure operator  $\delta: T \rightarrow T$  iff  $a > b$  and  $d \vee a \in H_i \cup \{1\}$  for all  $d, a \in H_i$  and  $b \in [0, i]$ .

$$N_{(\delta)}(f, l) = \begin{cases} \Phi(f, l) & \text{if } (f, l) \in [0, i]^2, \\ f \wedge l & \text{if } (f, l) \in [0, i[ \times H_i \cup H_i \times [0, i[ \\ & \cup [0, i[ \times [i, 1] \cup [i, 1] \times [0, i[, \\ f & \text{if } (f, l) \in (H_i \cup [i, 1]) \times \{i\}, \\ l & \text{if } (f, l) \in \{i\} \times (H_i \cup [i, 1]), \\ f \vee l & \text{if } (f, l) \in H_i \times H_i, \\ \delta(f) \vee \delta(l) & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

**Proof: Necessity:** Presume that the operation  $N_{(\delta)}$  is a uninorm on  $T$  that possesses an identity  $i$ . We describe that  $a > b$  for all  $a \in H_i, b \in [0, i]$ . Letting that there are

some elements  $a \in H_i, b \in ]0, i[$  with  $a \parallel b$ , we receive that

$$\begin{aligned} N_{(\delta)}(b, N_{(\delta)}(a, 1)) &= N_{(\delta)}(b, \delta(a) \vee \delta(1)) \\ &= N_{(\delta)}(b, 1) \\ &= b \wedge 1 = b, \end{aligned} \quad (2)$$

and

$$\begin{aligned} N_{(\delta)}(N_{(\delta)}(b, a), 1) &= N_{(\delta)}(b \wedge a, 1) \\ &= b \wedge a \wedge 1 = b \wedge a. \end{aligned} \quad (3)$$

Since  $a \parallel b$ , the associativity feature of  $N_{(\delta)}$  is contradicted. Therefore,  $a > b$  for all  $a \in H_i, b \in ]0, i[$ . Now, we demonstrate  $d \vee a \in H_i \cup \{1\}$  for all  $d, a \in H_i$ . Presume that there are some elements  $d, a \in H_i$  with  $i < d \vee a < 1$ . In this case, for the closure operator  $\delta: T \rightarrow T$  presented by  $\delta(l) = 1$  for all  $l \in T$ , we get that

$$\begin{aligned} N_{(\delta)}(d, N_{(\delta)}(a, a)) &= N_{(\delta)}(d, a \vee a) \\ &= N_{(\delta)}(d, a) = d \vee a, \end{aligned} \quad (4)$$

and

$$\begin{aligned} N_{(\delta)}(N_{(\delta)}(d, a), a) &= N_{(\delta)}(d \vee a, a) \\ &= \delta(d \vee a) \vee \delta(a) \\ &= \delta(d \vee a) = 1. \end{aligned} \quad (5)$$

Then the associativity feature of  $N_{(\delta)}$  is contradicted. Therefore,  $d \vee a \in H_i \cup \{1\}$  for all  $d, a \in H_i$ .

**Sufficiency:** Presume that  $a > b$  and  $d \vee a \in H_i \cup \{1\}$  for all  $d, a \in H_i$  and  $b \in [0, i]$ . We bring out that the operation  $N_{(\delta)}$  is a uninorm on  $T$  that possesses an identity  $i$ . Clearly,  $N_{(\delta)}$  is commutative and the element  $i$  is an identity of  $N_{(\delta)}$ . Hence, it remains to verify that  $N_{(\delta)}$  is associative and increasing.

(i) **Increasingness:** We prove that, for all  $f, l, k \in T$ ,  $N_{(\delta)}(f, k) \leq N_{(\delta)}(l, k)$  if  $f \leq l$ . If  $k = i$ , then

$$\begin{aligned} N_{(\delta)}(f, k) &= N_{(\delta)}(f, i) = f \\ &\leq l = N_{(\delta)}(l, i) = N_{(\delta)}(l, k). \end{aligned} \quad (6)$$

If  $(f, l) \in [0, i]^2 \cup \{i\}^2 \cup [i, 1]^2 \cup H_i^2$ , the increasingness is obtained. Thence, we deal with all remaining possible cases.

(i-1) Let  $f \in [0, i]$ .

- $l = i$  and  $k \in [0, i]$ ,

$$N_{(\delta)}(f, k) = \Phi(f, k) \leq k = N_{(\delta)}(i, k) = N_{(\delta)}(l, k). \quad (7)$$

- $l = i$  and  $k \in [i, 1] \cup H_i$ ,

$$N_{(\delta)}(f, k) = f \wedge k \leq k = N_{(\delta)}(i, k) = N_{(\delta)}(l, k). \quad (8)$$

- $l \in [i, 1] \cup H_i$  and  $k \in [0, i]$ ,

$$N_{(\delta)}(f, k) = \Phi(f, k) \leq l \wedge k = N_{(\delta)}(l, k). \quad (9)$$

- $(l \in [i, 1] \cup H_i$  and  $k \in [i, 1])$  or  $(l \in [i, 1]$  and  $k \in H_i)$ ,

$$N_{(\delta)}(f, k) = f \wedge k \leq \delta(l) \vee \delta(k) = N_{(\delta)}(l, k). \quad (10)$$

- $l, k \in H_i$ ,

$$N_{(\delta)}(f, k) = f \wedge k \leq l \vee k = N_{(\delta)}(l, k). \quad (11)$$

(i-2) Let  $f = i$  and  $l \in ]i, 1]$ .

- $k \in [0, i[$ ,

$$N_{(\delta)}(f, k) = N_{(\delta)}(i, k) = k = l \wedge k = N_{(\delta)}(l, k). \quad (12)$$

- $k \in ]i, 1] \cup H_i$ ,

$$N_{(\delta)}(f, k) = k \leq \delta(l) \vee \delta(k) = N_{(\delta)}(l, k). \quad (13)$$

(i-3) Let  $f \in H_i$  and  $l \in ]i, 1]$ .

- $k \in [0, i[$ ,

$$N_{(\delta)}(f, k) = f \wedge k \leq l \wedge k = N_{(\delta)}(l, k). \quad (14)$$

- $k \in ]i, 1]$ ,

$$N_{(\delta)}(f, k) = \delta(f) \vee \delta(k) \leq \delta(l) \vee \delta(k) = N_{(\delta)}(l, k). \quad (15)$$

- $k \in H_i$ ,

$$N_{(\delta)}(f, k) = f \vee k \leq \delta(l) \vee \delta(k) = N_{(\delta)}(l, k). \quad (16)$$

(ii) *Associativity*: We prove that for all  $f, l, k \in T$ ,  $N_{(\delta)}(f, N_{(\delta)}(l, k)) = N_{(\delta)}(N_{(\delta)}(f, l), k)$ .

The associativity holds if  $i \in \{f, l, k\}$ . Thence, we deal with all remaining possible cases.

(ii-1) Let  $f \in [0, i[$ .

- $l, k \in [0, i[$ ,

$$\begin{aligned} N_{(\delta)}(f, N_{(\delta)}(l, k)) &= N_{(\delta)}(f, \Phi(l, k)) \\ &= \Phi(f, \Phi(l, k)) \\ &= N_{(\delta)}(\Phi(f, l), k) \\ &= N_{(\delta)}(N_{(\delta)}(f, l), k). \end{aligned} \quad (17)$$

- $l \in [0, i[$  and  $k \in ]i, 1] \cup H_i$ ,

$$\begin{aligned} N_{(\delta)}(f, N_{(\delta)}(l, k)) &= N_{(\delta)}(f, l \wedge k) = N_{(\delta)}(f, l) \\ &= \Phi(f, l) = \Phi(f, l) \wedge k \\ &= N_{(\delta)}(\Phi(f, l), k) \\ &= N_{(\delta)}(N_{(\delta)}(f, l), k). \end{aligned} \quad (18)$$

- $l \in ]i, 1] \cup H_i$  and  $k \in [0, i[$ ,

$$\begin{aligned} N_{(\delta)}(f, N_{(\delta)}(l, k)) &= N_{(\delta)}(f, l \wedge k) = N_{(\delta)}(f, k) \\ &= N_{(\delta)}(f \wedge l, k) \\ &= N_{(\delta)}(N_{(\delta)}(f, l), k). \end{aligned} \quad (19)$$

- $(l \in ]i, 1] \cup H_i$  and  $k \in ]i, 1])$  or  $(l \in ]i, 1]$  and  $k \in H_i)$ ,

$$\begin{aligned} N_{(\delta)}(f, N_{(\delta)}(l, k)) &= N_{(\delta)}(f, \delta(l) \vee \delta(k)) \\ &= f \wedge (\delta(l) \vee \delta(k)) = f \\ &= N_{(\delta)}(f, k) \\ &= N_{(\delta)}(N_{(\delta)}(f, l), k). \end{aligned} \quad (20)$$

- $l, k \in H_i$ ,

$$\begin{aligned} N_{(\delta)}(f, N_{(\delta)}(l, k)) &= N_{(\delta)}(f, l \vee k) = f \wedge (l \vee k) \\ &= f = N_{(\delta)}(f, k) \\ &= N_{(\delta)}(f \wedge l, k) \\ &= N_{(\delta)}(N_{(\delta)}(f, l), k). \end{aligned} \quad (21)$$

(ii-2) Let  $f \in ]i, 1] \cup H_i$ .

- $l, k \in [0, i[$ ,

$$\begin{aligned} N_{(\delta)}(f, N_{(\delta)}(l, k)) &= N_{(\delta)}(f, \Phi(l, k)) \\ &= f \wedge \Phi(l, k) = \Phi(l, k) \\ &= N_{(\delta)}(l, k) = N_{(\delta)}(f \wedge l, k) \\ &= N_{(\delta)}(N_{(\delta)}(f, l), k). \end{aligned} \quad (22)$$

- $l \in [0, i[$  and  $k \in ]i, 1] \cup H_i$ ,

$$\begin{aligned} N_{(\delta)}(f, N_{(\delta)}(l, k)) &= N_{(\delta)}(f, l \wedge k) \\ &= N_{(\delta)}(f, l) = l \\ &= N_{(\delta)}(l, k) = N_{(\delta)}(f \wedge l, k) \\ &= N_{(\delta)}(N_{(\delta)}(f, l), k). \end{aligned} \quad (23)$$

(ii-3) Let  $f \in H_i$  and  $l \in ]i, 1]$ .

- $k \in [0, i[$ ,

$$\begin{aligned} N_{(\delta)}(f, N_{(\delta)}(l, k)) &= N_{(\delta)}(f, l \wedge k) \\ &= N_{(\delta)}(f, k) = k \\ &= N_{(\delta)}(\delta(f) \vee \delta(l), k) \\ &= N_{(\delta)}(N_{(\delta)}(f, l), k). \end{aligned} \quad (24)$$

- $k \in ]i, 1] \cup H_i$ ,

$$\begin{aligned} N_{(\delta)}(f, N_{(\delta)}(l, k)) &= N_{(\delta)}(f, \delta(l) \vee \delta(k)) \\ &= \delta(f) \vee \delta(l) \vee \delta(k) \\ &= N_{(\delta)}(\delta(f) \vee \delta(l), k) \\ &= N_{(\delta)}(N_{(\delta)}(f, l), k). \end{aligned} \quad (25)$$

Similarly, for the cases  $f \in ]i, 1]$  or  $f, l \in H_i$ , the associativity hold.

Thence,  $N_{(\delta)}$  is a commutative, associative, and increasing operation on  $T$  that possesses an identity  $i$ . Consequently,  $N_{(\delta)}$  is a uninorm on  $T$ .

If we delimitate the closure operator  $\delta: T \rightarrow T$  by  $\delta(l) = l$  for all  $l \in T$ , the structure that corresponds to the uninorm in Theorem 3.1 is as follows:

**Corollary 3.2.** Assume that  $i \in T \setminus \{0, 1\}$  and  $\Phi: [0, i]^2 \rightarrow [0, i]$  is a t-norm. The undermentioned operation  $N_{(\Phi)}: T^2 \rightarrow T$  is a uninorm that possesses an identity  $i$  iff  $a > b$  for all  $a \in H_i$  and  $b \in [0, i[$ .

$$N_{(\Phi)}(f, l) = \begin{cases} \Phi(f, l) & \text{if } (f, l) \in [0, i]^2, \\ f \wedge l & \text{if } (f, l) \in [0, i[ \times H_i \cup H_i \times [0, i[ \\ & \quad \cup [0, i[ \times [i, 1] \cup [i, 1] \times [0, i[, \\ f & \text{if } (f, l) \in H_i \times \{i\}, \\ l & \text{if } (f, l) \in \{i\} \times H_i, \\ f \vee l & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (26)$$

Take a note that the uninorm  $N_{(\Phi)}: T^2 \rightarrow T$  in Corollary 3.2 is equivalent to the one introduced in Theorem 6 by Çaylı (2019). Hence, the uninorm  $N_{(\delta)}: T^2 \rightarrow T$  in Theorem 3.1 encompasses, as a specific case, the uninorm constructed in Theorem 6 by Çaylı (2019). Moreover, when taking in Corollary 3.2 the t-norm  $\Phi: [0, i]^2 \rightarrow [0, i]$  determined by  $\Phi = \Phi^\wedge$ , we get Corollary 3.3 that presents the appearance of an idempotent uninorm on bounded lattices.

**Corollary 3.3.** Assume that  $i \in T \setminus \{0, 1\}$ . The undermentioned operation  $N_{(\wedge)}: T^2 \rightarrow T$  is an idempotent uninorm that possesses an identity  $i$  iff  $a > b$  for all  $a \in H_i$  and  $b \in [0, i[$ .

$$N_{(\wedge)}(f, l) = \begin{cases} f \vee l & \text{if } (f, l) \in [i, 1]^2 \cup H_i \times H_i \\ & \quad \cup ]i, 1[ \times H_i \cup H_i \times ]i, 1[, \\ f & \text{if } (f, l) \in H_i \times \{i\}, \\ l & \text{if } (f, l) \in \{i\} \times H_i, \\ f \wedge l & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (27)$$

If we admit being an atom of the element  $i \in T \setminus \{0, 1\}$ , the structure that corresponds to the uninorm in Corollary 3.2 is as follows:

**Corollary 3.4** Assume that  $i \in T \setminus \{0, 1\}$  is an atom. The undermentioned operation  $N_{(i, \wedge)}: T^2 \rightarrow T$  is an idempotent uninorm that possesses an identity  $i$ .

$$N_{(i, \wedge)}(f, l) = \begin{cases} f \vee l & \text{if } (f, l) \in [i, 1]^2 \cup H_i \times H_i \\ & \quad \cup ]i, 1[ \times H_i \cup H_i \times ]i, 1[, \\ f & \text{if } (f, l) \in H_i \times \{i\}, \\ l & \text{if } (f, l) \in \{i\} \times H_i, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (28)$$

**Remark 3.5.** Assume that  $i \in T \setminus \{0, 1\}$ ,  $\Psi: [i, 1]^2 \rightarrow [i, 1]$  is a t-conorm and  $\delta: T \rightarrow T$  is a closure operator. We develop in Theorem 3.1 an innovative generation for uninorms on bounded lattices. Specifically,

(i) if we choose  $f$  and  $l$  from  $H_i$ , then our technique puts for  $N_{(\delta)}(f, l)$  the output  $f \vee l$  while the one described in Theorem 8 by Çaylı (2019) puts for  $N(f, l)$  the output  $\Psi(f \vee i, l \vee i)$ . If  $(f, l) \in ]i, 1]^2 \cup ]i, 1[ \times H_i \cup H_i \times ]i, 1[$ , in our technique  $N_{(\delta)}(f, l) = \delta(f) \vee \delta(l)$  while in Theorem 8 determined by Çaylı (2019)  $N(f, l) = \Psi(f \vee$

$i, l \vee i)$ . On the other hand, both techniques equal in the remainder domains;

(ii) if we choose  $f$  and  $l$  from  $H_i$ , then our technique puts for  $N_{(\delta)}(f, l)$  the output  $f \vee l$  while the one presented in Theorem 3.1 by Çaylı (2021) puts for  $N(f, l)$  the output  $\delta(f) \vee \delta(l)$ . On the other hand, both techniques equal in the remainder domains;

(iii) if we choose  $f$  and  $l$  from  $H_i$ , then our technique puts for  $N_{(\delta)}(f, l)$  the output  $f \vee l$  while the one presented in Theorem 3.4 by Çaylı (2021) puts for  $N(f, l)$  the output  $\delta(f) \vee \delta(l)$ . If  $(f, l) \in ]i, 1]^2 \cup ]i, 1[ \times H_i \cup H_i \times ]i, 1[$ , in our technique  $N_{(\delta)}(f, l) = \delta(f) \vee \delta(l)$  while in Theorem 3.4 stated by Çaylı (2021)  $N(f, l) = \Psi(f, l)$  for  $(f, l) \in ]i, 1]^2$  and  $N(f, l) = f \vee l$  for  $(f, l) \in ]i, 1[ \times H_i \cup H_i \times ]i, 1[$ . On the other hand, both techniques equal in the remainder domains;

(iv) if we choose  $f$  and  $l$  from  $H_i$ , then our technique puts for  $N_{(\delta)}(f, l)$  the output  $f \vee l$  while the one proposed in Proposition 3.5 by Zhao and Wu (2021) puts for  $N(f, l)$  the output  $\delta(f) \vee \delta(l)$ . If  $(f, l) \in ]i, 1]^2 \cup ]i, 1[ \times H_i \cup H_i \times ]i, 1[$ , in our technique  $N_{(\delta)}(f, l) = \delta(f) \vee \delta(l)$  while in Proposition 3.5 represented by Zhao and Wu (2021)  $N(f, l) = 1$ . On the other hand, both techniques equal in the remainder domains.

**Remark 3.6.** Assume that  $i \in T \setminus \{0, 1\}$ . If we specify the closure operator  $\delta: T \rightarrow T$  by  $\delta(l) = l$  for all  $l \in T$ , then the below-mentioned statements are obtained:

- (i)  $N_{(\delta)}$  fits the definition of the uninorm described in Theorem 3.1 by Çaylı (2021);
- (ii)  $N_{(\delta)}$  fits the definition of the uninorm presented in Theorem 3.4 by Çaylı (2021) if defining the t-conorm  $\Psi: [i, 1]^2 \rightarrow [i, 1]$  such that  $\Psi = \Psi^\vee$ ;
- (iii)  $N_{(\delta)}$  fits the definition of the uninorm proposed in Proposition 3.6 by Zhao and Wu (2021) if  $l_1 \parallel l_2$  for all  $l_1 \in [i, 1[$ ,  $l_2 \in H_i$  and the t-conorm  $\Psi: [i, 1]^2 \rightarrow [i, 1]$  is defined by  $\Psi = \Psi^\vee$ .

Observably, the uninorm depicted by the structure in Theorem 3.1 does not have to match those that are delineated in (Çaylı 2019, 2021, Zhao and Wu 2021). We show this assertion in the below-mentioned examples.

**Example 3.7.** Take into consideration the lattice  $T_1$  described by Hasse diagram in Figure 1 and the t-norm  $\Phi: [0, i]^2 \rightarrow [0, i]$  represented by  $\Phi = \Phi^\wedge$ . Identify the closure operator  $\delta: T_1 \rightarrow T_1$  by  $\delta(0) = 0$ ,  $\delta(i) = i$ ,  $\delta(s) = \delta(u) = u$ ,  $\delta(t) = t$ ,  $\delta(n) = \delta(m) = m$ ,  $\delta(p) = \delta(q) = q$  and  $\delta(1) = 1$ . The uninorm  $N_{(\delta)}^1: T_1 \times T_1 \rightarrow T_1$  is presented in Table 1 with the help of the framework

established in Theorem 3.1. In that case, we obtain the statements listed below:

- (i)  $N_{(\delta)}^1$  fulfills that  $N_{(\delta)}^1(n, m) = m$  and  $N_{(\delta)}^1(n, n) = n$ ;
- (ii) the uninorm  $N^1: T_1 \times T_1 \rightarrow T_1$  obtained by the generation mean in Theorem 8 in (Çaylı 2019) fulfills that  $N^1(n, m) = 1$ ;
- (iii) the uninorms  $N^2, N^3: T_1 \times T_1 \rightarrow T_1$ , respectively, built by techniques in Proposition 3.6 in (Zhao and Wu 2021) and Theorem 3.4 in (Çaylı 2021) fulfill that  $N^2(n, n) = N^3(n, n) = m$ .

Hence,  $N_{(\delta)}^1$  differs from the uninorms  $N^1, N^2$  and  $N^3$  on  $T_1$ .

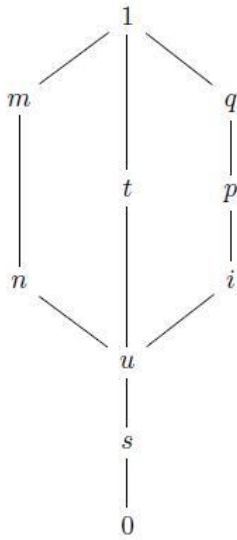


Figure 1. The lattice  $T_1$

Table 1. Uninorm  $N_{(\delta)}^1$  on  $T_1$

$N_{(\delta)}^1$	0	s	u	i	t	n	m	p	q	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s	0	s	s	s	s	s	s	s	s	s
u	0	s	u	u	u	u	u	u	u	u
i	0	s	u	i	t	n	m	p	q	1
t	0	s	u	t	t	1	1	1	1	1
n	0	s	u	n	1	n	m	1	1	1
m	0	s	u	m	1	m	m	1	1	1
p	0	s	u	p	1	1	1	q	q	1
q	0	s	u	q	1	1	1	q	q	1
1	0	s	u	1	1	1	1	1	1	1

**Example 3.8.** Take into consideration the lattice  $T_2$  depicted by Hasse diagram in Figure 2. Determine the closure operator  $\delta: T_2 \rightarrow T_2$  by  $\delta(0) = 0, \delta(i) = \delta(m) = \delta(n) = n, \delta(p) = \delta(q) = \delta(s) = s$  and  $\delta(1) = 1$ . The uninorm  $N_{(\delta)}^2: T_2 \times T_2 \rightarrow T_2$  is presented in Table 2 with the help of the framework established in Theorem 3.1. In that case, we obtain the statements listed below:

- (i)  $N_{(\delta)}^2$  fulfills that  $N_{(\delta)}^2(p, q) = q$ ;
- (ii) the uninorms  $N^4, N^5: T_2 \times T_2 \rightarrow T_2$ , respectively, built by techniques in Theorem 3.4 in (Çaylı 2021) and Proposition 3.5 in (Zhao and Wu 2021) fulfill that  $N^4(p, q) = N^5(p, q) = s$ .

Hence,  $N_{(\delta)}^2$  differs from the uninorms,  $N^4$  and  $N^5$  on  $T_2$ .

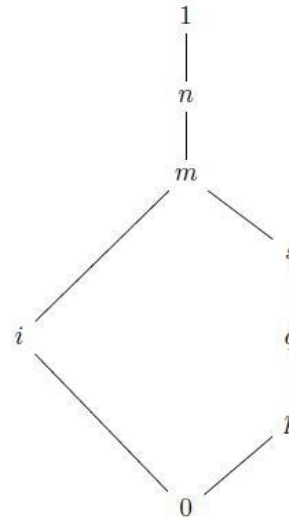


Figure 2. The lattice  $T_2$

Table 2. Uninorm  $N_{(\delta)}^2$  on  $T_2$

$N_{(\delta)}^2$	0	i	p	q	s	m	n	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0
i	0	i	p	q	s	m	n	1
p	0	p	p	q	s	n	n	1
q	0	q	q	q	s	n	n	1
s	0	s	s	s	s	n	n	1
m	0	m	n	n	n	n	n	1
n	0	n	n	n	n	n	n	1
1	0	1	1	1	1	1	1	1

**Remark 3.9.** The uninorm  $N_{(\delta)}$  in Theorem 3.1 matches up to the t-conorm  $\Psi'$  on  $[i, 1]^2$  stated by

$$\Psi'(f, l) = \begin{cases} \delta(f) \vee \delta(l) & \text{if } (f, l) \in ]i, 1]^2, \\ f \vee l & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (29)$$

Nevertheless,  $N_{(\delta)}$  does not need to match up with any other t-conorm except  $\Psi'$  on  $[i, 1]^2$ . To indicate this assertion, assume that the closure operator  $\delta$  on the lattice  $T_2$  in Figure 2 has the definition shown in Example 3.8 and the uninorm  $N_{(\delta)}|[i, 1]^2$  is the t-conorm  $\Psi'': [i, 1]^2 \rightarrow [i, 1]$  given in Table 3.

Table 3. T-conorm  $\Psi''$  on  $[i, 1]^2$

$\Psi''$	i	m	n	1
i	i	m	n	1
m	m	m	1	1
n	n	1	1	1
1	1	1	1	1

Utilizing the structure manner described in Theorem 3.1, then we conclude that

$$\begin{aligned} N_{(\delta)}\left(\left(N_{(\delta)}(m, m), q\right)\right) &= N_{(\delta)}(\Psi''(m, m), q) \\ &= N_{(\delta)}(m, q) \\ &= \delta(m) \vee \delta(q) = n \vee s = n, \end{aligned} \quad (30)$$

and



$$\begin{aligned}
 N_{(\delta)}(m, (N_{(\delta)}(m, q))) &= N_{(\delta)}(m, \delta(m) \vee \delta(q)) \\
 \square &= N_{(\delta)}(m, n) \\
 \square &= \Psi''(m, n) = 1.
 \end{aligned} \tag{31}$$

It contradicts the associativity property of  $N_{(\delta)}$ . Consequently,  $N_{(\delta)}$  does not need to match up with any t-conorm excluding  $\Psi'$  on  $[i, 1]^2$ .

We develop in the below-mentioned Theorem 3.10 a dual generation process of uninorms on bounded lattices. Accordingly, we delineate the form of uninorm  $N_{(\sigma)}$  that possesses an identity  $i$  on  $T$ , exploiting a t-conorm  $\Psi: [i, 1]^2 \rightarrow [i, 1]$  and an interior operator  $\sigma$  on  $T$ .

**Theorem 3.10.** Assume that  $i \in T \setminus \{0, 1\}$  and  $\Psi: [i, 1]^2 \rightarrow [i, 1]$  is a t-conorm. The undermentioned operation  $N_{(\sigma)}: T^2 \rightarrow T$  is a uninorm that possesses an identity  $i$  for every interior operator  $\sigma: T \rightarrow T$  iff  $a < c$  and  $d \wedge a \in H_i \cup \{0\}$  for all  $d, a \in H_i, c \in ]i, 1[$ .

$$N_{(\sigma)}(f, l) = \begin{cases} \Psi(f, l) & \text{if } (f, l) \in [i, 1]^2, \\ f \vee l & \text{if } (f, l) \in ]i, 1[ \times H_i \cup H_i \times ]i, 1[ \\ & \cup ]i, 1[ \times [0, i] \cup [0, i] \times ]i, 1[, \\ f & \text{if } (f, l) \in (H_i \cup [0, i]) \times \{i\}, \\ l & \text{if } (f, l) \in \{i\} \times (H_i \cup [0, i]), \\ f \wedge l & \text{if } (f, l) \in H_i \times H_i, \\ \sigma(f) \wedge \sigma(l) & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{32}$$

**Proof:** It is proved using similar circumstances in that of Theorem 3.1.

If we delimitate in Theorem 3.10 the interior operator  $\sigma: T \rightarrow T$  by  $\sigma(l) = l$  for all  $l \in T$ , the structure that corresponds to the uninorm in Theorem 3.10 is as follows:

**Corollary 3.11.** Assume that  $i \in T \setminus \{0, 1\}$  and  $\Psi: [i, 1]^2 \rightarrow [i, 1]$  is a t-conorm. The undermentioned operation  $N_{(\Psi)}: T^2 \rightarrow T$  is a uninorm that possesses an identity  $i$  iff  $a < c$  for all  $a \in H_i, c \in ]i, 1[$ .

$$N_{(\Psi)}(f, l) = \begin{cases} \Psi(f, l) & \text{if } (f, l) \in [i, 1]^2, \\ f \vee l & \text{if } (f, l) \in ]i, 1[ \times H_i \cup H_i \times ]i, 1[ \\ & \cup ]i, 1[ \times [0, i] \cup [0, i] \times ]i, 1[, \\ f & \text{if } (f, l) \in H_i \times \{i\}, \\ l & \text{if } (f, l) \in \{i\} \times H_i, \\ f \wedge l & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{33}$$

Take a note that the uninorm  $N_{(\Psi)}: T^2 \rightarrow T$  in Corollary 3.11 is equivalent to the one introduced in Theorem 9 by Çaylı (2019). Hence, the uninorm  $N_{(\sigma)}: T^2 \rightarrow T$  in

Theorem 3.10 encompasses, as a special case, the uninorm constructed in Theorem 9 by Çaylı (2019). Furthermore, when taking in Corollary 3.11 the t-conorm  $\Psi: [i, 1]^2 \rightarrow [i, 1]$  stated by  $\Psi = \Psi^v$ , we get Corollary 3.12 that presents the appearance of an idempotent uninorm on bounded lattices.

**Corollary 3.12.** Assume that  $i \in T \setminus \{0, 1\}$ . The undermentioned operation  $N_{(v)}: T^2 \rightarrow T$  is an idempotent uninorm that possesses an identity  $i$  iff  $a < c$  for all  $a \in H_i, c \in ]i, 1[$ .

$$N_{(v)}(f, l) = \begin{cases} f \wedge l & \text{if } (f, l) \in [0, i]^2 \cup H_i \times H_i \\ & \cup H_i \times [0, i] \cup [0, i] \times H_i, \\ f & \text{if } (f, l) \in H_i \times \{i\}, \\ l & \text{if } (f, l) \in \{i\} \times H_i, \\ f \vee l & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{34}$$

If we admit being a coatom of the element  $i \in T \setminus \{0, 1\}$ , the structure that corresponds to the uninorm in Corollary 3.12 is as follows:

**Corollary 3.13.** Assume that  $i \in T \setminus \{0, 1\}$  is a coatom. The undermentioned operation  $N_{(i,v)}: T^2 \rightarrow T$  is an idempotent uninorm that possesses an identity  $i$ .

$$N_{(i,v)}(f, l) = \begin{cases} f \wedge l & \text{if } (f, l) \in [0, i]^2 \cup H_i \times H_i \\ & \cup H_i \times [0, i] \cup [0, i] \times H_i, \\ f & \text{if } (f, l) \in H_i \times \{i\}, \\ l & \text{if } (f, l) \in \{i\} \times H_i, \\ 1 & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{35}$$

**Remark 3.14.** Assume that  $i \in T \setminus \{0, 1\}$ ,  $\Phi: [0, i]^2 \rightarrow [0, i]$  is a t-norm and  $\sigma: T \rightarrow T$  is an interior operator. For uninorms on bounded lattices, we formulate a novel generation procedure in Theorem 3.10. Specifically, (i) if we choose  $f$  and  $l$  from  $H_i$ , then our technique puts for  $N_{(\sigma)}(f, l)$  the output  $f \wedge l$  while the one described in Theorem 11 by Çaylı (2019) puts for  $N(f, l)$  the output  $\Phi(f \wedge i, l \wedge i)$ . If  $(f, l) \in [0, i]^2 \cup [0, i] \times H_i \cup H_i \times [0, i]$ , in our technique  $N_{(\sigma)}(f, l) = \sigma(f) \wedge \sigma(l)$  while in Theorem 11 provided by Çaylı (2019)  $N(f, l) = \Phi(f \wedge i, l \wedge i)$ . On the other hand, both techniques match up in the remainder domains;

(ii) if we choose  $f$  and  $l$  from  $H_i$ , then our technique puts for  $N_{(\sigma)}(f, l)$  the output  $f \wedge l$  while the one proposed in Theorem 3.10 by Çaylı (2021) puts for  $N(f, l)$  the output  $\sigma(f) \wedge \sigma(l)$ . On the other hand, both techniques equal in the remainder domains;

(iii) if we choose  $f$  and  $l$  from  $H_i$ , then our technique puts for  $N_{(\sigma)}(f, l)$  the output  $f \wedge l$  while the one in Theorem 3.12 by Çaylı (2021) puts for  $N(f, l)$  the output  $\sigma(f) \wedge \sigma(l)$ . If  $(f, l) \in [0, i]^2 \cup [0, i] \times H_i \cup H_i \times [0, i]$ , in our

technique  $N(\sigma)(f, l) = \sigma(f) \wedge \sigma(l)$  while in Theorem 3.12 presented by Çaylı (2021)  $N(f, l) = \Phi(f, l)$  for  $(f, l) \in [0, i]^2$ , and  $N(f, l) = f \wedge l$  for  $(f, l) \in [0, i] \times H_i \cup H_i \times [0, i]$ . On the other hand, both techniques match up in the remainder domains;

(iv) if we choose  $f$  and  $l$  from  $H_i$ , then our technique puts for  $N_{(\sigma)}(f, l)$  the output  $f \wedge l$  while the one in Corollary 4.2 introduced by Zhao and Wu (2021) puts for  $N(f, l)$  the output  $\sigma(f) \wedge \sigma(l)$ . If  $(f, l) \in [0, i]^2 \cup [0, i] \times H_i \cup H_i \times [0, i]$ , in our technique  $N(\sigma)(f, l) = \sigma(f) \wedge \sigma(l)$  while in Corollary 4.2 introduced by Zhao and Wu (2021)  $N(f, l) = 0$ . On the other hand, both techniques equal in the remainder domains.

**Remark 3.15.** Let  $i \in T \setminus \{0, 1\}$ . If we specify the interior operator  $\sigma: T \rightarrow T$  by  $\sigma(l) = l$  for all  $l \in T$ , we obtain the statements listed below:

- (i) the uninorm  $N_{(\sigma)}$  in Theorem 3.10 matches up to the uninorm presented in Theorem 3.10 by Çaylı (2021);
- (ii) the uninorm  $N_{(\sigma)}$  in Theorem 3.10 matches up to the uninorm provided in Theorem 3.12 by Çaylı (2021) when defining the t-norm  $\Phi: [0, i]^2 \rightarrow [0, i]$  such that  $\Phi = \Phi^\wedge$ ;
- (iii) the uninorm  $N_{(\sigma)}$  in Theorem 3.10 matches up to the uninorm stated in Corollary 4.4 by Zhao and Wu (2021) if  $f_1 \parallel f_2$  for all  $f_1 \in [0, i], f_2 \in H_i$  and the t-norm  $\Phi: [0, i]^2 \rightarrow [0, i]$  is defined by  $\Phi = \Phi^\wedge$ .

Analogously to Examples 3.7 and 3.8, we can illustrate that the uninorm established by Theorem 3.10 does not need to match up to those that are described in (Çaylı 2019, 2021, Zhao and Wu 2021).

#### 4. Conclusions

Uninorms have been thoroughly explored on bounded lattices similar to the way their investigations on the unit interval. Constructing uninorms has emerged on bounded lattices as a fascinating field of research recently. In this article, a novel method was presented to create uninorms possessing an identity  $i \in T \setminus \{0, 1\}$  on a bounded lattice  $T$  that benefit from both a closure operator  $\delta$  and a t-norm  $\Phi$  on  $T$ . Subsequently, we developed a dual construction mean for uninorms on  $T$  with the underlying not only the interior operator  $\sigma$  but also the t-conorm  $\Psi$  on  $T$ . We acquired on bounded lattices two forms of idempotent uninorms as a consequence of these techniques. For a better comprehension of the newly developed uninorms, some illustrated examples were also presented. Moreover, we examined the relative advantages of our tools against various techniques previously outlined in (Çaylı 2019, 2021, Zhao and Wu 2021). We came to the conclusion that the approaches in

this article do not have to match up to those found in the literature.

#### Declaration of Ethical Standards

The authors declare that they comply with all ethical standards.

#### Credit Authorship Contribution Statement

Yazar: Conceptualization, Methodology/Study design, Software, Validation, Formal analysis, Investigation, Resources, Data curation, Writing—original draft, Writing—review and editing, Visualization, Supervision

#### Declaration of Competing Interest

The authors have no conflicts of interest to declare regarding the content of this article.

#### Data Availability Statement

All data generated or analyzed during this study are included in this published article.

#### Acknowledgement

The author would like to thank the reviewers for evaluating and enriching this paper with their ideas, and the journal editors for their interest and effort.

#### 5. References

- Beliakov, G., Pradera, A. and Calvo, T., 2007. Aggregation Functions: A guide for Practitioners, Springer, Berlin.
- Benítez, J.M., Castro, J.L. and Requena, I., 1997. Are artificial neural networks black boxes? *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, **8**, 1156–1163. <https://doi.org/10.1109/72.623216>
- Birkhoff, G., 1967. Lattice Theory. American Mathematical Society Colloquium Publishers, Providence, RI.
- Bodjanova, S. and Kalina, M., 2018. Uninorms on bounded lattices-recent development. In: Kacprzyk, J., et al. (Eds.) EUSFLAT 2017, AISC, vol 641, Springer, Cham, 224–234.
- Bodjanova, S. and Kalina, M., 2019. Uninorms on bounded lattices with given underlying operations. In: Halaš, R., et al. (Eds.), AGOP 2019, AISC, vol. 981, Springer, Cham, 183-194.
- Çaylı, G.D., Karaçal, F. and Mesiar, R., 2019. On internal and locally internal uninorms on bounded lattices. *International Journal of General Systems*, **48**, 235-259. <https://doi.org/10.1080/03081079.2018.1559162>
- Çaylı, G.D., 2019. Alternative approaches for generating uninorms on bounded lattices. *Information Sciences*, **488**, 111-139. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.03.007>
- Çaylı, G.D., 2020. Uninorms on bounded lattices with the underlying t-norms and t-conorms. *Fuzzy Sets and Systems*, **395**, 107-129. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2019.06.005>

- Çaylı, G.D., 2021. New construction approaches of uninorms on bounded lattices, *International Journal of General Systems*, **50**, 139-158.  
<https://doi.org/10.1080/03081079.2020.1863397>
- Dan, Y. and Hu, B.Q., 2020. A new structure for uninorms on bounded lattices. *Fuzzy Sets and Systems*, **386**, 77-94.  
<https://doi.org/10.1016/j.fss.2019.02.001>
- Dan, Y., Hu, B.Q. and Qiao, J., 2019. New constructions of uninorms on bounded lattices. *International Journal of Approximate Reasoning*, **110**, 185-209.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijar.2019.04.009>
- De Baets, B., 1999. Idempotent uninorms. *European Journal of Operational Research*, **118**, 631-642.  
[https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00325-7](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00325-7)
- De Baets, B., Fodor, J., Ruiz-Aguilera, D. and Torrens, J., 2009. Idempotent uninorms on finite ordinal scales. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, **17**, 1-14.  
<https://doi.org/10.1142/S021848850900570X>
- Drewniak, J. and Drygaś, P., 2002. On a class of uninorms. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, **10**, 5-10.  
<https://doi.org/10.1142/S021848850200179X>
- Drossos, C. A., 1999. Generalized t-norm structures. *Fuzzy Sets and Systems*, **104**, 53-59.  
[https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(98\)00258-9](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(98)00258-9)
- Drossos, C. A. and Navara, M. 1996. Generalized t-conorms and closure operators. Proceedings of EUFIT'96, Aachen, Germany, 22-26.
- Dubios, D. and Prade, H., 1995. A review of fuzzy set aggregation connectives. *Information Sciences*, **3**, 85-121.  
[https://doi.org/10.1016/0020-0255\(85\)90027-1](https://doi.org/10.1016/0020-0255(85)90027-1)
- Dubios, D. and Prade, H., 2000. Fundamentals of Fuzzy Sets Kluwer Academic Publisher, Boston.
- Everett, C.J., 1944. Closure operators and Galois theory in lattices. *Transactions of the American Mathematical Society*, **55**, 514-525.  
<https://doi.org/10.1090/S0002-9947-1944-0010556-9>
- Fodor, J., Yager, R.R. and Rybalov, A., 1997. Structure of uninorms. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, **5**, 411-427.  
<https://doi.org/10.1142/S0218488597000312>
- González-Hidalgo, M., Massanet, S., Mir, A. and Ruiz-Aguilera, D., 2015. On the choice of the pair conjunction-implication into the fuzzy morphological edge detector. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, **23**, 872-884.  
<https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2014.2333060>
- He, P. and Wang, X.P., 2021. Constructing uninorms on bounded lattices by using additive generators. *International Journal of Approximate Reasoning*, **136**, 1-13.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijar.2021.05.006>
- Hua, X.J. and Ji, W., 2022. Uninorms on bounded lattices constructed by t-norms and t-subconorms. *Fuzzy Sets and Systems*, **427**, 109-131.  
<https://doi.org/10.1016/j.fss.2020.11.005>
- Karaçal, F. and Mesiar, R., 2015. Uninorms on bounded lattices. *Fuzzy Sets and Systems*, **261**, 33-43.  
<https://doi.org/10.1016/j.fss.2014.05.001>
- Klement, E.P., Mesiar, R. and Pap, E., 2000. Triangular Norms. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2000.
- Klement, E.P., Mesiar, R. and Pap, E., 2004a. Triangular norms. Position article I: basic analytical and algebraic properties. *Fuzzy Sets and Systems*, **143**, 5-26.  
<https://doi.org/10.1016/j.fss.2003.06.007>
- Klement, E.P., Mesiar, R. and Pap, E., 2004b. Triangular norms. Position article II: general constructions and parametrized families. *Fuzzy Sets and Systems*, **145**, 411-438.  
[https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(03\)00327-0](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(03)00327-0)
- Menger, K., 1942. Statistical metrics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **8**, 535-537.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.28.12.535>
- Ouyang, Y. and Zhang, H.P., 2020. Constructing uninorms via closure operators on a bounded lattice. *Fuzzy Sets and Systems*, **395**, 93-106.  
<https://doi.org/10.1016/j.fss.2019.05.006>
- Schweizer, B. and Sklar, A., 1963. Associative functions and abstract semigroups. *Publicationes Mathematicae Debrecen*, **10**, 69-81.  
<https://doi.org/10.5486/PMD.1963.10.1-4.09>
- Schweizer, B. and Sklar, A., 1983. Probabilistic Metric Spaces. Elsevier North-Holland, New York.
- Sun, X.R. and Liu, H.W., 2022. Further characterization of uninorms on bounded lattices. *Fuzzy Sets and Systems*, **427**, 96-108.  
<https://doi.org/10.1016/j.fss.2021.01.006>
- Takács, M., 2008. Uninorm-based models for FLC systems. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, **19**, 65-73.
- Yager, R.R., 1994. Aggregation operators and fuzzy systems modelling. *Fuzzy Sets and Systems*, **67**, 129-145.  
[https://doi.org/10.1016/0165-0114\(94\)90082-5](https://doi.org/10.1016/0165-0114(94)90082-5)
- Yager, R.R. and Rybalov, A., 1996. Uninorm aggregation operators. *Fuzzy Sets and Systems*, **80**, 111-120.  
[https://doi.org/10.1016/0165-0114\(95\)00133-6](https://doi.org/10.1016/0165-0114(95)00133-6)
- Yager, R.R., 2001. Uninorms in fuzzy systems modelling. *Fuzzy Sets and Systems*, **122**, 167-175.  
[https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(00\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(00)00027-0)

Yager, R.R., 2003. Defending against strategic manipulation in uninorm-based multi-agent decision making. *Fuzzy Sets and Systems*, **140**, 331-339.  
[https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00267-3](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00267-3)

Zhao, B. and Wu, T., 2021. Some further results about uninorms on bounded lattices. *International Journal of Approximate Reasoning*, **130**, 22-49.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijar.2020.12.008>

## Güçlü Temsil Yöntemleri ile Kişi Tanıma ve Takibi için Hibrit Bir Yaklaşım

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 09.11.2023

Kabul/Accepted: 31.07.2024

Yayımlandı/Published:02.12.2024

### A Hybrid Approach to Person Recognition and Tracking with Powerful Representation Methods

Gizem ORTAÇ KOŞUN<sup>1\*</sup>, Seçkin YILMAZ<sup>2</sup>, Rüya ŞAMLI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Yazılım Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

Halka açık ve kalabalık alanlarda yapılan gözetimlerde, otomatik bir takip sistemi olmadan manuel olarak gerçekleştirilen izlemelerde kişilerin takibi zor bir görevdir. Önerilen çalışma, bu sorunu çözmek ve literatüre katkı sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. Hibrit sistem, gözetim sistemlerinde kişilerin tanımlanması ve takibi için tasarlanmıştır. Kamera sistemlerinin kaydettiği videolarda takip edilmek istenen kişi, Mask R-CNN yöntemi kullanılarak segmente edilir ve farklı tekniklerle çıkarılan özellikleri birleştirilerek daha güçlü bir temsil vektörü oluşturulur. Bu temsil vektörü, kişilerin videolarda otomatik bir sistemle aranmasını ve daha etkili bir şekilde takip edilmesini kolaylaştırır. Çalışmada, renk histogramları, Gabor filtreleri, yönlendirilmiş gradyan histogramı ve VGG16 mimarisinden oluşan özellik çıkarım teknikleri kullanılarak güçlü bir temsil oluşturulmaktadır. Bu temsil, kişilerin daha iyi tanımlanmasını sağlayarak videolarda daha hızlı ve etkin bir arama performansı sunar. Çalışma, güvenlik personelinin yüz tanıma zorluğu yaşadığı durumlarda olağan şüpheli kişilerin tanımlanması ve takibini kolaylaştırmak için önemli bir altyapı sağlar. Sorgulanan kişinin her bir video karesinde tespit edilip işaretlenmesini sağlayarak gerçek dünyada kullanılabilir bir uygulama örneği sunar. Elde edilen sonuçlar, kesinlik, duyarlılık ve F skoru metrikleri kullanılarak yorumlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kişi tanıma, Kişi takibi, Gözetim videoları, Kişi yeniden tanımlama

#### Abstract

Tracking people is a difficult task in surveillance carried out in public and crowded areas and in manual monitoring without an automatic tracking system. The proposed study was developed to solve this problem and contribute to the literature. The hybrid system is designed for identification and tracking of individuals in surveillance systems. The person who is wanted to be followed in the videos recorded by the camera systems is segmented using the Mask R-CNN method and a stronger representation vector is created by combining the features extracted with different techniques. This representation vector makes it easier to search for people in videos and track them more effectively with an automated system. In the study, a powerful representation is created using feature extraction techniques consisting of color histograms, Gabor filters, directed gradient histogram and VGG16 architecture. This representation enables better identification of people, providing faster and more effective search performance in videos. The study provides an important infrastructure to facilitate the identification and tracking of usual suspects in situations where security personnel have difficulty in facial recognition. It provides an application example that can be used in the real world by ensuring that the interrogated person is detected and marked in each video frame. The results obtained were interpreted using precision, sensitivity and F score metrics.

**Keywords:** Person identification, Person tracking, Surveillance videos, Person reidentification

#### 1. Giriş

Günümüzde halkın güvenliği ve emniyeti konularının önemi her geçen gün artmaktadır. Özellikle havaalanları ve alışveriş merkezleri gibi kalabalık ve halka açık alanlarda, güvenlik endişeleri giderek artmaktadır. Bu nedenle, halkın güvenliğini sağlamak için önemli miktarda harcama yapılmakta ve çaba gösterilmektedir. Video gözetim sistemleri ise bu alanda kilit bir rol oynamaktadır. Adli soruşturmalar, suç tespiti, suç önleme ve kısıtlı

alanların korunması gibi çeşitli güvenlik konularını ele almak için günümüzde yaygın olarak kullanılan gözetim sistemleri, etkili bir güvenlik aracı olarak öne çıkmaktadır (Xiao vd. 2019).

Ülkemizde, kapalı alanların gözetimi için ağ kameralarıyla yapılan sürekli video kayıtları, olay veya anormallik olduğunda gözetim operatörleri tarafından manuel olarak izlenmektedir. Ancak, dağıtık kamera ağlarında insan operatörlerin becerilerine dayanan bir sistem kullanmak

maliyetli ve güvenilir değildir. Operatörlere genellikle aynı anda izleyebileceklerinden daha fazla kamera atanır ve hatta tek bir kamerada bile manuel izleme, dikkat eksikliklerine karşı savunmasız kalmaktadır. Ayrıca, operatörlerin bireysel deneyimi, odaklanma ve dikkat becerisi insan performansını belirleyen en önemli kriterlerdendir. Kamusal alan kamera ağları son yıllarda hızla büyüdüğü için, manuel izleme ve takip işlemlerinin ölçeklenebilir olmadığı giderek daha açık hale gelmektedir (Roshan vd. 2020).

Dağıtılmış çok kameralı bir gözetim sistemi için temel görevlerden biri insanları farklı konum ve zamanlardaki kamera görüntüleriyle ilişkilendirmektir. Kişi Yeniden Tanımlama (KYT, Person Re-identification - ReID) olarak bilinen bu durum; günlük hayatta yetkili/sınırlı erişim, sınır kontrolü, suç tespiti veya önlenmesi, adli arama gibi önemli derecede ihtiyaç duyulan ve rutin olarak gerçekleştirilen güvenlik görevlerindedir. Resmi olarak, farklı zamanlarda farklı kameralardan alınan bir kişinin görüntüleri arasındaki bağlantının kurulması olarak da tanımlanabilir (Chung vd. 2017). Geniş bir uygulama yelpazesine ve büyük ticari değere sahip olduğu için bilgisayarlı görü topluluğu içinde, otomatikleştirilmiş KYT çözümleri geliştirmeye artan bir ilgi vardır. Öte yandan, pek çok uygulamada bir kişiyi gerçekten benzersiz bir şekilde tanımlamak gerekli değildir. Aynı kişinin başka görüntülerde veya görüntü dizilerinde önceki veya ilerideki oluşumlarını belirlemek yeterlidir (Bäumel ve Stiefelhagen 2011).

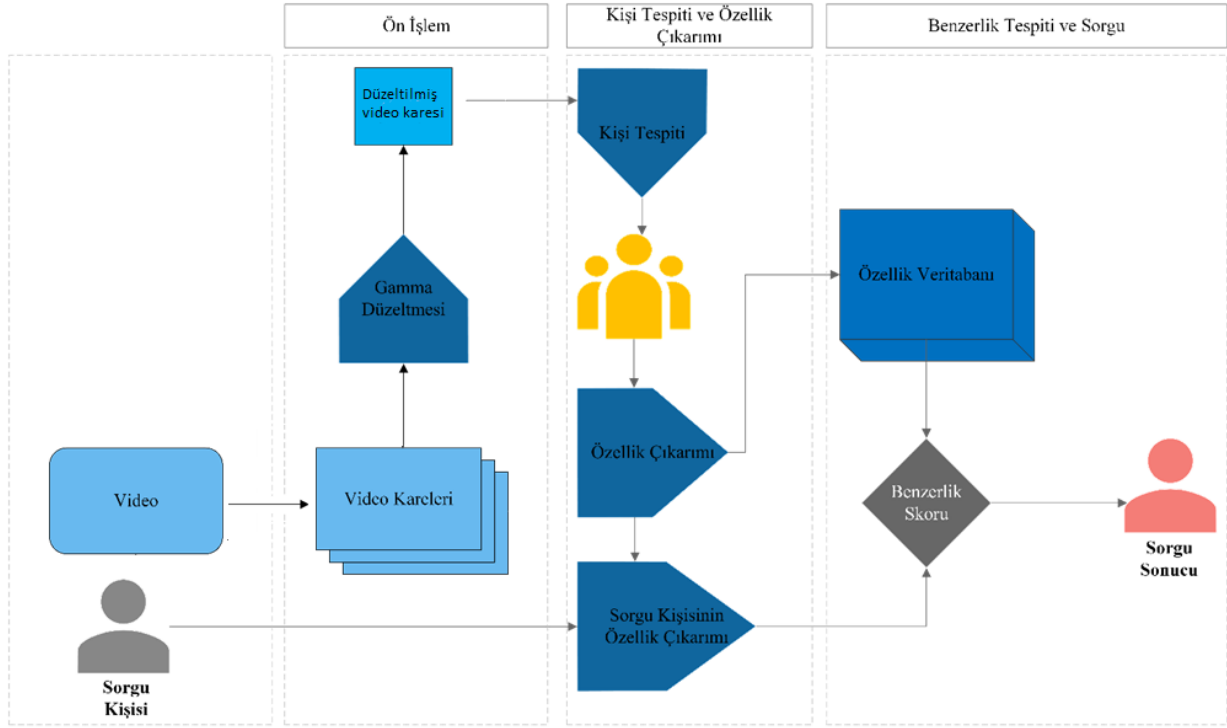
KYT için kişilerin benzersiz bir tanımlaması gerekmediğinden, genellikle güvenilir olmayan biyometrik özelliklerin kullanılması uygun değildir. Yüz ve yürüyüş gibi biyometrik özellikler, düşük çözünürlüklü kameralar nedeniyle video gözetim sistemlerinde kullanıma genellikle uygun değildir. Üniforma veya benzeri giysiler, yüz tanıma yapılamadığında veya kişiler için kullanılacak benzersiz bir özellik olmadığında da zorluğu artırabilir (Leng ve Tian 2019). Bu nedenle önerilen çalışmada bir kişinin tüm vücut görünümünün belirli bir zaman dilimi içinde değişmediği ve KYT için oldukça uygun olduğu gerçeği kullanılacaktır (Bäumel ve Stiefelhagen 2011).

KYT için literatürde kullanılan pek çok yöntem mevcuttur. Fakat bu yöntemler temel olarak "el yapımı" ve derin öğrenme sistemleri olarak ikiye ayrılmaktadır. El yapımı yöntemler histogramla renk özellikleri çıkarma ve Yerel İkili Model (Local Binary Pattern-LBP) ile doku çıkarma gibi düşük seviyeli özellikleri çıkarmak için kullanılan geleneksel yöntemlerdir. Renk histogramları, renk, desen, yürüyüş analizi ve basit mesafe ölçümleri faydalı olsa da düşük seviyeli öznitelikler kullanmakta ve gerçek

uygulamalarda doğruluk ve güvenilirlik açısından yetersiz kalabilmektedir. Bu öznitelikler ve metrikler, büyük sınıf içi ve sınıflar arası varyasyonlar durumunda etkili değildir. Öte yandan düşük seviyeli görsel özelliklerle karşılaştırıldığında uzun saç, mavi gömlek gibi tanımlayıcı insan özellikleri orta seviye tanımlamaları temsil etmektedir. Orta seviye tanımlamalar aynı kişi için daha tutarlıdır ve kişinin duruşu, açısı vb. çeşitliliklerine karşı daha dayanıklıdır. Fakat insan özelliklerini manuel olarak açıklamak maliyetli olduğundan, geniş bir özellik kümesi için yeterli eğitim verisi elde etmek zordur. Sonuç olarak, düşük seviyeli görsel özellikler hala kilit bir rol oynamaktadır ve karakteristik nitelikler çoğunlukla yardımcı özellikler olarak kullanılmaktadır (Su vd. 2016).

Son yıllarda ise Derin Öğrenme (Deep Learning-DL) uygulamalarının el yapımı özelliklerin bahsedilen eksikliklerinin üstesinden gelebildiği gözlemlenmiştir. Evrimsel Sinir Ağları (Convolution Neural Network - CNN) 2014 yılında KYT alanına sunulduğunda, özellik çıkarma yöntemleri tamamen değişmiştir. Yi vd. (2014) ve Wu vd. (2018) ise eğitim verilerinden otomatik olarak kişi görüntüsünün en uygun özelliklerini öğrenmek için bir Siamese sinir ağı kullanmıştır. Birçok yeni KYT çalışması, daha doğru sonuçlar elde etmek için derin öğrenmeye dayalı yöntemleri benimsemiş olsa bile derin özelliklerin avantajları kadar dezavantajları da vardır. Derin öğrenme modelleri, eğitim ve çıkarım aşamalarında genellikle yüksek hesaplama gücü gerektirir. Bunun yanında karmaşık ve yüksek boyutlu özellik vektörleri ürettiği için yorumlaması genellikle zordur. Ayrıca derin öğrenme modelleri eğitildikleri veri setlerine çok bağımlıdırlar. KYT için açıklama verilerinin de elde edilmesi yorucu ve maliyetli olduğundan, önceden eğitilmiş modeller genellikle herhangi bir uyarılma mekanizması olmadan yeni test ortamlarında kullanılmaktadır. Bu durum önemli performans düşüşlerine sebep olmaktadır (Almasawa vd. 2019).

El yapımı yöntemlerle derin öğrenme yöntemlerini birleştiren birkaç çalışmada ise renk, LBP ve Yerel Maksimal Oluşum (Latent Ordinal Model- LOMO) CNN ve Uzun Kısa Süreli Bellek (Long Short-Term Memory- LSTM) ile kullanılmıştır (Almasawa vd. 2019). Luo vd (2019) çalışmasında ise derin öğrenme tabanlı kişi yeniden tanıma sistemlerinde düşük seviyeli özniteliklerin kullanımını ele alınmaktadır. Renk histogramları, HOG, LBP gibi geleneksel düşük seviyeli özniteliklerin derin öğrenme modelleriyle birleştirilerek kullanılmasının faydalarını araştıran bu yaklaşım, derin öğrenme modellerinin performansını artırabileceğini ve KYT görevinde daha güçlü bir temel oluşturabileceğini göstermektedir.



Şekil 1. Önerilen algoritmanın akış şeması

Bu çalışmada da her iki yöntemin avantajlarından faydalanarak hem yüksek verimliliğe hem de genelleme kabiliyetine sahip ölçeklenebilir bir kişi KYT sistemi tasarlanması amaçlanmıştır. Ayrıca bu çalışma, düşük seviyeli özneliklerin derin öğrenme tabanlı sistemlerle entegrasyonunun, kişi yeniden tanıma performansını artırmak için önemli bir strateji olabileceğini vurgulamaktadır.

Bu kapsamda önerilen çalışmada kişi takibi ve çıkarımı konusunda farklı kişiler arasındaki ince farkları yeterince ayırt edici hale getirmek için özellik tanıma bağlamında “el yapımı” ve derin özellikler birleştirilerek, özellik tanımanın doğasında bulunan büyük sınıf içi varyasyona karşı daha dayanıklı olan birleştirilmiş bir temsil oluşturmak amaçlanmıştır. Önerilen yaklaşım derin modeller tarafından öğrenilen yüksek seviyeli veya bakış noktası değişikliklerinden kaynaklanan uzamsal değişikliklere karşı sağlamdır ve kişi özelliklerinin farklı görünüşlerini modelleyebilen zengin özellik temsillerini içermektedir.

## 2. Materyal ve Metot

Önerilen algoritmanın ana hatları Şekil 1’de gösterilmiştir. İlk aşamada gözetleme sistemlerinden alınan video ön işlem adımı olarak karelerine ayrılmaktadır. Elde edilen karelerde gama düzeltme (gamma correction) işlemi uygulanmıştır. Gama düzeltme, video veya dijital görüntülerde parlaklığı kodlamak ve çözmek için doğrusal olmayan bir işlemdir. Bilgisayar (ve diğer dijital ekran) ekranlarında parlaklığı düzgün şekilde görüntülemek için kullanılır. Bir kameranın içeriği yakalama şekli, bir ekranın

içeriği görüntüleme şekli ve görsel sistemin ışığı işleme şekli arasındaki farkları düzenlemeye yardımcı olmaktadır (Tharsanee vd. 2021).

### 2.1 Veri seti

Önerilen çalışmada farklı veri setleri kullanılarak performans analizi yapılmıştır. Çalışmanın performansını değerlendirmek için diğer modern yeniden kimlik veri kümeleriyle karşılaştırıldığında nispeten küçük bir veri kümesi olan PKU-Reid test edilmiştir. Bu veri seti iki ayrı kamera görüntüsünden çekilen 1824 görüntü dahil 114 kişiyi içermektedir. Her kişi için, bir kamera görüntüsü altında sekiz farklı yönden sekiz görüntü yakalanmış ve 128 × 48 piksele normalleştirilmiştir (Ma vd. 2016). Ek olarak ücretsiz ve anonim bir stok video sitesinden (www.pexels.com) elde edilen ve kalabalık bir bölgede yürüyen kişileri gösteren bir havaalanı videosu üzerinde test edilmiştir. Kullanılan video toplamda 285 adet kareden oluşmaktadır.

### 2.2 Kişi tespiti ve segmentasyonu

Şekil 1’de gösterildiği gibi ön işlem aşamasından sonra kişi tespiti ve bölütleme işlemi uygulanmaktadır. Bunun için her bir video karesinde kişilerin tespiti, konumlarının belirlenmesi ve piksel bazında maskelerinin çıkarılması için Mask R-CNN algoritması kullanılmıştır. Mask R-CNN, nesne tespitinde öneri ve sınıflandırma olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Bu ana aşamalar Şekil 2’de gösterilmiştir. Mask R-CNN mimarisinde (Singh ve Shekhar 2018) giriş olarak bir görüntü verildiğinde ilk önce bir CNN kullanılarak bir özellik haritası çıkarılır.





görüntü bozulmasına ve ölçeklemeye karşı dayanıklıdır. Gözetleme videosunda kişinin yeniden tanımlanması için vücut özelliklerine küresel bir renk yaklaşımı seçilmiştir. Kişinin renk bilgisinin çıkarılması, yöntemin açık ve basit olmasını sağlar. Renkli histogram tabanlı görüntü almanın uygulanması kolaydır ve tanıma sistemlerinde iyi çalışılmış ve yaygın olarak kullanılmıştır (Zhang vd. 2017).

#### 2.4 Gabor filtresi ile doku özelliklerinin çıkarılması

Kullanılan ikinci özellik olan doku, bir görüntünün en önemli özelliklerinden biridir. Doku özellikleri de tanıma sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada doku özelliklerinin çıkarımında Gabor filtreleme kullanılmıştır. Gabor filtrelerinin kullanımı, doku özelliklerinin çıkarılması için sinyal işlemede en popüler yaklaşımlardan biridir. Bunlar, uzamsal ve frekans alanında filtrelemeye izin verir.

Doku analizi için gri düzey birlikte oluşum matrisleri, Tamura doku özelliği, Markov rastgele alan modeli, Gabor filtreleme ve yerel ikili modeller gibi çeşitli algoritmalar tasarlanmıştır. Uygulamada, doku özellikleri, ayırım gücünü artırmak için renk özellikleriyle birleştirilebilir, böylece iyileştirilmiş çıkarım performansı elde edilir.

Gabor filtreleri, memeli görsel kortikal hücrelerine çok benzer şekilde hareket eder ve farklı yönlerde ve farklı ölçeklerde özellikleri çıkarır. Farklı ölçeklerde ve yönlerde bir filtre bankası, bir görüntünün çok kanallı filtrelenmesine ve frekans ve yön bilgilerinin çıkarılmasına izin verir (Zekri vd. 2017). Gabor filtre ailesinin genel ifadesi Eşitlik 1,2 ve 3 ile ifade edilmiştir:

$$g(x, y; \lambda, \theta, \psi, \sigma, \gamma) = \exp\left(\frac{-x'^2 + \gamma^2 y'^2}{2\sigma^2}\right) \cos\left(2\pi \frac{x'}{\lambda} + \psi\right) \quad (1)$$

$$x' = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (2)$$

$$y' = -x \sin \theta + y \cos \theta \quad (3)$$

$\lambda$  kosinüsün dalga boyu faktörünü;  $\theta$ , Gabor fonksiyonunun yönünü kontrol eder. Sıfır derece theta değeri, Gabor fonksiyonunun dikey konumuna karşılık gelir.  $\phi$ , fazın ofset değerini ve  $\gamma$  ise uzamsal görüş açısını belirtir.  $\sigma$  değeri ise Gabor filtresinde kullanılan Gauss fonksiyonunun standart sapmasıdır (Li vd. 2010). Bu parametreleri değiştirerek frekans alanını neredeyse tamamen kapsayan bir filtre bankası elde edilir. Çok

kanallı filtre doku analizi alanında etkili bir yöntemdir. Filtre bankaları, bir görüntüyü, görüntünün her pikselini bir arazi kullanımı türünde sınıflandırmak için kullanılabilen doku özelliklerine ayırma özelliğine sahiptir. Çok kanallı filtreleme işlemi, retina üzerindeki görüntüyü, her birinin sınırlı bir frekans ve yönelim aralığında yoğunluk farklılıklarına sahip olan çeşitli filtrelenmiş görüntülere ayırıştıran insan görsel sisteminin özelliklerini taklit etmektedir. Bir Gabor filtre bankası, farklı radyal frekanslar ve yönelimlere sahip frekans alanını kapsayan bir grup Gauss filtresinden oluşmaktadır. Bu nedenle dokular filtrelere verdikleri yanıtlarla karakterize edilir ve bu filtrelerin her biri belirli bir frekans ve yönelim için tasarlanmıştır. Her filtreyi kullanarak  $I(x, y)$  görüntüsü üzerindeki Gabor dönüşümü Eşitlik 4'teki gibi tanımlanmıştır (Allison ve Wintz 2009):

$$\omega_{mn}(x, y) = \int (I(x_1, y_1) g_{mn} * (x - x_1, y - y_1) dx_1 dy_1) \quad (4)$$

Daha sonra  $m \times n \times 2$  boyutunda bir histogram oluşturulur ve her bir bölme ortalamayı ( $\mu_{mn}$ ) ve standart sapmayı ( $\sigma_{mn}$ ) temsil eder:

$$\mu_{mn} = \iint |\omega_{mn}(xy)| dx dy \quad (5)$$

$$\sigma_{mn} = \sqrt{\iint (|\omega_{mn}(x, y)| - \mu_{mn})^2 dx dy} \quad (6)$$

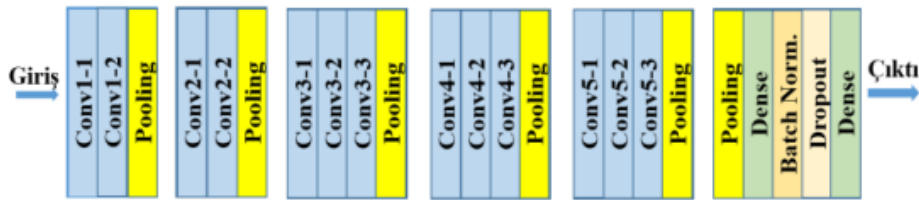
#### 2.5 Şekil özelliklerinin çıkarımı

Görüntülerde temsil edilen nesnelerin şekli, tanıma görevlerinde kullanılan en önemli özelliklerden biridir. Bu durum nesnelere tanımak için şeklin algısal olarak önemli olmasından kaynaklanmaktadır. Bazı durumlarda şekil, temsil edilen nesne hakkında renk, doku veya diğer özelliklerden daha fazla içsel bilgi içerir. Geometrik bir bakış açısıyla, biçim resmi olmayan bir şekilde, bir nesnenin bir görüntüdeki temsilinden ölçek, öteleme ve döndürme gibi benzer dönüşümler nedeniyle renk, doku ve efektlerin çıkarılmasının sonucu olarak tanımlanabilir. Yönlendirilmiş gradyan histogramı (Histogram of Gradient - HOG), nesne algılama amacıyla bilgisayarla görme ve görüntü işlemede kullanılan bir özellik tanımlayıcısıdır. Teknik, bir görüntünün yerleştirilmiş bölümlerinde gradyan oryantasyon oluşumlarını sayar. Bu yöntem, kenar oryantasyonu histogramlarına, ölçekle değişmeyen özellik dönüşümü tanımlayıcılarına ve şekil bağlamlarına

benzer, ancak düzgün aralıklı hücrelerden oluşan yoğun bir ızgara üzerinde hesaplanması ve gelişmiş doğruluk için örtüşen yerel kontrast normalleştirilmesi kullanması bakımından farklılık gösterir. HOG tanımlayıcısının diğer tanımlayıcılara göre birkaç önemli avantajı vardır. Yerel hücreler üzerinde çalıştığı için, nesne yönelimi dışında geometrik ve fotometrik dönüşümlere değişmez. Bu tür değişiklikler yalnızca daha büyük uzamsal bölgelerde ortaya çıkacaktır. Ayrıca, kaba uzamsal örnekleme, hassas yönelim örnekleme ve güçlü yerel fotometrik normalizasyon, kabaca dik bir konumu korudukları sürece yayaların bireysel vücut hareketlerinin göz ardı edilmesine izin verir. HOG tanımlayıcısı, "hücre" olarak adlandırılan küçük bir uzaysal bölgenin pikselleri üzerindeki gradyan yönlerinin birikmesine ve sonraki amaçlar için dikkate alınacak özellik vektörünü sağlayan bir 1 boyutlu histogramın oluşturulmasına dayanır. Analiz edilecek görüntü  $L, N \times N$  piksel boyutunda hücrelere bölünür ve her pikseldeki gradyanın  $\theta_{x,y}$  yönelimi hesaplanır. Ardından  $\theta_{ij}$  yönelimleri  $i = 1 \dots N^2$  yani aynı  $j$  hücresine ait olanlar nicelenir ve bir  $M$ -kutu histogramında toplanır. Son olarak, elde edilen tüm histogramlar, bu algoritmik adımın nihai sonucu olan, yani sonraki işlemler için dikkate alınacak özellik vektörü olan benzersiz bir HOG histogramında sıralanır ve birleştirilir (Velmurugan ve Baboo 2011).

## 2.6 Derin özelliklerin çıkarımı

Geleneksel özelliklerin sınırlı temsil kabiliyeti ve derin sinir ağları yoluyla görüntü işlemedeki atılım nedeniyle, Evrimsel Sinir Ağları (Convolutional Neural Network – CNN) tabanlı görüntü alma son yıllarda hızla gelişmiştir. CNN, görüntü sınıflandırmasında büyük bir atılım yaptığından, birçok araştırmacı, eğitilmiş CNN özniteliklerini kullanmaya çalışmaktadır. Derin öğrenme (Deep Learning- DL) tabanlı teknikler, eğitim hesaplamaları için önemli miktarda veri gerektirmesine rağmen, önceden eğitilmiş ağlar, çeşitli alanlarda özellik çıkarma ve görüntü alma için kolayca uyarlanabilir. Bugün, CNN tabanlı yöntemler, görüntü alımında geleneksel düşük seviyeli görüntü tanımlayıcılarının neredeyse tamamen yerini alarak, görüntü alımında yaygın bir uygulama olarak kabul edilmektedir. CNN, görüntü alımı için geleneksel düşük seviyeli görüntü tanımlayıcıların yerini almak için kullanılır ve 3 sınıfa ayrılır: (1) Önceden eğitilmiş CNN modelleri, (2) İnce ayarlı CNN modelleri ve (3) Hibrit CNN modelleri. Bu çalışmada VGG16 (Simonyan ve Zisserman 2014) mimarisi kullanılmıştır. VGG16, ImageNet ile önceden eğitilmiş ve 2014 yılında ILSVR yarışmasını kazanan evrimsel bir sinir ağı mimarisidir. VGG16 yüksek doğruluklu bir özellik çıkarıcı olarak hizmet verebilir (Liu vd. 2019). Bu modelin mimarisi Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. VGG16 mimarisi (Simonyan ve Zisserman 2015)

Şekil 4'te verilen özellik çıkarımında temel fikir,  $(224 \times 224)$  boyutlu görüntünün, çok küçük alıcı alanlara sahip filtrelerin kullanıldığı ReLU aktivasyonlarına sahip bir evrimsel katmanlar yığınından geçmesidir. Uzamsal havuzlama, bazı konvolüsyonel katmanlardan sonra gerçekleştirilen beş maksimum havuzlama katmanı tarafından gerçekleştirilir (Gkelios vd 2021). Tamamen bağlantılı son katman, 1000 nöron içeren çıkış katmanı olarak çalışır ve bunun 1000'e kadar sınıfla sonuçlanabileceğini belirtir. Yukarıda verilen teknikler ile özellik çıkarımları yapıldıktan sonra özellik vektörleri birleştirilir. Özellik vektörlerinin birleştirilmesinde aşağıdaki yaklaşım uygulanmaktadır.

## 2.7 Özellik vektörlerinin birleştirilmesi

Her bir video karesinde tespit edilip maskelenen ve segmente edilen kişi görüntülerinin yukarıda bahsedilen

(renk, doku, şekil, CNN tabanlı) öznitelikleri çıkarılmış ve bu öznitelik vektörleri birleştirilerek her bir kişi için tek bir öznitelik temsili oluşturulmuştur. Sonuç olarak her bir video karesi için; segmente edilen kişilerin öznitelik vektörlerini içeren bir galeri oluşturulmuştur.

## 2.8 Benzerlik metriği ve sorgulama

Her bir video karesinde tespit edilen kişi sayısı  $N$  olmak üzere;  $I_n$  segmente edilen kişi görüntüsünün öznitelik vektörünü,  $y_n$  ise bu kişinin etiketini temsil etmektedir.  $I_q$  sorgu görüntüsünü,  $y^q$  sorgu görüntüsünün etiketini ve  $N$  adet galeri resmi  $I = \{(I_1, y_1), (I_2, y_2), \dots, (I_N, y_N)\}$  şeklinde temsil edilmektedir.  $N$  adet görüntünün benzerlik oranına göre sıralama listesi  $\{r_1, r_2, \dots, r_N\}$  olarak gösterilebilmektedir. Burada  $r_i, I_i$  görüntüsünün sıralanmış indeksidir. Bu amaç fonksiyonu doğru eşleşmelerin sıralama indekslerini minimize ederek,

doğru eşleşmeleri sıralamada üst sıralara taşımayı hedefler ve Eşitlik 7'deki gibi özetlenebilir:

$$\min \sum_{i=1}^N r_i f(y^q, y_i), f(y^q, y_i) = \begin{cases} 1 & y^q = y_i \\ 0 & y^q \neq y_i \end{cases} \quad (7)$$

Eşitlik 7'de iki amaç fonksiyonu, sorgu görüntülerinin galeri görüntüleri içindeki doğru eşleşmelerinin sıralamasını optimize etmeyi hedefler. İlk fonksiyon, genel sıralama performansını iyileştirmeye çalışmaktadır. Sorgulanacak kişi girdi olarak alındığında aynı öznitelik modelleri ile sorgu kişinin de öznitelik vektörü oluşturulmuştur. Sorgu kişinin öznitelik vektörü ile her karedeki kişilerin daha önceden oluşturulmuş ve veri tabanı haline getirilmiş öznitelik vektörleri arasındaki benzerlik oranı hesaplanmıştır. Benzerlik oranlarının hesaplamasında Cosine Benzerliği (Cosine Similarity – CS) kullanılmıştır. Bu metrik sıfırdan farklı iki vektör arasındaki bir ölçüdür (Rahutomo vd. 2012).

Bu iki vektör arasındaki açının kosinüsünü ölçmek için iç çarpım uzayını kullanır. Öklid nokta çarpım formülü kosinüs benzerliğini şu şekilde hesaplamak için kullanılabilir:

$$a \cdot b = |a||b|\cos\theta, \quad (8)$$

burada  $a$  ve  $b$  iki vektördür ve  $\theta$  aralarındaki açıdır.  $x = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$  Vektörünün Öklid normu veya Öklid uzunluğu ile aynı olan büyüklük veya uzunluk kullanılarak (Eşitlik 9), S benzerliği Eşitlik 10 kullanılarak hesaplanır:

$$|x| = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}, \quad (9)$$

$$S = \cos\theta = \frac{A \cdot B}{|A||B|} = \frac{\sum_i^N A_i B_i}{\sqrt{\sum_i^N A_i^2} \sqrt{\sum_i^N B_i^2}} \quad (10)$$

Eşitlik 10'da A ve B iki vektördür. Cosine benzerliği -1 ve 1 arasında değerler almaktadır. Benzer vektörlerin oranı 1'e yakın, farklı vektörlerin benzerlik oranı ise -1'e yakındır.

Cosine benzerliği dışında çalışmanın performansını hesaplamak için çeşitli ölçümler kullanılmıştır. Bu metrikler karmaşıklık matrisi üzerinden hesaplanmıştır. Karışıklık matrisinde, Gerçek pozitif (GP), doğru şekilde sınıflandırılan pozitif etiketli verilerin sayısıdır, gerçek negatif, doğru şekilde sınıflandırılan negatif etiketli verilerin sayısıdır. Yanlış pozitif (YP), pozitif olarak

sınıflandırılan negatif etiketli verilerin sayısıdır. Yanlış negatif, yanlışlıkla pozitif olarak sınıflandırılan pozitif etiketli verilerin sayısıdır. En çok kullanılan performans ölçütleri doğruluk, duyarlılık, kesinlik ve f puanıdır. Doğruluk, doğru şekilde sınıflandırılmış verilerin tüm verilere oranı olan bir performans ölçüsüdür. Kesinlik, gerçek pozitifin tüm pozitif sınıflandırılmış verilere oranıdır. Duyarlılık, gerçek pozitifin tüm pozitif verilere oranıdır. F puanı, kesinlik ve duyarlılığın harmonik ortalaması olduğundan model performansını hesaplamak için güçlü bir ölçümdür (Miao vd. 2022). En çok kullanılan performans ölçütleri kesinlik (Eşitlik 11), duyarlılık (Eşitlik 12) F-Skorunun (Eşitlik 13) hesaplanmasında kesinlik ve duyarlılık sırasıyla K ve D olarak ifade edilmektedir. Formüller aşağıda verilmiştir:

$$\text{Kesinlik} = \text{GP}/(\text{GP}+\text{YP}) \quad (11)$$

$$\text{Duyarlılık} = \text{GP}/(\text{GP}+\text{YN}) \quad (12)$$

$$\text{F-Skoru} = 2 \cdot (\text{K} \cdot \text{D}) / (\text{K} + \text{D}) \quad (13)$$

### 3. Bulgular

Önerilen çalışmada her bir kişi görüntüsünün öznitelik vektörünü oluşturmak için kullanılan Gabor, renk histogramı, HOG ve VGG16 yöntemlerinin parametreleri şu şekildedir:

Gabor filtresi kullanılarak desen özelliklerinin çıkarımında kullanılan parametreler şu şekildedir: Filtre bankası bir yönlendirme  $\theta = (180^\circ)$  ve  $F = (0,1,0.5,0.8)$  olmak üzere üç radyal frekans değeriyle gerçekleştirilmiştir. Böylece frekans alanını kapsayan toplam 3 filtre elde edilmiştir. Ayrıca Gauss eğrisinin farklı standart sapma değerleri test edilmiştir. Bunlar çalışmada kullanılan iki değerden oluşan bir settir  $\sigma = (1ve3)$ .

Renk histogramlarının çıkarılmasında ise HSV renk uzayında renk kanalı (hue) için 8 bölme, doygunluk (saturation) için 12 bölme, değer (value) kanalı için 3 bölme kullanılmıştır. Böylece  $8 \times 12 \times 3 = 288$  boyutunda bir özellik vektörü elde edilmiştir. Görüntülerin tamamı için 3 boyutlu HSV renkli histogramı hesaplamak yerine görüntünün farklı bölgeleri için renk histogramları hesaplanmıştır. Küresel histogramlar yerine bölgelere dayalı histogramların kullanılması, yerelliği bir renk dağılımında simüle etmeyi sağlamıştır. Görüntü tanımlayıcı sol üst köşe, sağ üst köşe, sağ alt köşe, alt- sol köşe ve son olarak görüntünün merkezi olmak üzere görüntü tanımlayıcı görüntüyü 5 farklı bölgeye ayırmıştır. Bu sayede bu bölgelerin her birinin histogramı ayrı ayrı tanımlanmıştır. Her bir bölge  $8 \times 12 \times 3 = 288$  boyutlu bir

histogramla temsil edilmiştir. 5 bölge için genel özellik vektörü  $5 \times 288 = 1440$  boyutunda olmaktadır. Böylece her görüntü 1.440 sayı kullanılarak ölçülmüştür ve temsil edilmiştir.

HOG tanımlayıcının uygulanması, görüntünün hücre adı verilen birbirine bağlı küçük bölgelere bölünmesini ve daha sonra her hücre için, her hücre içindeki piksellerin yönlendirilmiş gradyanlarının bir histogramının hesaplanmasını gerektirir. Daha sonra özellik vektörünü oluşturmak için bu histogramları birden fazla hücrede biriktirmek mümkündür. HOG tanımlayıcısındaki ilk gerçek adım, görüntü gradyanını hem x hem de y yönünde hesaplamaktır. Ardından görüntü hücrelere ve bloklara bölünmektedir. Bir "hücre", her hücreye ait piksel sayısı ile tanımlanan dikdörtgen bir bölgedir. Bu çalışmada *pixels\_per\_cell* parametresi  $2 \times 2$  olarak seçilmiştir. Histogramları oluşturmadan önce ise yön sayısı belirlenmektedir. Yönlerin sayısı, ortaya çıkan histogramdaki kutu sayısını kontrol eder. Bu çalışmada yön sayısı 9 olarak seçilmiştir. Her hücredeki tüm piksellerin azalma yönlerini belirtilen sayıda yönlendirme bölmesinde gruplanıp, her bir bölmedeki gradyanların büyüklükleri toplandığında ortaya çıkan değer, bölmelerin yükseklikleri olacaktır. Kutu sayısı genellikle 9 olarak ayarlanmıştır, böylece her bir kutunun genişliği 20 derece olmuştur.

Son olarak VGG16 mimarisi ile çıkarılan özneliklerde ağın üst kısmına tamamen bağlı 3 katman dahil edilmemiştir. Böylece bu özellik için  $1 \times 512$  boyutunda öznelik vektörü oluşmuştur. Her bir karede tespit edilen kişi görüntülerinin farklı özellikleri birleştirilerek; kişilerin her birinin tek bir özellik vektörü ile temsil edilmesi sağlanmıştır. Çalışmada PKU-Reid veri setinden rastgele 26 kişinin farklı sayıda 5 farklı yönden çekilmiş rastgele görüntüleri galeri seti olarak kullanılmıştır. Galeri seti toplam 171 adet kişi görüntüsünden oluşmaktadır. 6 kişi ise sorgu kişisi olarak kullanılmıştır. Ön işlem aşamasında ilk olarak galeri seti ve sorgu kişilerinin görüntülerinin arka plandan temizlenmesi için Bölüm 2.2'de detaylı olarak açıklanan kişi segmentasyonu yöntemimiz uygulanmıştır. Bu sayede PKU-Reid veri setinden elde edilen galeri seti ve sorgu setinin görüntülerinde arka plan yok edilmiş, sadece kişilerin piksellerinin yer aldığı maskelenmiş görüntüler elde edilmiştir. Çizelge 1'de çalışmada PKU-Reid veri setinden seçilen sorgu kişilerinin arka plandan temizlenmeden önceki ve temizlendikten sonraki görüntüleri sunulmuştur.

İkinci olarak galeri seti ve sorgu görüntülerinin öznelik vektörleri oluşturulmuştur. 6 adet sorgu kişisi her bir galeri kişisinin özellik vektörleri ile tek tek karşılaştırılarak Cosine benzerliği hesaplanmıştır. Her bir sorgu kişisi ile

galeri görüntülerinin Cosine benzerliği hesaplandıktan sonra bu benzerlik oranları büyükten küçüğe sıralanmıştır. Çizelge 2'de her bir sorgu kişisi için benzerlik oranı en yüksek ilk 5 galeri resmi sonucu ve benzerlik oranları (CB kısaltması) gösterilmiştir. Doğru eşleşmeler yeşil ile yanlış eşleşmeler kırmızı ile işaretlenmiştir.





















**Çizelge 1.** PKU-reid veri setinden seçilen sorgu kişilerinin Mask-RCNN modeli kullanılarak arka plandan temizlenme sonuçları



Çalışmada PKU-Reid veri setinden oluşturulan galeri seti ve sorgu kişilerinin sonuçları için Ortalama Kesinlik (Average Precision) hesaplanmıştır. Ortalama Kesinlik değerleri tek bir sorgu için ayrı ayrı hesaplanan gerçek pozitif ve yanlış pozitif sorgu sonuçlarının ortalaması dikkate alınarak elde edilmiştir. Tespit algoritmasının performansını gösteren AP değeri sonuçları Çizelge 3'te gösterilmiştir. Sonuçlardan görüleceği üzere her bir sorgu kişisi için yüksek değerlere sahip Ortalama Kesinlik değerleri elde edilmiştir. Bu durum tespit algoritmasının başarımını göstermektedir. Ortalama benzerlik değerleri ise sorgu kişileri için en yüksek benzerlik oranına sahip ilk 5 sonuçtan doğru eşleştirme yapılan sonuçların ortalamasını yansıtmaktadır. Sonuçlardan anlaşılacağı üzere önerilen yöntem farklı açılara sahip kişi görüntüleri için yüksek eşleştirme performansı göstermiştir.



Çizelge 2. PKU-Reid veri setinden seçilen sorgu kişilerinin sorgu sonuçları

Sorgu Kişisi			Sorgu Sonuçları ve Cosine Benzerlik Sonuçları (CB)		
					
Sorgu Kişisi 1	CB : 0.852	CB : 0.869	CB : 0.861	CB : 0.912	CB : 0.913
					
Sorgu Kişisi 2	CB : 0.872	CB : 0.845	CB : 0.854	CB : 0.90	CB : 0.88
					
Sorgu Kişisi 3	CB : 0.803	CB : 0.772	CB : 0.837	CB : 0.806	CB : 0.809
					
Sorgu Kişisi 4	CB : 0.88	CB : 0.794	CB : 0.809	CB : 0.798	CB : 0.816
					
Sorgu Kişisi 5	CB : 0.805	CB : 0.792	CB : 0.782	CB : 0.804	CB : 0.857
					
Sorgu kişisi 6	CB : 0.821	CB : 0.857	CB : 0.833	CB : 0.871	CB : 0.898

**Çizelge 3.** Sorgu sonuçlarının ortalama benzerlik ve Ortalama Kesinlik değerleri

	Ortalama Benzerlik Değeri	Ortalama Kesinlik
Sorgu kişisi 1	0.881	1.0
Sorgu kişisi 2	0.872	1.0
Sorgu kişisi 3	0.805	0.804
Sorgu kişisi 4	0.820	0.804
Sorgu kişisi 5	0.804	0.809
Sorgu kişisi 6	0.865	1.0

Önerilen çalışmada performans karşılaştırması yapabilmek adına bir stok videosu kullanılmıştır. Çizelge 4'te havaalanı videosunda sorgulanan 4 kişinin gerçek pozitif tespitini içeren rastgele seçilmiş bir video karesinde işaretlenmiş sonuçları gösterilmiştir. Video bir havaalanında çekilmiştir. Video boyunca gösterilen açıda yerleştirilmiş bir kamera ile kişilerin yürüyüşü kaydedilmiştir. Video toplamda 285 kareden oluşmaktadır.

Çizelge 5'te ise örnek videoda tespit ve segmente edilen kişilerin görüntüleri gösterilmiştir. Verilen örnek video karesi haricinde video boyunca farklı kişiler de tespit edilmiştir. Videoda yer alan kişiler hareket halinde olduğu için her biri farklı sayıda video karesinde gözükmetedir. Kişi tespit ve segmentasyonu yöntemimizle (Bölüm 2.2) tespit edilen bu kişilerin her birinin video karesindeki

konum bilgisi takip yapabilmek için kaydedilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan videoda 4 örnek sorgu kişinin benzerlik sonuçları hesaplanmıştır. Çizelge 6'da videoda sorgulanan 4 kişinin video boyunca kaç karede yer aldığı, yer aldığı kareler boyunca sonuçların kesinlik (K), duyarlılık (D) ve F skorları sunulmuştur. Ek olarak sorgu kişinin en yüksek Cosine benzerliğine sahip olduğu ilk 5 sorgu sonucu gösterilmiştir.

**Çizelge 4.** Havaalanı videosunda sorgulanan kişilerin takibini gösteren örnek video kareleri



**Çizelge 5.** Örnek videoda tespit ve segmente edilen kişilerin görüntüsü



Elde edilen sonuçlar; önerilen algoritmanın sorgu sonuçları açısından yanlış pozitif tespitlerin göreceli olarak düşük bir oranda olduğunu göstermektedir. Özellikle video karelerinde kişilerin birbirlerini kapattığı durumlarda yanlış pozitif sonuçları artış göstermiştir. Bunun yanında ağırlıklı olarak aynı renk bilgisine sahip kişilerin de az miktar da olsa yanlış pozitif tespitlere neden olduğu gözlemlenmiştir.

Önerilen çalışmanın gerçek uygulamalar için kullanışlı olmasını sağlayan önemli bir özelliği ise her bir video karesinde sorgu kişisi ile eşleşen kişilerin takibinin yapılmasıdır. Her bir video karesinde sorgu kişisine en yüksek Cosine benzerliğine sahip olan kişi video karesinde işaretlenmektedir. Bu sayede çalışma kişi tanınmanın yanı sıra video üzerinden de takibe olanak sağlamaktadır.

#### 4. Sonuçlar ve Tartışma

















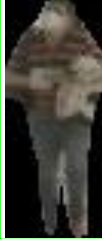







Bu çalışmada zorlayıcı bir problem olan kişi tanıma ve takibi problemi ele alınarak önerilen yöntem ile gerçek hayat uygulamalarına oldukça fayda sağlayacak bir altyapı geliştirilmiştir. Önerilen bu yöntemde kamera sistemleri videolarında belirli bir kişinin farklı özelliklerinin birleştirilerek daha güçlü bir temsil vektörüyle ifade edilerek gözetim videolarında aranması ve takip edilmesi sağlanmıştır. Gözetim videolarında tespit edilen kişilerin özellik çıkarımlarında renk, doku, şekil ve derin ağlarla elde edilen özelliklerden faydalanılmıştır. Bu sayede farklı seviyede özelliklerin birleştirilmesiyle daha etkin bir arama algoritması elde edilmiştir. Sonuç olarak bu çalışma ile güvenlik personelleri tarafından yüz tespiti yapılamayan olağan şüphelilerin takibini ve bir kişinin



kayıtlı bir videodan aranmasını kolaylaştırılması konusunda önemli bir alt yapı oluşturulmuştur. İlerleyen süreçlerde çalışmanın görüntü kalitesinin düşük olduğu gözetim videolarında da yüksek performans elde edilmesi

konusunda çalışılacaktır. Ek olarak tespit edilen kişilerin aksesuar/kıyafet bilgilerinin de çıkarılarak daha spesifik bir arama algoritması geliştirilmesi hedeflenmektedir.

**Çizelge 6.** Havaalanı videosuna ait 4 kişinin sorgu sonucu ve performans değerlendirmeleri

Sorgu Kişisi	Cosine Benzerlik Değeri (CB) En Yüksek İlk 5 Sorgu Sonucu					Sorgulanan Video Karesi Sayısı	Performans Sonuçları
						58	K : 0.8966 D : 1 F Skor : 0.9455
1	CB : 0.962	CB : 0.955	CB : 0.951	CB : 0.946	CB : 0.941		
						29	K : 0.8621 D : 1 F Skor : 0.9268
2	CB : 0.979	CB : 0.967	CB : 0.964	CB : 0.952	CB : 0.946		
						110	K : 0.65 D : 1 F Skor : 0.7879
3	CB : 0.908	CB : 0.901	CB : 0.906	CB : 0.893	CB : 0.891		
						186	K : 0.812 D : 1 F Skor : 0.895
4	CB : 0.957	CB : 0.933	CB : 0.903	CB : 0.905	CB : 0.9		

#### Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

#### Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Metodoloji/Çalışma, deneysel tasarım, Analiz ve yorumlama, Araştırma, Yazma/orijinal taslak

Yazar 2: Denetleme/danışmanlık, Doğrulama

Yazar 3: Denetleme/danışmanlık, Doğrulama

#### Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

#### Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir. Veri kümeleri istek üzerine mevcuttur. Bu makalenin sonuçlarını destekleyen ham veriler, yazarlar tarafından herhangi bir çekince olmaksızın sunulacaktır.

#### 5. Kaynaklar

Almasawa, M.O., Elrefaei, L.A., and Moria, K. 2019. A survey on deep learning-based person re-identification systems. *IEEE Access*, **7**, 175228-175247. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2957336>

- Battal, A. ve Tuncer, A. 2022. Detection of Face Mask Wearing Condition for COVID-19 Using Mask R-CNN. *El-Cezeri*, **9(3)**, 1051-1060.  
<https://doi.org/10.31202/ecjse.1061270>
- Bäumel, M. and Stiefelhagen, R., 2011. Evaluation of Local Features for Person Re-Identification in Image Sequences. In *Proceedings of the International Conference on Advanced Video and Signal-based Surveillance (AVSS)*, 291-296.  
<https://doi.org/10.1109/AVSS.2011.6027339>
- Chung, D., Tahboub, K. and Delp, E.J. 2017. A two stream siamese convolutional neural network for person re-identification. In *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, 1983-1991.
- Gkelios, S., Sophokleous, A., Plakias, S., Boutalis, Y. and Chatzichristofis, S.A. 2021. Deep convolutional features for image retrieval. *Expert Systems with Applications*, **177**, 114940.  
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114940>
- He, K., Gkioxari, G., Dollár, P. and Girshick, R. 2017. Mask r-cnn. In *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, 2961-2969.  
<https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.322>
- He, K., Zhang, X., Ren, S. and Sun, J. 2016. Deep residual learning for image recognition. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 770-778.  
<https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90>
- Leng, Q., Ye, M. and Tian, Q. 2019. A survey of open-world person re-identification. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, **30(4)**, 1092-1108.
- Li, W., Mao, K., Zhang, H. and Chai, T. 2010. Designing compact Gabor filter banks for efficient texture feature extraction. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Control Automation Robotics and Vision*, 1193-1197.
- Li, Y., Xie, S., Chen, X., Dollar, P., He, K. and Girshick, R. 2021. Benchmarking detection transfer learning with vision transformers.  
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.11429>
- Lin, T.Y., Maire, M., Belongie, S., Hays, J., Perona, P., Ramanan, D. and Zitnick, C.L. 2014. Microsoft coco: Common objects in context. In: *Computer Vision—ECCV 2014: 13th European Conference, Zurich, Switzerland, September 6-12, Proceedings, Part V 13*. Springer International Publishing, 740-755.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-10602-1\\_48](https://doi.org/10.1007/978-3-319-10602-1_48)
- Liu, F., Wang, Y., Wang, F.C., Zhang, Y.Z. and Lin, J. 2019. Intelligent and secure content-based image retrieval for mobile users. *IEEE Access*, **7**, 119209-119222.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2935222>
- Luo, H., Gu, Y., Liao, X., Lai, S. and Jiang, W. 2019. Bag of tricks and a strong baseline for deep person re-identification. In *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition workshops*, 0-0.  
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1903.07071>
- Ma, L., Liu, H., Hu, L., Wang, C. and Sun, Q. 2016. Orientation driven bag of appearances for person re-identification. arXiv preprint arXiv:1605.02464.  
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1605.02464>
- Miao, J., Zhu, W. 2022. Precision–recall curve (PRC) classification trees. *Evol. Intel.* **15**, 1545–1569  
<https://doi.org/10.1007/s12065-021-00565-2>
- Rahutomo, F., Kitasuka, T. and Aritsugi, M. 2012. Semantic cosine similarity. In *Proceedings of the International student conference on advanced science and technology-ICAST. South Korea: University of Seoul*,1.
- Roshan, S., Srivathsan, G., Deepak, K. and Chandrakala, S. 2020. Violence detection in automated video surveillance: Recent trends and comparative studies. *The Cognitive Approach in Cloud Computing and Internet of Things Technologies for Surveillance Tracking Systems*, Ch.11, 157-171.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816385-6.00011-8>
- Simonyan, K. and Zisserman, A. 2014. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. arXiv preprint arXiv:1409.1556.  
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.1556>
- Singh, J. and Shekhar, S. 2018. Road damage detection and classification in smartphone captured images using mask r-cnn. arXiv preprint arXiv:1811.04535.  
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1811.04535>
- Su, C., Zhang, S., Xing, J., Gao, W. and Tian, Q. 2016. Deep attributes driven multi-camera person re-identification. In: *Computer Vision—ECCV 2016: 14th European Conference, Amsterdam, The Netherlands, October 11-14, 2016, Proceedings, Part II 14*. Springer International Publishing, 475-491.  
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1605.03259>
- Tharsanee, R.M., Soundariya, R.S., Kumar, A.S., Karthiga, M. and Sountharajan, S. 2021. Deep convolutional neural network–based image classification for COVID-19 diagnosis. In *Data Science for COVID-19*.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824536-1.00012-5>
- Velmurugan, K. and Baboo, S.S. 2011. Image retrieval using Harris corners and histogram of oriented gradients. *International Journal of Computer Applications*, **24(7)**, 6-10.  
<https://doi.org/10.5120/2968-3968>
- Wu, L., Wang, Y., Gao, J. and Li, X. 2018. Where-and-when to look: Deep siamese attention networks for video-based person re-identification. *IEEE Transactions on Multimedia*, **21(6)**, 1412-1424.  
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1808.01911>

- Xiao, J., Li, S. and Xu, Q. 2019. Video-based evidence analysis and extraction in digital forensic investigation. *IEEE Access*, **7**, 55432-55442.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2913648>
- Yao, H., Zhang, S., Zhang, D., Zhang, Y., Li, J., Wang, Y. and Tian, Q. 2017. Large-scale person re-identification as retrieval. *In Proceedings of the International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*, 1440-1445.  
<https://doi.org/10.1109/ICME.2017.8019485>
- Yi, D., Lei, Z. and Li, S.Z. 2014. Deep metric learning for practical person re-identification, 34-39. ArXiv e-prints, 89.  
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1407.4979>
- Zekri, K., Touzi, A.G. and Lachiri, Z. 2017. A comparative study of texture descriptor analysis for improving content based image retrieval. *In Proceedings of the International International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD)*, 247-253.  
<https://doi.org/10.1109/CADIAG.2017.8075665>.

#### **İnternet Kaynakları**

- 1- Allison, D. and Wintz, M. 2009. Related Image Retrieval using Color and Gabor Filter Histogram Featurization. [http://www.cs.pomona.edu/~dkauchak/ir\\_project/wHITEPAPERS/Image.pdf](http://www.cs.pomona.edu/~dkauchak/ir_project/wHITEPAPERS/Image.pdf) (23.10.2023).



## Bilişsel Radyo Ağlarında Arabellek Tabanlı Kanal Tahsis Yaklaşımı ile İkincil Kullanıcı Çağrı Başarımlarının İyileştirilmesi

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 07.02.2024

Kabul/Accepted: 01.08.2024

Yayımlandı/Published: 02.12.2024

### Improving the Call Performance of Secondary Users by Utilizing a Buffer-Based Channel Allocation Approach in Cognitive Radio Networks

Sedat ATMACA\*

Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilişim Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Muğla, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

Bu makalede sunulan çalışmada, Birincil Kullanıcıların (BK) ve İkincil Kullanıcıların (İK) aynı iletişim alanı içerisinde birlikte bulunduğu ve İK'ların lisanslı spektrumu fırsatçı bir yaklaşımla kullandığı bir Bilişsel Radyo (BR) ağ modeli geliştirilmiş, analiz edilmiş ve başarımları eş bir ağ modeli ile karşılaştırmalı değerlendirilmiştir. Önerilen ağ modelinde spektrum yetersizliğinden çağrıları engellenen İK'lar ve yeni gelen BK çağrılarında dolayı bağlantısı düşen İK'lar için arabellek kullanımı öngörülmüştür. Önerilen BR ağ modelinin başarımları üç boyutlu sürekli Markov zinciri kullanılarak analiz edilmiştir. Ayrıca, geliştirilen BR ağ modelinin Monte-Carlo benzetimi de gerçekleştirilerek elde edilen sonuçlarla, analitik modelden elde edilen sonuçlar doğrulanmıştır. Önerilen modelde İK çağrı engelleme olasılığı, İK çağrı düşme olasılığı ve İK spektrum el-değiştirme olasılığı başarımları olarak benimsenmiştir. Karşılaştırmalı başarımlar sonuçlarına göre, İK varış hızı 2 olduğunda, İK çağrı engelleme olasılığında %55, İK çağrı düşme olasılığında %61 ve İK spektrum el-değiştirme olasılığında yaklaşık %50 oranında iyileştirme elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Bilişsel Radyo; Kaynak Tahsisi; Başarım Analizi; Markov Zinciri.

#### Abstract

In this presented work, a Cognitive Radio (CR) network model where Primary Users (PUs) and Secondary Users (SUs) coexist within the same communication area and SUs utilize the licensed spectrum opportunistically was developed, analyzed, and its performance was comparatively evaluated with a peer network model. In the proposed CR network model, the buffer usage is envisaged for SUs whose calls are blocked due to limited spectrum and for SUs whose connections drop due to incoming PU calls. The performance of the proposed CR network model was analyzed using a three-dimensional continuous-time Markov chain. Additionally, a Monte Carlo simulation was developed for the CR network model, and the results obtained from the simulation model were validated by the results obtained from the analytical model. In the proposed model, SU call blocking probability, SU call dropping probability, and SU spectrum handover probability were considered as performance metrics. According to the comparative performance results, when the SU arrival rate is 2, an improvement of 55% in the SU call blocking probability, 61% in the SU call drop probability and approximately 50% in the SU spectrum handover probability is achieved.

**Keywords:** Cognitive Radio; Resource Allocation; Performance Evaluation; Markov Chain

#### 1. Giriş

Günümüzde, teknolojinin hızla gelişimiyle birlikte, kablosuz haberleşme sistemleri her geçen gün daha yaygın kullanılmaktadır. Bununla birlikte, haberleşme sistemlerindeki bu hızlı gelişim ve kablosuz cihazların yaygınlaşması, spektrum yetersizliği sorununu da daha belirgin hale getirmiştir (Bayrakdar and Çalhan 2015, Haykin 2005, Mitola and Maguire 1999, Zhao and Sadler 2007). Haberleşme sistemlerindeki artan kullanıcı sayısı ve mevcut kablosuz frekans spektrumunun sınırlı olması sonucunda, iletişimde sorunlar (bağlantı kurulamaması,

bağlantılarda kesintiler, gecikme) yaşanabilmektedir. Geleneksel kablosuz spektrum tahsis tekniklerinde, sabit veya statik kanal tahsis yaklaşımı kullanılmaktadır. Bu yaklaşım, belirli bir kablosuz iletişim sistemi veya kullanıcı için spektrum kaynaklarının bir kısmının tahsis edilmesini ve sadece bu sistemlerin tahsis edilen kaynakların özel kullanım hakkına sahip olmasını sağlamaktadır. Ancak, geleneksel sabit kanal tahsis yaklaşımının bazı olumsuz yönleri vardır. Belirli frekans bantlarının statik olarak tahsisi, spektrumun etkin şekilde kullanılmasını engellemektedir (Mitola and Maguire 1999,

Haykin 2005). Tahsis edilen frekans kanalları, belirli zaman dilimlerinde veya belirli coğrafi bölgelerde kullanılmazken veya çok az kullanılırken, diğer zamanlarda veya bölgelerde aşırı yüklenebilmektedir. Diğer bir ifade ile, lisanslı spektrumun kullanımı konuma veya zamana bağlı olarak değişmektedir (Zhao 2007, Lee 2012, Qing 2011). Bu durum da spektrum verimliliğini azaltarak spektrum kıtlığı sorununa yol açmaktadır. Bu nedenle, dinamik spektrum yönetimi gibi yenilikçi yaklaşımlar, spektrumun daha esnek ve dinamik kullanılmasını ve böylece boşta olan frekans kanallarından daha etkin yararlanılmasını hedeflemektedir (Tang et al. 2012, Hassani and Berangi 2019).

Bilişsel Radyo (BR), kablosuz iletişimdeki spektrum yetersizliğinin olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla geliştirilen ve lisanslı spektrumun daha etkin kullanımını sağlamak için öngörülen temel bir teknolojidir (Haykin 2005, Mitola and Maguire 1999, Zhao and Sadler 2007). BR ağları, lisanslı kullanıcılara (Birincil Kullanıcı, BK) müdahale etmeden lisanslı spektrumun geçici olarak lisanssız kullanıcılar (İkincil Kullanıcı, İK) tarafından kullanılmasına izin vererek, spektrum verimliliğini büyük ölçüde artırabilmektedir.

## 2. İlgili Çalışmalar

Son yıllarda BR ağlarında kanal tahsisi konusunda literatürde oldukça fazla sayıda araştırma sunulmuştur (Qiming et al. 2010, Salameh et al. 2017, Salameh et al. 2020, Shruti and Kulshrestha 2022) ve halen bu alandaki çalışmalar artarak devam etmektedir.

Qing vd. (2011), farklı bant genişliği kullanan BK'lar ve İK'larla bir BR ağ sistemini analiz etmiş ve İK servislerinin zorla sonlandırılmasını önlemek amacıyla İK'lar için sonlu arabellek kullanımı da içeren dinamik bir spektrum erişim tekniği önermişlerdir. Önerdikleri çalışmada kullanılan ana başarımların İK zorla sonlandırma olasılığı, İK çağrı engelleme olasılığı, İK kullanıcı çağrı düşme olasılığı ve İK gecikmesidir. Bu çalışma ile, arabellek kullanımı ile artan gecikmelere karşın İK servislerinin zorla sonlandırılması işleminin ortadan kaldırıldığı sayısal sonuçlarla gösterilmiştir.

Lee vd. (2012), kanal rezervasyonu nedeniyle azalan çağrı başarımlarını telafi etmek amacıyla düşük öncelikli İK çağrıları için arabellek kullanan bir spektrum kanal tahsis yaklaşımı önermişlerdir. Kanal rezervasyonunun ve arabelleğe alınmanın İK çağrıların başarımlarını üzerindeki etkisini karakterize etmek için bir analitik model geliştirmişlerdir. Bu modele dayanarak, değişken arabellek boyutları için hem yüksek hem de düşük öncelikli İK çağrıları için çağrı engelleme olasılığını, zorunlu

çağrı sonlandırma olasılığını ve spektrum verimini değerlendirmişler ve İK çağrıların ara belleğe alınmasının, bu kullanıcıların çağrı engelleme olasılığını önemli ölçüde azaltabildiğini göstermişlerdir.

Telex vd. (2013), İK'ların sabit sayıda birincil kanalı bir araya getirebileceği bir çoklu kanallı BR ağ modelinin başarımlarını incelemişlerdir. İncelenen modelde spektrum algılamadaki yanlış alarmlar (false alarm) ve sezme kaçırımların (miss detection) etkileri dikkate alınmakta ve ikincil ağda spektrum el değiştirmesinin etkin olduğu varsayılmaktadır. Engellenen İK isteklerini ve kesintiye uğramış İK hizmetlerini kaydetmek için bir arabellek mekanizması sunmuşlardır. Sürekli Zamanlı Markov Zinciri (CTMC) temelli bir analitik model geliştirmişler ve sistem başarımlarını, verimlilik, çağrı engelleme olasılığı ve çağrı zorla sonlandırma olasılığı açısından değerlendirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, arabellek kullanımının İK çağrı engelleme olasılığını önemli ölçüde azaltabildiğini ve verimliliği artırabildiğini göstermişlerdir.

Wang vd. (2013), heterojen veri trafiği ve sınırlı sistem kaynaklarını (ikincil baz istasyonundaki önbellek yeteneğini) aynı anda dikkate alarak, BR ağlarında elde edilebilir trafik yükünü artırmak için yeni bir spektrum paylaşım tekniği önermişlerdir. Özellikle, ikincil baz istasyonunda veri depolama kontrolü için ağ kodlaması kullanan bir BR ağ modeli ele alınmakta ve heterojen trafik temelli üç farklı veri değişim senaryosu ve beş tür karşılaştırma mekanizması sunmuşlardır. Başarımların ölçütleri olarak, çağrı engelleme olasılığını, zorunlu çağrı sonlandırma olasılığını, verimliliği ve spektrum kullanımını benimsemişler ve elde ettikleri sayısal sonuçlara göre, mevcut yaklaşımlara kıyasla daha yüksek trafik yükü ve spektrum kullanımını gerçekleştirebileceklerini ifade etmişlerdir.

Kulkarni vd. (2017), İK'ların BK paketlerini iki fazlı aktarma kullanarak ilettiği bir BR ağ sistemi önermişlerdir. Önerilen modelde İK'lar, zaman paylaşımını kullanarak iletim aşamasında kendi paketlerini belirli bir olasılıkla iletmektedir. Birincil ve İkincil kullanıcılar sınırlı kapasiteye sahip kuyruklara sahiptirler. Aktarma kuyruğu durum bilgisinden yararlanan İK'lar, BK'ların paket kaybı olasılığını belirli bir eşliğin altında tutarken paket dağıtım verimini en üst düzeye çıkarmayı amaçlamaktadır. Çalışmada, önerilen ağ modelinin başarımlarını karşılaştırmak ve kuyruk boyutlarının paket dağıtım verimi üzerindeki etkisini incelemek için sayısal sonuçlar sunulmaktadır. Goel vd. (2022), gerçek zamanlı ve gerçek zamanlı olmayan İK'ların mevcut kanallar için BK'larla yarıştığı ve iki tür arabellek kullandığı BR ağlarında yeni bir spektrum yönetim tekniği önermektedir. İK'lar için hizmet

kalitesini (QoS) artırmak amacıyla, yeniden deneme tekniğiyle birlikte spektrum el-değiştirme ve çağrı arabelleğe alma teknikleri birlikte kullanılarak engellenecek veya zorla düşürülecek İK'lar kuyruğa alınarak daha sonra hizmet alabilmeleri sağlanmaktadır. Tüm sistem çok boyutlu sürekli zamanlı Markov zinciri (CTMC) kullanılarak modellenmiş ve servis kalitesi desteği

için başarımların elde edilmiştir. Önerilen yeniden deneme tekniği ve arabellek kullanımı ile verimi arttırırken çağrı engelleme ve çağrı düşme olasılıklarını azalttıklarını sayısal sonuçlar ile sunmuşlardır. Çizelge 1'de BR ağlarında dinamik spektrum erişimini kullanan ilgili literatürün özeti, kanal tahsisinde kullanılan özellikler ve kullanılan başarımların metrikleri açısından özetlenmiştir.

**Çizelge 1.** BR ağlarında dinamik spektrum erişimini kullanan ilgili literatürün özeti

Referans	Arabellek kullanımı	İK önceliği	Heterojen veri trafiği	Kanal rezervasyonu	Spektrum el-değiştirme	Kanal birleştirme	Başarımların metrikleri
Qiming vd. (2010)	x	x	x	✓	✓	x	İK çağrı engelleme olasılığı, İK spektrum el-değiştirme olasılığı, İK çağrı düşme olasılığı
Qing vd. (2011)	✓	x	x	x	✓	x	İK çağrı engelleme olasılığı, İK zorla çağrı sonlandırma olasılığı, İK ortalama gecikme
Lee vd. (2012)	✓	✓	x	x	✓	x	İK çağrı engelleme olasılığı, İK zorla çağrı sonlandırma olasılığı, İK iş çıkarma oranı
Telex vd. (2013)	✓	x	x	x	✓	✓	İK çağrı engelleme olasılığı, İK zorla çağrı sonlandırma olasılığı, İK iş çıkarma oranı
Wang vd. (2013)	✓	✓	✓	x	✓	x	İK çağrı engelleme olasılığı, İK zorla çağrı sonlandırma olasılığı, İK Kanal kullanım oranı, İK iş çıkarma oranı
Kulkarni vd. (2017)	✓	x	x	x	x	x	İK paket kayıp olasılığı, İK paket iş çıkarma oranı,
Goel vd. (2022)	✓	✓	✓	x	✓	x	İK çağrı engelleme olasılığı, İK zorla çağrı düşme olasılığı, İK iş çıkarma oranı, İK Kanal kullanım oranı,

Bu makalede sunulan çalışma, BK ve İK olmak üzere iki farklı kullanıcı sınıfı içeren merkezi yapıda bir BR ağ modelini esas almaktadır. Önerilen modelde, engellenen veya düşen İK çağrılarını yönetmek ve böylece kablosuz iletişimde verimliliği artırmak ve ağdaki İK çağrı başarımını iyileştirmek amacıyla arabellek kullanımı benimsenmiştir.

Önerilen BR ağ modelinin başarımını değerlendirmek ve analiz etmek amacıyla 3-boyutlu sürekli Markov zinciri modeli geliştirilmiştir. Bununla birlikte, önerilen modelinin bilgisayar benzetimi de gerçekleştirilerek analitik modelden elde edilen sonuçlar doğrulanmıştır. Önerilen ağ modelinin karşılaştırmalı başarımların değerlendirilmesi, Qiming et al. (2010)' in çalışmalarında sunulan ve arabellek içermeyen rassal kanal tahsis algoritması kullanan eşlenik ağ modeli ile gerçekleştirilmiştir. İK çağrı engelleme olasılığı, İK çağrı düşme olasılığı ve İK spektrum el-değiştirme olasılıkları başarımların metrikleri olarak belirlenmiştir. Karşılaştırmalı başarımların değerlendirilmesinden elde edilen sonuçlara göre, önerilen ağ modeli ile, arabellek kullanmayan modele göre (Qiming et al. 2010), İK çağrı engelleme olasılıklarında, İK çağrı düşme olasılıklarında ve İK

spektrum el-değiştirme olasılıklarında dikkate değer iyileştirmeler elde edilmiştir.

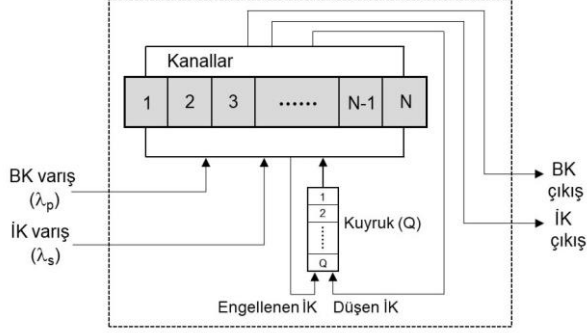
### 3. Önerilen Bilişsel Radyo Ağ Modeli

Önerilen BR ağ modelinde birincil ve ikincil kullanıcılar, belirli bir coğrafi alanda aynı frekans kanallarını paylaşmaktadırlar. Hem birincil hem de ikincil kullanıcılar için tek bir erişim noktası kullanılmaktadır. Birincil ve ikincil kullanıcıların çağrı varış süreçleri, birbirinden bağımsız Poisson süreçleridir ve bu kullanıcılara ait varış hızları sırasıyla  $\lambda_p$  ve  $\lambda_s$ 'dir. Birincil ve ikincil kullanıcıların servis hızları ise sırasıyla  $\mu_p$  ve  $\mu_s$  parametreleri ile üstel dağılıma sahiptir.

#### 3.1 Önerilen ağ modelinde kullanılan kanal ve arabellek yapısı

Şekil 1'de önerilen BR ağ modelinde kullanılan kanal ve arabellek yapısı görülmektedir. Önerilen ağ modelinde toplam N frekans kanalı ve Q boyutlu bir ilk giren ilk çıkar (First-In First-Out, FIFO) kuyruğu arabellek olarak bulunmaktadır. Birincil kullanıcılar, lisanslı kullanıcılar ve kanallara yasal erişim hakkına sahiptirler. İkincil

kullanıcılar ise birincil kullanıcılar tarafından kullanılmayan kanalları bu kullanıcılara zarar vermeden fırsatçı bir yaklaşımla kullanılmaktadırlar. Yeni kanal isteğinde bulunan birincil ve ikincil kullanıcılar için sistemde uygun olan kanallardan sadece bir tanesi tahsis edilir. Sistemde bulunan arabellek ise hem çağrıları engellenen İK'ları, hem de sistemden düşen İK'ları saklamak için kullanılır.



Şekil 1. Önerilen BR ağ modelinde kanal ve arabellek yapısı

### 3.2 Önerilen ağ modelinde kullanılan kanal tahsis algoritması

Önerilen ağ modelinde birincil ve ikincil kullanıcı arasında anlaşılabilir olarak tek bir erişim noktası kullanımı kabul edilmiştir. Bu erişim noktası, ağa bağlanan birincil ve ikincil kullanıcılar için bir Kanal Tahsis Tablosu (KTT) oluşturularak bu tablo yardımıyla kullanıcı türüne (önceliklerine) göre kanal tahsisi gerçekleştirmektedir. Erişim noktası tarafından kullanılan kanal tahsis algoritmasının akış şeması Şekil 2'de verilmiştir. Kanal tahsis işlemi esas teşkil eden dört önemli olay bulunmaktadır:

**(1) BK kanal isteği:** Sisteme istekte bulunan bir BK için, diğer BK'lar tarafından kullanılmayan (boşta veya İK'lar tarafından kullanılan) bir veya daha fazla kanal varsa, bu kanallardan biri rassal olarak atanır. Eğer diğer BK'lar tarafından kullanılmayan kanal yoksa, istekte bulunan BK için çağrı engelleme durumu oluşur. Eğer BK için atanan kanal mevcut durumda sistemdeki bir İK tarafından kullanılıyorsa, bu kanalı kullanan İK için boş kanal aranır. Eğer boşta kanal varsa, İK o kanala atanır (spektrum el-değiştirme), yoksa İK için çağrı düşme durumu oluşur.

**(2) BK servis tamamlama:** Sistemdeki bir BK servisini tamamladığında, bu kullanıcıya ait kanal boşta

çıkarılarak, diğer kullanıcıların hizmetine sunulur ve KTT güncellenir.

**(3) İK kanal isteği:** Sisteme istekte bulunan bir İK için, öncelikle boş olan (diğer birincil ve ikincil kullanıcılar kullanılmayan) kanal aranır. Eğer boşta bir veya daha fazla kanal varsa, bu kanallardan biri rassal olarak istekte bulunan İK için atanır. Eğer sistemde boşta kanal yoksa, ancak arabellekte boşluk varsa bu kullanıcı arabelleğe alınır. Eğer arabellekte de boşluk yoksa, bu kullanıcı için çağrı engelleme durumu oluşur.

**(4) İK servis tamamlama:** Sistemdeki bir İK servisini tamamladığında, bu kullanıcıya ait kanal boşta çıkarılarak, diğer kullanıcıların hizmetine sunulur ve KTT güncellenir.

### 4. Önerilen Bilişsel Radyo Ağ Modelinin Başarım Analizi

Önerilen BR ağ modelinin başarım analizi üç boyutlu sürekli Markov zinciri kullanılarak analitik olarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 2'de önerilen ağ modelinin 4 kanal ve 3 arabellek boyutu için Markov zinciri modeli görülmektedir. Markov zinciri modelinde her bir durum  $(i, j, k)$  üçlülerinden oluşmaktadır. Burada,  $i, j, k$  sırasıyla sistemdeki birincil kullanıcı sayısı, ikincil kullanıcı sayısı ve arabellekte boş kanal bekleyen ikincil kullanıcı sayısını göstermektedir. Markov zincirine ait durum uzayı  $S$ , aşağıda verilen Denklem (1) ile tanımlanır;

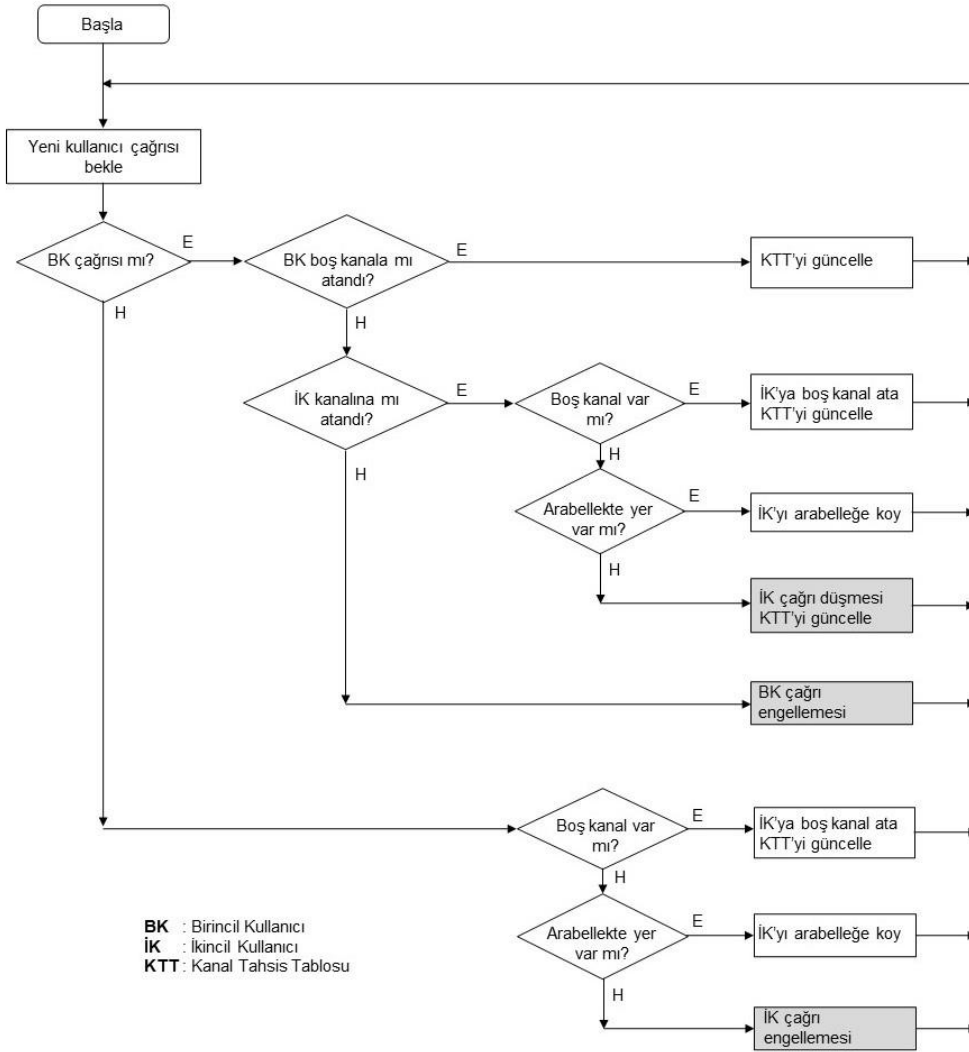
$$S = \{(i, j, k) | 0 \leq i, j \leq N, i + j \leq N, 0 \leq k \leq Q\} \quad (1)$$

Önerilen ağ modelinin Markov zinciri modelinde  $i = 0, j = 0, k = 0$ ;  $i = N, j = 0, k = 0$ ; ve  $i = 0, j = N, k = 0$  durumlarına ait denge eşitlikleri sırasıyla Denklem (2), Denklem (3) ve Denklem (4)'te verilmiştir.

$$P(0,0,0)(\lambda_p + \lambda_s) = P(1,0,0)\mu_p + P(0,1,0)\mu_s \quad (2)$$

$$P(N,0,0)(N\mu_p + \lambda_s) = P(N-1,0,0)\lambda_p \quad (3)$$

$$\begin{aligned} P(0,N,0)(\lambda_p + \lambda_s + N\mu_s) \\ = P(0,N-1,0)\lambda_s \\ + P(1,N-1,1)\mu_p \\ + P(0,N,1)N\mu_s \end{aligned} \quad (4)$$



Şekil 2. Önerilen ağ modelinde kullanılan kanal tahsis algoritmasının akış diyagramı

Markov zinciri modelinde  $i = 0, j = N, k = Q$ ; ve  $i = N, j = 0, k = Q$  durumlarına denge eşitlikleri sırasıyla Denklem (5) ve Denklem (6)'da verilmiştir.

$$P(0, N, Q)(\lambda_p + N\mu_s) = P(0, N, Q - 1)\lambda_s \quad (5)$$

$$P(N, 0, Q)(N\mu_p) = P(N - 1, 1, Q)\lambda_p + P(N - 1, 1, Q - 1)\lambda_p + P(N, 0, Q - 1)\lambda_s \quad (6)$$

$1 \leq i < N, j = 0, k = 0$  durumuna ait denge eşitlikleri Denklem (7)'de verilmiştir.

$$P(i, 0, 0)(\lambda_p + \lambda_s + i\mu_p) = P(i - 1, 0, 0)\lambda_p + P(i, 1, 0)\mu_s + P(i + 1, 0, 0)(i + 1)\mu_p \quad (7)$$

$i = 0, 1 \leq j < N, k = 0$  durumuna ait denge eşitlikleri Denklem (8)'de verilmiştir.

$$P(0, j, 0)(\lambda_p + \lambda_s + j\mu_s) = P(0, j - 1, 0)\lambda_s + P(1, j, 0)\mu_p + P(0, j + 1, 0)(j + 1)\mu_s \quad (8)$$

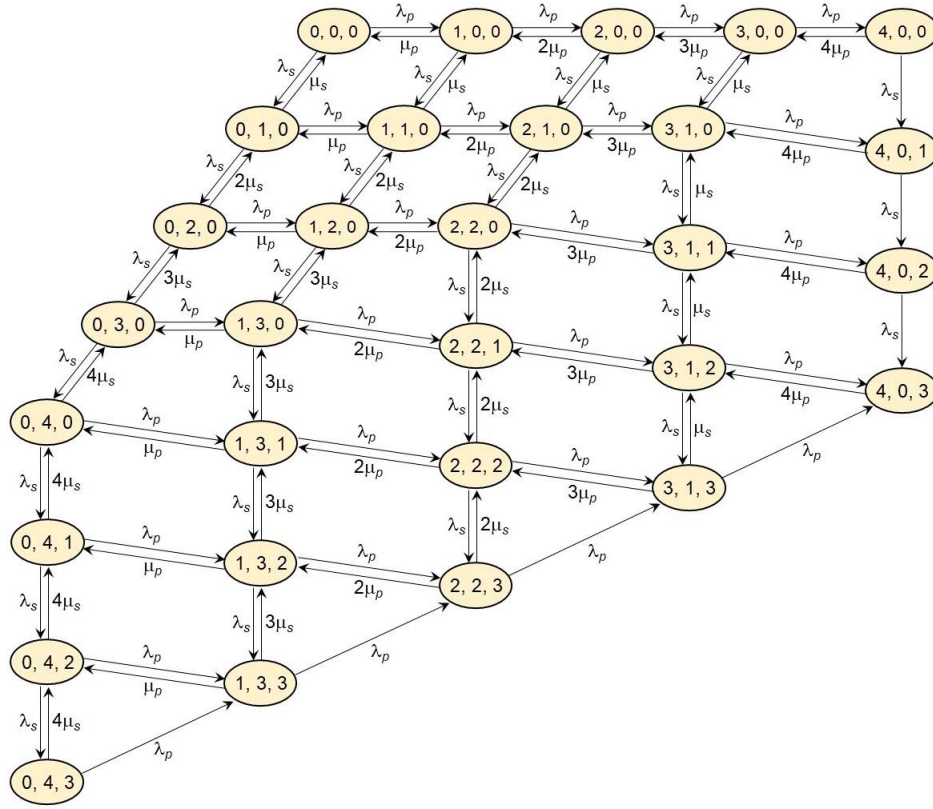
$i = 0, j = N, 1 \leq k < Q$  durumuna ait denge eşitlikleri Denklem (9)'da verilmiştir.

$$P(0, N, k)(\lambda_p + \lambda_s + N\mu_s) = P(0, N, k - 1)\lambda_s + P(0, N, k + 1)N\mu_s + P(1, N - 1, k + 1)\mu_p \quad (9)$$

$i = N, j = 0, 1 \leq k < Q$  durumuna ait denge eşitlikleri Denklem (10)'da verilmiştir.

$$P(N, 0, k)(\lambda_s + N\mu_p) = P(N, 0, k - 1)\lambda_s + P(N - 1, 1, k - 1)\lambda_p \quad (10)$$





Şekil 3. Önerilen ağ modelinin 4 kanal ve 3 arabellek boyutu için sürekli Markov zinciri modeli

$1 \leq i < N, i + j = N, k = 0$  durumuna ait denge eşitlikleri Denklem (11)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 P(i, j, 0)(\lambda_p + \lambda_s + i\mu_p + j\mu_s) &= P(i - 1, j, 0)\lambda_p \\
 &+ P(i, j - 1, 0)\lambda_s \\
 &+ P(i + 1, j - 1, 1)(i + 1)\mu_p \\
 &+ P(i, j, 1)j\mu_s
 \end{aligned} \tag{11}$$

$1 \leq i < N, i + j = N, k = Q$  durumuna ait denge eşitlikleri Denklem (12)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 P(i, j, k)(\lambda_p + i\mu_p + j\mu_s) &= P(i, j, Q - 1)\lambda_s \\
 &+ P(i - 1, j + 1, Q - 1)\lambda_p \\
 &+ P(i - 1, j + 1, Q)\lambda_p
 \end{aligned} \tag{12}$$

$1 \leq i < N, i + j = N, 1 \leq k < Q$  durumuna ait denge eşitlikleri Denklem (13)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 P(i, j, k)(\lambda_p + \lambda_s + i\mu_p + j\mu_s) &= P(i - 1, j + 1, k - 1)\lambda_p \\
 &+ P(i, j, k - 1)\lambda_s \\
 &+ P(i + 1, j - 1, k + 1)(i + 1)\mu_p \\
 &+ P(i, j, k + 1)j\mu_s
 \end{aligned} \tag{13}$$

$1 \leq i < N, 1 \leq j < N, i + j < N, k = 0$  durumuna ait denge eşitlikleri Denklem (14)'te verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 P(i, j, k)(\lambda_p + \lambda_s + i\mu_p + j\mu_s) &= P(i - 1, j, k)\lambda_p \\
 &+ P(i, j - 1, k)\lambda_s \\
 &+ P(i + 1, j, k)(i + 1)\mu_p \\
 &+ P(i, j + 1, k)(j + 1)\mu_s
 \end{aligned} \tag{14}$$

Markov zinciri modelinde tüm durumların olasılıkları toplamı 1 olduğundan bu durum Denklem (15) ile gösterilebilir;

$$\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N \sum_{k=0}^Q P(i, j, k) = 1 \tag{15}$$

İkincil kullanıcılara ait çağrı engelleme olasılığı Markov zinciri modelinde ilgili durumlar kullanılarak Denklem (16) ile hesaplanır;

$$\begin{aligned}
 P_B &= \frac{\text{Engellenen IK çağrı sayısı}}{\text{Toplam IK çağrı sayısı}} \\
 &= \sum_{i=0, i+j=N, k=Q}^N P(i, j, k)
 \end{aligned} \tag{16}$$

İkincil kullanıcılara ait çağrı düşme olasılığı ( $P_D$ ), Markov zinciri modelinde ilgili durumlar kullanılarak Denklem (17) ile hesaplanır.

$$P_D = \frac{\text{Düşen İK çağrı sayısı}}{\text{Toplam İK çağrı sayısı}} = \sum_{i=0, i+j=N, k=Q}^{N-1} \frac{P(i, j, k) \lambda_p}{\lambda_s} \quad (17)$$

İkincil kullanıcılara ait çağrı el-değiştirme olasılığı ( $P_H$ ), Markov zinciri modelinde ilgili durumlar kullanılarak Denklem (18) ile hesaplanır.

$$P_H = \frac{\text{El - değiştiren İK çağrı sayısı}}{\text{Toplam İK çağrı sayısı}} = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0, i+j < N}^{N-1} \frac{(j/(N-i))P(i, j, 0) \lambda_p}{\lambda_s} \quad (18)$$

## 5. Sayısal Sonuçlar ve Analiz

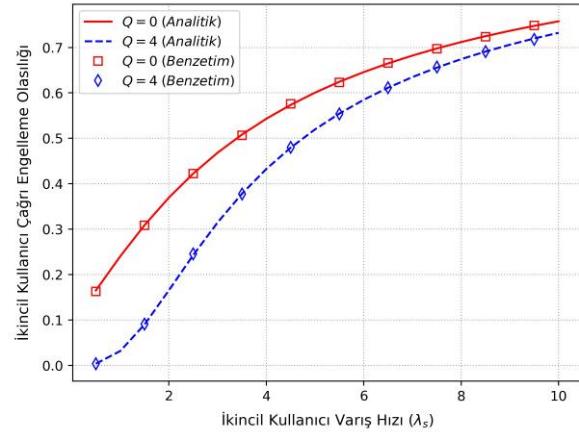
Bu çalışmada önerilen BR ağ modelinden elde edilen analitik ve benzetim sonuçları, artan İK varış hızları için analiz edilmiştir. BR ağında kullanılan başarımler, çağrı engelleme olasılığı, çağrı düşme olasılığı ve spektrum el-değiştirme olasılıkları olarak belirlenmiştir. Sunulan bütün grafiklerde, önerilen ağ modelinden elde edilen sonuçlar, Qiming et al. (2010) tarafından geliştirilen (arabellek kullanmayan) eş ağ modelinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Geliştirilen BR ağ analitik ve benzetim modelinde kullanılan parametreler Çizelge 2’de sunulmuştur. Burada kullanılan parametrelerden ilgili olanlar için Toukhey et al. (2016) ve Telex et al. (2012) makaleleri referans alınmıştır.

**Çizelge 2.** Önerilen ağ modeli benzetim parametreleri

Kanal sayısı ( $M$ )	3
Kuyruk büyüklüğü ( $Q$ )	4
PU varış hızı ( $\lambda_p$ )	1,2
SU varış hızı ( $\lambda_s$ )	0 – 10
PU servis hızı ( $\mu_p$ )	1,0
SU servis hızı ( $\mu_s$ )	1,0

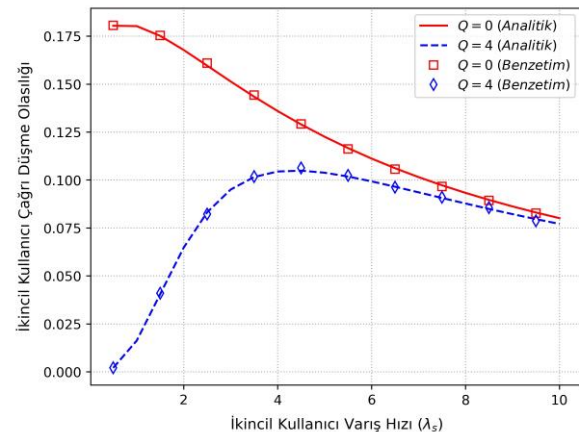
Şekil 4’te artan İK varış hızları için arabellek ( $Q = 4$ ) kullanan önerilen ağ modeli ile Qiming et al. (2010) tarafından geliştirilen ve arabellek kullanmayan ( $Q = 0$ ) eş ağ modelinden elde edilen İK çağrı engelleme olasılıkları sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde sabit bir BK varış hızı ( $\lambda_p$ ) için, İK varış hızı (0 – 10) arttırıldığında İK çağrı engelleme olasılıklarının her iki model için de arttığı görülmektedir. Örneğin İK varış hızı 2,0 iken, çağrı engelleme olasılığı ( $Q = 0$ ) olan modelde 0,37, ( $Q = 4$ ) olan modelde 0,17 olurken, İK varış hızı 4’e arttırıldığında, çağrı engelleme olasılığı ( $Q = 0$ ) olan modelde 0,54, ( $Q = 4$ ) olan modelde 0,43 olmaktadır. Bununla birlikte önerilen modelden elde edilen çağrı engelleme olasılıkları İK’ların bütün yük değerleri için daha düşüktür. Örneğin İK

varış hızı 2 olduğunda, önerilen modelden edilen çağrı engelleme olasılığı, arabellek kullanmayan modelden elde edilen çağrı engelleme olasılığından yaklaşık %55 daha iyi sonuç vermektedir.



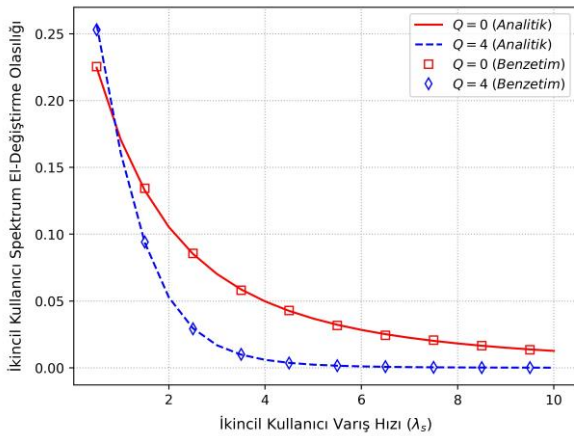
**Şekil 4.** Artan İK varış hızları için İK çağrı engellenme olasılıkları

Şekil 5’de artan İK varış hızları için arabellek kullanan önerilen ağ modeli ile arabellek kullanmayan eş ağ modelinden elde edilen İK çağrı düşme olasılıkları verilmiştir. Grafikler incelendiğinde sabit bir BK varış hızı ( $\lambda_p$ ) için, İK varış hızı (0 – 10) arttırıldığında İK çağrı düşme olasılıklarının arabellek kullanmayan modelde sürekli azalırken, arabellek kullanan modelde belirli bir değere ( $\lambda_s = 4$ ) kadar arttığı, bu değerden sonra ise azaldığı görülmektedir. Arabellek kullanmayan ağ modelinde artan İK varış hızları için İK çağrı düşme olasılıklarının azalma sebebi, İK çağrı engelleme oranlarının artmasıdır. Bu modelde artan İK varış hızları için İK’lara gerekli spektrum tahsisi yapılamayacağından, sistemdeki İK sayısı azalacak ve buna bağlı olarak bu kullanıcıların çağrı düşme olasılıkları da düşecektir. Bununla birlikte önerilen ağ modelinden elde edilen İK çağrı düşme olasılıkları İK’ların bütün varış hızları için arabellek kullanmayan modelden daha iyi (düşük) sonuçlar verdiği görülmektedir.



**Şekil 5.** Artan İK varış hızları için İK çağrı düşme olasılıkları

Şekil 6'da artan İK varış hızları için önerilen ağ modelinden ve Qiming et al. (2010) tarafından geliştirilen eş ağ modelinden elde edilen İK spektrum el-değiştirme olasılıkları sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde sabit bir BK varış hızı ( $\lambda_p$ ) için, İK varış hızı (0 – 10) arttırıldığında İK spektrum el-değiştirme olasılıklarının her iki model için de azaldığı görülmektedir. Örneğin İK varış hızı 2,0 iken, spektrum el-değiştirme olasılığı önerilen modelde ( $Q = 4$ ) 0,053, arabelleksiz ( $Q = 0$ ) olan modelde 0,10 olurken, İK varış hızı 4'e arttırıldığında, önerilen modelde ( $Q = 4$ ) 0,006, ( $Q = 0$ ) olan modelde 0,05 olmaktadır. Bununla birlikte önerilen modelden elde edilen spektrum el-değiştirme olasılıkları, İK'ların varış hızları 1,0 olana kadar arabelleksiz eş modelden elde edilen değerlerden daha yüksek, bu değerden sonraki bütün varış hızları için daha düşüktür. Örneğin İK varış hızı 2 iken, önerilen modelden edilen spektrum el-değiştirme olasılığı 0,052, arabellek kullanmayan modelden elde edilen spektrum el-değiştirme olasılığı ise 0,105'dir. Bu varış hızında önerilen model yaklaşık 2,01 kat daha iyi sonuç vermektedir.



Şekil 6. Artan İK varış hızları için İK spektrum el-değiştirme olasılıkları

## 6. Sonuç

Bu makalede, İK'ların lisanslı spektrumu fırsatçı bir yaklaşımla kullandığı ve engellenen ya da yeni gelen BK çağrılarında dolayı bağlantısı düşen İK'lar için arabellek kullanımı öngören bir BR ağ modeli sunulmaktadır. Önerilen BR ağ modelinin başarımı hem üç boyutlu sürekli Markov zinciri kullanılarak analitik olarak hem de bilgisayar benzetimiyle elde edilmiştir. Ayrıca, benzetim modelinden elde edilen sonuçlarla, analitik modelden elde edilen sonuçlar doğrulanmıştır. İK çağrı engelleme olasılığı, İK çağrı düşme olasılığı ve İK spektrum el-değiştirme olasılığı başarımleri olarak benimsenmiştir. Önerilen modelden elde edilen sonuçlar, literatürdeki arabellek kullanmayan eş bir modelden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Önerilen model, özellikle İK yükünün (İK varış hızı) düşük

olduğu (0-5) senaryolarda, İK çağrı engelleme olasılığı ve çağrı düşme olasılıklarında yüksek iyileştirmeler sağlarken, spektrum el-değiştirme olasılığında düşük iyileşme sağlamıştır. İK yükünün yüksek olduğu (5'ten büyük) senaryolarda ise, İK çağrı engelleme olasılığı ve çağrı düşme olasılıklarında düşük iyileştirmeler sağlarken, spektrum el-değiştirme olasılığında yüksek iyileşme sağlamıştır. Örneğin, İK varış hızı 2 olduğunda, İK çağrı engelleme olasılığında %55,2, İK çağrı düşme olasılığında %61,4 ve İK spektrum el-değiştirme olasılığında yaklaşık %49,9 oranında iyileşme elde edilmiştir. İK varış hızı 6 olduğunda ise, İK çağrı engelleme olasılığında %9,4, İK çağrı düşme olasılığında %10,7 ve İK spektrum el-değiştirme olasılığında %96,3 oranında iyileşme elde edilmiştir.

Bu çalışmadan farklı olarak İK'ların kullandıkları veri trafik türlerine göre farklı önceliklere sahip olduğu bir BR ağının modellenmesi, benzetimi ve analizi gelecek çalışma olarak düşünülmektedir.

## Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

## Yazarlık Katkı Beyanı

Makalenin tamamı başlıca yazar tarafından yazılmıştır.

## Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarın bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edeceği hiçbir çıkar çatışması yoktur.

## Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

## 7. Kaynaklar

- Bayrakdar, M. E., and Çalhan, A., 2015. Bilişsel radyo ağlarında spektrum el değiştirme. *Sakarya University Journal of Science*, **19(3)**, 291-302. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.81445>
- Goel, S., Kulshrestha, R., 2022. Queueing based spectrum management in cognitive radio networks with retrial and heterogeneous service classes. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, **13**, 2429–2437. <https://doi.org/10.1007/s12652-021-03442-z>
- Hassani, M. M., and Berangi, R., 2019. Impact of the primary user on the secondary user blocking probability in cognitive radio sensor networks. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, **27(3)**, 2081-2092. <https://doi.org/10.3906/elk-1706-292>
- Haykin, S., 2005. Cognitive radio: brain–empowered wireless communications. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, **23(2)**, 201–220. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2004.839380>

- Kulkarni, K., and Adrish, B., 2017. On Optimal Spectrum Access of Cognitive Relay with Finite Packet Buffer. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66, 7584-7588.
- Lee, Y., Park, G. C., Sim, D.B., 2012. Cognitive radio spectrum access with prioritized secondary users, *Applied Mathematics & Information Sciences*, **6(2)**, 595-601.
- Mitola, J., and Maguire, G. Q., 1999. Cognitive radio: making software radios more personal. *IEEE Personal Communications*, **6(4)**, 13-18.  
<https://doi.org/10.1109/98.788210>
- Qiming, T., Chuan, M., Guanding, Y., and Aiping, H., 2010. Analysis of cognitive radio spectrum access with finite primary users and infinite secondary users. *International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP)*, China, pp. 1-5.  
<https://doi.org/10.1109/WCSP.2010.5633740>
- Qing, H., Shaoyi, X., and Xiaojun J., 2011. Performance evaluation of secondary users in Dynamic Spectrum Access system, 2011. *IEEE 22nd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Toronto, Canada, pp. 710-714.  
<https://www.doi.org/10.1109/PIMRC.2011.6140057>
- Salameh, O., Bruneel, H., and Wittevrongel, S., 2020. Performance evaluation of cognitive radio networks with imperfect spectrum sensing and bursty primary user traffic. *Mathematical Problems in Engineering*, **64**, 1-11.  
<https://doi.org/10.1155/2020/4102046>
- Salameh, O., Turck, K. D., and Bruneel, H., 2017. Analysis of secondary user performance in cognitive radio networks with reactive spectrum handoff. *Telecommunication Systems*, **65**, 539-550.  
<https://doi.org/10.1007/s11235-016-0250-7>
- Shruti and Kulshrestha, R., 2022. Analysis of Spectrum Sensing and Spectrum Access in Cognitive Radio Networks with Heterogeneous Traffic and  $p$ -Retry Buffering, in *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 21(7), pp. 2318-2331.  
<https://www.doi.org/10.1109/TMC.2020.3042836>
- Tang, W., Yu, H., Han, Y., and Li, S., 2012. An analytical performance model considering access strategy of opportunistic spectrum sharing system. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, **24(11)**, 1200-1212.  
<https://doi.org/10.1002/cpe.1890>
- Telex, M. N. N., Shou. Dong and Atta S. Attahiru, Analysis of cognitive radio networks with channel assembling, buffering, and imperfect sensing, 2013. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Shanghai, China, pp. 952-957.  
<https://www.doi.org/10.1109/WCNC.2013.6554692>
- Toukhey, A.T.E, Mohsen M. T., and Ibrahim F. T, 2016. QoS-Driven Channel Allocation Schemes Based on Secondary Users' Priority in Cognitive Radio Networks. *International Journal of Wireless and Mobile Computing* 11(2), 91-99.
- Wang, Z., and Zhang, Y., Analysis of cognitive radio spectrum access with heterogeneous traffic under buffer constraints, 2013. *3rd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks*, Xianning, China, pp. 137-140.  
<https://www.doi.org/10.1109/CECNet.2013.6703291>
- Zhao, Q., and Sadler, B. M., 2007. A survey of dynamic spectrum access. *IEEE Signal Processing Magazine*, 24(3), 79-89.  
<https://doi.org/10.1109/MSP.2007.361604>

## Yapay Zekâ Çağında Duygu Analizi: Büyük Dil Modellerinin Yükselişi ve Klasik Yaklaşımlarla Karşılaştırılması

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 15.05.2024

Kabul/Accepted: 05.08.2024

Yayımlandı/Published:02.12.2024

## Sentiment Analysis in the Age of Artificial Intelligence: The Rise of Large Language Models and Comparison with Classical Approaches

Muhammed Abdulhamid KARABIYIK<sup>1\*</sup>, Asım Sinan YÜKSEL<sup>2</sup>, Fatma Gülşah TAN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Bor Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Programcılığı Bölümü, Niğde, Türkiye

<sup>2</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

<sup>3</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Bilgi İşlem Daire Başkanlığı, Isparta, Türkiye

© Ayfon Kocatepe Üniversitesi

### Öz

Duygu analizi, günümüzde hem bireylerin hem de şirketlerin karar alma süreçlerinde önemli bir rol oynayan, farklı veri kaynaklarından elde edilen bilgileri inceleyerek insan duygularını anlamayı sağlayan bir yöntemdir. Duygu analizi klasik makine öğrenmesi yöntemleriyle gerçekleştirildiğinde, metinlerin duygusal içeriğini anlamak için genellikle belirli özelliklerin elle seçilmesini ve öznelik mühendisliği gerektirir. Bu yöntemler, duygusal ifadelerin karmaşıklığını ve çok katmanlı yapısını tam olarak yakalayamamakta ve genellikle belirli bağlamlarda başarılı olmaktadır. Ancak, büyük dil modelleri, derin öğrenme prensiplerine dayanarak, karmaşık dil yapılarını daha etkili bir şekilde öğrenebilirler. Bu modeller, büyük ölçekteki metin verilerini işleyerek genel dil bilgisiyle donanmışlardır. Dolayısıyla, duygu analizi gibi görevlerde kullanıldıklarında, öznelik mühendisliği gerektirmeden karmaşık duygusal ifadeleri daha doğru bir şekilde çözebilirler. Çalışmamızda, üç farklı veri seti kullanılarak büyük dil modelleri ve klasik yöntemlerin duygu analizindeki performansları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, büyük dil modellerinin klasik yöntemlere kıyasla daha yüksek doğruluk oranları elde ettiğini, duygu analizi alanında gelecekte daha fazla kullanılacağını ve bu alandaki çalışmalara önemli katkılar sağlayacağını göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler** Duygu Analizi; Büyük Dil Modelleri; Doğal Dil İşleme; İstem Mühendisliği, Makine Öğrenme.

### Abstract

Sentiment analysis is a method that plays an important role in the decision-making processes of both individuals and companies today and enables understanding human emotions by examining information obtained from different data sources. When sentiment analysis is performed with traditional machine learning methods, it often requires hand-selection of specific features and feature engineering to understand the sentiment of texts. These methods cannot fully capture the complexity and multilayered nature of emotional expressions and are often successful in certain contexts. However, large language models can learn complex language structures more effectively, based on deep learning principles. These models are equipped with general language knowledge by processing large-scale text data. Therefore, when used in tasks such as sentiment analysis, they can more accurately decode complex emotional expressions without requiring feature engineering. In our study, the performances of large language models and classical methods were compared using three different data sets. The results show that large language models achieve higher accuracy rates compared to classical methods, will be applied more in the field of sentiment analysis in the future, and will make significant contributions to studies in this field.

**Keywords** Sentiment Analysis; Large Language Models; Natural Language Processing; Prompt Engineering; Machine Learning.

### 1. Giriş

Yapay zekâ, insan zekasını taklit etmeyi ve hatta aşmayı amaçlayan, bilgisayar bilimlerindeki en karmaşık ve çok yönlü konulardan biridir. Ancak, bu hedefe ulaşma süreci, bilgi işleme gücü ve algoritmik karmaşıklık açısından bir dizi zorlukla karşı karşıya kalmıştır. Yapay zekâ teorisi, bu zorlukları aşmak için çeşitli yaklaşımlar geliştirmiştir. Ancak geçmiş dönemlerdeki teknolojinin verimlilik, bellek ve işlem gücü açısından yetersizliği bu alandaki pratik uygulamaların önünde bir engel olarak durmuştur. Günümüzde bilgisayar teknolojisinin hızla ilerlemesiyle birlikte, bu durum değişmeye başlamış ve yapay zekânın

günlük hayata entegrasyonu giderek artmıştır. Özellikle yapay zekânın alt dalı olan derin öğrenme tekniklerinin gelişimiyle, yapay zekâ tabanlı çözümler daha yüksek hız ve doğruluk performanslarını elde etmişlerdir. Derin öğrenme yaklaşımları, klasik yapay zekâ yöntemleriyle çözülemeyen problemlerin aşılmasına yardımcı olmalarıyla dikkat çekmekte, zaman ve fiyat maliyetlerinin, sistem hata oranlarının düşürülmesine imkân sağlamaktadırlar (Khakurel vd. 2018).

Yapay zekâ teknikleri, görüntü, ses, sinyal ve metin gibi verilere dayalı problemlerin çözümünde hayati bir rol oynamaktadır. İnternetin yaygınlaşmasıyla birlikte, sosyal

medya platformları, bloglar, haber siteleri ve diğer çevrimiçi kaynaklar aracılığıyla özellikle metin tabanlı verilerin miktarı hızla artmaktadır. Bu artış son yıllarda doğal dil işleme çalışmalarına büyük bir ivme kazandırmıştır (Jouis ve Shafei 2018). Araştırmacılar, metin verilerini analiz etmek, anlamak ve kullanmak için yeni yöntemler geliştirmekte ve bu alandaki potansiyeli keşfetmektedirler. Bu bağlamda, doğal dil işleme alanında önemli bir araştırma ve geliştirme potansiyeline sahip temel konulardan birisi de duygu analizi olmuştur. Duygu analizi, kullanıcı etkileşimli sistemlerde hedef kitlelerin tepkilerinin tespiti açısından önemli bir konudur (Yue vd. 2019). Duyguların başarılı bir şekilde tespit edilmesi, ticari ve sosyal konularda kurumların operasyonlarını faydalı bir şekilde geliştirmelerini sağlamaktadır. Faydalarının yanında belirli zorlukları da beraberinde getirmektedir. Bu zorluklardan ilki, insan duygularının geniş çeşitliliği ve metinlerdeki duygusal ifadelerin karmaşıklığı ve belirsizliğidir. Dil ve kültürel farklılıklar da bir başka zorluktur; çünkü duygusal ifadeler, dil ve kültürel bağlamlardan etkilenmekte ve bu da yapay zekâ modellerinin genelleme yeteneği kazanmasını zorlaştırmaktadır. Ayrıca, metinlerde sıklıkla kullanılan ironi ve mizah gibi dil işlevleri, duygu analizi modelleri için zorluklar oluşturmaktadır. Son olarak, etiketli veri toplama süreci öznel olabilmekte ve insanlar arasında duygusal ifadelerin yorumlanması farklılık gösterebilmektedir. Bu da model eğitimi için ek bir zorluk yaratmaktadır. Bu zorluklar, metin tabanlı duygu analizi alanında çalışan araştırmacılar ve uygulayıcılar için önemli sorunlar oluşturmakta ve yeni yöntemlerin geliştirilmesini ve mevcut modellerin iyileştirilmesini gerekli kılmaktadır (Khurana vd. 2023).

Büyük dil modelleri (BDM), son yıllarda yapay zekâ alanında büyük bir gelişme göstermiştir. Çok büyük metin ve kod veri kümeleri üzerinde eğitilmiş olan bu modeller, metin üretme, makine çevirisi, farklı türde içerikler yazma ve sorulan sorulara cevap verme gibi çeşitli görevlerde insan benzeri performans sergilemektedirler. Duygu analizinde, klasik gözetimli sınıflandırma yöntemlerinden faydalanılmaktadır (Hasan vd. 2018). Ancak, BDM'lerin gelişimiyle birlikte bu alan yeni bir boyut kazanmıştır. Temelinde derin öğrenme tekniklerinden faydalanılması, büyük miktarda verilerle eğitilmiş olmaları doğal dilin yapısını kolaylıkla öğrenmelerini sağlamıştır.

Bu çalışmada klasik yöntemler ve BDM'lerin duygu analizi problemindeki başarıları karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalarda üç farklı veri seti kullanılmıştır. Bu veri setleri, hava yolu şirketlerine, finansal gelişmelere ve filmlere yapılan yorumları kapsamaktadır. Klasik yöntemlerde deneyler farklı sayıda eğitim verisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyin her adımında eğitim seti genişletilerek doğruluk oranları yeniden hesaplanmıştır. Eğitim setinin her adımda

genişletilmesindeki amaç ise klasik yöntemlerin daha fazla veriyle eğitilerek BDM'lerin performanslarını yakalayıp yakalamadıklarını gözlemlemektir. BDM deneylerinde ise Sıfır Atış İstem (Zero Shot Prompting) yöntemi kullanılarak ön eğitilmiş modellerin doğruluk oranı hesaplanmıştır. Sıfır atış istem, sadece BDM'de yer alan bilgiyi kullandığı için ek bir eğitim maliyeti oluşturmamıştır.

## **2. Materyal ve Metot**

Duygu analizi için seçilen klasik makine öğrenmesi teknikleriyle BDM'leri karşılaştırma amacınız, duygu analizi alanında mevcut en etkili ve güncel yöntemlerin belirlenmesidir. Klasik yöntemlerden, duygu analizi gibi doğal dil işleme görevlerinde sıklıkla kullanılan ve kapsamlı bir literatür desteğine sahip olan Rastgele Orman (RO), Lojistik Regresyon (LR), Destek Vektör Makineleri (DVM), Gauss Sade Bayes (GSB), K - En Yakın Komşu (K-EYK), AdaBoost ve Yapay Sinir Ağları (YSA) seçilmiştir.

BDM'lerde, son yıllarda yapay zekâ alanında devrim niteliğindeki ilerlemelerin ürünleri olan BERT, GPT 3.5 Turbo ve Gemini modelleri seçilmiştir. Bu modeller, derin öğrenme prensiplerine dayanarak geniş bir dil anlama yeteneğiyle bilinmektedirler. Özellikle BERT, Transformer mimarisi sayesinde doğal dil işleme alanında çığır açmış ve birçok dil işleme görevinde liderlik etmiştir. GPT 3.5 Turbo ise OpenAI tarafından geliştirilen ve daha önceki versiyonların performansını büyük ölçüde aşan son derece büyük bir dil modelidir. Gemini ise daha yeni bir model olmasına rağmen, özellikle genel anlamda daha dengeli bir performans sağlamak amacıyla tasarlanmıştır.

BDM'ler ve klasik yöntemlerin performansları, üç farklı veri seti kullanılarak karşılaştırılmıştır. Veri setleri dengeli bir şekilde oluşturulmuştur; dolayısıyla, performans değerlendirmesi için yalnızca doğruluk oranı kullanılmıştır. Modellerin performansını daha adil bir şekilde karşılaştırabilmek için test veri seti sabit tutulmuştur.

### **2.1 Veri Setleri**

Performans testlerinde kullanılmak üzere 3 farklı veri seti hazırlanmıştır. Bu veri setleri hava yolu şirketlerine, finansal gelişmelere ve filmlere yapılan yorumlar olarak 3 ana kategoriden oluşmaktadır. Veri setleri eğitim ve test olarak iki parçaya ayrılırken, test veri setleri sabit boyutta tutulmuştur. Bunun sebebi, farklı büyüklüklerdeki eğitim setleriyle geliştirilen modellerin aynı veri seti üzerindeki başarılarının kıyaslanabilmesidir. Testler, eğitim setlerindeki veriler sınıf başına 50 veri artırılarak yapılmıştır. Hava yolları yorumlarını içeren veri setinde pozitif, negatif ve nötr olmak üzere 3 sınıf mevcuttur (Rane ve Kumar 2018). Başlangıç olarak 150 eğitim ve 150 test verisi olmak üzere modeller eğitilmiştir. Testler,



eğitim veri seti boyutu her adımda 150 veri artırılarak tekrarlanmıştır. Toplam 46 adet test yapılmış ve son modelin eğitimi 7050 eğitim ve 150 test verisiyle gerçekleştirilmiştir.

Finansal gelişmelere yapılan yorumları içeren veri setinde pozitif, negatif ve nötr olmak üzere 3 sınıf mevcuttur (Malo vd. 2014). Başlangıç olarak 150 eğitim ve 150 test veri seti olmak üzere modeller eğitilmiştir. Eğitim veri seti boyutu her adımda 150 veri artırılarak testler tekrarlanmıştır. Toplam 16 adet test yapılmış ve son modelin eğitimi 2400 eğitim ve 150 test verisiyle gerçekleştirilmiştir. Film yorumlarını içeren veri setinde pozitif ve negatif olmak üzere 2 sınıf mevcuttur (Maas vd. 2011). Başlangıç olarak 100 eğitim ve 100 test verisi olmak üzere modeller eğitilmiştir. Eğitim seti boyutu her adımda 100 veri artırılarak testler tekrarlanmıştır. Toplam 30 adet test yapılmış ve son modelin eğitimi 3000 eğitim ve 100 test verisiyle gerçekleştirilmiştir. Veri setleriyle ilgili özet bilgiler Çizelge 1’de gösterilmiştir.

**Çizelge 1.** Kullanılan veri setleri temel bilgileri

Veri Seti	Eğitim seti		Test Seti Boyutu
	Başlangıç Boyutu	Bitiş Boyutu	
Finans	150	2400	150
Hava Yolları	150	7050	150
Film	100	3000	100

## 2.2 Metin Ön İşleme

Doğal dil işlemede, makine öğrenmesi yöntemlerinin kullanılmasında yapısal zorluklar ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple metinler bazı ön işlem aşamalarından geçirilmektedir. Çalışmamızda kullanılan ön işleme adımları Şekil 1’de gösterilmiştir.

## 2.3 Klasik Makine Öğrenmesi Yöntemleri

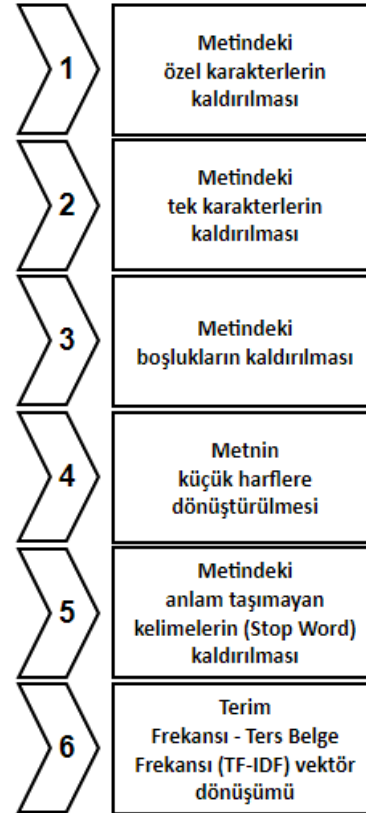
Klasik makine öğrenmesi yöntemleri ile metin sınıflandırma, veri toplama, metin ön işleme ve özellik çıkarma adımlarını içerir. Bu adımların ardından bir model eğitilir ve değerlendirilir.

Eğitilen model, yeni metin verilerini belirli kategorilerde sınıflandırmak için kullanılır. Duygu analizinde ise metnin hedef duygulara göre etiketlenmesi gerekir. Örneğin, ifadenin duygusu insan kararıyla pozitif, negatif ve nötr olarak etiketlenir. Etiketlenen ifade, metin ön işleme adımlarından geçirilerek sınıflandırma modelinin eğitimi yapılır. Modelin eğitimi tamamlandıktan sonra elde edilen model duygu analizinin tespitinde kullanılır.

### 2.3.1 Rastgele Orman

Rastgele Orman algoritması, temel olarak karar ağaçları üzerine kurulmuş bir yöntemdir. Alt kümelere ayrılmış

birden fazla karar ağacının sonuçlarını değerlendirir ve alt küme sonuçlarının yoğunluğuna göre nihai sonucu elde eder. Kullanılan bu dağıtık yapı modeli ezberden (aşırı uyum) koruyarak modelin daha etkili sonuçlar elde etmesini sağlar. Ancak alt karar ağaçlarının sayısı arttıkça oluşan karmaşıklık kullanım zorlukları oluşturmaktadır (Kılınçarslan vd. 2020). Şekil 2’de RO yöntemine ait çalışma prensibi gösterilmiştir. Deneylerde kullanılan RO yönteminde toplam alt ağaç sayısı 200 olarak kullanılmıştır.



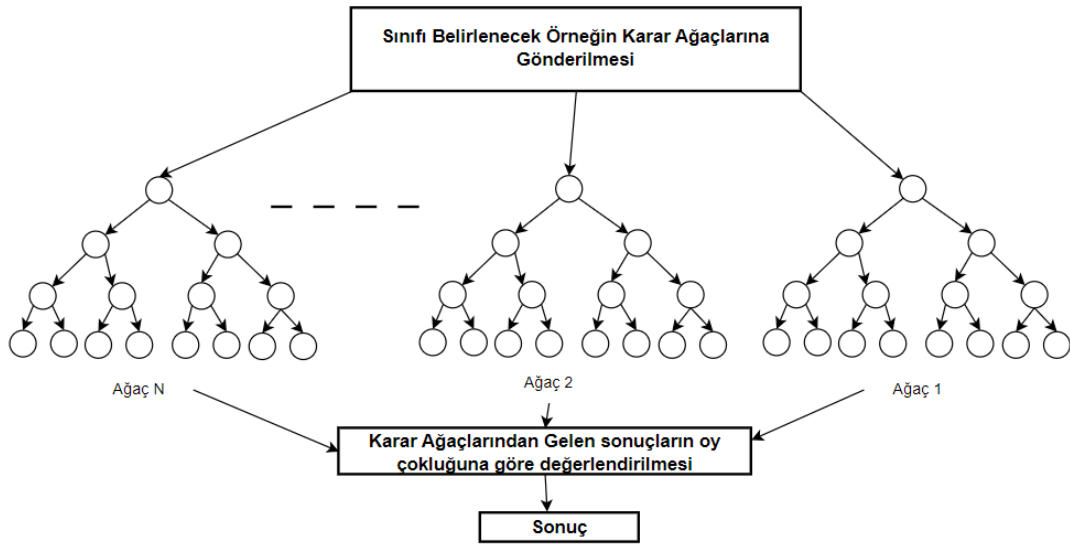
**Şekil 1.** Metin ön işleme adımları.

### 2.3.2 Lojistik Regresyon

Lojistik Regresyon algoritması, denetimli öğrenme tabanlı bir sınıflandırma yöntemidir. Genellikle iki sınıf içeren problemler için kullanılır. Ancak çok sınıflı problemlerde kullanılmak üzere geliştirilmiş çoklu LR yöntemleri de bulunmaktadır. Çoklu LR algoritması, hedef verinin hangi sınıfa ait olduğunu olasılıksal bir sonuçla tahmin eder. Hedef verinin en yüksek olasılığa sahip sınıfa ait olduğunu varsayar (Asan vd. 2023). LR olasılık formülü Denklem 1’de gösterilmiştir.

$$P(x) = \frac{1}{1 + e^{-(x-\mu)/s}} \quad (1)$$

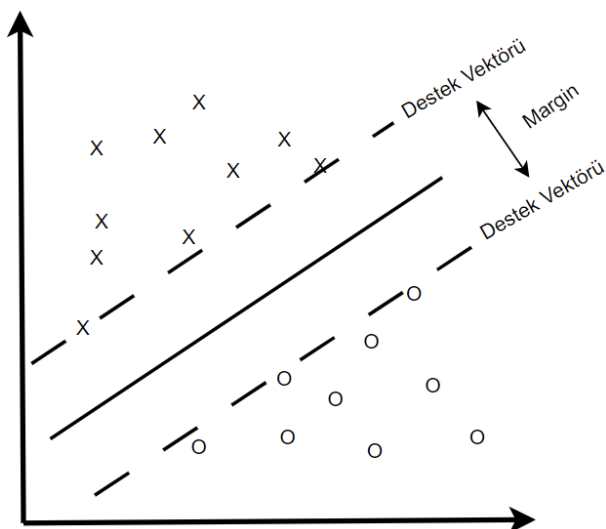
Deneylerde kullanılan LR modelinin parametreleri düzenli hale getirme gücünün tersi olan ve C ile sembolize eden parametre değeri 1.0’dır. Optimizasyon problemi için kullanılan çözücü algoritma ise lbfgs’dır.



Şekil 2. Rastgele Orman Yöntemi Çalışma Prensipleri.

### 2.3.3 Destek Vektör Makineleri

Destek Vektör Makineleri algoritması, denetimli öğrenme yöntemlerinden biridir ve hem regresyon hem de sınıflandırma problemleri için kullanılabilir. DVM, verileri analitik bir düzlemdeki dağılımlarına göre sınıflandırır ve bu sınıfları ayıran en uygun karar sınırlarını belirlemeye odaklanır. Bu sınırlar, veri noktalarının en yakın olduğu destek vektörlerine dayanır. DVM, veri noktalarını sınıflara ayırmak için bu destek vektörlerini kullanarak çalışır. DVM'nin birincil amacı, veri noktalarını farklı sınıflara en iyi şekilde ayıran bir karar sınırı belirlemek ve böylece etiketlenmemiş veri noktalarının doğru sınıflandırılmasını sağlamaktır (Yücesoy 2020). DVM sınıflar arası vektör yerleşimi Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Destek Vektör Makineleri vektör yerleşimi ve sınıflar arası ayırım.

Deneylerde kullanılan LR modelinin parametreleri düzenli hale getirme gücünün tersi olan ve C ile sembolize eden parametre değeri 1.0'dır. Sınıfların ayrılması için kullanılan Kernel yöntemiyle lineerdir.

### 2.3.4 Gauss Sade Bayes

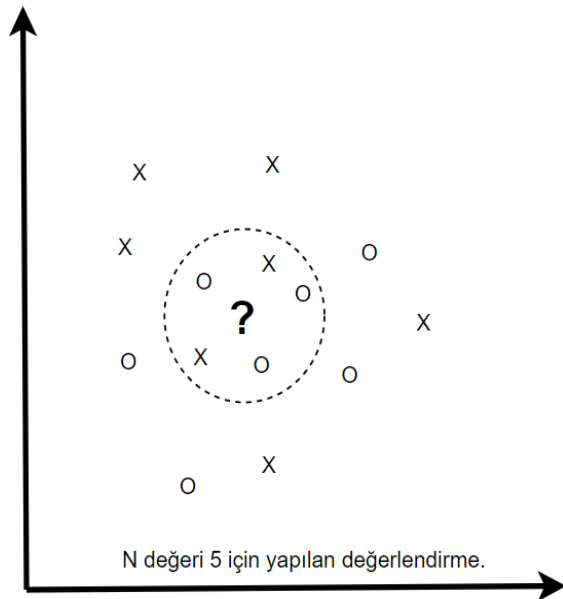
Sade Bayes sınıflandırıcı algoritması, verilerin sınıflar arası dağılım oranını hesaplamak için Bayes teoreminin formülünü kullanır. Bu algoritma, verilerin belirli niteliklerle birlikte hangi sınıfa ait olduğunu tahmin etmek için kullanılır. GSB algoritması, Sade Bayes algoritmasının bir alt türüdür ve benzer bir çalışma prensibine sahiptir. Bu algoritma, eğitim setindeki her sınıf için özelliklerin normalleştirilmiş verileri üzerinden ortalama değerlerini hesaplar. Sınıflandırılacak yeni bir veri noktasının, hesaplanan ortalama sınıf değerlerinden hangisine daha yakınsa o sınıfa ait olduğu varsayılır. Bu yöntem, veri noktalarının özelliklerine göre sınıflandırma yaparken sınıflar arasındaki önemli farklılıkları dikkate alır ve bu da genellikle etkili bir sınıflandırma sonucuna yol açar (Bezek Güre 2024). Denklem 2'de GSB formülü gösterilmiştir.

$$P(x_i|y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y^2}} \exp\left(-\frac{(x_i-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (2)$$

### 2.3.5 K En Yakın Komşu

K-EYK, denetimli öğrenme yöntemini kullanan bir sınıflandırma algoritmasıdır. Sınıfı tahmin edilecek verinin kendisine en yakın sınıf örneklerine olan mesafesini öklid veya manhattan uzaklık formüllerini kullanarak hesaplar. K adet komşunun ölçülen mesafelerinden en yakın komşuluğa sahip sınıf tahmin edilecek verinin sınıfı olduğu varsayılır (Gül ve Kalyoncu 2020). K-EYK yöntemi için mesafe ve komşu sayıları Şekil 4'te gösterilmiştir. Deneylerde kullanılan K-EYK yöntemi için hesaplanması gereken en yakın komşu sayısı 5 olarak belirlenmiştir.





Şekil 4. K En Yakın Komşu Yöntemi Çalışma Prensibi.

Zayıf Öğrenci 1		
x	x	x
x	y	y
y	y	y

Zayıf Öğrenci 2			Güçlü Öğrenci 2		
x	x	x	x	x	x
x	y	y	x	y	y
y	y	y	y	y	y

Zayıf Öğrenci 3		
x	x	x
x	y	y
y	y	y

Şekil 5. AdaBoost Yöntemi Çalışma Prensibi.

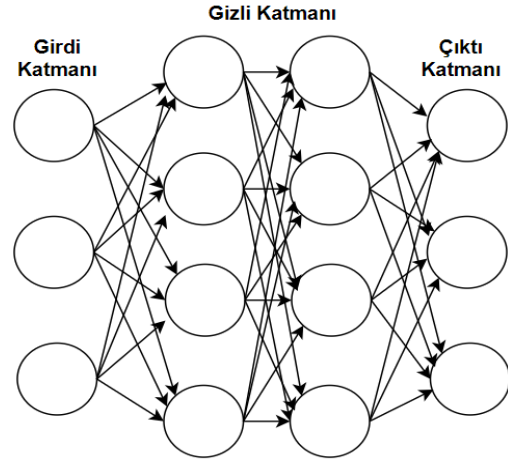
### 2.3.6 AdaBoost

Adaboost algoritması, belirli sayıda oluşturulan zayıf öğrencilerden alınan sonuçlar üzerine kurulu bir sınıflandırıcıdır. Zayıf öğrencilerin sonuçlarında iteratif olarak kat sayıları değiştirilir ve daha başarılı sonuçlar elde edilir. Belirli bir iterasyon sayısından sonra nihai sonuca ulaşılmaktadır. Adaboost algoritması, ezberle (aşırı uyum) eğilimli bir algoritmadır (Sağbaş 2023). Çalışma prensibi Şekil 5'te gösterilmiştir.

Deneylerde kullanılan AdaBoost yöntemi için kullanılan parametreler güçlendirme algoritması için SAMME ve her iterasyon için rastgele durum sayısı (random state) 42 olarak kullanılmıştır.

### 2.3.7 Yapay Sinir Ağları

YSA, denetimli bir öğrenme yöntemi kullanmaktadır. Belirli sayıda iterasyonla kendini eğiterek sonuç üretir. 3 katmandan oluşmaktadır. Bu katmanlar giriş katmanı, gizli katman ve çıkış katmanıdır. Giriş katmanı, girdi olarak kullanılan verinin modellendiği nöronlardan oluşmaktadır. Gizli katman sayısı problem türüne göre değişebilen ağırlık değişimlerinin yapıldığı nöronların bulunduğu bölümdür. Çıkış katmanı ise hedef sınıfların benzerlik oranlarını veren katmandır (Subası ve Erdem 2021). YSA katmanları Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Yapay Sinir Ağı katmanları.

Deneylerde kullanılan YSA için aktivasyon fonksiyonu relu'dur. Kullanılan gizli katmanın boyutu 10'a 10 olarak tasarlanmıştır.

### 2.4 Büyük Dil Modelleri

BDM'ler, genellikle derin öğrenme tekniklerine dayalı büyük ölçekli YSA'lardır. Bu modeller, milyonlarca veya milyarlarca metin örneğiyle eğitilirler. Eğitim sürecinde, geniş metin veri setlerini kullanarak dilin yapısını, bağlamsal ilişkileri ve kelime kullanımını öğrenirler. Metinlerin anlamını anlama, cümle oluşturma, çeviri gibi çeşitli doğal dil işleme görevlerinde oldukça etkilidirler. Ancak BDM'ler doğal bir dilin esnek yapısından dolayı her zaman doğru bilgileri verememektedir. Bu problemin üstesinden gelebilmek ve modelin istenilen çıktıları daha etkili bir şekilde üretmesini sağlamak için istem mühendisliği tekniklerinden faydalanılmaktadır. Örneğin, bir metin sınıflandırma görevi için özel bir giriş veya talimat oluşturularak, modelin belirli bir metni daha doğru bir şekilde sınıflandırması sağlanabilmektedir. Bu çalışmada, istem mühendisliği tekniği olarak sıfır atış

istemi kullanılmıştır (Bulat ve Tzimiropoulos 2024). Sıfır atış yöntemi, bir dil modeline daha önce öğretilmemiş bir görevi veya konuyu tanımlamadan önce, bu görevi veya konuyu doğru bir şekilde anlamasını ve ona ilişkin bilgi üretmesini sağlayan bir yöntemdir. Model, belirli bir talimat veya giriş olmadan, genel dil anlayışı ve eğitimiyle, yeni bir görevi çözmek veya bilgi sağlamak için kullanılabilir. Sonuç olarak, modelin esnekliği ve genel dil anlama yeteneği kabiliyeti gelişmiş olur.

#### 2.4.1 BERT

BERT, BDM'lerin ilk örneklerinden birisidir. Temel olarak metin üretmek için geliştirilen model farklı problemlerin çözümünde de kullanılmaktadır. BERT, yapısı gereği farklı doğal dil işleme problemlerinde kullanılacağı zaman probleme özel bir şekilde yapılandırılmalıdır. Bu çalışmada kullanılan BERT modeli duygu analizi yapan ön eğitilmiş bir yapıya sahiptir (Sousa vd. 2019).

#### 2.4.2 GPT 3.5 Turbo

GPT 3.5 Turbo, 14 Kasım 2023 yılında OpenAI firması tarafından yayınlanan BDM'dir. Bünyesinde 500 milyardan fazla parametre bulundurmaktadır. Farklı alanlarda kullanılabilen dil modeli özellikle doğal dil işleme problemlerinde oldukça başarılıdır. GPT 3.5 Turbo'nun, son bilgi güncellemesi Ocak 2022 yılında gerçekleşmiştir (Shahin vd. 2024).

#### 2.4.2 Gemini

Gemini, 2024 yılında Google AI tarafından piyasaya sürülmüştür. Google AI tarafından daha önce piyasaya sürülen BARD ve LaMDA dil modellerinin birleşiminden oluşmasından dolayı çoklu dil modeli olarak da tanımlanmaktadır. Çoklu model özelliğinden dolayı Gemini metin, görüntü, ses ve video gibi farklı türdeki giriş değerlerini de kullanabilmektedir (Khurdula vd. 2024).

### 3. Bulgular ve Tartışma

Yapılan deneylerde ilk olarak hava yolu veri seti kullanılarak her yöntem için 47 adet model eğitilmiştir. Modeller pozitif, negatif ve nötr olmak üzere üç sınıflı tahminler üretmektedir. Başlangıç olarak 150 adet veri olan bir eğitim seti kullanılmıştır.

Finansal yorumlar veri seti kullanılarak her yöntem için 16 adet model eğitilmiştir. Modeller pozitif, negatif ve nötr olmak üzere üç sınıflı tahminler üretmektedir. Başlangıç olarak 150 adet veri olan bir eğitim seti kullanılmıştır.

Film yorumları veri seti kullanılarak her yöntem için 30 adet model eğitilmiştir. Modeller pozitif ve negatif olmak üzere iki sınıflı tahminler üretmektedir. Başlangıç olarak 100 adet veri olan bir eğitim seti kullanılmıştır.

Her model eğitimi için sınıf başı 50 adet veri eklenerek eğitim seti artırılmış ve her model bu yeni veri setiyle

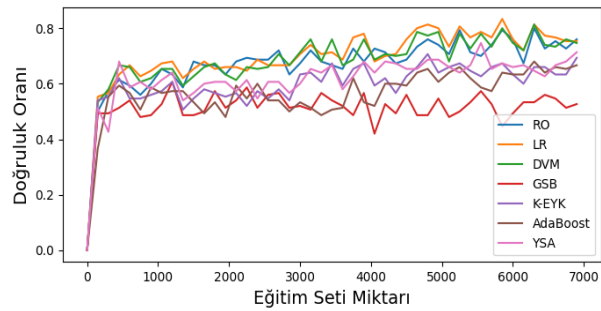
yeniden eğitilmiştir. Modellerdeki sınıf sayılarının farklı seçilmesindeki temel sebep sınıf sayılarının modeller üzerindeki etkisini ölçmektir. Oluşturulan modellerin aynı veri seti üzerinde test edilebilmesi için test seti sabit tutulmuştur. Model eğitimlerinde kullanılan test setlerindeki veri miktarı, finans ve hava yolları yorumları test setleri için 150 adet film yorumları test seti içinse 100 adet veriye sahiptir.

Modellerin performanslarının değerlendirilmesinde doğruluk oranı kullanılmıştır. Veri setlerindeki sınıflar arası veri miktarının eşit olarak yapılandırılması performans değerlendirilmesinde doğruluk oranını verimli hale getirmektedir. Doğruluk oranı karmaşıklık matrisi tabanlı bir değerlendirme yapmaktadır. Karmaşıklık matrisi, modelin Doğru pozitif (TP), Doğru negatif (TN), Yanlış pozitif (FP) ve Yanlış negatif (FN) cevaplarıyla oluşturulmaktadır. Denklem 3'te doğruluk oranı formülü verilmiştir.

$$\text{Doğruluk oranı} = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (3)$$

#### 3.1 Klasik Yöntem Sonuçları

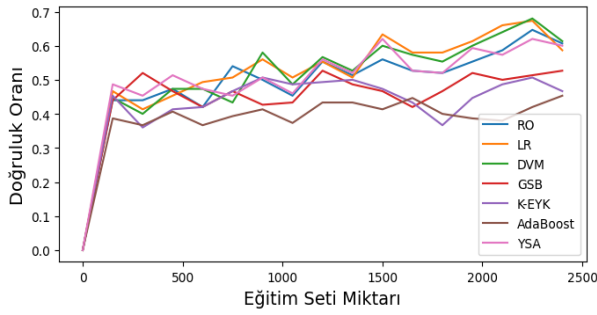
Klasik yöntemlerle gerçekleştirilen deneyin ilk adımında Hava yolu şirketlerinin hizmetlerine yapılan yorumlar için 150 eğitim seti ve 150 test seti kullanılarak modeller eğitilmiştir. Bu eğitimin sonunda AdaBoost algoritması 0.36 doğruluk oranıyla en düşük başarıyı elde ederken, 0.55 doğruluk oranıyla en yüksek başarıyı LR algoritması elde etmiştir. En yüksek doğruluk oranına ise 5850 eğitim ve 150 test seti içeren adımda ulaşılmıştır. Bu adımda, 0.83 doğruluk oranıyla en yüksek performansı LR yöntemi elde etmiştir. Şekil 7' de deneyin her bir adımı için doğruluk oranları gösterilmiştir.



Şekil 7. Hava yolu şirketlerinin hizmetlerine yapılan yorumlar için yapılan üç sınıflı duygu analizi sonuçları.

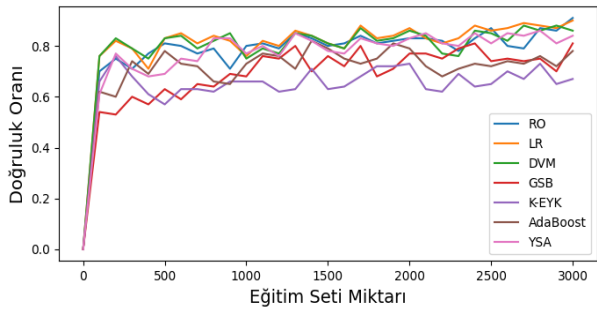
Deneyin diğer bölümünde finansal gelişmelere yapılan yorumlar için 150 eğitim seti ve 150 test seti kullanılarak modeller eğitilmiştir. Bu eğitimin sonunda AdaBoost algoritması 0.38 doğruluk oranıyla en düşük başarıyı yakalarken, 0.48 doğruluk oranıyla en yüksek başarıyı YSA algoritması elde etmiştir. En yüksek doğruluk oranına ise 2250 eğitim ve 150 test seti kullanılan adımda ulaşılmıştır. Bu adımda 0.68 doğruluk oranıyla en yüksek performansı

DVM yöntemi elde etmiştir. Şekil 8’ de deneyin her bir adımı için doğruluk oranları gösterilmiştir.



**Şekil 8.** Finansal gelişmelere yapılan yorumlar için üç sınıflı duygu analizi sonuçları.

Deneyin son bölümünde filmlere yapılan yorumlar için 100 eğitim seti ve 100 test seti kullanılarak modeller eğitilmiştir. Bu eğitimin sonunda YSA algoritması 0.61 doğruluk oranıyla en düşük başarıyı yakalarken, 0.76 doğruluk oranıyla en yüksek başarıyı LR ve DVM algoritmaları elde etmiştir. En yüksek doğruluk oranına ise 3000 eğitim ve 100 test seti kullanılan adımda ulaşılmıştır. Bu adımda 0.91 doğruluk oranıyla en yüksek performansı RO yöntemi göstermiştir. Şekil 9’ da deneyin her bir adımı için doğruluk oranları gösterilmiştir.



**Şekil 9.** Filmlere yapılan yorumlar için iki sınıflı duygu analizi sonuçları.

### 3.2 Büyük Dil Modelleri Sonuçları

BDM’lerle yapılan deneylerde klasik yöntemlerde kullanılan test seti üzerinde deneyler yapılmıştır. Sıfır atış tekniği kullanılarak yapılan duygu analizinde Gemini modelinin tüm veri setlerinde en yüksek performansı gösterdiği görülmüştür. BERT modeli performans açısından en düşük başarıyı sergilemiştir. Çizelge 2’de modellerin veri setlerine göre doğruluk oranları gösterilmiştir.

**Çizelge 2.** BDM’lerin üç farklı veri setindeki duygu analizi sonuçları.

Model	Hava yolu şirketlerine yapılan yorumlar	Finansal gelişmelere yapılan yorumlar	Film yorumları
BERT	0.6733	0.5266	0.69
GPT 3.5 Turbo	0.76	0.5933	0.96
Gemini	0.76	0.7733	0.98

### 3.2 Karşılaştırmalı Model Sonuçları

BDM ve klasik yöntemler kendilerine has gereksinimlere sahiptirler. BDM’ler geliştirilirken yüksek boyutlu verilerden faydalanırlar ve üretilen model birçok farklı problemde kullanılabilir. Klasik yöntemlerde modeller probleme uygun veri setleriyle eğitilir ve dil yapısı çoğunlukla dikkate alınmaz. Yapılan deneyler sonucunda klasik yöntemler bazı veri setlerinde ne kadar çok veri kullanılsa da BDM başarısını yakalayamamıştır. Başarıları eşit olan durumlardaysa ise probleme uygun yüksek bir veri ihtiyacı olmaktadır. Çizelge 3’te veri miktarına göre en başarılı sonuçları veren BDM’ler ve klasik makine öğrenmesi modellerinin karşılaştırılması gösterilmiştir.

**Çizelge 3.** Veri miktarına göre BDM ve Klasik model başarı karşılaştırılması.

BDM Modeli	Klasik Model	Veri Seti	Veri Sayısı
BERT	LR	Hava Yolları	1050
GPT 3.5 Turbo	DVM	Hava Yolları	3150
GEMINI	DVM	Hava Yolları	3150
BERT	RO, LR, DVM	Film	100
GPT 3.5 Turbo	-	Film	-
GEMINI	-	Film	-
BERT	LR, DVM	Finansal	900
GPT 3.5 Turbo	LR,DVM,YSA	Finansal	1500
GEMINI	-	Finansal	-

Çizelge 3’te BDM Modeli alanında deneylerde kullanılan BDM’ler gösterilirken Veri seti kısmında deneyde kullanılan veri setini göstermektedir. Veri sayısı kısmında ise klasik yöntemlerde kullanılan modellerin başarısının BDM modelini geçtiği noktada kaç adet eğitim verisi kullanıldığını göstermektedir. Model kısmındaysa BDM sonuçlarını geçebilen klasik yöntem modeli varsa listelenmektedir.

Hava yolları yorumları veri seti için karşılaştırmalı sonuçlar incelendiğinde LR yöntemi 1050 veriyle eğitildiğinde BERT modelinin başarısına ulaşırken DVM yöntemi 3150 veriyle eğitildiğinde GPT 3.5 Turbo ve Gemini modellerinin başarısına ulaşmaktadır.

Finansal yorumlar veri seti için karşılaştırmalı sonuçlar incelendiğinde LR ve DVM yöntemleri 900 veriyle eğitildiğinde BERT modelinin başarısına ulaşırken LR, DVM ve YSA yöntemleri 1500 veriyle eğitildiğinde GPT 3.5 Turbo modelinin başarısına ulaşmaktadır. Klasik yöntemler çalışmada kullanılan tüm eğitim seti verisi kullanılmasına rağmen Gemini modelinin başarısına ulaşamamaktadır.

Film yorumları veri seti için karşılaştırmalı sonuçlar incelendiğinde RO, LR ve DVM yöntemleri 100 veriyle eğitildiğinde BERT modelinin başarısına ulaşırken hiçbir klasik yöntem GPT 3.5 Turbo ve Gemini başarısına ulaşamamıştır.

BDM ve klasik yöntemler beraber değerlendirildiğindeyse modeller Finans yorumları veri setinde ortak bir başarısızlığa sahiptir. Bu başarısızlığın temel nedeni olarak finansal terimlerin klasik duygu analizi yapısından farklı olmasıdır. Film yorumları veri setinde olan yüksek başarı oranıysa veri setindeki yorum metinlerinin detaylı olması ve veri setinin iki sınıfa sahip olması olarak gözlemlenmiştir.

#### 4. Sonuçlar

BDM'ler sıfır atış, birkaç atış istem yöntemleri ile genelleme yapma ve yeni görevleri yerine getirme yeteneği kazanabilmektedirler. Yalnızca dil modelleme hedefleri üzerine eğitilmiş olmalarına rağmen, bu modeller, bir soruyu yanıtlamak veya özetleme yapmak gibi eğitim almadıkları yeni görevlerde nispeten iyi performans gösterebilirler.

Bu çalışmada, BERT, GPT, Gemini gibi BDM'lere sıfır atış yöntemi uygulandığında, herhangi bir eğitim süreci olmadan duygu analizi görevini ne ölçüde yerine getirebildiği incelenmiştir. BDM'lerin metinlerdeki duyguları negatif, pozitif ya da nötr olarak sınıflandırabildikleri ve performanslarının da klasik denetimli makine öğrenmesi yöntemlerine rakip olduğu deneylerle kanıtlanmıştır.

Makine öğrenmesi yöntemlerinde kullanılan eğitim örneklerin sayısı arttıkça performansları mümkün olan iyi sabit değere ulaştığı ve BDM'lerin ise en iyi algoritmanın performansını geçtiği gözlemlenmiştir. Sonuçlarımız, BDM'lerin bağlam içi örnekler verilmesi dahi duygu analizi gibi karmaşık görevleri yerine getirebildiklerini ortaya koymuştur. Gelecek çalışma olarak, BDM'lerin duygu analizi konusundaki hassasiyetlerini artırmak için farklı istem mühendisliği yaklaşımları denenebilir. Ayrıca, BDM'lerin duygusal bağlamları daha iyi anlayabilmesi için belirli metin türleri veya kültürel farklılıklar üzerinde daha fazla çalışma yapılabilir. Bu şekilde, BDM'lerin duygu analizi alanında daha etkili ve genel geçer sonuçlar elde etmesi sağlanabilir.

#### Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

#### Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Kaynaklar, Deney, Yazma, Fikir Sahibi

Yazar 2: Kaynaklar, Araştırma, Yazma

Yazar 3: Araştırma, Deney, Yazma

#### Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

#### Verilerin Kullanılabilirliği

Yazarlar, bu çalışmanın bulgularını destekleyen ana verilerin makale içerisinde mevcut olduğunu beyan ederler.

#### 5. Kaynaklar

- Asan, M.E., Taşkın, H., Alemdar, M., ve Capoglu, R., 2023, Tiroit kanseri hastalık tanısında lojistik regresyon kullanımı. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*.  
<https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1253193>
- Bezek Güre, Ö., 2024, Classification of Liver Disorders Diagnosis using Naïve Bayes Method. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, **13**, 153–160.  
<https://doi.org/10.17798/bitlisfen.1361016>
- Bulat, A. ve Tzimiropoulos, G., 2024, Language-Aware Soft Prompting: Text-to-Text Optimization for Few- ve Zero-Shot Adaptation of V & L Models. *International Journal of Computer Vision*, **132**, 1108–1125.  
<https://doi.org/10.1007/s11263-023-01904-9>
- Gül, E. ve Kalyoncu, M., 2020, Ağır Vasıta Hava Kompresörü Piston Segmanı Aşınması Durumlarında K-En Yakın Komşu Algoritmasının Sınıflandırma Performansının İncelenmesi. *European Journal of Science ve Technology*.  
<https://doi.org/10.31590/ejosat.802958>
- Hasan, A., Moin, S., Karim, A., ve Shamshirbve, S., 2018, Machine Learning-Based Sentiment Analysis for Twitter Accounts. *Mathematical ve Computational Applications*, **23**, 11.  
<https://doi.org/10.3390/mca23010011>
- Jouis, C. ve Shafei, B., 2018, Big textual data. In *Proceedings of the 10th International Conference on Management of Digital EcoSystems* ((New York, NY, USA: ACM)), pp. 7–12.
- Khakurel, J., Penzenstadler, B., Porras, J., Knutas, A., ve Zhang, W., 2018, The Rise of Artificial Intelligence under the Lens of Sustainability. *Technologies*, **6**, 100.  
<https://doi.org/10.3390/technologies6040100>
- Khurana, D., Koli, A., Khatter, K., ve Singh, S., 2023, Natural language processing: state of the art, current trends ve challenges. *Multimedia Tools ve Applications*, **82**, 3713–3744.  
<https://doi.org/10.1007/s11042-022-13428-4>
- Khurdula, H.V., Pagutharivu, A., ve Soung Yoo, J., 2024, The Future of Feelings: Leveraging Bi-LSTM, BERT with Attention, Palm V2 & Gemini Pro for Advanced Text-Based Emotion Detection. In *SoutheastCon 2024* ((IEEE)), pp. 275–278.
- Kılınçarslan, Ş., Şimşek Türker, Y., ve İnce, M., 2020, Prediction of heat-treated cedar wood swelling ve shrinkage values with artificial neural networks ve rveom forest algorithm. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, **8**, 200–205.  
<https://doi.org/10.21923/jesd.825442>
- Maas, A.L., Daly, R.E., Pham, P.T., Huang, D., Ng, A.Y., ve Potts, C., 2011, Learning Word Vectors for

- Sentiment Analysis. In *Proceedings of the 49th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies* ((Portlve, Oregon, USA: Association for Computational Linguistics)), pp. 142–150.
- Malo, P., Sinha, A., Korhonen, P., Wallenius, J., ve Takala, P., 2014, Good debt or bad debt: Detecting semantic orientations in economic texts. *Journal of the Association for Information Science ve Technology*, **65**, 782–796.  
<https://doi.org/10.1002/asi.23062>
- Rane, A. ve Kumar, A., 2018, Sentiment Classification System of Twitter Data for US Airline Service Analysis. In *2018 IEEE 42nd Annual Computer Software ve Applications Conference (COMPSAC)* (IEEE), 769–773.
- Sağbaşı, E.A., 2023, MFCC Öznitelikleri ve Adaboost Topluluk Öğrenme Yöntemi Kullanılarak Uyku Seslerinin Sınıflandırılması. *Computer Science*. Cilt: IDAP-2023 : International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium Sayı: IDAP-2023, 31 - 36  
<https://doi.org/10.53070/bbd.1347221>
- Shahin, M., Chen, F.F., Hosseinzadeh, A., Maghanaki, M., ve Eghbalian, A., 2024, A novel approach to voice of customer extraction using GPT-3.5 Turbo: linking advanced NLP ve Lean Six Sigma 4.0. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **131**, 3615–3630.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-024-13167-w>
- Sousa, M.G., Sakiyama, K., Rodrigues, L. de S., Moraes, P.H., Fernvees, E.R., ve Matsubara, E.T., 2019, BERT for Stock Market Sentiment Analysis. In *2019 IEEE 31st International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI)* ((IEEE)), pp. 1597–1601.
- Subaşı, A. ve Erdem, K., 2021, Hibrit nanoakışkanların özgül ısılarının yapay sinir ağları ile tahmin edilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **37**, 377–388.  
<https://doi.org/10.17341/gazimmfd.880340>
- Yücesoy, E., 2020, Konuşmacının Yaş ve Cinsiyetine Göre Sınıflandırılmasında DVM Çekirdeğinin Etkisi. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*.  
<https://doi.org/10.31202/ecjse.707179>
- Yue, L., Chen, W., Li, X., Zuo, W., ve Yin, M., 2019, A survey of sentiment analysis in social media. *Knowledge ve Information Systems*, **60**, 617–663.  
<https://doi.org/10.1007/s10115-018-1236-4>

## Sağlık İstatistiklerinin Veri Madenciliği Teknikleri İle Analizi: Makine Öğrenmesi Algoritmaları Kullanılarak Genel Sağlık Durumunun Sınıflandırılması

\*Makale Bilgisi / Article Info  
Alındı/Received: 29.05.2024  
Kabul/Accepted: 31.08.2024  
Yayımlandı/Published:02.12.2024

### Analysis of Health Statistics With Data Mining Techniques: Classification of General Health Status Using Machine Learning Algorithms

Yunus Emre GÜR<sup>1</sup>, Kamil Abdullah EŞİDİR<sup>2</sup>, Ahmed İhsan ŞİMŞEK<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> Firat Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, Elazığ, Türkiye

<sup>2</sup> Firat Kalkınma Ajansı, Elazığ, Türkiye

<sup>3</sup> Firat Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, Elazığ, Türkiye

#### Öz

Sağlık sektörü, günümüzde devasa veri yığınlarıyla başa çıkmak zorundadır. Bu verilerin derinliklerindeki bilgileri çözümleyerek hastalıkları daha iyi anlama ve sağlık hizmetlerini geliştirme gibi birçok amaç doğrultusunda veri madenciliği metodolojileri kullanılmaktadır. Bu çalışma, bir veri madenciliği sınıflandırma tekniği olan Gradient Boosting'in, mikro sağlık verilerini nasıl kategorize edebileceğini araştırmaktadır. Çalışmada, Türkiye İstatistik Kurumu'ndan (TÜİK) elde edilen 2022 yılına ait mikro veriler kullanılmıştır. Araştırmada kullanılan soru formundan elde edilen 9 adet bağımsız değişken, analizlerde kullanılarak sağlık durum tespiti tahmin edilmiştir. Ayrıca, çeşitli sosyo-demografik faktörlerin (yaş, cinsiyet, medeni ve çalışma durumu) ve yaşam tarzı alışkanlıklarının (tütün kullanımı) genel sağlık üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Çalışmanın sonuçları, makine öğrenmesi metodlarının sağlık sektöründe ne denli etkili olabileceğini göstermektedir. Bu modeller arasında Gradient Boosting modeli, sınıflandırma performansında, doğruluk, hassasiyet, duyarlılık ve F1 skoru gibi metrikler dikkate alınarak yapılan incelemede ön plana çıkarak, sağlık politikalarının ve müdahalelerinin geliştirilmesine katkıda bulunacak önemli bilgiler sunmuştur. Özellikle, tütün kullanımının sağlık üzerindeki olumsuz etkilerinin belirlenmesi, bu faktörlerin insan sağlığına etkisinin büyük olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgular, sağlık politikaları ve halk sağlığı programlarının geliştirilmesinde makine öğrenmesinin önemli faydalar sağlayabileceğine işaret etmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Veri Madenciliği, Sınıflandırma, Mikro Sağlık Verileri, Makine Öğrenmesi, Gradient Boosting

#### Abstract

The healthcare industry today has to deal with huge piles of data. Data mining methodologies are used for many purposes such as better understanding diseases and improving health services by analyzing the information in the depths of these data. This study investigates how Gradient Boosting, a data mining classification technique, can categorize micro health data. In the study, micro data for 2022 obtained from the Turkish Statistical Institute (TUIK) was used. Health status determination was estimated by using 9 independent variables obtained from the questionnaire used in the research in the analyses. Additionally, the effects of various socio-demographic factors (age, gender, marital and employment status) and lifestyle habits (tobacco use) on general health were analyzed. The results of the study show how effective machine learning methods can be in the healthcare sector. Among these models, the Gradient Boosting model came to the fore in the analysis of classification performance, taking into account metrics such as accuracy, sensitivity, sensitivity and F1 score, providing important information that will contribute to the development of health policies and interventions. In particular, determining the negative effects of tobacco use on health reveals that these factors have a great impact on human health. These findings indicate that machine learning can provide significant benefits in the development of health policies and public health programs.

**Keywords:** Data Mining, Classification, Microhealth Data, Machine Learning, Gradient Boosting

#### 1. Giriş

Teknolojik gelişmeler ve büyüyen veri hacmi, insanların verileri daha anlamlı bir şekilde kullanma arzusunu artırmıştır. Bu bağlamda, veri madenciliği kavramı birçok kişi tarafından çeşitli şekillerde tanımlanabilir. Genel bir ifadeyle, veri madenciliği; depolanan verileri matematiksel ve istatistiksel yöntemler kullanarak işleyip, değerli bilgiler elde etme sürecidir (Altınbaş, 2010).

Günümüzde sağlık sektörü, büyük miktarda veriyi ele almaktadır ve bu verilerden anlam çıkarmak, hastalıkları anlamak ve sağlık hizmetlerini iyileştirmek için veri madenciliği teknikleri kullanılmaktadır. Sağlık istatistikleri, hasta kayıtları, tedavi sonuçları ve genetik veriler gibi geniş veri setlerini içermektedir. Bu verilerin etkili bir şekilde analiz edilmesi, sağlık sistemlerinin daha iyi yönetilmesine ve hastaların daha etkili bir şekilde tedavi edilmesine olanak tanımaktadır (Terzi, 2019). Bununla

birlikte, sağlık sektöründe veri madenciliğine yönelik çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Veri madenciliği, bilgi keşfini beş temel metodoloji üzerinden gerçekleştirmektedir. Bunlar, genel çıkarımlar, ilişkisel kurallar, sınıflandırma ve kümeleme teknikleri, tahmin edici algoritmalar ve aykırı değer analizleri şeklindedir (Koçak ve Ergün, 2023).

Veri tabanlı bilgiler, sağlık sistemi politikalarının ve yönetim kararlarının temelini oluşturmaktadır. Sağlık politikalarının ve kararlarının hedeflerine ulaşması ve etkili olması, güvenilir, güncel ve doğru veriye dayanmaktadır. Sağlık bilgi sistemlerinin ana amacı, büyük miktardaki sağlık verilerini işleyerek kullanışlı bilgiler elde etmektir. Elde edilen bu bilgiler, hastalar için daha kaliteli sağlık hizmetleri sunumu, sağlık kuruluşlarının daha etkili yönetimi, kaynakların verimli kullanımı ve sağlık politikalarının geliştirilmesi için kullanılır. Sağlık verileri, hastaneler, diğer sağlık kuruluşları, sigorta firmaları ve ilgili devlet daireleri gibi çeşitli kurumlar tarafından toplanır. Dijital verilerin miktarındaki artış, yeni zorluklar doğurmuştur. Bunlar arasında, büyük, çok boyutlu ve karmaşık verileri işleyebilecek yöntem ve sistemler geliştirmek; yeni veri türlerini işlemek için metodolojiler ve sistemler oluşturmak; dağınık verileri işlemek için yöntemler, protokoller ve altyapılar kurmak; ve veri kullanımı ve güvenliğiyle ilgili modeller oluşturmak yer almaktadır (Koyuncugil ve Özgülbaş, 2009).

Bununla birlikte, bu çalışma kullanılan veri setinin temelini oluşturan ve TÜİK tarafından gerçekleştirilen Türkiye Sağlık Araştırması, ilk defa 2008 yılında yapılmıştır. Araştırma, bebeklerden yetişkinlere kadar geniş bir yaş grubunu kapsamaktadır. Bireylerin sağlık durumlarına ilişkin önemli veriler toplanmaktadır. 15 yaş ve üzeri bireylerin sağlık hizmetlerinden faydalanma durumları, günlük aktivitelerinde yaşadıkları zorluk dereceleri, sigara ve alkol kullanma alışkanlıkları gibi çeşitli sağlık göstergeleri araştırılmaktadır. Araştırma sayesinde, toplumun genel sağlık durumunun değerlendirilmesi ve sağlık politikalarının yönlendirilmesine katkı sunulması hedeflenmektedir (Genç ve Kurutkan, 2021). Bu çalışmada kullanılan 2022 Yılı Türkiye Sağlık Araştırması verileri, ülke genelinde toplamda 11.170 adet haneden elde edilmiştir. Yapılan araştırma, ülkelerin gelişmişlik düzeylerini gösteren kalkınma göstergeleri içerisinde önemli paya sahip olan, sağlık göstergelerine ait bilgilerin elde edilmesine olanak tanımıştır. Araştırma, sadece ülke genelini yansıtmamakta, aynı zamanda uluslararası karşılaştırmalara olanak tanımaktadır. Araştırmanın kapsamı, Türkiye sınırları içinde yer alan tüm yerleşim yerlerinde bulunan hane halklarıdır.

Bu çalışmanın temel amacı, makine öğrenmesi gibi veri madenciliği sınıflandırma tekniklerinin, mikro sağlık verilerini nasıl kategorize edebileceğini araştırmaktır. Bu bağlamda, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından sağlanan 2022 yılına özgü mikro veri seti bu çalışmada kullanılmıştır. Kullanılan anket formundan elde edilen dokuz bağımsız değişken, sağlık durumu tahminlerinin yapılmasında analiz edilmiştir. Sonuçta, bu araştırma makine öğrenmesi sınıflandırma algoritmalarının sağlık istatistiklerinin detaylı analizinde ve politika oluşturma sürecinde ne kadar değerli bir araç olabileceğini göstermektedir. Bu tekniklerin kullanılması, sağlık sektörü analizlerinde önemli bir evrimi temsil ederek, daha bilinçli ve amaç odaklı politika kararları alınmasını mümkün kılmaktadır.

Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde, sınıflandırma konusunda yapılan literatür taramasının ardından, çalışmanın metodolojisi ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır. Bu bölümde, analiz için kullanılan veri setinin nitelikleri, tercih edilen sınıflandırma metodlarının özellikleri ve yapılan analizin teknik detayları detaylandırılmıştır. Sonrasında, araştırmadan elde edilen sonuçlar, sağlık sektörünün güncel durumunu ve gelişmekte olan eğilimleri açıklayan kıymetli bilgilerle birlikte irdelenmiştir. Makalenin son kısmında, bu sonuçların sağlık politikalarına ve sektör analizlerine olan etkileri üzerine değerlendirmeler yapılmış ve gelecek çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

## **2. Literatür Taraması**

Çalışmanın bu bölümünde, sağlık sektöründe yapılan sınıflandırma çalışmaları ile ilgili literatür incelenmiştir. Bu inceleme sonucu elde edilen çalışmalar aşağıda sunulmuştur. Karakoyun ve Hacibeyoğlu'nun (2014) çalışmasında, biyomedikal veri kümeleri kullanılarak altı farklı makine öğrenmesi sınıflandırma algoritmasının performansını test edilmiş ve sonuçlar istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır. Çalışmada, Yapay Sinir Ağları (YSA) ve k-En Yakın Komşu (k-EYK) algoritmalarının küçük ve orta ölçekli veri kümeleri için sınıflandırma doğruluğu ve işlem hızı açısından etkili olduğu bulunmuştur. Çalışma, bu algoritmaların sağlık sektörü analizleri ve politika yapımında değerli araçlar olabileceğini göstermiştir. Bu bulgular, gelecekteki araştırmalar için temel oluşturmakta ve makine öğrenmesi algoritmalarının iyileştirilmesi veya hibrit kullanımlarının araştırılmasını önermektedir.

Alptekin ve Yeşilaydın (2015), OECD ülkelerinin belirlenen sağlık göstergeleri bazında bulanık kümeleme analizi ile sınıflandırmıştır. Çalışmanın amacı, Türkiye'nin dahil olduğu kümenin ve bu kümedeki diğer ülkelerin tespit edilmesi ve Türkiye'nin bu ülkelerle benzerliklerinin



belirlenmesidir. Toplam 34 OECD ülkesi, sağlıkla doğrudan ve dolaylı olarak etkileyen on değişken kullanılarak analiz edilmiştir. Bulgular, Türkiye'nin dördüncü kümede yer aldığını ve bu kümede Estonya, Macaristan, Meksika, Polonya ve Şili gibi ülkelerle benzer özellikler gösterdiğini ortaya koymuştur.

Akbar vd. (2020)'nin çalışmasında, sağlık sigortası dolandırıcılığının tahmininde karar ağacı sınıflandırıcı doğruluğunun Extreme Gradient Boosting (XGB) algoritması kullanılarak iyileştirilmesi incelenmiştir. Çalışma, Random Forest ve XGB Trees sınıflandırıcıları kullanarak potansiyel dolandırıcılık sağlayıcılarını tahmin etmeyi amaçlamaktadır. Toplamda, XGB Trees sınıflandırıcısı, rastgele alt örnekleme kullanarak %87 geri çağırma ve %86 doğruluk ile en iyi performansı göstermiştir. Bu sonuçlar, sağlık sigortası dolandırıcılığı tespitinde XGB Trees sınıflandırıcısının etkililiğini ortaya koymaktadır.

Doğan (2020)'in çalışmasında, Türkiye'de sağlık hizmet talebinde gelir düzeyinin doğrudan ve zaman maliyeti nedeniyle gelirin dolaylı etkisini incelemeyi amaçlamıştır. Teorik inceleme, sağlık ekonomisi modellerinin karşılaştırılmasını içermekte olup, olgusal analiz Türkiye Sağlık Araştırması (2016) verileri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bulgular, gelirin hem doğrudan hem de dolaylı olarak sağlık hizmeti talebini etkilediğini göstermektedir. Çalışma, Türkiye'de sağlık düzenlemelerinde gelir grupları arasındaki farklılıkların dikkate alınmasının önemini vurgulamaktadır.

Genç ve Kurutkan (2021), çalışmalarında, sosyo-ekonomik faktörlerin karşılanmayan sağlık ihtiyaçlarına etkilerini ve bu ihtiyaçların sağlıkta eşitsizliklere neden olan faktörleri belirlemeyi amaçlamaktadır. "TÜİK Sağlık Araştırması" verileri (2014 ve 2016) üzerinden yapılan analizlerde, depresyon hastalığı ve sosyo-ekonomik değişkenler arasındaki ilişkiyi belirlemek için Binary Logit Regresyon analizi kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, yaş, gelir düzeyi, sağlık güvencesi, cinsiyet, medeni durum, eğitim, çalışma durumu, genel sağlık durumu, bedensel ağrı durumu ve depresyon gibi faktörler, karşılanmayan sağlık ihtiyaçlarına en fazla etki eden unsurlardır. Ayrıca, karşılanmayan sağlık ihtiyaçlarından kaynaklanan sağlık eşitsizliklerinin özellikle dezavantajlı grupları etkilediği belirlenmiştir.

Theerthagiri ve Vidya (2022)'nin çalışmasında, kardiyovasküler hastalık tahmini için yenilikçi bir Gradient Boosting tabanlı Rekürsif Özellik Eleme (RFE-GB) sınıflandırma algoritması önerilmiştir. Araştırma, bu algoritmayı geleneksel Lineer Diskriminant Analizi (LDA), K-En Yakın Komşu (KNN), Karar Ağacı (DT), Naive Bayes

(NB) ve Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) algoritmalarıyla karşılaştırmıştır. RFE-GB algoritması, %89.78'lik bir doğruluk oranıyla en yüksek performansı göstermiştir. Bu sonuç, kardiyovasküler hastalıkların sınıflandırılmasında RFE-GB algoritmasının diğer makine öğrenmesi yöntemlerine kıyasla üstün olduğunu göstermektedir.

Wang vd. (2022)'nin çalışmasında, petrokimya tesislerinin insan sağlığı üzerindeki risklerini tespit etmek için Extreme Gradient Boosting (XGBoost) algoritması kullanılmıştır. 13 göstergeye dayanan bir risk tespit indeksi sistemi oluşturulmuş ve farklı yapay zeka yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, XGBoost'un diğer modellere göre daha yüksek doğruluk oranıyla en iyi performansı sergilediğini göstermiştir. Çalışma, site konumu, planlaması ve üretim süresi gibi faktörlerin risk tespitinde önemli olduğunu belirlemiştir. Bu bulgular, endüstriyel sitelerin sağlık risklerinin yönetiminde önemli katkılar sağlamaktadır.

Xu vd. (2022)'nin çalışmasında, EEG sinyallerinin doğrusal olmayan özellikleri ve Gradient Boosting Decision Tree (GBDT) kullanılarak epilepsi nöbetlerinin erken tahmini için bir yöntem geliştirilmiştir. EEG sinyalleri iki kategoriye ayrılmış ve çeşitli entropi özellikleri çıkarılmıştır. Geliştirilen GBDT sınıflandırıcısı, 10 kat çapraz doğrulama ile değerlendirilmiş ve ortalama %91.76 doğruluk oranı elde edilmiştir. Araştırma, bu yöntemin epilepsi nöbetlerini erken tahmin etmede etkili olduğunu ve düşük yanlış alarm oranları sağladığını göstermektedir. Bu sonuçlar, epilepsi hastaları için erken uyarı ve zarar azaltma potansiyeli taşımaktadır.

Chung ve Teo (2023), çalışmalarında, Gradient Boosting algoritması ile derin öğrenme yöntemleri kullanılarak zihinsel sağlık sorunlarının tahmin edilmesi üzerine odaklanmışlardır. Çeşitli makine öğrenme algoritmalarının performansları karşılaştırılmış ve Gradient Boosting, %88.80'lik bir doğruluk oranı ile en yüksek performansı göstermiştir. Çalışma, bu algoritmaların zihinsel sağlık sorunlarının tahmininde etkili olduğunu ve bu tür tahminlerin klinik teşhislerde kullanılabileceğini göstermektedir. Bu sonuçlar, zihinsel sağlık alanında makine öğrenmesi yaklaşımlarının potansiyelini ortaya koymaktadır. Tripathi vd. (2023)'nin çalışmasında, kolon kanseri dokusunun makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak sınıflandırılması incelenmiştir. Araştırmada, kolorektal kanserli dokulardan elde edilen 7180 görüntü üzerinde çeşitli makine öğrenimi yöntemleri (K-En Yakın Komşu, Destek Vektör Makinesi, Karar Ağacı, Rastgele Orman, Extreme Gradient Boosting, Gaussian Naive Bayes) kullanılmıştır. Sonuçlar, Extreme Gradient Boosting yönteminin en etkili ve uygulanabilir yaklaşım olduğunu göstermiştir. Bu



çalışma, kolon kanseri dokusunun sınıflandırılmasında yapay zekâ ve makine öğrenmesi tekniklerinin potansiyelini ortaya koymaktadır.

Yongcharoenchaiyasit vd. (2023), yaşlılarda kalp yetmezliği, aort stenozu ve demansın sınıflandırılması için Gradient Boosting tabanlı bir model geliştirilmiştir. Çalışma, bu hastalıkların tahmininde çeşitli makine öğrenmesi algoritmalarının performanslarını karşılaştırmış ve Gradient Boosting yönteminin diğerlerine göre daha yüksek doğruluk oranına sahip olduğunu bulmuştur. Araştırma, hastalıkların erken tanısında ve tedavisinde bu tür makine öğrenmesi yaklaşımlarının potansiyelini ortaya koymaktadır.

Yin vd. (2024), sağlık tesislerinin iklim üzerindeki etkilerini tahmin etmek için Gradient Boosting Machine (GBM) modelleri kullanmışlardır. GBM, 2020 yılında 283 hastanenin katıldığı bir anketten elde edilen verilerdeki eksiklikleri doldurmak için kullanılmıştır. GBM ile elektrik kullanımı, sığır eti tüketimi ve anestezi gaz desfluran kullanımı tahmin edilmiştir. Çalışma, bu üç alanın toplamda 3 milyon metrik ton CO2 eşdeğeri emisyon ürettiğini tespit etmiştir. Elektrik tüketimi, toplam karbon ayak izinin en büyük kısmını oluşturmuştur. Bu çalışma, sağlık tesislerinin karbon emisyonlarını tahmin etmede GBM yönteminin potansiyelini göstermektedir.

### **3. Materyal ve Metot**

Akademik yöntem, bilimsel çalışmalarda kullanılan, hipotez oluşturma, veri toplama, analiz etme, yorum yapma ve sonuçları raporlama aşamalarını kapsayan sistematik ve disiplinli bir yaklaşımdır. Bu yöntem, bilimsel araştırmaların güvenilir, tekrar edilebilir ve geçerli sonuçlar üretmesine katkıda bulunur (Karaca, 2015). Sınıflandırma ise, belirli özelliklere dayanarak nesnelere veya bireyleri gruplara ayırmayı hedefler, amacı her durumda doğru sınıf tahminini yapmaktır (Kayakuş ve Yiğit Açıkgöz, 2023). Sınıflandırma yöntemlerinde, verinin bir bölümü eğitim, diğer bölümü test seti olarak kullanılır ve hata ile doğruluk oranları, sınıflandırmanın başarısını ölçmek için değerlendirilir (Yıldıztepe ve Kocataş, 2018). Verilerin sınıflandırılması için öğrenme algoritmaları temel alınmaktadır. Var olan veri tabanının bir kısmı eğitim amacıyla kullanılarak sınıflandırma kuralları oluşturulur. Oluşturulan model yeni durumlar için nasıl karar vereceği belirlenir. Elde edilen modelin doğruluğu test edilerek onaylanırsa, bu model diğer veriler üzerinde de uygulanır (Yılmaz, 2012). Sınıflandırma yaparken kullanılan algoritmaların seçimi, kullanılacak veri tipiyle uyumlu olmalıdır. Böylece daha doğru sonuçlar elde edebilmemiz mümkündür (Çiçek ve Arslan, 2020).

### **3.1 Veri Seti**

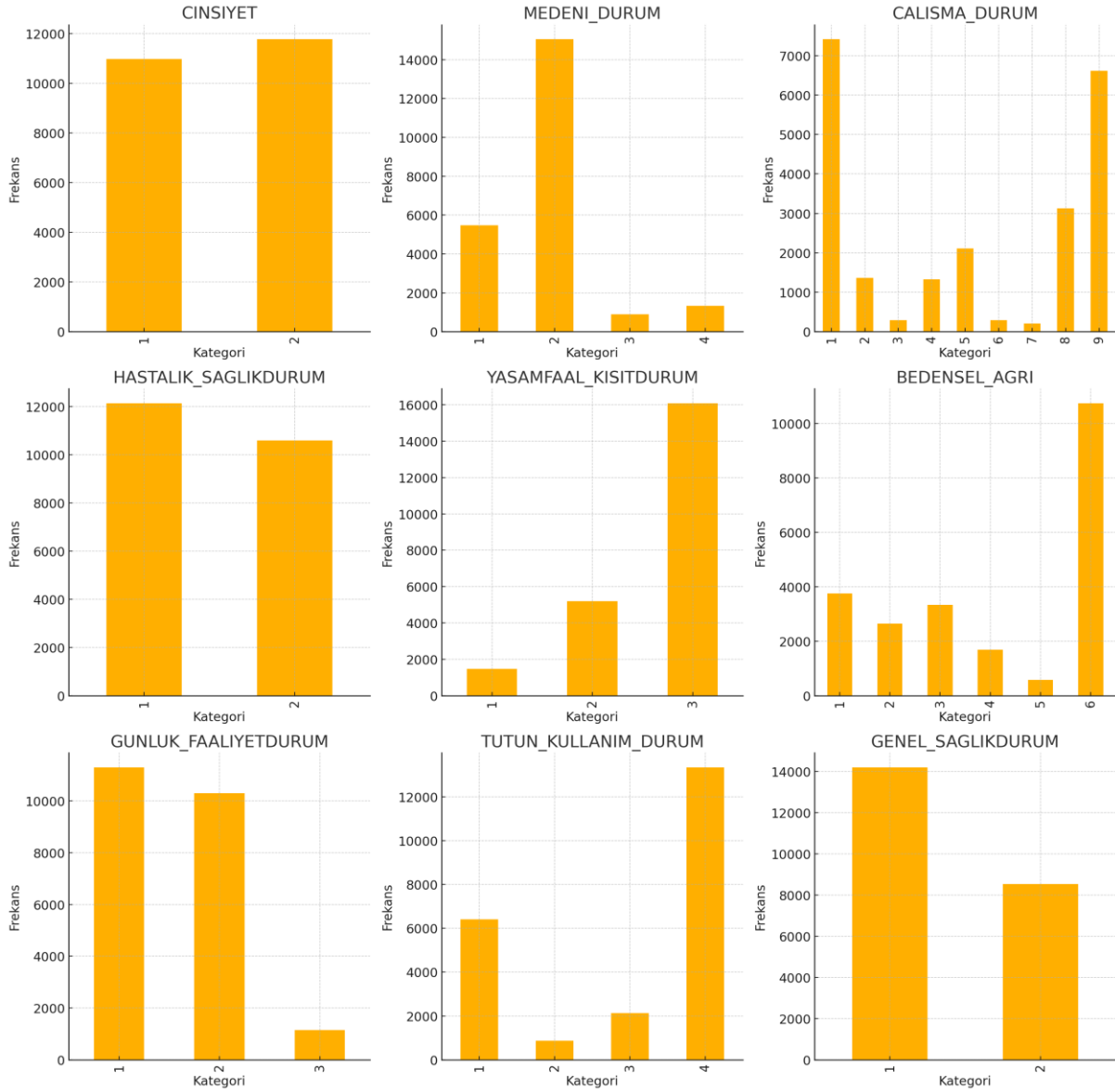
Bu çalışmada Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından gerçekleştirilen 2022 Yılı Türkiye Sağlık Araştırması verileri kullanılmıştır. Araştırmadan elde edilen veriler, ülke genelinde toplamda 11.170 adet haneden elde edilmiştir. Yapılan araştırma, ülkelerin gelişmişlik düzeylerini gösteren kalkınma göstergeleri içerisinde önemli paya sahip olan, sağlık göstergelerine ait bilgilerin elde edilmesine olanak tanımıştır. Araştırma, sadece ülke genelini yansıtmamakta, aynı zamanda uluslararası karşılaştırmalara olanak tanımaktadır. Araştırmanın kapsamı, Türkiye sınırları içinde yer alan tüm yerleşim yerlerinde bulunan hane halklarıdır. Bu bilgiler doğrultusunda, bu çalışmanın temel amacı, makine öğrenmesi tekniklerini kullanarak, mikro sağlık verilerinin nasıl kategorize edebileceğini araştırmaktır. Araştırmada kullanılan anket formundan elde edilen dokuz bağımsız değişken, sağlık durumu tahminlerinin yapılmasında analiz edilmiştir. Yapılan veri seti in inceleme adımında, eksik veriler, veri tabanından çıkarılmıştır. Veri setinde toplamda 22.742 adet hücre verisi mevcuttur.

Çalışmada kullanılan bağımsız değişkenler şunlardır: cinsiyet, yaş, medeni durum, çalışma durumu, hastalık ve sağlık durumu, yaşam faaliyetlerindeki kısıtlılıklar, bedensel ağrı, günlük faaliyetlerin durumu ve tütün kullanımı. Bu değişkenler, araştırmada bireylerin genel sağlık durumunu (Y olarak tanımlanan bağımlı değişken) etkileyen faktörler olarak incelenmiştir. Bu bağımsız değişkenler, genel sağlık durumunu anlamak ve değerlendirmek için kullanılmıştır. Kullanılan her bir kategorik değişkenin frekans dağılımları Şekil 1'de gösterilmektedir.

Veri setindeki tüm kategorik değişkenlerin frekans dağılımları Şekil 1'de gösterilen bar grafikler kullanılarak detaylı bir şekilde incelenmiştir. "Cinsiyet" değişkeni, kadın (2) ve erkek (1) bireylerin dengeli bir dağılım gösterdiğini ortaya koymaktadır. "Medeni Durum" değişkeninde, evli bireylerin (2) büyük bir çoğunluğu oluşturduğu, bekâr (1), dul (3) ve boşanmış (4) bireylerin ise daha düşük oranlarda temsil edildiği belirlenmiştir. "Çalışma Durumu" değişkeninde 1. (ücretli çalışan) ve 9. (Ev işleri ile meşgul) kategorilerinin en yüksek frekansa sahip olduğu, 7. (ev hanımı) ve 8. (öğrenci) kategorilerinin ise nispeten daha az gözlem içerdiği saptanmıştır. "Hastalık/Sağlık Durumu" değişkeni, büyük ölçüde sağlıklı bireylerden (1) oluşurken, "Yaşam Faaliyeti Kısıt Durumu" değişkeninde kısıtlılık yaşayan bireylerin (3) baskın olduğu gözlemlenmiştir. "Bedensel Ağrı" değişkeninde ise ağrısı yüksek olan bireylerin (6) yaygın olduğu, "Günlük Faaliyet Durumu" değişkeninde çoğunluğun (1) faaliyetsiz veya

kısıtlı faaliyet gösterdiği anlaşılmıştır. "Tütün Kullanım Durumu" değişkeninde ise yüksek oranda tütün kullanan bireylerin (4) mevcut olduğu görülürken, "Genel Sağlık Durumu" değişkeni ise bireylerin çoğunluğunun sağlıklı (1)

olduğunu ortaya koymuştur. Bu analizler, verinin genel yapısını anlamaya yönelik önemli ipuçları sunmakta ve çalışmanın ilerleyen aşamaları için güçlü bir temel oluşturmaktadır.



Şekil 1. Kategorik Değişkenlerin Frekans Dağılımları

Tablo 1'de analizlerde kullanılan bağımsız değişkenler ve değişkenlerin açıklama ve tanımlamaları gösterilmiştir. İlgili tabloda yer alan veri seti, içerdiği bilgilerin türünü ve bu bilgilerin nasıl kodlandığını açıklamaktadır.

### 3.2. Yazılım ve Donanım

Bu çalışmada genel sağlık durumunun sınıflandırılması işlemi Python 3.6 yazılımında yapılmıştır. Sınıflandırma işleminde, Karar Ağaçları (Decision Trees), En Yakın Komşu Algoritması (K-Nearest Neighbors), Doğrusal Diskriminant Analizi (Linear Discriminant Analysis), Destek Vektör Makinesi (Support Vector Machine) ve Gradient Boosting modellerini kullanmak için yaygın olarak kullanılan scikit-learn kütüphanesi tercih edilmiştir. Scikit-learn, makine

öğrenmesi modellerinin eğitimi, testini ve değerlendirilmesini kolaylaştıran zengin bir araç seti sunmaktadır. Decision Tree Classifier, K-Neighbors Classifier, Linear Discriminant Analysis, SVC (Support Vector Classification) ve Gradient Boosting Classifier sınıfları, bu modellerin scikit-learn kütüphanesindeki karşılıklarıdır. Ayrıca, veri işleme ve model değerlendirme süreçlerinde pandas ve numpy kütüphaneleri veri manipülasyonu ve matematiksel hesaplamalar için; matplotlib ve seaborn kütüphaneleri ise veri görselleştirme için kullanılmıştır. Bu kütüphaneler birlikte kullanıldığında, makine öğrenmesi projelerinin baştan sona etkili bir şekilde gerçekleştirilmesine imkân tanımaktadır.

**Tablo 1.** Bağımsız Değişkenler ve Tanımlamaları

Değişken Ad	Değişken Tanımı	Açıklama
Cinsiyet	Kişinin Cinsiyeti	1. Erkek 2. Kadın
Yaş	Bitirilen yaş	
Medeni Durum	Medeni durumunuz nedir?	1. Hiç evlenmedi 2. Evli 3. Boşanmış 4. Eşi vefat etmiş
Çalışma Durumu	Çalışma durumunuz nedir?	1. Ücretli çalışan 2. İşveren 3. Ücretsiz aile işçisi 4. İş arayan 5. Eğitime devam eden 6. Emekli 7. Yaştan ötürü çalışamayan 8. Engelli 9. Ev işleri ile meşgul
Hastalık ve Sağlık Durumu	6 aydan uzun süren hastalığınız var mı?	1. Evet 2. Hayır
Yaşam Faaliyet Kısıt Durumu	Sağlık probleminden ötürü günlük faaliyetlerinizin kısıtlanma durumu nedir?	1.Ciddi biçimde kısıtlandı 2.Kısıtlandı (ciddi değil) 3.Kısıtlanmadı
Bedensel Ağrı	Son 4 haftadaki bedensel ağrınız nedir?	1.Çok az 2.Az 3.Orta 4.Fazla 5.Çok fazla 6. Hiç
Günlük Faaliyet Durumu	Hangisi durumunuzu en iyi şekilde tanımlamaktadır?	1.Çoğunlukla oturan 2.Orta derecede fiziksel işler 3.Genelde ağır iş
Tütün Kullanım Durumu	Tütün mamulleri kullanıyor musunuz?	1.Evet, her gün 2.Evet, ara sıra 3.Hayır içiyordum bıraktım 4.Hayır hiç kullanmadım
Genel Sağlık Durumu	Ferdin Genel Sağlık Durumu	1.Sağlığı iyi 2.Sağlığı kötü

Bununla birlikte, sınıflandırma yöntemlerinde, kullanılan veri seti genellikle eğitim ve test setleri olarak ikiye ayrılır. Hata oranı ve doğruluk oranı, yanlış ve doğru sınıflandırılan kayıtları belirlemek için kullanılır (Yıldıztepe ve Kocataş, 2018). Söz konusu ayırım, bu çalışmada, verinin %80'i eğitim ve %20'si test seti olacak şekilde "train\_test\_split" komutu ile gerçekleştirilmiştir. Veri bölünmesi sırasında "random\_state" parametresi de kullanılarak, bu işlemde tutarlılık sağlanmış ve veri setleri her seferinde aynı şekilde bölünerek model performanslarının kıyaslanmasına olanak sağlanmıştır. Random\_state, rastgele sayı tohumu olarak işlev görerek, her çalışmada aynı veri bölünmesinin tekrarlanmasını ve sonuçların karşılaştırılmasını sağlar. Bu sayede, farklı denemeler arasında tutarlılık korunmuş olur (Bisht ve Bisht, 2022).

Tüm sınıflandırma işlemleri için kullanılan bilgisayar donanımları şu özelliklere sahiptir: İşlemci olarak, yüksek performanslı 8 çekirdekli bir Intel Core i7-10700K

bulunmaktadır, bu da büyük veri kümeleriyle çalışırken ve yoğun hesaplamalar yaparken üstün performans sağlamaktadır. 32 GB DDR4 RAM, veri işleme ve model eğitimi sırasında bellek yetersizliği yaşanmaması için yeterli kapasite sunmaktadır. Grafik kartı olarak, NVIDIA GeForce RTX 3080 tercih edilmiş; bu güçlü GPU, özellikle derin öğrenme modelleriyle çalışırken hesaplama gücünü artırmıştır. Depolama birimi olarak, 1 TB kapasiteli NVMe SSD kullanılmış, bu da hızlı veri erişimi ve büyük dosyaların saklanması için idealdir. Ayrıca, bilgisayar iyi bir soğutma sistemi ve yüksek çözünürlüklü 27 inç bir monitör ile donatılmış, bu da uzun süreli çalışma koşullarında verimliliği artırmıştır. Bu donanım özellikleri, sınıflandırma işlemlerini hızlı ve verimli bir şekilde gerçekleştirmek için mükemmel bir altyapı sunmaktadır.

### 3.3. Makine Öğrenmesi Modelleri

#### 3.3.1. Karar Ağaçları

Karar ağaçları, makine öğrenimi, görüntü işleme ve örüntü tanıma dahil olmak üzere çeşitli alanlarda sıklıkla

kullanılan etkili bir tekniktir (Stein vd., 2005). Karar ağacı modeli, adından da anlaşılacağı üzere ağaç benzeri bir yapı sergiler. Hiyerarşik bir ağaç yapısına benzeyen kökler, dallar ve yapraklardan oluşur. Karar ağaçları verileri kökte sınıflandırarak başlar, ardından düğümler, dallar ve yapraklar (karar sınıfı) aracılığıyla devam eder. Bu süreç ağaç yapısı yapraklar elde edene kadar devam eder. Düğüm noktaları, karar oluşturma sürecinin gerçekleştiği belirli konumlardır. Elde edilen sonuca göre dallar oluşturulur ve oluşturulan dallara uygun olarak yapraklar elde edilir. Bir yaprak oluşturulmamışsa bir düğüm oluşturulur ve bu süreç karar sınıfını temsil eden bir yaprak oluşana kadar devam eder (Kızgın vd., 2023). Bu çalışmada, İnce Ağaç (Fine Tree) kullanılmıştır. İnce Ağaç sınıflandırması, ince taneli sınıfların daha kaba üst sınıflar halinde kümelendiği ve nesne örneklerinin üst sınıfları aracılığıyla ayrıntılı kategorilere ayrıştırılmasına yardımcı olan bir sınıflandırma ağacı oluşturan bir yöntemdir (Wu vd., 2020). Bu yaklaşım, özellikle geniş kelime dağarcığına sahip uzun kuyruklu nesne algılama ve örnek segmentasyon görevlerinin üstesinden gelme ihtiyacının olduğu senaryolarda kullanışlıdır (Wu vd., 2020). İnce Ağaç sınıflandırması, çeşitli çalışmalarda Doğrusal Diskriminant Analizi (LDA) ve K-En Yakın Komşular (KNN) gibi diğer yöntemlerle karşılaştırılmış ve farklı uygulamalardaki etkinliği gösterilmiştir (Kaya, 2021).

### 3.3.2. En Yakın Komşular (K-Nearest Neighbours-KNN)

KNN algoritması kullanım kolaylığı ve etkinliği ile en çok kullanılan sınıflandırma algoritmalarından biridir (Wu vd., 2008). Ayrıca KNN algoritmaları regresyon ve kayıp değer girişi gibi çeşitli veri madenciliği uygulamalarında da sıklıkla kullanılmaktadır. k-En Yakın Komşular (KNN), birden fazla uygulamada hem basit hem de oldukça verimli olan parametrik olmayan bir sınıflandırma tekniğidir. Standart KNN yaklaşımının arkasındaki temel kavram, çoğunluk kuralına dayalı olarak bir test veri noktasının etiketini tahmin etmektir. Başka bir deyişle, test veri noktasının etiketi, özellik uzayındaki en benzer k eğitim veri noktası arasında en yaygın sınıf dikkate alınarak tahmin edilir (Cheng vd., 2015).

Bir t veri kaydını sınıflandırmak için, önce t'nin bir komşuluğunu oluşturan k en yakın komşusuna ulaşılır. t için sınıflandırma, mesafeye dayalı ağırlıklandırmanın dikkate alınıp alınmadığına bakılmaksızın, genellikle komşuluktaki veri kayıtları arasında oy çokluğuyla belirlenir. Bununla birlikte, k-en yakın komşu (KNN) algoritmasını uygulamak için, sınıflandırmanın doğruluğu büyük ölçüde bu parametreye bağlı olduğundan, k için uygun bir değer seçmek çok önemlidir. KNN yöntemi k değerinden etkilenir ve bu da belirli bir düzeyde önyargıya

neden olabilir. K değerini seçmek için çok sayıda yöntem vardır, ancak basit olanı algoritmayı farklı k değerleriyle birden çok kez çalıştırmak ve en uygun performansı göstereni seçmektir (Guo vd., 2003). KNN tekniği tipik olarak sırasıyla Denklem 1-4'te verilen Öklid, Chebyshev, Manhattan ve Mahalanobis mesafe ölçümlerini kullanarak verilerin yakınlık ölçümlerini hesaplar.

$$d_{Euclidean}(x_i, y_i) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2} \quad (1)$$

$$d_{Chebishev}(X_i, Y_i) = \max_{i=1,2,3,\dots,m} |X_i - Y_i| \quad (2)$$

$$d_{Manhattan}(X_i, Y_i) = \sum_{i=1}^n |X_i - Y_i| \quad (3)$$

$$d_{Mahalanobis}(x_i, y_i) = \sqrt{(X_i - Y_i)^T \Sigma^{-1} (X_i - Y_i)} \quad (4)$$

### 3.3.3. Doğrusal Diskriminant Analizi (Linear Discriminant Analysis-LDA)

Doğrusal Diskriminant Analizinin (LDA) amacı, orijinal belirleyicilerin bir bileşimi olan yeni bir değişken üretmektir. Bu, yeni faktörle ilgili olarak önceden belirlenmiş kategoriler arasındaki farklılıkların optimize edilmesiyle elde edilir. Amaç, tahmin edici puanları, diskriminant puanı olarak bilinen tek bir yeni bileşik değişkenin oluşturulmasıyla sonuçlanacak şekilde birleştirmektir. Bu, verilerin boyutlarını azaltmaya yönelik bir yaklaşım olarak görülebilir ve tahmin edicileri p boyuttan tek boyutlu bir çizgiye sıkıştırır. Sürecin sonunda amaç, sınıflar arasındaki ortalama puan farkını en üst düzeye çıkarırken, her sınıf için normal bir diskriminant puanı dağılımına sahip olmaktır (Subaşı ve Gürsoy, 2010). LDA yaklaşımı, yordayıcı değişkenlerin aralık veya oran değişkenleri olduğunu varsayar, yani nesne büyüklükleri açısından sıralanabilir ve karşılaştırılabilirler. Oran ölçekleri aralık ölçekleriyle aynı özelliklere sahiptir, ancak aynı zamanda mutlak bir sıfır noktasına sahiptirler. İkinci olarak LDA, yordayıcı değişkenlerin puanlarının çok değişkenli normal dağılım izleyen bir popülasyondan bağımsız ve rastgele seçildiğini varsayar. Üçüncü olarak, gruplar aynı varyans/kovaryans matrislerine sahiptir. Görsel olarak, her bir gruba ait öğeler kendilerini aynı şekil, boyut ve yönelimi paylaşan çok boyutlu bir 'bulut' halinde düzenlemelidir (Worth ve Cronin, 2003). LDA, olasılıksal yorumlar sağlayan bir sınıflandırma yaklaşımıdır. Basit bir ifadeyle, çeşitli sınıf etiketleri arasında optimum farklılaşma sağlamak için doğrusal bir kombinasyon oluşturan faktörlerin belirlenmesine dayanır (Mandelkow vd., 2016). LDA açıkça farklı veri sınıfları arasındaki ayrımı yakalamayı amaçlamaktadır. LDA, altta yatan uzayda farklı sınıflar arasında en yüksek düzeyde ayırt edilebilirlik sergileyen vektörleri tanımlamaya çalışır. Resmi olarak LDA, mevcut verilere dayanarak hedef sınıflar arasındaki ortalama farkları maksimize eden bağımsız özelliklerin doğrusal bir

kombinasyonunu oluşturur (Rathi ve Palani, 2012). İlgili denklemler 5 ve 6 'da verilmiştir:

$$S_W = \sum_{j=1}^c \sum_{i=1}^{N_j} (x_i^j - \mu_j)(x_i^j - \mu_j)^T \quad (5)$$

" $x_i^j$ " ifadesi j sınıfının birinci örneğini, " $\mu_j$ " j sınıfının ortalamasını, "c" sınıf sayısını temsil etmektedir. Ayrıca, "sınıflar arası dağılım matrisi" terimi belirli bir matematiksel kavramı ifade eder.  $\mu$  tüm sınıfların ortalamasını gösterir.

$$S_b = \sum_{j=1}^c (x_i^j - \mu_j)(x_i^j - \mu_j)^T \quad (6)$$

### 3.3.4. Destek Vektör Makinesi (Support Vector Machine-SVM)

Destek Vektör Makineleri (SVM) teorisi, geleneksel örüntü tanıma tekniklerinin eğitim seti üzerindeki performansı optimize ederek ampirik riski en aza indirmeyi amaçladığını belirtmektedir. Ancak SVM, sabit ancak bilinmeyen bir veri olasılık dağılımına dayalı olarak görülmeyen örüntüleri yanlış sınıflandırma olasılığı olan yapısal riski en aza indirmeye odaklanır. Genelme hatasında bir üst sınırı en aza indirmeye eşdeğer olan bu yeni tümevarım ilkesi, olasılıkta tekdüze yakınsama teorisine dayanmaktadır (Yue vd., 2003). Destek Vektör Makinelerinin (SVM) amacı, marjı maksimize eden ve sınıfları doğrusal bir şekilde etkili bir şekilde ayırabilen hiper düzlemi tanımlamaktır (Abdullah ve Abdulazeez, 2021). Destek Vektör Makineleri (SVM'ler), doğrusal olmayan durumların sınıflandırılmasını kolaylaştırmak için girdi uzayından özellik uzayına bir eşleme gerçekleştirir. Çekirdek yöntemi, eşleme fonksiyonunun açık bir şekilde tanımlanması ihtiyacını ortadan kaldırarak boyutluluk laneti sorununu ele almada faydalıdır. Özellik uzayı olarak da bilinen yeni uzaydaki doğrusal sınıflandırma, girdi uzayı olarak da bilinen orijinal uzaydaki doğrusal olmayan sınıflandırmaya eşdeğerdir. SVM'ler bunu, girdi vektörlerini maksimum ayırma hiper düzleminin oluşturulduğu daha yüksek boyutlu bir uzaya (özellik uzayı olarak da bilinir) dönüştürerek başarır (Yu ve Kim, 2012).

### 3.3.5. Gradient Boosting

Gradient Boosting, makine öğrenimi alanında yaygın olarak kullanılan bir ensemble öğrenme tekniğidir. Algoritma, hatalara odaklanarak çalışmaktadır. İlk öğrenici genellikle basit bir tahmin yapar, ardından sonraki modeller öncekilerin hatalarını düzeltmeye odaklanarak öğrenir. Bu şekilde, her adımda daha doğru tahminler elde edilir. Gradient Boosting'in belki de en önemli özelliği, her adımda modelin önceki hatalarını minimize etmek için gradient (eğim) bilgisini kullanmasıdır. Bu, her bir öğrenicinin eklenirken tahmin

performansını optimize etmeye yöneliktir. Algoritma, belirli bir hata eşliğine ulaşıncaya veya belirli bir iterasyon sayısına kadar devam eden iteratif bir süreçtir. Her adımda, bir önceki modelin hatası üzerine yeni bir model eklenir ve bu süreç tekrarlanır (Bentéjac vd., 2021).

Gradient Boosting'in Temel Adımları şu şekilde özetlenebilir: Veri seti için ilk basit tahmin yapılır. Genellikle bu, sınıflandırma için en yaygın sınıfı veya regresyon için ortalama bir değeri temsil etmektedir. Bu süreç Denklem 7'de gösterilmiştir.

$$F_0(x) = \arg \min_{\gamma} \sum_{i=1}^n L(y_i, \gamma) \quad (7)$$

Burada,  $F_0(x)$ , başlangıç modelidir,  $L$  kayıp fonksiyonu,  $y_i$  gerçek değerler ve  $\gamma$  modelin çıktısıdır. Bu işlemden sonra, ilk tahminle gerçek değerler arasındaki fark (hata) hesaplanmaktadır. Yani, her iterasyonda, modelin çıktısı ile gerçek değer arasındaki kayıp fonksiyonunun gradyanı hesaplanır. Bu süreç Denklem 8'de gösterilmiştir.

$$r_{im} = - \left[ \frac{\partial L(y_i, F(x_i))}{\partial F(x_i)} \right]_{F(x)=F_{m-1}(x)} \quad (8)$$

$r_{im}$  değerleri, m-inci iterasyonda modelin tahmin hatalarının gradyanlarıdır ve  $F_{m-1}(x)$  bir önceki adımda elde edilen modeldir. Bu işlemin ardından, hataları minimize edecek bir zayıf öğrenici  $h_m(x)$  (örneğin, bir karar ağacı) eğitilir. Bu öğrenici, hataların gradyanlarını ( $r_{im}$ ) tahmin etmeye çalışır. Ardından, modeli güncellemek için bir çarpan  $\gamma_m$  bulunur. Bu süreç Denklem 9'da gösterilmiştir.

$$\gamma_m = \arg \min_{\gamma} \sum_{i=1}^n L(y_i, F_{m-1}(x_i) + \gamma h_m(x_i)) \quad (9)$$

Bu adım, yeni öğrenicinin katkısının boyutunu ayarlar. Son olarak model, yeni öğrenicinin katkısıyla güncellenir. Bu süreç Denklem 10'da gösterilmiştir.

$$F_m(x) = F_{m-1}(x) + \gamma_m h_m(x) \quad (10)$$

Burada,  $F_m(x)$  güncellenmiş modeldir. Bu işlem, belirlenen sayıda iterasyon boyunca veya hatalar bir eşik değerinin altına düşene kadar tekrarlanır (Mayr vd. 2014).

### 3.4. Performans Değerlendirme

Bununla birlikte, sınıflandırma başarısını değerlendirmek için bir dizi metrik bulunmaktadır, bunlar arasında kesinlik, hassasiyet, f1-skor, karışıklık matrisi, doğruluk ve özgünlük bulunmaktadır (Hossin ve Sulaiman, 2015).

Performans ölçütleri hata matrisi kullanılarak türetilmiştir ve 0 ile 1 arasında bir değer aralığına sahiptir. Hesaplamalara göre, ölçümlerin değerleri 1'e yaklaştığında üstün performans sergilediği iddia edilmektedir. Gerçek pozitif (TP), beklenen sonuç pozitif olduğunda ve gerçekleşen sonuç da pozitif olduğunda ortaya çıkar. Yanlış pozitif (FP), bir tahmin pozitif olduğunda, ancak gerçek durum negatif olduğunda,

örneğin sağlıklı bir bireyin hasta olacağı tahmin edildiğinde ortaya çıkar. Yanlış negatif (FN), tahmin olumsuz bir sonuca işaret ettiğinde, ancak gerçek durum olumlu olduğunda, örneğin bir hastanın sağlıklı olacağı tahmin edildiğinde ortaya çıkar. Tahmin olumsuz olduğunda ve gerçek durum da olumsuz olduğunda gerçek bir olumsuzluk (TN) meydana gelir. Çalışmada doğruluk, duyarlılık, hassasiyet ve F1 skoru metrikleri kullanılmıştır. Bu metriklerin hesaplanması sırasıyla Denklem 11-14 arasında verilmiştir:

$$\text{Doğruluk} = \frac{\text{Gerçek Pozitifler (TP)} + \text{Gerçek Negatifler (TN)}}{\text{Toplam Örnek Sayısı}} \quad (11)$$

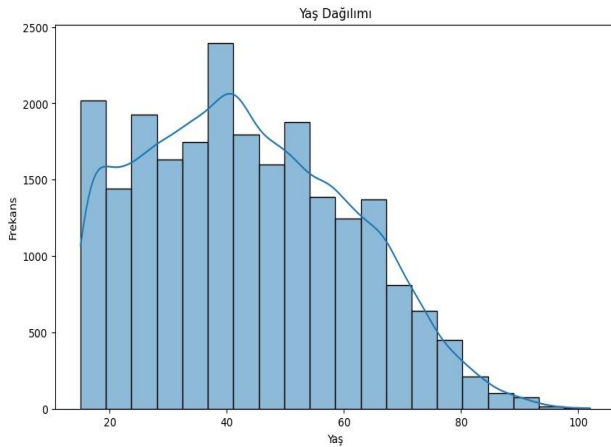
$$\text{Duyarlılık} = \frac{\text{Gerçek Pozitifler (TP)}}{\text{Gerçek Pozitifler (TP)} + \text{Yanlış Negatifler (FN)}} \quad (12)$$

$$\text{Hassasiyet} = \frac{\text{Gerçek Pozitifler (TP)}}{\text{Gerçek Pozitifler (TP)} + \text{Yanlış Pozitifler (FP)}} \quad (13)$$

$$\text{F1 Skoru} = 2 \times \frac{(\text{Hassasiyet} \times \text{Duyarlılık})}{(\text{Hassasiyet} + \text{Duyarlılık})} \quad (14)$$

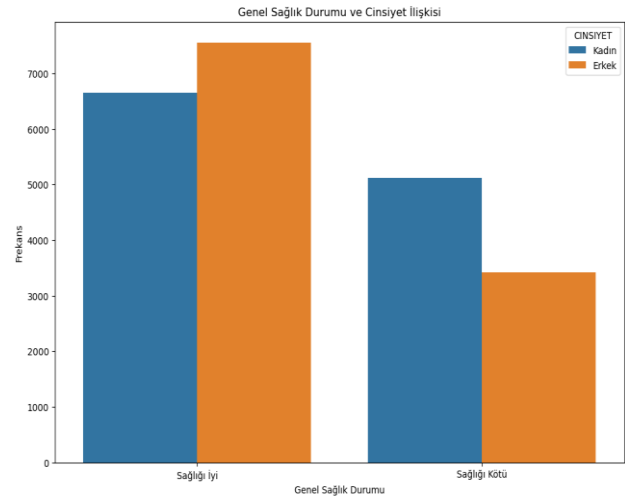
#### 4. Bulgular

Çalışmadan elde edilen bulgular incelendiğinde, Şekil 2'de, veri setindeki kişilerin yaş dağılımını gösteren bir histogram bulunmaktadır. Histogram, veri noktalarını belirli aralıklara veya "kutulara" bölen bir grafik türüdür. Her bir aralıktaki gözlemlerin frekansını veya sayısını göstererek, veri setindeki yaş dağılımını görsel olarak ifade etmektedir.



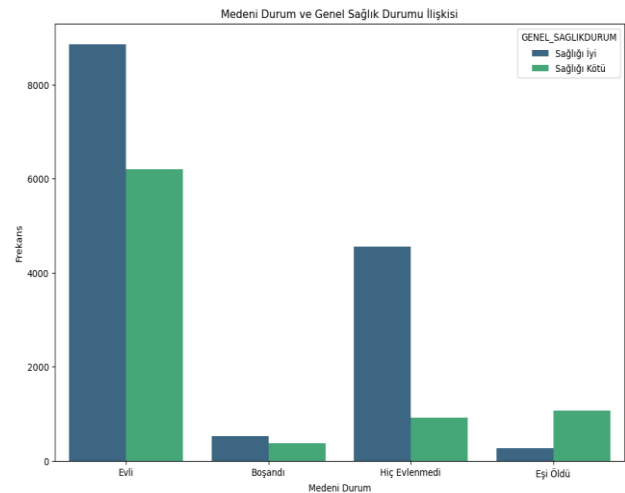
Şekil 2. Yaş Dağılımı

Grafikte, yaş dağılımının genellikle 20 ila 60 yaş arasında yoğunlaştığı görülmektedir. Genç yetişkinlerin sayısı fazla iken yaşın artışıyla birlikte birey sayısı azalmaktadır, 60 yaşından sonra ise hızla düşmektedir. Bu durum, yaşlı nüfusun az olduğuna işaret etmektedir. Grafik, nüfusun orta yaş grubunda yoğunlaştığını ve yaş dağılımının sağlık durumu analizi için önemli olduğunu göstermektedir. Buna ek olarak, Şekil 3'te genel sağlık durumu ile cinsiyet ilişkisi grafik ortamında gösterilmiştir.



Şekil 3. Genel Sağlık Durumu ve Cinsiyet İlişkisi

Şekil 3'te, genel sağlık durumunun iyi ya da kötü olduğunu belirten kadın ve erkek katılımcıların sayısı karşılaştırılmaktadır. Sağlıklı olduğunu belirtenler arasında kadınların sayısı erkeklere göre daha fazla, sağlığı kötü olanlar arasında ise erkeklerin sayısı kadınlardan yüksektir. Bu, sağlık durumunun cinsiyete göre değişiklik gösterebileceğine dair bir gösterge olabilir ve belki de cinsiyete özgü sağlık riskleri veya sağlık hizmetlerine erişim farklılıklarını yansıtabilir. Her iki kategoride de katılımcıların sayısı, sağlık algısının cinsiyetlere göre nasıl değişebileceği hakkında önemli veriler sunmaktadır. Öte yandan, Şekil 4'te medeni durum ve genel sağlık durumu arasındaki ilişki gösterilmiştir.

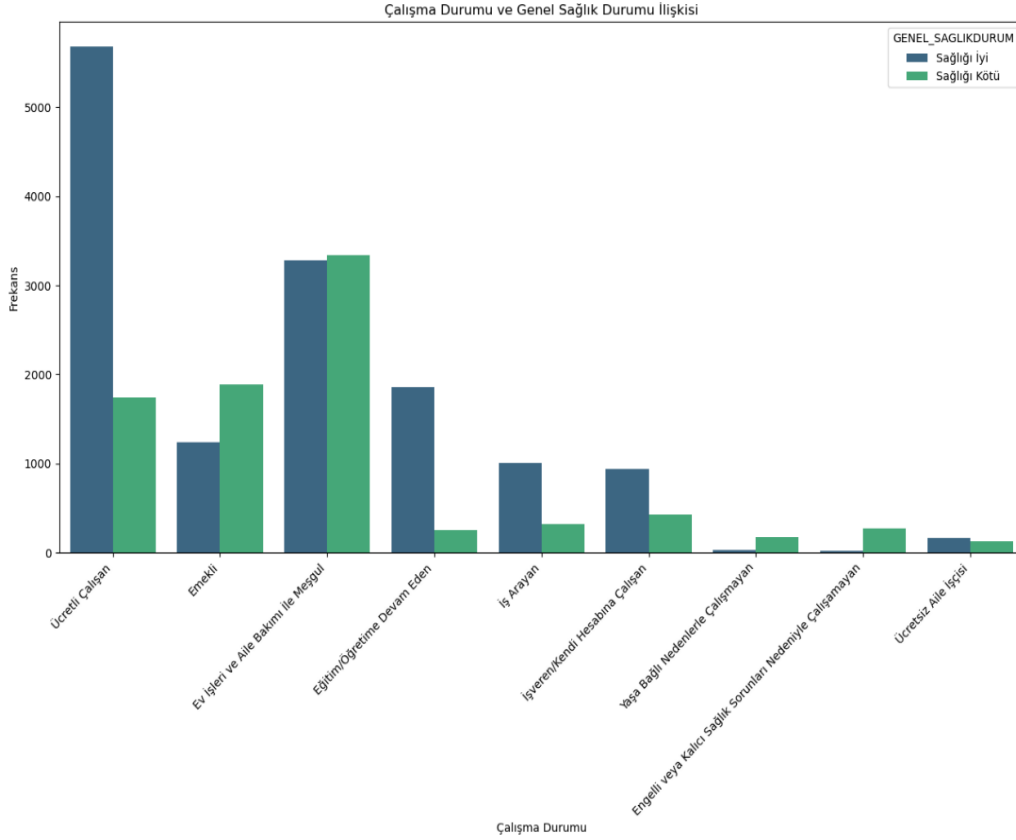


Şekil 4. Medeni Durum ve Genel Sağlık Durumu İlişkisi

Şekil 4, farklı medeni durumlara sahip bireylerin genel sağlık durumu ile ilişkisini göstermektedir. Evli bireyler arasında sağlıklı olanların sayısı oldukça yüksektir ve bu grup sağlığı kötü olanların sayısını da en çok barındırıyor. Boşanmış bireylerde ise sağlıklı olanların sayısı, sağlığı kötü olanlara göre daha az farkla öndedir. Hiç evlenmemiş kişilerde sağlıklı olanların sayısı, sağlığı kötü olanlardan

daha fazla, ancak bu grup en az sayıda sağlığı kötü bireyi içermektedir. Eşi ölmüş bireylerin sağlığı genel olarak kötü olarak raporlanmıştır ve bu kategorideki sağlıklı olanların sayısı en düşüktür. Bu veriler, medeni durumun genel sağlık üzerindeki olası etkilerini yansıtmakta ve sosyal

destek ile sağlık arasındaki ilişkiyi anlamak için önemli ipuçları sunmaktadır. Bununla birlikte, Şekil 5'te çalışma durumu ve genel sağlık durumu arasındaki ilişki gösterilmektedir.

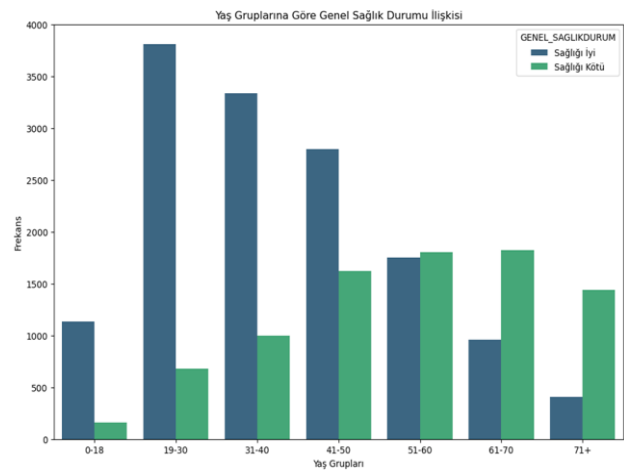


Şekil 5. Çalışma Durumu ve Genel Sağlık Durumu İlişkisi

İlgili şekildeki bulgular incelendiğinde, ücretli çalışanlar arasında kendini sağlıklı olarak rapor edenlerin sayısı belirgin bir şekilde daha yüksektir. Ev hanımları ve emekliler arasında sağlığı iyi ve kötü olarak rapor edenler arasındaki fark daha azdır. İş arayanlar ve öğrenciler genellikle sağlıklı olduklarını belirtmişlerdir. Freelance (genellikle bağımsız çalışan ve bir organizasyona sabit bir şekilde bağlı olmayan profesyoneller için kullanılan bir terimdir) çalışanlar ve serbest meslek sahipleri genellikle sağlıklı olarak rapor edilmişken, evden çalışanlar ve uzaktan çalışanlar arasında sağlığı iyi olanların oranı daha düşüktür. Ücretsiz izinde olanlar ve diğerleri kategorisinde sağlığı iyi olanların sayısı oldukça azdır. Bu veriler, iş ve yaşam tarzı koşullarının sağlık üzerindeki etkilerini yansıtmakta ve sosyoekonomik faktörlerle sağlık arasındaki ilişkiyi gözler önüne sermektedir. Bununla birlikte Şekil 6, farklı yaş gruplarına göre bireylerin genel sağlık durumlarını karşılaştırmaktadır.

Bulgular incelendiğinde, genç yaş gruplarındaki (0-18, 19-30) bireylerin büyük çoğunluğu kendilerini sağlıklı olarak nitelendirirken, orta yaş grubu (31-40, 41-50) da önemli bir sağlıklı popülasyona sahip. 51-60 yaş aralığındaki sağlık

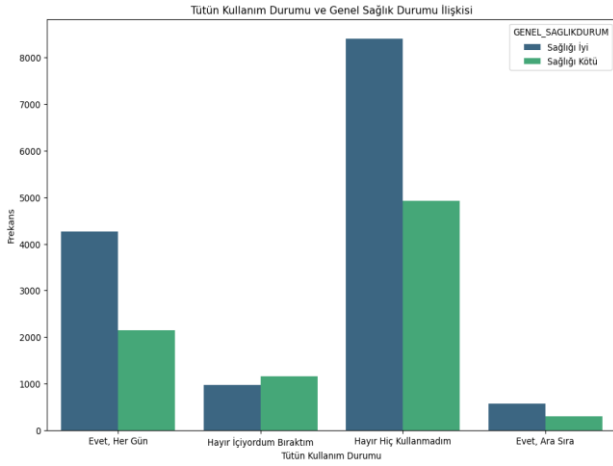
durumu dengeli bir dağılım gösterirken, 61-70 ve 71+ yaş gruplarında sağlıklı bireylerin sayısı sağlığı kötü olanlara göre daha azdır.



Şekil 6. Yaş Gruplarına Göre Genel Sağlık Durumu İlişkisi

Bu eğilim, yaşla birlikte sağlık sorunlarının artışı ve genel sağlık durumunun genç bireylerde daha iyi olduğunu göstermektedir. Buna ek olarak Şekil 7'de tütün kullanım durumu ve genel sağlık durumu ilişkisi karşılaştırılmıştır.



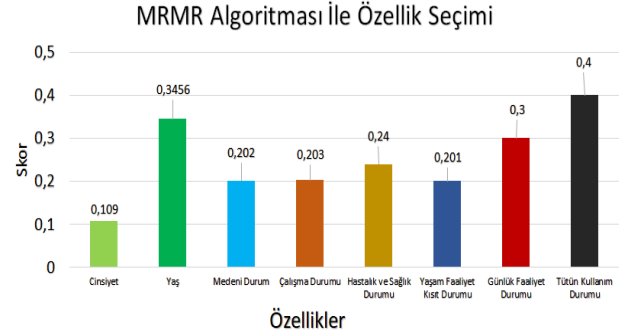


Şekil 7. Tütün Kullanım Durumu ve Genel Sağlık Durumu İlişkisi

İlgili şekil, tütün kullanım durumunun bireylerin genel sağlık durumu ile ilişkisini incelemektedir. Veriler, her gün tütün kullananlar arasında sağlığı kötü olan bireylerin sayısının, sağlığı iyi olanlara kıyasla daha fazla olduğunu göstermektedir. Tütün kullanımını bırakan bireylerde, sağlıklı olma oranı daha yüksek görünmekte, bu durum tütün kullanımını bırakmanın potansiyel olarak olumlu sağlık etkileri olabileceğini düşündürmektedir. Tütün hiç kullanmamış bireyler genel olarak daha sağlıklı görünürken, ara sıra tütün kullananlarda sağlığı iyi olanların oranı nispeten daha düşük gözlemlenmiştir. Bu bulgular, düzensiz tütün kullanımının bile sağlık üzerinde olumsuz etkiler yaratabileceğini ima edebilir, ancak bu ilişkilerin daha derinlemesine analizlerle desteklenmesi gerekmektedir.

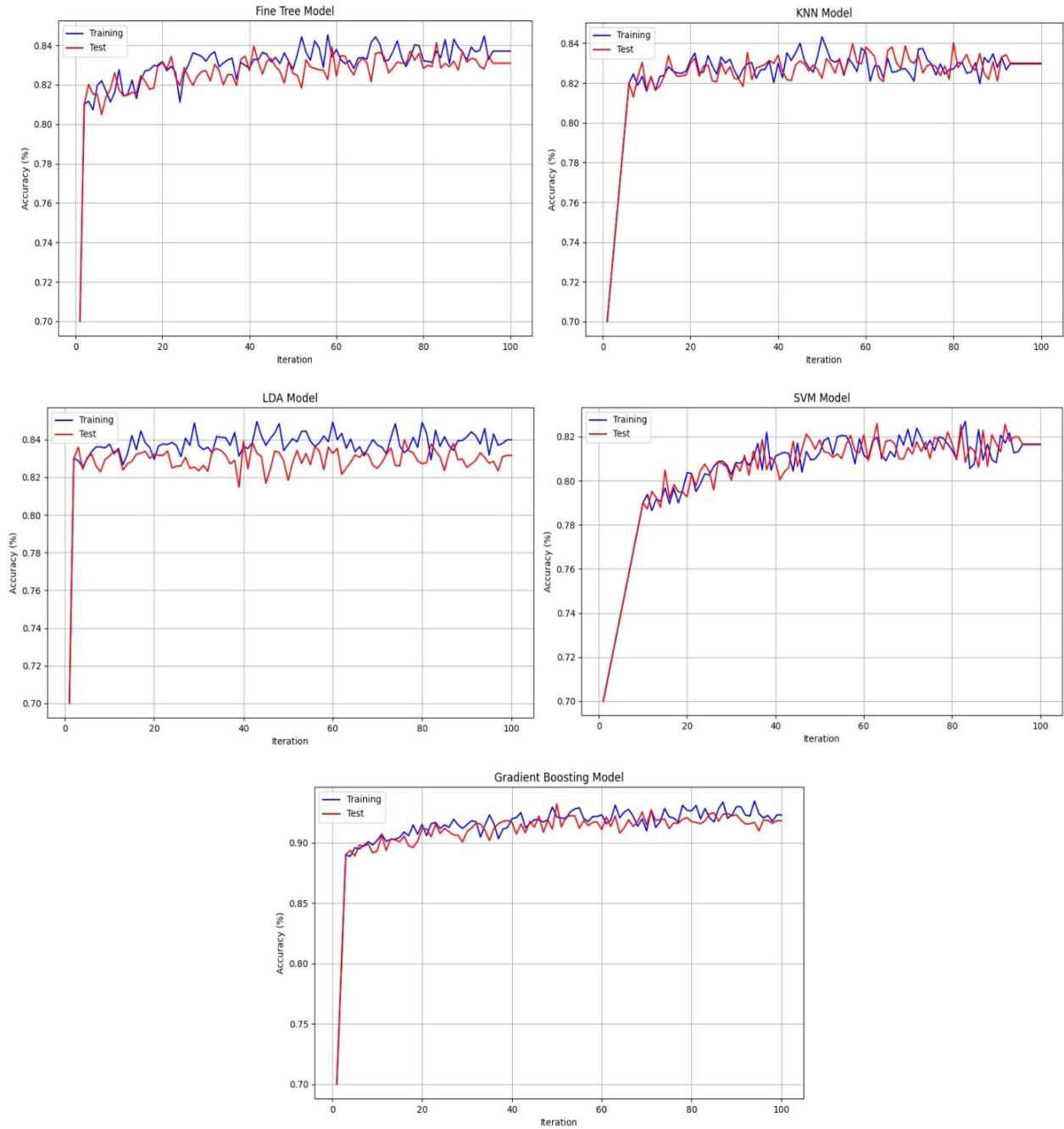
Bununla birlikte, sınıflandırma işlemlerinde özellik seçimi, model performansını artırmak ve gereksiz veya alakasız özellikleri elemek için önemlidir. MRMR (Minimum Redundancy Maximum Relevance) algoritması, bu amaçla kullanılan popüler bir yöntemdir ve adından da anlaşılacağı gibi, seçilen özelliklerin hem birbirleriyle minimum düzeyde tekrar eden bilgi (redundancy) içermesini hem de sınıflandırma hedefi ile maksimum düzeyde ilişkili (relevance) olmasını sağlamayı hedefler (Peng vd., 2005). MRMR algoritması, maksimum ilgililik (relevance) ile hedef değişkenle olan ilişkiyi ve minimum tekrar (redundancy) ile seçilen özelliklerin kendi aralarındaki korelasyonu hesaplayarak çalışır (Estévez vd., 2009). Bu süreçte, mutual information (karşılıklı bilgi) gibi ölçütler kullanılır. Her adımda en fazla bilgi sağlayan ve en az tekrar eden özellikleri seçerek, MRMR algoritması modelin genel performansını artırır ve aşırı öğrenme (overfitting) riskini azaltır. Yüksek boyutlu veri kümelerinde etkili bir şekilde çalışan MRMR, sınıflandırma işlemlerinde dengeli ve verimli sonuçlar üretir (Zhou vd., 2020). Bu çalışmada makine öğrenmesi modelleri ile

sınıflandırma işlemi yapılmadan önce, MRMR algoritması ile özellik seçimi yapılmış ve bu özellik dereceleri kullanılarak sınıflandırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 8'de bu algoritma kullanılarak elde edilen bağımsız değişkenlerin özellik önem dereceleri gösterilmiştir.



Şekil 8. MRMR Algoritmasına Göre Bağımsız Değişkenlerin Önem Sıralamaları

Şekil 8, MRMR algoritmasına göre çeşitli özelliklerin sınıflandırma işlemine olan katkısını skorlar aracılığıyla ifade etmektedir. En yüksek skora sahip olan özellik, 0,4 ile Tütün Kullanım Durumu olarak belirlenmiştir, bu da bu değişkenin bireylerin genel sağlık durumunu sınıflandırmada en etkili faktör olduğunu göstermektedir. İkinci sırada 0,3456 skoruyla Yaş özelliği gelmektedir, bu da yaşın sağlık durumu üzerinde önemli bir etkisi olduğunu vurgular. Günlük Faaliyet Durumu (0,3) ve Hastalık ve Sağlık Durumu (0,24) da yüksek skorlarıyla dikkat çekmektedir, bu da bu özelliklerin sağlık durumu sınıflandırmasında önemli rol oynadığını göstermektedir. Diğer özellikler arasında Medeni Durum (0,202), Çalışma Durumu (0,203), Yaşam Faaliyet Kısıt Durumu (0,201) ve Cinsiyet (0,109) yer almaktadır. Bu sonuçlar, tüm bu özelliklerin makine öğrenmesi modellerinde girdi olarak kullanıldığını ve bireylerin genel sağlık durumunun sınıflandırılmasında etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Tütün Kullanım Durumu ve Yaş gibi değişkenlerin yüksek skorları, bu faktörlerin sağlık durumu üzerinde daha belirleyici olduğunu gösterirken, Cinsiyet ve Yaşam Faaliyet Kısıt Durumu gibi değişkenlerin daha düşük skorları, bu faktörlerin sınıflandırma üzerindeki etkisinin nispeten daha az olduğunu ima etmektedir. Bu bulgular, sağlık durumu sınıflandırma modellerinde hangi özelliklerin daha kritik olduğunu anlamada önemli bilgiler sunmaktadır. MRMR algoritması ile özellik skorları değerlendirildikten sonra, bu özelliklerin tamamı makine öğrenmesi modellerine girdi olarak verilmiş ve sınıflandırma işlemleri için tüm modeller 100 iterasyon boyunca eğitilip test edilmiştir. Şekil 9'da tüm modellerin sınıflandırma işlemlerine ilişkin eğitim ve test aşamasında, doğruluk grafikleri gösterilmektedir.

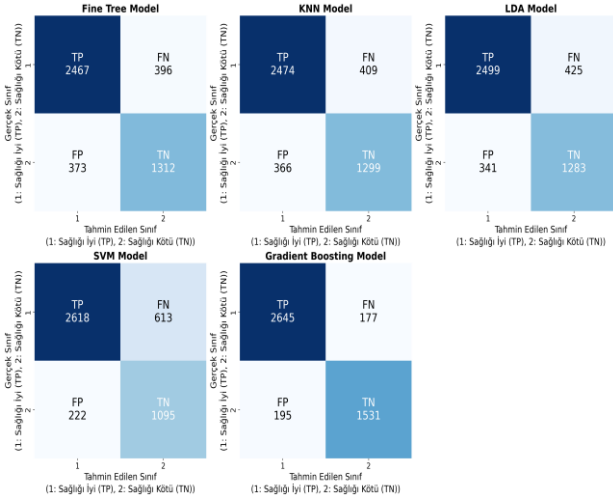


**Şekil 9.** Sınıflandırma İşleminde Kullanılan Tüm Modellerin Eğitim ve Test Doğruluk Grafikleri

Şekil 9'daki grafikler, genel sağlık durumu sınıflandırması için kullanılan modellerin eğitim ve test doğruluk oranlarını göstermektedir. Fine Tree modeli, 100 iterasyon boyunca eğitimde %83.70, testte %83.09 doğrulukla kararlı bir performans sergilemiştir. KNN modeli, 20. iterasyonda test doğruluğunda hızlı bir artış göstererek %82.96 test doğruluğuna ulaşmış, eğitim doğruluğu ise %82.99 seviyesindedir. LDA modeli, eğitimde %83.99 ve testte %83.16 doğruluk ile en yüksek eğitim doğruluğunu göstermiş, ilk 20 iterasyonda hızlı bir artışın ardından stabil bir performans sergilemiştir. SVM modeli, başlangıçta daha düşük doğrulukla başlamış, 20. iterasyona kadar hızlı bir artış göstermiş, ardından %81.66 eğitim ve %81.64 test doğruluğuyla stabil kalmıştır. En

dikkat çekici model olan Gradient Boosting modeli, ilk 10 iterasyonda hızlı bir doğruluk artışı göstererek eğitimde %92.30, testte %91.82 doğruluğa ulaşmış ve iterasyon boyunca bu yüksek doğruluk oranını korumuştur.

Bu sonuçlar, Gradient Boosting modelinin diğer modellere kıyasla daha hızlı ve yüksek doğruluk oranlarına ulaşarak genel sağlık durumu sınıflandırmasında en etkili yöntem olduğunu ve iterasyon boyunca tutarlı bir performans sergilediğini göstermektedir. Bununla birlikte, Şekil 10'da tüm modellerin test setine ilişkin sınıflandırma işlemlerine ait karışıklık matrisleri gösterilmiştir. Karışıklık matrisi, model doğruluğunu değerlendirmek için kullanılan temel ve anlaşılır metriklerden biridir (Cengil ve Çınar, 2020).



Şekil 10. Modellerin Test Sonuçlarına İlişkin Karışıklık Matrisleri

Şekil 10'da sunulan karışıklık matrisleri, beş farklı modelin (Fine Tree, KNN, LDA, SVM ve Gradient Boosting) test sonuçlarını ayrıntılı bir şekilde karşılaştırmaktadır. Fine Tree Modeli, 2467 doğru pozitif (TP) ve 1312 doğru negatif (TN) tahmin ile ortalama bir performans sergilemiştir; ancak 373 yanlış pozitif (FP) ve 396 yanlış negatif (FN) tahmin ile hatalı sınıflandırmalarda belirli bir düzeyde zayıflık göstermiştir. KNN Modeli, benzer bir performansla 2474 TP ve 1299 TN elde etmiş, ancak 366 FP ve 409 FN değerleriyle hala dikkate değer bir hata oranına sahiptir. LDA Modeli ise 2499 TP ve 1283 TN ile doğru sınıflandırma oranlarında nispeten iyi bir performans göstermiştir, fakat 341 FP ve 425 FN oranları modelin yanlış negatif sınıflandırmalarda geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. SVM Modeli, 2618 TP ve 1095 TN ile diğer modellere kıyasla en yüksek doğru pozitif tahmin oranını yakalamış; ancak 613 FN ve 222 FP ile özellikle negatif sınıfların doğru tahmin edilmesinde diğer modellere göre daha düşük bir performans sergilemiştir. Bu durum, modelin pozitif sınıflandırmalar açısından başarılı olmasına karşın, negatif sınıflandırmalarda zayıf kaldığını göstermektedir. Gradient Boosting Modeli ise 2645 TP ve 1531 TN ile en yüksek genel doğruluk oranını elde etmiştir. Sadece 195 FP ve 177 FN ile yanlış sınıflandırmaları en aza indiren bu model, özellikle hatalı sınıflandırma oranlarını azaltmada diğer modellere kıyasla belirgin bir üstünlük sağlamıştır. Bu sonuçlar, Gradient Boosting Modeli'nin diğer modellere kıyasla daha etkili bir sınıflandırma performansı sergilediğini ve genel olarak daha güvenilir sonuçlar verdiğini göstermektedir. Diğer modellerin ise özellikle yanlış negatif (FN) sınıflandırmaların azaltılması için iyileştirilmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Buna ek olarak, modellerin test performansını değerlendiren sınıflandırma raporu Çizelge 2'de sunulmuştur.

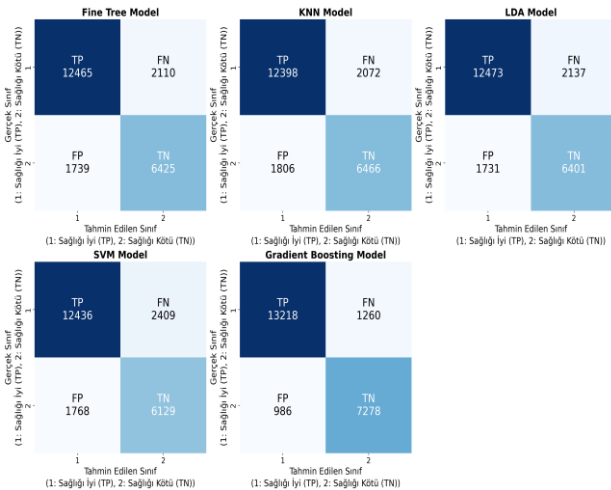
Çizelge 2. Test Sonuçları Sınıflandırma Raporu

Model	Genel Doğruluk	Sınıf	Hassasiyet	Duyarlılık	F1-skoru	Destek
Fine Tree	0.8309	1	0.8687	0.8617	0.865	2840
		2	0.768	0.7786	0.773	1708
Makro Ort.					0.8193	4548
Ağırlıklı Ort.					0.8311	4548
KNN	0.8296	1	0.8711	0.8581	0.8646	2840
		2	0.7605	0.7802	0.7702	1708
Makro Ort.					0.8174	4548
Ağırlıklı Ort.					0.8300	4548
LDA	0.8316	1	0.8799	0.8547	0.8671	2840
		2	0.7512	0.7900	0.7701	1708
Makro Ort.					0.8186	4548
Ağırlıklı Ort.					0.8325	4548
SVM	0.8164	1	0.9218	0.8103	0.8671	2840
		2	0.6411	0.8314	0.7240	1708
Makro Ort.					0.7932	4548
Ağırlıklı Ort.					0.8224	4548
GB	0.9182	1	0.9313	0.9373	0.9343	2840
		2	0.8964	0.8870	0.8917	1708
Makro Ort.					0.9130	4548
Ağırlıklı Ort.					0.9181	4548

Tablo 2'deki modellerin test sonuçlarına göre, genel sağlık durumu sınıflandırmasında Gradient Boosting modeli, %91.82 genel doğruluk oranıyla en yüksek performansı sergilemiştir. Sınıf 1 (sağlığı iyi) tahminlerinde SVM modeli, en yüksek hassasiyeti (%92.18) ve F1 skorunu (%86.71) sağlarken, LDA modeli en yüksek duyarlılığı (%87.99) göstermiştir. Sınıf 2 (sağlığı kötü) tahminlerinde ise Gradient Boosting modeli, hem hassasiyet (%89.64),

duyarlılık (%88.70) hem de F1 skoru (%89.17) açısından diğer modellere üstün gelmiştir. Genel olarak, Gradient Boosting modeli, her iki sınıfta da yüksek doğruluk, hassasiyet, duyarlılık ve F1 skoru ile en iyi performansı göstermiş, özellikle sınıf 2 tahminlerinde başarılı olmuştur. Diğer modeller de makul performans sergilemiş, ancak Gradient Boosting modeli, genel doğruluk ve dengeli sınıflandırma yetenekleriyle öne çıkmıştır.

Tablo 2'deki sonuçlara ek olarak, modellerin performansını daha güvenilir bir şekilde değerlendirmek amacıyla 5 katlı çapraz doğrulama uygulanmıştır. Çapraz doğrulama, modellerin genelleme yeteneklerini teyit etmek ve overfitting (aşırı öğrenme) sorunlarını tespit etmek için kritik bir yöntemdir. Bu yöntemle, tüm veri seti 5 eşit parçaya bölünmüş ve her seferinde bir parça test seti olarak kullanılarak model eğitilmiştir. Bu süreç 5 kez tekrarlanmış ve her bir tekrarda farklı bir bölüm test seti olarak kullanılmıştır. Böylece her modelin performansı, veri setinin farklı bölümlerinde test edilerek ortalama performans değerleri elde edilmiştir. 5 katlı çapraz doğrulama, modellerin daha geniş veri kümesi üzerindeki tutarlılıklarını ve güvenilirliklerini artırarak, sonuçların genel geçerliliğini sağlamıştır. Bu analiz, her bir modelin sadece belirli bir veri kümesi üzerinde değil, tüm veri setinde nasıl performans gösterdiğini değerlendirmeye olanak tanımıştır. Bu sayede, modellerin gerçek dünya verileri üzerinde ne kadar başarılı olabilecekleri daha iyi anlaşılabilir ve model seçimi daha doğru yapılabilir. Şekil 10'da modellerin çapraz doğrulama sonuçlarına ilişkin karışıklık matrisleri gösterilmiştir.



**Şekil 11.** Tüm Modellerin Çapraz Doğrulama Sonuçlarına İlişkin Karışıklık Matrisleri

Şekil 11'de sunulan karışıklık matrisleri, Fine Tree, KNN, LDA, SVM ve Gradient Boosting modellerinin 5 katlı çapraz doğrulama aşamasındaki performanslarını karşılaştırmaktadır. Fine Tree Modeli, 12465 doğru pozitif

(TP) ve 6425 doğru negatif (TN) tahminlerle makul bir performans sergilemiştir; ancak 1739 yanlış pozitif (FP) ve 2110 yanlış negatif (FN) tahminle, modelin hatalı sınıflandırmalarda belirli bir zayıflığa sahip olduğu görülmektedir. KNN Modeli, benzer şekilde, 12398 TP ve 6466 TN ile doğru sınıflandırmalarda başarılı olmuş, ancak 1806 FP ve 2072 FN değerleriyle hala iyileştirme gerektiren bir hata oranına sahiptir. LDA Modeli, 12473 TP ve 6401 TN ile doğru sınıflandırmalarda tutarlı bir performans göstermiş olsa da, 1731 FP ve 2137 FN değerleri, özellikle negatif sınıflandırmalar açısından modelin performansının artırılabilirliğini göstermektedir. SVM Modeli, 12436 TP ve 6129 TN değerleri ile doğru sınıflandırmalarda nispeten güçlü bir performans sergilemiş, ancak 2409 FN ve 1768 FP ile diğer modellere kıyasla daha fazla yanlış sınıflandırma yapmıştır. Bu, özellikle yanlış negatif sınıflandırmalarda modelin zayıf kaldığını ortaya koymaktadır. Gradient Boosting Modeli ise 13218 TP ve 7278 TN ile tüm modeller arasında en yüksek doğruluğa ulaşmıştır; sadece 986 FP ve 1260 FN değerleriyle diğer modellere göre çok daha düşük bir hata oranı sunmuştur. Bu sonuçlar, Gradient Boosting Modeli'nin diğer modellere kıyasla veriyi daha etkili bir şekilde modellediğini ve özellikle hatalı sınıflandırmaları minimize etmede üstün bir performans sergilediğini göstermektedir. Genel olarak, Gradient Boosting Modeli'nin, sınıflandırma doğruluğu ve hata oranlarını minimize etme açısından en başarılı model olduğu sonucuna varılabilir. Diğer modellerin ise özellikle negatif sınıfların doğru tahmin edilmesi konusunda geliştirilmesi gerekmektedir.

## 5. Sonuçlar ve Tartışma

Günümüzde sağlık sektörü, büyük veri analizi ve veri madenciliği uygulamalarıyla önemli bir dönüşüm yaşamaktadır. Sağlık istatistikleri, bu alandaki kilit bilgileri içermekte olup, doğru analiz ve sınıflandırma stratejileri kullanılarak bu verilerden elde edilen bilgiler, sağlık hizmetlerinin planlanması, hastalıkların öngörülmesi ve genel sağlık politikalarının geliştirilmesi konularında önemli katkılarda bulunabilir. Mikro veri setleri ve veri madenciliği yaklaşımları, büyük bir potansiyel taşımaktadır. Bu makalede kullanılan veri seti, birçok farklı disiplindeki araştırmacılar, analistler ve karar alıcılar için önemli bilgilere sahip bir kaynaktır.

Bu çalışma, sağlık istatistiklerinin veri madenciliği teknikleri kullanılarak analiz edilmesi ve genel sağlık durumunun makine öğrenmesi yöntemleri ile sınıflandırılması üzerine odaklanmıştır. Bu bağlamda, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından sağlanan 2022 yılı mikro verileri kullanılarak çeşitli makine öğrenmesi

modelleri değerlendirilmiştir. Çalışmanın bulguları, Gradient Boosting algoritmasının sağlık durumu sınıflandırmasında diğer modellere kıyasla üstün performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu model, yüksek doğruluk, hassasiyet, duyarlılık ve F1 skoru ile öne çıkmıştır ve özellikle sağlığı kötü olan bireylerin doğru bir şekilde tespit edilmesinde etkili olmuştur. Gradient Boosting modelinin öne çıkmasının yanı sıra, diğer modellerin performansları da dikkate değer bulunmuştur. Fine Tree, KNN, LDA ve SVM modelleri de makul doğruluk oranlarına ulaşmış, ancak Gradient Boosting modeli ile karşılaştırıldığında daha düşük performans sergilemişlerdir. Bu sonuçlar, Gradient Boosting modelinin sağlık durumu gibi karmaşık ve çok boyutlu veri setlerinde güvenilir ve doğru tahminler yapabilme kapasitesini göstermektedir.

Bu çalışmanın sonuçları, çeşitli demografik ve sosyal faktörlerin bireylerin genel sağlık durumları üzerinde belirgin etkileri olduğunu göstermektedir. Yaş, cinsiyet, medeni durum, tütün kullanımı ve çalışma durumu gibi değişkenler, sağlık durumu üzerinde önemli rol oynamaktadır. Özellikle tütün kullanımının azaltılması ve yaşam tarzı değişiklikleri konusunda politika yapıcılar ve sağlık profesyonelleri için faydalı veriler sunulmaktadır. Bunun yanı sıra, bulgular, sağlık eğitimi programlarının geliştirilmesi ve hedeflenen müdahaleler için bir temel oluşturabilir. Örneğin, yaşlı bireyler ve kronik rahatsızlıkları olanlar için özel sağlık hizmetleri ve destek programları tasarlanabilir. Ayrıca, genç yetişkinler ve çalışan nüfus için sağlıklı yaşam tarzı alışkanlıkları teşvik eden kampanyalar düzenlenmelidir.

Öte yandan, literatürde yer alan ve bu çalışmada incelenen makaleler, sağlık sektöründe veri madenciliği ve sınıflandırma yöntemlerinin çeşitli uygulamalarını ele almaktadır. Örneğin, biyomedikal veri kümeleri üzerinde farklı makine öğrenmesi algoritmalarının etkinliğinin karşılaştırıldığı çalışmalar, sağlık sigortası dolandırıcılığının tespiti için algoritmaların kullanıldığı analizler, ve farklı demografik faktörlerin sağlık hizmeti talebi üzerindeki etkisini inceleyen araştırmalar bulunmaktadır. Ayrıca, sosyo-ekonomik faktörlerin sağlık ihtiyaçlarına etkilerini belirlemeye yönelik çalışmalar ve Gradient Boosting yöntemi kullanılarak yapılan sınıflandırma analizleri gibi çeşitli konulara değinilmiştir. Literatürde yapılan diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında, bu çalışma, Gradient Boosting algoritmasının sağlık istatistikleri veri setlerinde etkili bir sınıflandırma aracı olduğunu doğrulamaktadır. Örneğin, Akbar ve arkadaşlarının (2020) sağlık sigortası dolandırıcılığı tahmininde, Wang ve arkadaşlarının (2022) petrokimya tesislerinin insan sağlığı üzerindeki risklerini tespit etmede, ve Theerthagiri ve Vidya'nın (2022)

kardiyovasküler hastalık tahmininde Gradient Boosting algoritmasının üstün performans gösterdiği çalışmalarla uyumlu bulgular elde edilmiştir.

Bu çalışma, sağlık alanında makine öğrenmesi ve veri madenciliği tekniklerinin uygulanabilirliğini ortaya koymaktadır. Özellikle Gradient Boosting modelinin sağlık verilerinde yüksek performans göstermesi, literatürdeki benzer çalışmalara paralel olarak değerlendirilebilir. Örneğin, Kardiyotokogram verileri kullanılarak fetal sağlığın sınıflandırılması, XGBoost'un en yetkin sınıflandırıcı olarak ortaya çıktığını ve birden fazla metrikte sürekli olarak diğerlerinden daha iyi performans gösterdiğini tespit eden araştırmacılar tarafından araştırılmıştır (Alkurdi, 2024). Bu çalışma, fetal sağlık takibinde devrim yaratarak fetal koşulların daha güvenilir ve objektif bir şekilde değerlendirilmesini sağlayan makine öğrenimi vaadinin altını çizmektedir. Sağlık sonuçlarının tahmin edilmesinde makine öğreniminin uygulanması, Etiyopya'da beş yaş altı çocukların yetersiz beslenmesine odaklanan Fenta vd. (2021)'in çalışmasıyla da desteklenmektedir. Çalışmada, beslenme durumunun belirleyicilerini tespit etmek için rastgele orman sınıflandırıcıları kullanılmış ve bu da makine öğreniminin halk sağlığı araştırmalarındaki etkinliğini ortaya koymuştur (Fenta vd., 2021). Bulgular, sosyo-ekonomik faktörlerin çocuk sağlığı sonuçlarını etkilemedeki önemini vurgulamaktadır. Bu çalışmalar, mevcut çalışmanın sonuçlarını desteklemekte ve makine öğrenmesi tekniklerinin sağlık verileri üzerinde uygulanabilirliğini güçlendirmektedir.

Bu çalışmanın bulguları, politika yapıcılar ve sağlık profesyonelleri için önemli çıkarımlar sunmaktadır. Tütün kullanımının azaltılması, sağlıklı yaşam tarzı alışkanlıklarının teşvik edilmesi ve yaşlı bireyler ile kronik hastalıkları olanlara yönelik özel sağlık hizmetleri ve destek programları tasarlanması gerekmektedir. Ayrıca, genç yetişkinler ve çalışan nüfus için sağlıklı yaşam tarzı alışkanlıklarını teşvik eden kampanyalar düzenlenmeli ve sağlık eğitimi programları geliştirilmelidir. Bu politikalar, toplum sağlığının iyileştirilmesine ve sağlık hizmetlerinin daha verimli kullanılmasına katkı sağlayacaktır.

Çalışmanın bazı kısıtlılıkları bulunmaktadır. Veri seti yalnızca belirli demografik ve sosyo-ekonomik değişkenleri içermektedir, bu nedenle daha geniş kapsamlı verilerin analizi ile sonuçlar daha da güçlendirilebilir. Ayrıca, çalışmada yalnızca belirli makine öğrenmesi modelleri değerlendirilmiştir; farklı ve daha yeni algoritmaların kullanımı ile daha yüksek performans elde edilebilir. Gelecek çalışmalarda, farklı veri setlerinin ve daha geniş değişken yelpazesinin kullanılması, ayrıca

derin öğrenme yöntemlerinin dahil edilmesi önerilmektedir. Bu yaklaşımlar, sağlık durumunun daha doğru ve kapsamlı bir şekilde sınıflandırılmasına olanak tanıyacaktır. Bununla birlikte, bu faktörlerin sağlık üzerindeki etkilerini daha derinlemesine incelemeli ve özellikle düşük sağlık durumu bildiren gruplara yönelik müdahaleleri geliştirmek hedeflenmelidir. Ayrıca, farklı yaş grupları için sağlık hizmetlerine erişim ve kullanımını iyileştirmeye yönelik politikaların oluşturulması gerekmektedir. Sonuç olarak, bu çalışma, veri madenciliği ve makine öğrenmesi tekniklerinin sağlık sektöründe ne denli etkili olabileceğini göstermiş ve Gradient Boosting algoritmasının genel sağlık durumu sınıflandırmasında üstün performansını ortaya koymuştur. Bu bulgular, sağlık politikalarının geliştirilmesi ve halk sağlığı programlarının iyileştirilmesi için değerli bilgiler sunmaktadır.

#### **Etik Standartlar Bildirgesi**

Bu çalışmanın hazırlanma sürecinde bilimsel ve etik ilkelere uyulduğu ve yararlanılan tüm çalışmaların kaynakçada belirtildiği beyan olunur.

#### **Yazarlık Katkı Beyanı**

Yazar 1: Kavramsallaştırma, Veri İyileştirme, Analiz ve Yorumlama, Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak  
Yazar 2: Araştırma, Fikir Sahibi, Analiz ve Yorumlama, Doğrulama, Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak,  
Yazar 3: Metodoloji, Doğrulama, Biçimsel Analiz, Görselleştirme, Denetleme, Yazma – orijinal taslak

#### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

#### **Verilerin Kullanılabilirliği/ Data Availability**

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

## **6. Kaynaklar**

- Abdullah, D. M., & Abdulazeez, A. M. (2021). Machine learning applications based on SVM classification a review. *Qubahan Academic Journal*, **1(2)**, 81-90.
- Akbar, N. A., Sunyoto, A., Arief, M. R., & Caesarendra, W. (2020). *Improvement of Decision Tree Classifier Accuracy for Healthcare Insurance Fraud Prediction by Using Extreme Gradient Boosting Algorithm*. 2020 International Conference on Informatics, Multimedia, Cyber and Information System (ICIMCIS), Jakarta, Indonesia, pp. 110-114. IEEE.
- Alkurdi, A. and Abdulazeez, D. A. M., 2024. Comprehensive classification of fetal health using cardiocogram data based on machine learning. *Indonesian Journal of Computer Science*, **13(1)**.  
<https://doi.org/10.33022/ijcs.v13i1.3718>.
- Alptekin, N., & Yeşilaydın, G., 2015. OECD ülkelerinin sağlık göstergelerine göre bulanık kümeleme analizi ile

sınıflandırılması. *İşletme Araştırmaları Dergisi*, **7(4)**, 137-155.

- Altıntaş YY. 2010. Veri madenciliğinin tıpta kullanımı ve bir uygulama: hemodiyaliz hastaları için risk seviyelerine göre risk faktörlerinin etkileşimlerinin incelenmesi. Ulusal Tez Merkezi, 269710: 1-3.
- Bentéjac, C., Csörgő, A., & Martínez-Muñoz, G. 2021. A comparative analysis of gradient boosting algorithms. *Artificial Intelligence Review*, **54**, 1937-1967.
- Bisht, R. K., & Bisht, I. P. (2022). *Investigation of the Role of Test Size, Random State, and Dataset in the Accuracy of Classification Algorithms*. International Conference on Communication and Intelligent Systems, Singapore, pp. 715-726. Springer Nature Singapore.
- Cengil, E. & Çınar A., 2020. Göğüs Verileri Metrikleri Üzerinden Kanser Sınıflandırılması, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, **11(2)**, ss. 513-519.
- Cheng, D., Zhang, S., Liu, X., Sun, K., & Zong, M., 2017. Feature selection by combining subspace learning with sparse representation. *Multimedia Systems*, **23**, 285-291.
- Chung, J., & Teo, J., 2023. Single classifier vs. ensemble machine learning approaches for mental health prediction. *Brain informatics*, **10(1)**, 1-10.
- Çiçek, A. ve Arslan, Y., 2020. Müşteri Kayıp Analizi İçin Sınıflandırma Algoritmalarının Karşılaştırılması. *İleri Mühendislik Çalışmaları Ve Teknolojileri Dergisi*, **1(1)**, 13-19.
- Doğan, E., 2020. Gelir Düzeyi ve Sağlık Hizmet Talebi İlişkisi: Mikro Veriler ile Türkiye Örneği. *MANAS Sosyal Araştırmalar Dergisi*, **9(4)**, 2376-2392.  
<https://doi.org/10.33206/mjss.705718>
- Estévez, P. A., Tesmer, M., Perez, C. A., & Żurada, J. M. 2009. Normalized mutual information feature selection. *IEEE Transactions on Neural Networks*, **20(2)**, 189-201.  
<https://doi.org/10.1109/tnn.2008.2005601>
- Fenta, H. M., Zewotir, T., & Muluneh, E. K. 2021. A machine learning classifier approach for identifying the determinants of under-five child undernutrition in ethiopian administrative zones. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, **21(1)**, 291.  
<https://doi.org/10.1186/s12911-021-01652-1>.
- Genç, B. U. G., & Kurutkan, M. N. (2021). Eşitsizlik Bağlamında Karşılanmayan Sağlık İhtiyacı: Türkiye Sağlık Araştırması Verilerinden Kanıtlar. *SDÜ Sağlık Yönetimi Dergisi*, **3(1)**, 34-51.
- Guo, G., Wang, H., Bell, D., Bi, Y., & Greer, K. (2003). *KNN Model-Based Approach in Classification*. OTM Confederated International Conferences, CoopIS, DOA, and ODBASE 2003, Catania, Sicily, Italy,



- November 3-7, 2003, pp. 986-996. Springer Berlin Heidelberg.
- Hossin M., and Sulaiman M. N., (2015). A review on evaluation metrics for data classification evaluations, *International Journal of Data Mining & Knowledge Management Process*, **5(2)**, ss. 1.
- Karaca İ. (2015). Büyük Veri Analizlerinin Kurumsal Faaliyetlerde Kullanım Alanları, Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Bilgi ve Belge Yönetimi Bölümü, Ankara.
- Karakoyun, M., & Hacibeyoğlu, M. (2014). Biyomedikal Veri Kümeleri İle Makine Öğrenmesi Sınıflandırma Algoritmalarının İstatistiksel Olarak Karşılaştırılması. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, **16(48)**, 30-42.
- Kaya, I. (2021). Comparison of spectral and template matching features for ssvp bci target frequency classification. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, **9(2)**, 64-68. <https://doi.org/10.18201/ijisae.2021.235>.
- Kayakuş, M. & Yiğit Açıkgöz, F. (2023). Twitter'da Makine Öğrenmesi Yöntemleriyle Sahte Haber Tespiti. *Abant Sosyal Bilimler Dergisi*, **23(2)**, 1017-1027. <https://doi.org/10.11616/asbi.1266179>
- Kızgın, M. S., Çambay, Z., Sepet, H., Özçelik, S. T. A., & Uyanık, H. (2023). Onobrychis Bitkisine Ait Meyve Tiplerinin Makine Öğrenmesi Yaklaşımıyla Sınıflandırılması. *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, **35(2)**, 87-96.
- Koçak, A., & Ergün, M. A. (2023). Sağlıkta veri kalitesi ve veri madenciliği uygulamaları. *Disiplinlerarası Yenilik Araştırmaları Dergisi*, **3(1)**, 23-30.
- Koyuncugil, A., & Özgülbaş, N. (2009). Veri madenciliği: Tıp ve sağlık hizmetlerinde kullanımı ve uygulamaları. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, **2(2)**, 21-32
- Mandelkow, H., De Zwart, J. A., & Duyn, J. H. (2016). Linear discriminant analysis achieves high classification accuracy for the BOLD fMRI response to naturalistic movie stimuli. *Frontiers in human neuroscience*, **10**, 128.
- Mayr, A., Binder, H., Gefeller, O., & Schmid, M. (2014). The evolution of boosting algorithms. *Methods of information in medicine*, **53(6)**, 419-427.
- Peng, H., Long, F., & Ding, C. (2005). Feature selection based on mutual information criteria of max-dependency, max-relevance, and min-redundancy. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **27(8)**, 1226-1238. <https://doi.org/10.1109/tpami.2005.159>
- Rathi, V. P., & Palani, S. (2012). Brain tumor MRI image classification with feature selection and extraction using linear discriminant analysis. arXiv preprint arXiv:1208.2128.
- Stein, G., Chen, B., Wu, A. S., & Hua, K. A. (2005). Decision Tree Classifier for Network Intrusion Detection with GA-Based Feature Selection. 43rd Annual Southeast Regional Conference, Kennesaw, GA, USA, pp. 136-141.
- Subasi, A., & Gursoy, M. I. (2010). EEG signal classification using PCA, ICA, LDA and support vector machines. *Expert systems with applications*, **37(12)**, 8659-8666.
- Terzi, M. (2019). Türkiye'de Sağlık Sektöründe Veri Madenciliği Kullanım Alanları. *Black Sea Journal of Health Science*, **2(2)**, 45-48.
- Theerthagiri, P., & Vidya, J. (2022). Cardiovascular disease prediction using recursive feature elimination and gradient boosting classification techniques. *Expert Systems*, **39(9)**, e13064.
- Tripathi, A., Kumar, K., Misra, A., & Chaurasia, B. K. (2023). Colon Cancer Tissue Classification Using ML. 6th International Conference on Information Systems and Computer Networks (ISCON), Mathura, India, pp. 1-6.
- Türkiye Sağlık Araştırması 2022 Yılı Mikro Veri Seti, (2023). Yayın No: 4702, ISBN: 978-625-8368-43-7, Yayın Tarihi: Temmuz 2023, *Türkiye İstatistik Kurumu*, Ankara.
- Wang, M., Li, X., Lei, M., Duan, L., & Chen, H. (2022). Human health risk identification of petrochemical sites based on extreme gradient boosting. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **233**, 113332.
- Worth, A. P., & Cronin, M. T. (2003). The use of discriminant analysis, logistic regression and classification tree analysis in the development of classification models for human health effects. *Journal of Molecular Structure: THEOCHEM*, **622(1-2)**, 97-111.
- Wu, J., Song, L., Wang, T., Zhang, Q., & Yuan, J. (2020). *Forest r-cnn: large-vocabulary long-tailed object detection and instance segmentation*. 28th ACM International Conference on Multimedia, Seattle, WA, USA (Online).
- Wu, X., Kumar, V., Ross Quinlan, J., Ghosh, J., Yang, Q., Motoda, H., ... & Steinberg, D. (2008). Top 10 algorithms in data mining. *Knowledge and information systems*, **14**, 1-37.
- Xu, X., Lin, M., & Xu, T. (2022). Epilepsy seizures prediction based on nonlinear features of EEG signal and gradient boosting decision tree. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **19(18)**, 11326.
- Yıldıztepe, E. ve Kocataş, A. (2018). Türkiye işgücü verilerinin karar ağacı yöntemleriyle analizi. *Çankırı Karatekin Üniversitesi İİBF Dergisi*. **8** (2), 91-114.
- Yılmaz, E. (2012). İstatistiksel Analiz Yöntemi Olarak Veri Madenciliğinde Chaid Algoritması ve Türkiye'de İşgücü Piyasasının Durumunun Ve Bunun Nedenlerinin Belirlenmesine İlişkin Bir Uygulama, Yüksek Lisans



Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Ana Bilim Dalı, İstanbul.

Yin, H., Sharma, B., Hu, H., Liu, F., Kaur, M., Cohen, G., ... & Eckel, S. P. (2024). Predicting the climate impact of healthcare facilities using gradient boosting machines. *Cleaner Environmental Systems*, **12**, 100155.

Yongcharoenchaiyasit, K., Arwatchananukul, S., Temdee, P., & Prasad, R. (2023). Gradient Boosting Based Model for Elderly Heart Failure, Aortic Stenosis, and Dementia Classification. *IEEE Access*. **11**, 48677-48696,  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3276468>

Yu, H., & Kim, S. (2012). SVM Tutorial-Classification, Regression and Ranking. *Handbook of Natural computing*, **1**, 479-506.

Yue, S., Li, P., & Hao, P. (2003). SVM classification: Its contents and challenges. *Applied Mathematics-A Journal of Chinese Universities*, **18**, 332-342.

Zhou, H., Wang, X., & Zhang, Y. (2020). Feature selection based on weighted conditional mutual information. *Applied Computing and Informatics*, **20**(1/2), 55-68.  
<https://doi.org/10.1016/j.aci.2019.12.003>



## DAC: Differentiable Auto-Cropping in Deep Learning

### DAC: Derin Öğrenmede Türevlenebilir Oto-Kırpma

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 30.04.2024

Kabul/Accepted: 01.09.2024

Yayımlandı/Published: 02.12.2024

Ahmet Esad TOP<sup>1\*</sup>, Mustafa YENİAD<sup>2</sup>, Mahmut Sertaç ÖZDOĞAN<sup>3</sup>, Fatih NAR<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ASELSAN, Corporate Management Directorate, IT Department, Ankara, Turkey

<sup>2</sup>Ankara Yıldırım Beyazıt University, Department of Computer Engineering, Ankara, Turkey

<sup>3</sup>Ankara Yıldırım Beyazıt University, Department of Prosthodontics, Ankara, Turkey

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

Bir görüntünün sınırlarını ilgi alanına odaklanacak şekilde otomatik olarak ayarlama işlemi olan oto-kırpma, panoramik diş radyografilerinin teşhis kalitesinin iyileştirilmesi açısından çok önemlidir. Önemi, minimum bilgi kaybıyla farklı girdi görüntülerinin boyutunu standartlaştırma yeteneğinde yatmaktadır, böylece tutarlılık sağlanmakta ve sonraki görüntü işleme görevlerinin performansı iyileştirilmektedir. Çalışmaların birçoğunda CNN'ler yaygın olarak kullanılmasına rağmen, farklı boyutlardaki görüntüler için oto-kırpma kullanan araştırmalar sınırlı kalmaktadır. Bu çalışma, panoramik diş radyografilerinde türevlenebilir oto-kırpma kullanmanın potansiyelini araştırmayı amaçlamaktadır. Çalışmada, çoğunlukla 2836×1536 veya buna yakın çözünürlüklü, 3 diş hekimi tarafından beş farklı sınıfa bölünmüş 20.973 panoramik diş radyografisinden oluşan benzersiz bir veri kümesi kullanıldı; bu, önceki çalışmadaki aynı veri kümesidir (Top et al. 2023). Değerlendirme için bu veri kümesine en başarılı sonucu veren ResNet-101 modeli kullanıldı (Top et al. 2023). Varyansı azaltmak için, hem oto-kırpma olan hem de oto-kırpma olmayan eğitimlere 10 kat çapraz doğrulama kullanılarak model değerlendirildi. Daha doğru ve sağlam sonuçlara ulaşmak için veri artırma yöntemi de kullanıldı. Veri artırma, oto-kırpma olan eğitim için, oto-kırpma olmayan eğitime göre çok daha az etkili olacak şekilde ayarlandı. Veri kümesiyle ilgili sorunları azaltmak için geliştirilen önerilen oto-kırpma optimizasyonu sayesinde doğruluk %1,8 artarak %92,7'den %94,5'e çıktı. Makro ortalama AUC'si de 0,989'dan 0,993'e yükseldi. Önerilen oto-kırpma optimizasyonu, uçtan uca bir CNN'de eğitilebilir bir ağ katmanı olarak uygulanabilir ve diğer problemler için de kullanılabilir. Doğruluğu %92,7'den %94,5'e çıkarmak, iyileştirme için çok az alan kaldığından, azalan faydalar kanununa da bağlı olarak çok zorlu bir iştir. Sonuçlar, önerilen türevlenebilir oto-kırpma algoritmasının potansiyelini göstermekte ve farklı alanlarda kullanımını teşvik etmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Bilgisayar destekli teşhis; CNN; Türevlenebilir kırpma; Gradyan yükselme; Panoramik radyografi.

#### Abstract

Auto-cropping, the process of automatically adjusting the boundaries of an image to focus on the region of interest, is crucial to improving the diagnostic quality of dental panoramic radiographs. Its importance lies in its ability to standardize the size of different input images with minimal loss of information, thus ensuring consistency and improving the performance of subsequent image-processing tasks. Despite the widespread use of CNNs in many studies, research on auto-cropping for different-sized images remains limited. This study aims to explore the potential of differentiable auto-cropping in dental panoramic radiographs. A unique dataset of 20,973 dental panoramic radiographs, mostly with a resolution of 2836×1536 or close, divided into five classes by 3 dentists, was used, which is the same dataset from the previous study (Top et al. 2023). ResNet-101 model, which was the most successful network for the dataset (Top et al. 2023), was used for the evaluation. To reduce variance, the model was evaluated using 10-fold cross-validation for both non-auto-cropped and auto-cropped trainings. Data augmentation was also used to produce more accurate and robust results. For auto-cropped training, it was adjusted to be much less effective than the non-auto-cropped one. Accuracy was improved by 1.8%, from 92.7% to 94.5%, thanks to the proposed auto-crop optimization developed to reduce dataset-related issues. Its macro-average AUC was also raised from 0.989 to 0.993. The proposed auto-crop optimization can be implemented as a trainable network layer in an end-to-end CNN and can be used for other problems as well. Increasing the accuracy from 92.7% to 94.5% is a very challenging task due to diminishing returns, as there is little room for improvement. The results show the potential of the proposed differentiable auto-crop algorithm and encourages its use in different fields.

**Keywords:** Computer aided diagnosis; Convolutional Neural Networks; Differentiable cropping; Gradient ascent; Panoramic radiograph.

#### 1. Introduction

There has been a significant transformation in the computer vision society in recent years, mostly driven by the widespread acceptance and application of Convolutional Neural Networks (CNNs) (LeCun et al. 1998). The CNNs have proven to be a fast, adaptable,

scalable, comprehensive, and end-to-end learning approach that moves the field forward (Jaderberg et al. 2015). Input limitations on size are present in many current Neural Network (NN) models used in computer vision (He et al. 2016, Krizhevsky et al. 2012, Simonyan and Zisserman 2014, Zeiler and Fergus 2014). However, the conventional strategy is uniformly downsampling for

the intended input size, which is lower than the images in the dataset (Recasens et al. 2018). In many circumstances, uniform downsampling is straightforward and efficient, but it can be lossy for tasks when the aspect ratio is crucial and the RoI projection is on a small portion. Significant advancements have been made in Computer-Aided Diagnosis (CAD) recently (Demir et al. 2023, Fidan et al. 2019, Katsumata 2023, Kemal and Kılıçarslan 2021, Kohinata et al. 2023, Yurttakal and Baş 2021). Manually extracted features along with learning methods were used in traditional CAD systems, including pattern recognition algorithms, to transform them into decisions (Shin et al. 2016). The evolution from rule-based to learning-based solutions was realized by Artificial Intelligence (AI) and further advanced by Deep Learning (DL) (Çelik and Çelik 2022, Kooi et al. 2017). This study applied the proposed auto-cropping method on a unique dental radiography dataset (Top et al. 2023) in a DL training for a CAD system.

When a few teeth are missing from the mouth, restorations like dental bridges and crowns are utilized to fill the gap (Sakaguchi and Powers 2012, Top 2023). Radiographs are an essential diagnostic tool since these restorations are not usually evident during a conventional clinical examination (Top et al. 2023, White et al. 2001). Restorations must be precisely detected and identified to stop several problems in oral health (Liedke et al. 2015, Top 2023). Panoramic X-ray is a useful radiography type and a valuable diagnostic tool for dental and oral health disorders as they provide a complete and exhaustive image (i.e., a full image of the whole jaw and teeth in a single image) of the oral anatomy (Corbet et al. 2009, Scarfe and Farman 2008).

Although panoramic radiography is a very valuable diagnostic tool, it is prone to significant and unforeseen geometric anomalies. Furthermore, the specific jaw curvature and posture of patients may result in differences in the generated image (Choi 2011, Top 2023). The NN training of panoramic radiographs presents a unique set of difficulties due to their comprehensive nature, capturing not only the teeth but also the chin, spine, and jaws, as mentioned in (Jader et al. 2018). As a result, it becomes difficult to set just one fixed position that applies to the entire dataset for the intended Region of Interest (RoI). One approach to overcome this difficulty is to extract the RoI from the image automatically. Thus, auto-cropping eliminates the problem of image variability and allows the model to focus on the most relevant parts of the images, which is crucial for improving model accuracy and diagnostic performance.

Additionally, while the dataset is extensive, data augmentation is necessary to enhance the robustness and generalizability of deep learning models. Data augmentation techniques, such as random rotations, shifts, and flips, introduce variability that helps the model learn to generalize better to unseen data. This is particularly important for reducing overfitting and improving the model's performance on the test set by simulating real-world uncertainties and variations.

This study aims to uncover the potential of the previously studied unique dataset (Top et al. 2023) by using differentiable auto-crop optimization, which is utilized in CNNs to detect the quantitative level of dental restorations. We propose a novel Differentiable Auto-Cropping (DAC) technique for automatically selecting the bounding box and then cropping the RoI by tweaking the gradient ascent optimization independently for each input picture. The proposed auto-crop algorithm was developed with the dataset (Top et al. 2023) in (Top 2023) to alleviate dataset-related issues. Hence, it aims to improve the training performance of the dataset by using auto-crop.

## 2. Related Work

In computer vision systems, auto-cropping is essential (Chen et al. 2016) because it allows for the autonomous separation of meaningful sections from images. A few methods have been proposed to address the challenge of end-to-end image cropping or downsampling after localizing (Dai et al. 2016a, Han et al. 2019, Jaderberg et al. 2015, Liang et al. 2022, Recasens et al. 2018, Riad et al. 2022, Rippel et al. 2015). In recent studies, Spatial Transformer Networks (STNs) (Jaderberg et al. 2015) were employed for image transformation and cropping operations, and they were usually trained in two stages. However, some end-to-end systems are also available, such as (Liang et al. 2022), which employed two stages. Locating the vertebrae and segmenting the entire spine were done in the first stage. Then, a regression network predicted the orientations of the localized vertebrae in the second stage. A differentiable cropping was employed for moving data between stages that were intended to closely connect both phases, and this was called as "inter-stage transfer method" in the study. The approach introduced in the study, which includes two steps with the localization of several bounding boxes inside a single image for cropping and sending to the regression network, cannot be applied to other tasks as it is designed as task-specific. It is based on supervised learning and requires ground-truth bounding boxes for training, but our study can operate under unsupervised learning as

well as supervised learning and does not require ground-truth bounding boxes for training. Additionally, the RoI Align pooling layer (He et al. 2017) was employed to differentiate the cropping process, as this layer gathers the information from the outputs of localization and segmentation networks rather than using the raw input. However, our proposed method works on the raw input.

To reduce computational complexity and provide some shift-invariance, CNNs frequently use a variety of downsampling operators, such as strided convolutions or pooling layers, that gradually reduce the resolution of intermediate features (Riad et al. 2022). According to (Riad et al. 2022), the first downsampling layer with differentiable strides was proposed by employing both the spatial and frequency domains, much like (Rippel et al. 2015). As opposed to (Rippel et al. 2015), which optimizes a fixed bounding box updated by a stride parameter, their solution employs backpropagation to learn the size of the bounding box. Our study is similar to (Riad et al. 2022), as it also determines the bounding box area itself. Additionally, (Dai et al. 2016a) presented one of the major advances in differentiable semantic segmentation. They created a differentiable pooling layer known as the "RoI Warping Layer" that uses interpolation on the feature maps of the preceding layer and reduces the size for the next layer. Instead of downsampling the input image right after the input layer, all three strategies (Dai et al. 2016a, Riad et al. 2022, Rippel et al. 2015) focused on intermediate layers. However, our proposed method downsamples (i.e., crops) the input image that is fed to the NN in the first place. (Han et al. 2019) conducted a study to develop a specialized layer (i.e., for detecting people) that can transform RoI in a differentiable and supervised manner. This layer aims to identify specific objects (i.e., individuals) from the input data. It is important to note that this approach relied on supervised learning and was primarily designed for object detection tasks. The detector employed in the approach was trained alone using state-of-the-art techniques (Dai et al. 2016b, Girshick 2015, He et al. 2017, Ren et al. 2015) and detecting the bounding boxes required supervised learning. The weakness of the need for supervision is the point that inspired this study, as our proposed method does not require such supervision.

The end-to-end auto-cropping applicability logic described in this study bears a striking resemblance to the end-to-end concept implemented by (Recasens et al. 2018). A saliency-based non-uniform distortion layer for CNNs that improves spatial sampling for specific tasks was introduced. This layer integrates seamlessly into existing networks and enhances task performance by selectively

preserving important information from high-resolution data. However, it should be emphasized that our auto-cropping technique uniformly downsamples the input, and therefore the employed approaches are different. In their groundbreaking work, Jaderberg et al. introduced the notion of spatial transformers, a learnable module that empowers CNNs with the ability to manipulate data spatially (Jaderberg et al. 2015). Explicit transformations of feature maps, including scaling, rotation, translation, and even non-rigid deformations, can be done by the module. A spatial manipulation inside a CNN was accomplished by both the STNs and our algorithm but with a different focus. Our algorithm wasn't built to achieve broad (general) spatial invariance; instead, it was made for RoI selection and cropping. Moreover, a differentiable pre-processing stage (i.e., *max - min* pooling) and the optimization part were brought together to feed downsampled and clarified inputs (i.e., in terms of regional variability (Liu et al. 2020)) to the optimization in our algorithm.

Jiang et al. described a major drawback of bilinear interpolation, which is quite localized by considering only the four nearest pixels (i.e., causes gradients to be affected only by the intensity differences between these nearby pixels) (Jiang et al. 2019), which was the essential part of the spatial transformer module (Jaderberg et al. 2015). In an effort to alleviate this limitation, (Jiang et al. 2019) introduced an approach that transforms the sampling part through the inclusion of randomly generated auxiliary sample locations (i.e., by making bilinear sampling on those locations later on), thereby achieving a more linear approximation. Despite providing a broader context for local transformations, the optimization remains unaffected by all pixels in the input image. In contrast, our proposed auto-crop optimization takes every pixel into account, some with minimal impact (but never completely ignored), as observed in the two related studies.

### 3. Materials and Methods

#### 3.1. Dataset

The study utilized a retrospective dataset (Top et al. 2023) from Ankara Yıldırım Beyazıt University (AYBU) Tepebaşı Oral and Dental Health Training Hospital, which was conducted in accordance with approved protocols by the AYBU non-drug ethics committee with the permission date of 19/04/2019 (file number: 2019-12). The study followed the criteria established in the Helsinki Declaration of 1964 as well as the updated version from 2013.

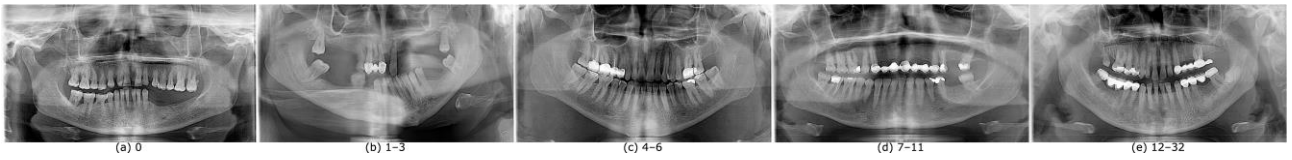


Figure 1. A sample from each class (Top et al. 2023)

Table 1. The classes and details (Top 2023, Top et al. 2023)

# of Restorations	# of Samples (%)	Category Name
0	4248 (20.25%)	No restoration
1-3	4231 (20.17%)	Low-level-restoration
4-6	4227 (20.16%)	Mid-level-restoration
7-11	4253 (20.28%)	High-level-restoration
12-32	4014 (19.14%)	Very High-level-restoration

The collection contains 20,973 panoramic radiographs in total, and each one is unique even if taken from the same person, pose angle, exposure time, different contrast and brightness values, and passed time between the shots leads this uniqueness). The dataset was obtained retrospectively from the Tepebaşı Oral and Dental Health Training Hospital's Picture Archiving Communication System (PACS) using the Infinitt PACS, developed by Infinitt Co. in Seoul, Korea. Filming was done with two different Planmeca ProMax X-ray devices (Planmeca, Helsinki, Finland). Three dentists labeled the dataset into five classes in consensus according to fixed dentures that included crowns and bridges. Details about the categories and number of samples can be seen in Table 1. Also, a sample from each class is depicted in Figure 1.

The dataset does not consist of single-resolution images, but there are two sets of resolution, most of which are grouped there. 44% of the total images have a resolution of  $2836 \times 1536$  and 37% of the total images have a resolution of  $2860 \times 1536$ . 17% of the images were stored in 16, 24, or 32-bit format, and they were converted into 8-bit depth grayscale images. The proposed auto-crop method finds the RoI and resizes the image to a desired size (i.e., using bi-linear interpolation and preserving the aspect ratio of the original input), so the variable resolution of the dataset is not so important. In other words, the proposed method somehow brings scale-invariance.

As mentioned, during the pre-processing phase, the images were converted to single-channel grayscale. For non-auto-cropped training, they are resized to  $224 \times 224$  pixels (i.e., the aspect ratio was corrupted). In contrast, the experiment using the auto-crop algorithm reproduces

the inputs at a fixed resolution of  $200 \times 370$  pixels (i.e., according to the desired aspect ratio and resolution of the input images), where the width is 370px; so no additional resizing is needed.

Apart from these, image augmentation settings tried to be defined not to lose parts of the RoI (see Figure 2) for non-auto-cropped experiments. However, since each person and each X-ray shot is unique and there is no single RoI location for all, these settings still apply an excessive augmentation for some samples. Translating and rotating without knowing the midpoint of the RoI causes problems such as the appearance of no-data (black) regions as a result of excessive augmentation, which reduces the efficiency of the data set as very large regions are no-data.

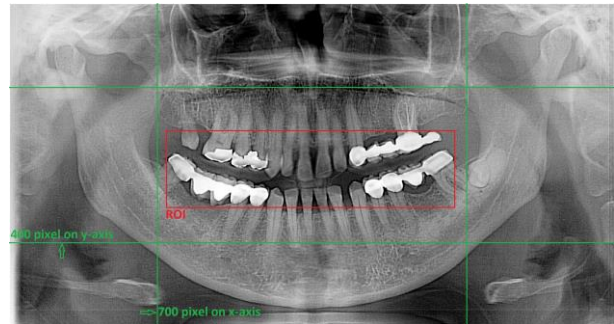


Figure 2. The image translation process and RoI (Top et al. 2023)

The auto-crop algorithm downsampled images into a single and desired resolution (i.e.,  $370 \times 200$ ), so the setting for the augmentation needed to be changed. Also, the reproduced dataset has lost some tissues (i.e., explained in the first section) other than the oral region, so the excessive augmentation (i.e., in terms of percentage) would damage the accuracy a lot. Therefore, a reasonable (i.e., not excessive) augmentation (i.e., random translation between  $-26$  to  $26$  pixels on the  $x$ -axis and  $-14$  to  $14$  pixels on the  $y$ -axis, random reflection on the  $x$ -axis, random rotation with an angle between  $-7$  to  $7$  degrees, random scaling with a factor between  $0.97$  to  $1.03$ , and random shearing over an angle between  $0$  to  $2$  degrees) was employed for the auto-cropped experiment.

In an X-ray film, teeth and bones appear lighter than cheeks and gums due to the absorption of the X-rays (Fitzgerald 2000, Top 2023). Similarly, dental restorations like crowns and bridges appear lighter than the teeth as they are radiopaque (Pröbster and Diehl 1992, Top et al.

2023). This feature makes the grayscale image of dental restorations learnable by CNN and detectable by the auto-crop algorithm (i.e., not just restorations but teeth as well).

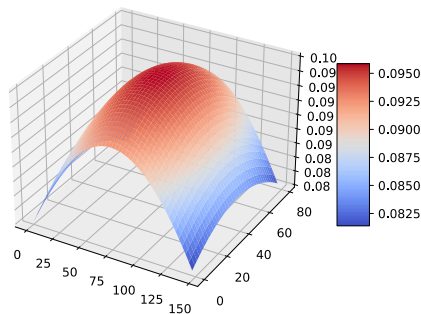
### 3.2. Auto-Crop

The proposed auto-crop algorithm relies on gradient ascent optimization to maximize the cost function. This approach includes the dot product between a discrete signal (i.e., image) and a continuous function (i.e., rectangular function).

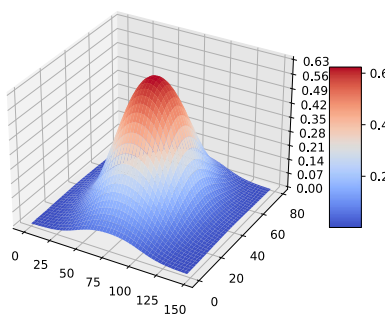
The features of the intended task are located in the oral region of the individual, which varies from person to person. Also, the exclusion of other tissues present in the panoramic radiograph is essential for enhancing the efficacy of the training process. In this context, the most practical approach is to crop the region from the images through an automatic procedure. To address this need, an auto-crop optimization was implemented to effectively find and crop the ROI from the images.

The process of evaluating the gradient by conducting a dot product between an image (i.e., discrete) and a continuous function is called numerical estimation of the derivative or convolution. In the inner product method, the derivative to be approximated is initially represented by the constructed continuous function. Subsequently, this function is sampled (i.e., discretized) to align with the sampling rate of the image, and the dot product can then be computed. The algorithm continuously updates the parameters to determine the ROI position. The necessity of "highlighting the prominent regions and preventing the less important ones" feature in the rectangular function has led to the use of the 2D Sigmoid function (see Figure 3), which can be described as:

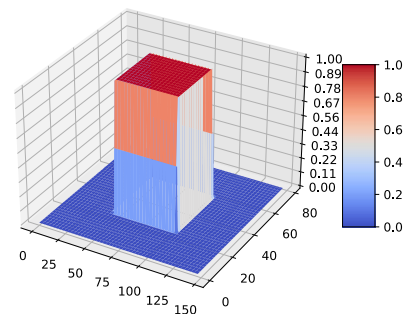
$$\sigma(x, y, \gamma) = \frac{1}{1+e^{-x \cdot \gamma}} \cdot \frac{1}{1+e^{-y \cdot \gamma}} \quad (1)$$



(a) For the sharpness ( $\gamma$ ) = 0.01



(b) For the sharpness ( $\gamma$ ) = 0.1



(c) For the sharpness ( $\gamma$ ) = 10

**Figure 4.** 3D plots of the rectangular function for different  $\gamma$  values, where the function sampled for a  $148 \times 80$  image and  $(x_c, y_c) = (74, 40)$  with  $r = 30$  (Top 2023)

where the default value of the sharpness ( $\gamma$ ) is 1 as in Figure 3.

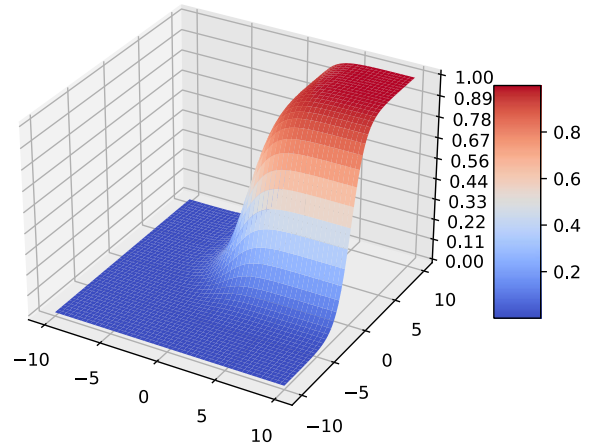
To search the ROI, rectangular area parameters (i.e., the center coordinates for the  $x$  and  $y$  axes, and a distance from the center) should be defined, and accordingly, the required function should be in the form of a rectangular function. Therefore, the rectangular function using 2D sigmoids is defined as:

$$R(x, y, x_c, y_c, r_{total}, \alpha, \gamma) = A \cdot B$$

$$A = \sigma(x - (x_c - r_{total}), y - (y_c - \alpha \cdot r_{total}), \gamma) \quad (2)$$

$$B = \sigma(-x + (x_c + r_{total}), -y + (y_c + \alpha \cdot r_{total}), \gamma)$$

where  $\alpha$  is the aspect ratio (*height/width*),  $x_c$  and  $y_c$  are center coordinates of the region,  $r_{total}$  is the center-to-edge distance for the  $x$ -axis and ' $\alpha \cdot r_{total}$ ' is for the  $y$ -axis, and  $\gamma$  is for controlling the smoothness (or sharpness) of the rectangular function. The default value of the sharpness ( $\gamma$ ) is 1, but see Figure 4 for how the rectangular function changes when  $\gamma$  is changed (i.e., decreasing gamma increases the smoothness of the rectangular function, and increasing gamma results in a sharper function).



**Figure 3.** 3D plot of the sigmoid (Top 2023)



A rectangular function of the same size as the input image, known as a full-size rectangular function, is employed for the optimization. The cost function utilizes a function derived from this rectangular function, not the identical one. The improved cost function is as following:

$$f(x_c, y_c, r, r_{min}, s, x, y, \alpha, \gamma) = \frac{f_{inside}}{f_{outside}+1}$$

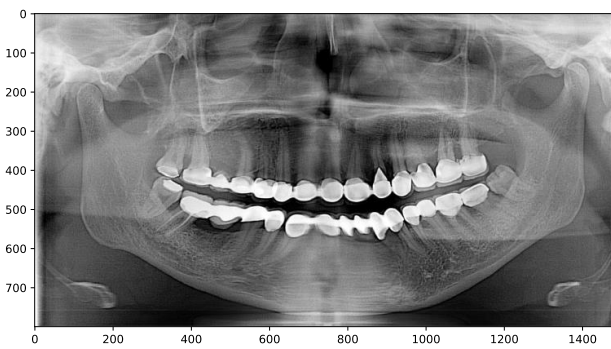
$$f_{inside} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} s_i z_i}{\sum_{i=0}^{n-1} z_i} \quad (3)$$

$$f_{outside} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} s_i (1-z_i)}{\sum_{i=0}^{n-1} 1-z_i}$$

where  $z_i$  is the rectangular function ( $R$ ) explained above and  $r_{total} = r_{min} + r$ .

Multiplying the input image by the rectangular function yields  $f_{inside}$ 's top portion, while the discretized rectangular function makes up the bottom portion of  $f_{inside}$ , which serves as a penalty to curb the increase of offset  $r$  forever. During the gradient ascent process,  $f_{inside}$  aims to maximize the desired inner portion of the rectangular function, while  $f_{outside}$  aims to minimize the undesired outer part of the rectangular function (i.e., helps maximize  $f_{inside}$  in return). The inclusion of 1 in the denominator of the cost function ( $f$ ) serves a purpose: when  $f_{outside}$  falls within the range of 0 to 1 and approaches 0, the cost function, which we aim to maximize, goes towards infinity. Adding 1 ensures that the maximum value of the cost function that it can reach is at  $f_{inside}$ .

In the backward pass, the procedure calculates the gradients of  $x_c, y_c,$  and  $r$  (i.e., Rol parameters) iteratively through the dot product of the image and the rectangular function, which emphasize those with a strong resemblance. The algorithm updates the Rol parameters based on the gradients. This seeks to maximize the value of the cost function (i.e., better Rol selection) and is expressed as:



(a) The original input with a resolution  $1480 \times 800$

$$\operatorname{argmax}_{x_c, y_c, r} f(x_c, y_c, r, r_{min}, s, x, y, \alpha, \gamma) \quad (4)$$

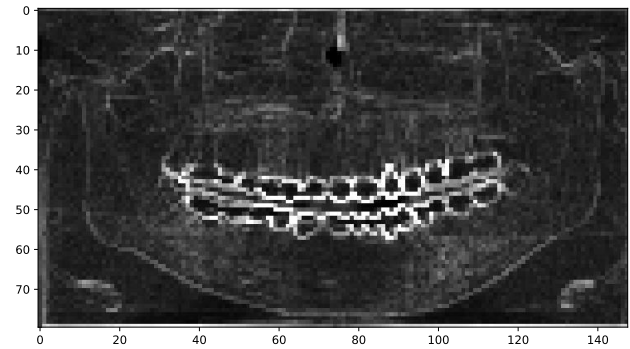
The procedure stops when convergence (i.e., when the vanishing gradient problem occurs or reaches a stable Rol position) is reached. Several preventive mechanisms, such as gradient clipping, center shifting, and the use of absolute values, were employed to avoid problems during convergence such as exploding gradient problem or Rol falling outside of the image after the update.

Before beginning the search, a differentiable pre-processing procedure (i.e., subtracting the min-pooling from the max-pooling) was executed on the input. The process inherently has differentiability due to the differentiability of max pooling. The min-pooling is simply the inverse version of max-pooling, so it is also differentiable. The operation can be stated as below:

$$\begin{aligned} \maxMinDif(x) &= \maxPool(x) - \minPool(x) \\ \minPool(x) &= -\maxPool(-x) \end{aligned} \quad (5)$$

Instead of simply utilizing filtering, pooling processes were adopted to downsample the image, making edges more perceptible and reducing the resolution. Downsampling was desired to reduce the computation time of the following processes. The generated image (see Figure 5) was fed into gradient ascent optimization, making major variations in regional characteristics more evident (Liu et al. 2020) across all teeth.

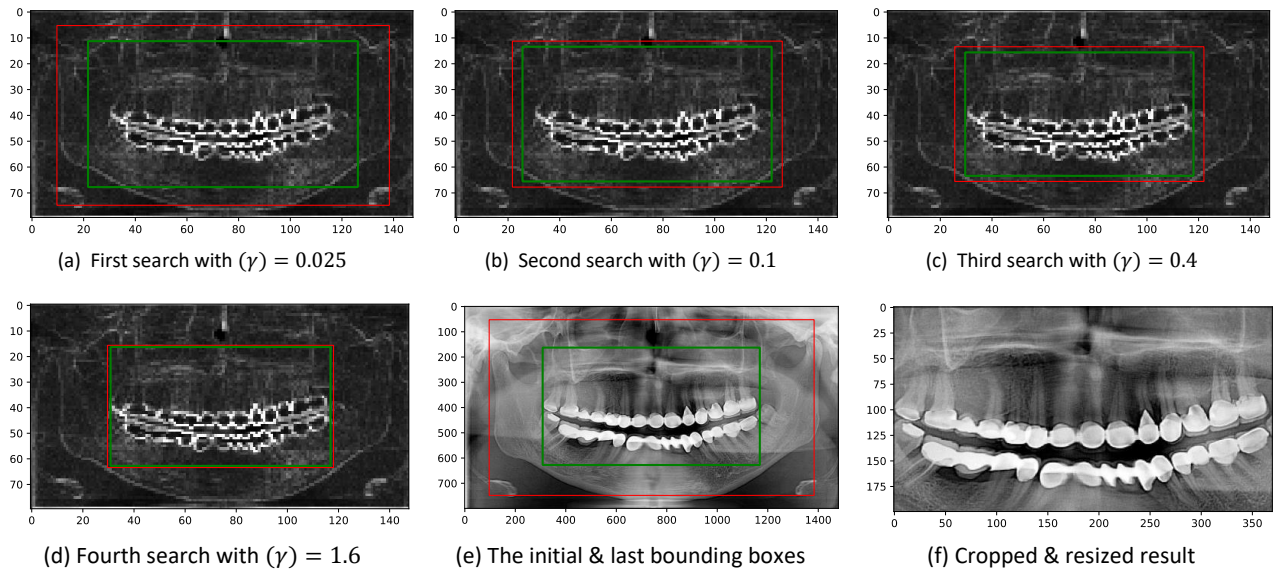
PyTorch (Paszke et al. 2019) was used to implement the entire auto-crop process, leveraging its capabilities to efficiently run operations such as maximum pooling and dot product through the Torch library. PyTorch was considered ideal for providing end-to-end smart cropping, primarily because of its automatic gradient calculation capabilities on tensors (i.e., 2D tensors for our case).



(b) The generated image with a resolution  $148 \times 80$

**Figure 5.** Result of  $\max - \min$  pooling where the resolution was reduced 10x (i.e., window size and stride was 10) (Top 2023)





**Figure 6.** Representation of the initial (i.e., red) and optimized (i.e., green) bounding boxes in the input image (Top 2023)

#### Algorithm 1. Adaptive sharpness $\gamma$ and step size $\eta$

**Input:**  $\gamma, \eta$  and input image as  $s$

**Output:** output image

1. Get *width* and *height* hence  $\alpha$  information from image  $s$
2.  $s \leftarrow \text{maxMinDif}(s)$
3.  $x, y \leftarrow \text{meshgrid}([0 \dots \text{width} - 1], [0 \dots \text{height} - 1])$   
*//meshgrid* returns a list of coordinate matrices from coordinate vectors
4.  $x_c \leftarrow \text{width}/2$
5.  $y_c \leftarrow \text{height}/2$
6.  $r_{min} \leftarrow \text{width}/3.5$
7.  $r \leftarrow (\text{width}/2.3) - (\text{width}/3.5)$
8. **for**  $i \leftarrow 1$  to 4 **do**
9.  $x_c, y_c, r \leftarrow \underset{x_c, y_c, r}{\text{argmax}} f(x_c, y_c, r, r_{min}, s, x, y, \alpha, \gamma)$
10.  $\gamma \leftarrow \gamma * 4$
11.  $\eta \leftarrow \eta/2$
12. **end for**
13. Crop the found RoI and resize it to  $370 \times 200$
14. Save output image

Fine-tuning by increasing the sharpness ( $\gamma$ ) and decreasing the step size after some rough searching was held to find the ideal solution. Sharpness started at 0.025 and the last fine-tuning value was 0.2, and the learning rate started at 96 and dropped to 12. Figure 6 depicts two rectangles (i.e., one for initial RoI and one for post-search) on the input image, allowing a visual inspection. As can be seen, when the sharpness was low (smoother rectangular function) and the step-size was high, the bounding box moved too much at the rough search

(Figure 6a). On the contrary, fine-tuning stages (Figure 6b, Figure 6c, and Figure 6d) searched in small steps in an adaptive way. The fine-tuning algorithm can be seen in Algorithm 1.

The parameters of the rectangular function ( $x_c$ ,  $y_c$ , and  $r_{total}$ ) were not subject to the random initialization. Instead, a conscious approach was adopted that ensures a consistent starting point. As mentioned earlier, the ( $x_c$ ,  $y_c$ ) pair are center coordinates and hence initialized from the center. Also, the center-to-edge distance ( $r_{total}$ ) was initialized in a way that the bounding box of the RoI was positioned close to the edges of the image. Then they were optimized by gradient ascent and found the appropriate RoI.

### 3.3. Training

AlexNet (Krizhevsky et al. 2012), VGG-16 (Simonyan and Zisserman 2014), ResNet-18, ResNet-50, ResNet-101 (He et al. 2016), and Inception ResNet V2 (Szegedy et al. 2017) were tested on the non-auto-cropped dataset in (Top 2023, Top et al. 2023). These networks were chosen based on previous performance improvements on the ImageNet dataset in ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge (ILSVRC) (Russakovsky et al. 2015). ResNets can still be considered one of the most successful networks around (Top et al. 2023). The selection also took into account the dataset's size, as it is a large dataset, and networks with a large number of parameters can exploit the full potential of the data. However, deep networks tend to face the vanishing gradient problem, and residual blocks have provided a solution to this problem (He et al. 2016). Accordingly, ResNet101 (see Figure 7) produced the best results at the time, so it was used in the auto-cropped trial.

The original network architecture underwent some minor modifications, such as reducing the input size from 3 channels to 1 channel (since the dataset consists of grayscale images) and the resolution from 224×224 to 200×370 (i.e., the input size could have been increased

more but the limitation was the Video Random-Access Memory (VRAM) of the Graphics Processing Unit (GPU)), or decreasing the size of the classification layer (i.e., fully-connected layer) from 1000 to 5 as there are 5 categories available for the task.

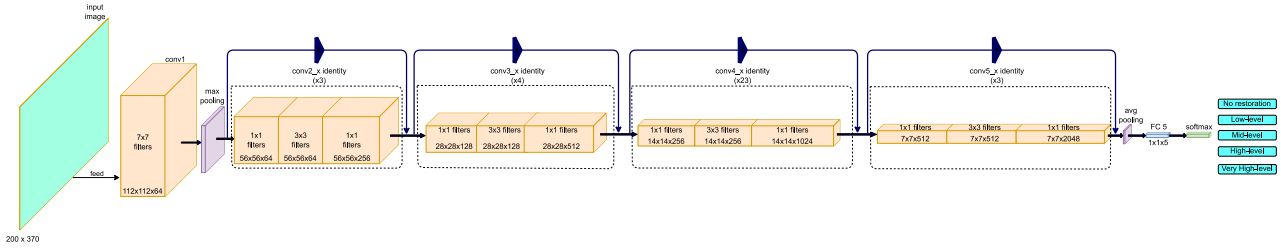


Figure 7. Representation of the structural design of the modified ResNet-101 architecture (Top 2023)

Transfer learning was not applicable because the dataset for the study consisted of grayscale images. The training aims to identify dental restorations (i.e., the objects it contains are different types of teeth, cheeks, gums, and bones, all present at the same time). The source domain of pre-trained networks is ImageNet (Russakovsky et al. 2015), and its purpose is to classify objects such as tigers, airplanes, or pineapples, so each model is trained from scratch.

We used 10-fold cross-validation to accurately assess model performance (by reducing variance) and reduce bias. This procedure ensured consistent and generalized results, where the average accuracy of the ten different trainings was used in the final evaluation. The "Adam" solver along with a batch size of 24 (i.e., to be able to fit the data into the VRAM of the GPU), and 1e-3 learning rate were the parameters of the training. A trial-and-error method was used for determining the best number of epochs. However, before we finished the development of the auto-crop algorithm, we tentatively trained and tested the idea (i.e., ad hoc) and found that 144 epochs solved the problem best, so when we finished development, we only used a 10-fold training with 144 epochs.

Since auto-cropping can deliver the unchanged aspect ratio, we modified the input size of ResNet101 as mentioned above (i.e., a 65.2% increase from 224×224 to 200×370), which significantly increased the total number of parameters in the network. The reason why the extra number of epochs is needed compared to the non-auto-cropped dataset is that the input layer has higher resolution and needs more information extraction or a deeper network.

#### 4. Results and Discussion

For results, the average of the 10-fold cross-validation approach is reported, as explained in the previous

section. On a single machine, the tests were carried out using a single Intel® Core™ i7-5960X CPU, 32 GB of Random Access Memory (RAM), and a single 8 GB NVIDIA® Quadro® M4000 GPU. The hardware capabilities help to decrease training time, but they are not necessary for practical usage in a clinical context. Even today's standard hardware (without a GPU) is adequate to run a test on the trained network. This highlights the method's high suitability for clinical applications, thanks to its significant results, robustness, and rapid execution time. Table 2 displays the average accuracies for these two approaches; DAC indicates that it is trained with our proposed method.

Table 2. Average accuracy results of 10-fold cross-validation and their corresponding number of epochs

Network (training type)	# of Epochs	Avg. Accuracy
ResNet-101 (non-DAC)	48	90.5%
ResNet-101 (non-DAC)	72	91.8%
ResNet-101 (non-DAC)	96	92.7%
ResNet-101 (non-DAC)	112	92.2%
ResNet-101 (DAC)	144	94.5%

Figure 8 shows confusion matrices to see accuracy results (i.e., precision and recall values can also be observed). The accuracy results indicate top-1 accuracy of the average of 10-folds. To conduct a more comprehensive performance comparison of the models, the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve was generated by varying the threshold for each class (see Figure 9). Additionally, the Area Under the ROC Curve (AUC) was calculated for each class (see Figure 11), along with their macro-averages (see Figure 10). Log-scale on x-axis was used in Figure 9 and Figure 11 to illustrate better.

The highest accuracy achieved was 92.7% for non-auto-cropped training (i.e., underfitted before the 96 epochs and overfitted at the 112 epochs) and 94.5% for auto-cropped training, and the macro-average AUC scores were 0.989 and 0.993, respectively. The auto-cropped training showed a clear dominance over the non-auto-

cropped training in every aspect, as it is more successful in terms of accuracy, precision, recall, AUC for all classes, and macro-average AUC.

The classes "0", "7-11", and "12-32" tend to be simpler for the networks to learn, but the other classes "1-3" and "4-6" appear to be more difficult.

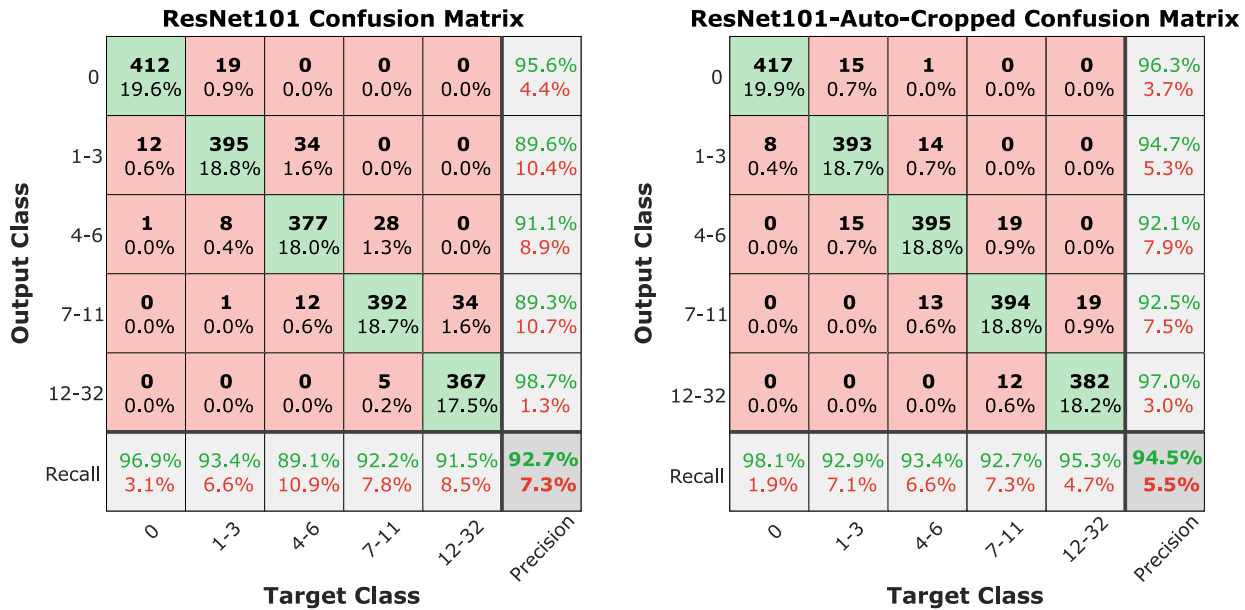


Figure 8. Confusion matrices for both training

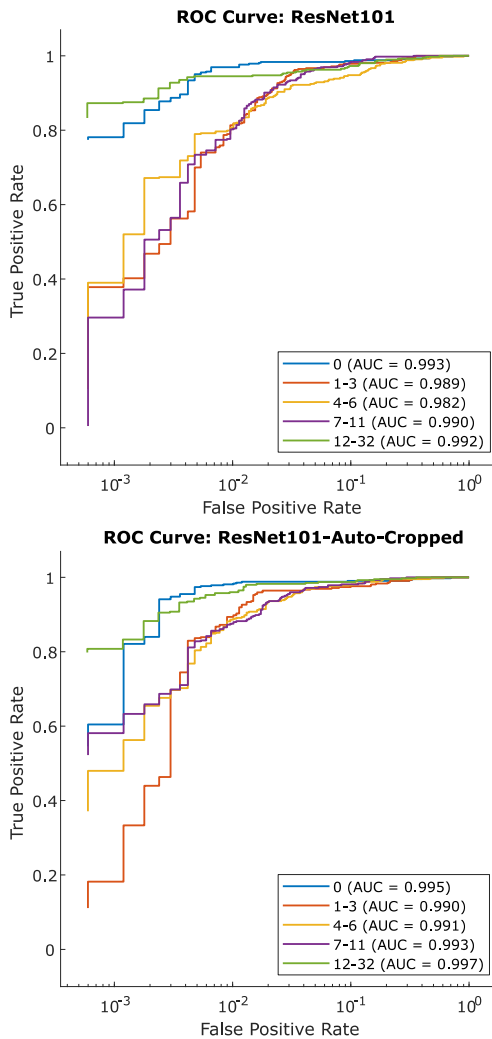


Figure 9. ROC curves present ability to separate positive from negative samples

The implementation of 10-fold cross-validation, which caused high computational costs during each training session, was found to be time-consuming throughout the training procedure. Additionally, fitting both the training data and all network parameters into the GPU's VRAM remained difficult, often requiring batch size reduction. Also, VRAM size has limited the increase of input size (i.e., we could have increased the input size more than 200×370). For these reasons, having access to a more powerful GPU with additional VRAM capacity might have helped with these tests. However, resizing a set of images of different sizes to a fixed size (i.e., 200×370) to fit in VRAM, and losing less information by finding RoI is possible thanks to our proposed auto-cropping algorithm.

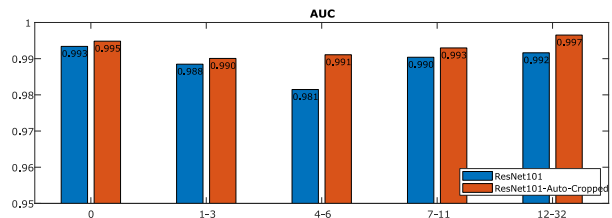
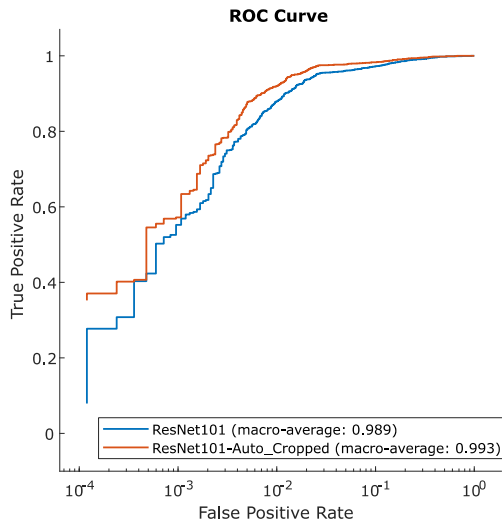


Figure 10. A bar comparison of the AUC scores in each class

Despite the limitations established on the augmentation parameters for non-auto-cropped training, excessive augmentation resulted in the loss of certain features. However, the use of auto-crop enabled the removal of noisy data, making extreme augmentation adjustments unnecessary.

Auto-cropping took advantage of changing the input size with a significant resolution increase of 65.2% (i.e., from

224×224 to 200×370). Using the higher resolution with auto-crop resulted in better accuracy, as the algorithm can identify and crop the region that holds the required features and reduces information loss that occurs with traditional resizing methods that preserve irrelevant features (i.e., the resulting image by resizing the original input contains parts not relevant to the classification task and loses more data compared to resizing after cropping). The cropping and resizing operations were accomplished without distorting the aspect ratio, which had previously been an issue when resizing to 224×224.



**Figure 11.** The macro-average AUC scores

The auto-crop operation improved the accuracy and produced more consistent results. Because the performance values of each fold at 10-fold cross-validation for auto-cropped training were closer to each other, while non-auto-cropped trainings were more unstable. Consistent results came into play because of the previous excessive augmentation approach, which involved noisy or unnecessary parts of the image.

## 5. Conclusion and Future Work

We have introduced an end-to-end differentiable optimization algorithm that finds the RoI with gradient ascent and crops it without corrupting the aspect ratio. We have demonstrated empirically that our method can provide better training performance than non-cropped training, where accuracy significantly increased from 92.7% to 94.5%. This improvement is particularly notable given the diminishing returns typically observed in high-accuracy regions. Also, the DAC method demonstrated its ability to improve the generalization capabilities of the network, allowing the model to continue effective training up to 144 epochs without overfitting. We have also shown our technique's effectiveness in locating and cropping the RoI after its search. The significant improvement in accuracy highlights DAC's effectiveness in

refining input data and enabling better learning by precisely focusing on relevant features.

The efficiency of DAC method in resizing images while preserving critical information alleviated some of dataset challenges. By increasing resolution from 224×224 to 200×370, DAC leveraged higher resolution images to improve accuracy significantly compared to traditional resizing methods. The DAC method produced more consistent results across all folds of the 10-fold cross-validation, contrasted with the instability observed in non-DAC training. The consistency is attributed to the removal of noisy data and unnecessary augmentation, ensuring that only relevant features were emphasized during training.

Unlike other similar methods, our method does not need supervised learning, takes every pixel into account, and can be applied immediately after the input layer. The proposed method is simple to include in existing models and may be effectively trained end-to-end.

Auto-crop enables the network's input data to be cropped and resized, and it may be introduced as a network layer following the input layer (i.e., can be trained with the backpropagation and can be implemented using the Theseus layer (Pineda et al. 2022)) into current CNN architectures without additional supervision or adjustment to the optimization process (i.e., convenient due to gradient ascent). This also allows for the use of a dataset with varying resolution (i.e., multi-resolution). The auto-crop technique is not limited to tackling a specific problem; it may also be used for various Red-Green-Blue (RGB) and grayscale datasets.

Finding RoI can also lead to better data augmentation organization. For example, rotation-based augmentation creates black (no-data) regions in the augmented (rotated) image. With the introduction of the auto-crop, you can obtain an image without black regions if you rotate it around the center of the RoI with a properly selected rotation range.

### Declaration of Ethical Standards

This study is derived from the doctoral thesis (thesis number: 836565) titled "Evaluation of Fixed Restorations on Panoramic Radiographs Using Deep Learning and Auto-Crop" completed on 20.09.2023 by Ahmet Esad TOP under the supervision of Asst. Prof. Dr. Mustafa Yeniad.

The authors declare that they comply with all ethical standards. They declare that they follow all ethical guidelines including authorship, citation, data reporting, and publishing original research in all processes of the paper and that they do not make any falsification on the data collected.

#### Credit Authorship Contribution Statement

Author-1: Conceptualization, Resources, Data curation, Methodology design, Formal analysis, Validation, Investigation, Visualization, Writing – original draft

Author-2: Conceptualization, Resources, Formal analysis, Study design, Validation, Investigation, Supervision, Writing – review and editing, Funding acquisition

Author-3: Conceptualization, Resources, Data curation, Validation, Investigation, Supervision, Writing – review and editing, Opinionator

Author-4: Conceptualization, Methodology design, Study design, Formal analysis, Validation, Investigation, Supervision, Project administration, Writing – review and editing, Opinionator

#### Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper. The authors have no conflicts of interest to declare regarding the content of this article.

#### Data Availability Statement

The authors declare that the main data supporting the findings of this work are available within the article.

All data generated or analyzed during the study are subject to ethics committee approval.

#### Declaration of Ethics Committee Approval

Ethical approval for the study involving human participants was obtained in accordance with the guidelines set by the AYBU Institutional Review Board and adhering to the principles outlined in the 1964 Declaration of Helsinki and its subsequent amendments or similar ethical standards. The study received official approval and permission from the AYBU non-drug ethical committee with the approval date of 19/04/2019 (File Number: 2019-12).

#### Declaration of Informed Consent

Written informed consent was not required in this study due to retrospective data collection from all included patients. The informed consent exemption has been granted by the Institutional Review Board and is not expected to adversely affect the rights and health of patients whose data is used. The study ensures that all data is unidentified and anonymized during analysis and reporting, strictly adhering to guidelines to protect patient privacy and confidentiality.

#### Acknowledgement

The authors would like to express their gratitude to the AYBU Tepebaşı Oral and Dental Health Training Hospital for allowing them to gather the data.

#### 6. References

Çelik, B., Çelik, M.E., 2022. Automated detection of dental restorations using deep learning on panoramic radiographs. *Dentomaxillofacial Radiology* 51, 20220244. <https://doi.org/10.1259/dmfr.20220244>

Chen, J., Bai, G., Liang, S., Li, Z., 2016. Automatic image cropping: A computational complexity study, in: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. pp. 507–515. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.61>

Choi, J.-W., 2011. Assessment of panoramic radiography as a national oral examination tool: review of the literature. *Imaging science in dentistry* 41, 1–6. <https://doi.org/10.5624%2Fisd.2011.41.1.1>

Corbet, E., Ho, D., Lai, S., 2009. Radiographs in periodontal disease diagnosis and management. *Australian dental journal* 54, S27–S43.

Dai, J., He, K., Sun, J., 2016a. Instance-aware semantic segmentation via multi-task network cascades, in: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. pp. 3150–3158. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.343>

Dai, J., Li, Y., He, K., Sun, J., 2016b. R-fcn: Object detection via region-based fully convolutional networks. *Advances in neural information processing systems* 29. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1605.06409>

Demir, K., Aksakalli, I.K., Baygın, N., Sökmen, Ö.Ç., 2023. Deep Learning Based Lesion Detection on Dental Panoramic Radiographs, in: *2023 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU)*. IEEE, pp. 1–6.

Fidan, U., Uzunhisarcıklı, E., Çalıklı, İ., 2019. Classification of dermatological data with self organizing maps and support vector machine. *Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering* 19, 894–901. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.591816>

Fitzgerald, R., 2000. Phase-sensitive x-ray imaging. *Physics today* 53, 23–26. <https://doi.org/10.1063/1.1292471>

Girshick, R., 2015. Fast r-cnn, in: *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*. pp. 1440–1448. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2015.169>

Han, C., Ye, J., Zhong, Y., Tan, X., Zhang, C., Gao, C., Sang, N., 2019. Re-id driven localization refinement for person search, in: *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*. pp. 9814–9823. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2019.00991>

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. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.322>

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.

Jader, G., Fontineli, J., Ruiz, M., Abdalla, K., Pithon, M., Oliveira, L., 2018. Deep instance segmentation of teeth in panoramic X-ray images, in: *2018 31st SIBGRAPI Conference on Graphics, Patterns and Images (SIBGRAPI)*. IEEE, pp. 400–407.

- Jaderberg, M., Simonyan, K., Zisserman, A., Kavukcuoglu, K., 2015. Spatial transformer networks. *Advances in neural information processing systems* 28. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1506.02025>
- Jiang, W., Sun, W., Tagliasacchi, A., Trulls, E., Yi, K.M., 2019. Linearized multi-sampling for differentiable image transformation, in: *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*. pp. 2988–2997. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2019.00308>
- Katsumata, A., 2023. Deep learning and artificial intelligence in dental diagnostic imaging. *Japanese Dental Science Review* 59, 329–333.
- Kemal, A., Kılıçarslan, S., 2021. COVID-19 diagnosis prediction in emergency care patients using convolutional neural network. *Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering* 21, 300–309. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.788898>
- Kohinata, K., Kitano, T., Nishiyama, W., Mori, M., Iida, Y., Fujita, H., Katsumata, A., 2023. Deep learning for preliminary profiling of panoramic images. *Oral Radiology* 39, 275–281.
- Kooi, T., Litjens, G., Van Ginneken, B., Gubern-Mérida, A., Sánchez, C.I., Mann, R., den Heeten, A., Karssemeijer, N., 2017. Large scale deep learning for computer aided detection of mammographic lesions. *Medical image analysis* 35, 303–312. <https://doi.org/10.1016/j.media.2016.07.007>
- Krizhevsky, A., Sutskever, I., Hinton, G.E., 2012. Imagenet classification with deep convolutional neural networks, in: *Advances in Neural Information Processing Systems*. pp. 1097–1105.
- LeCun, Y., Bottou, L., Bengio, Y., Haffner, P., 1998. Gradient-based learning applied to document recognition. *Proceedings of the IEEE* 86, 2278–2324. <https://doi.org/10.1109/5.726791>
- Liang, Y., Lv, J., Li, D., Yang, X., Wang, Z., Li, Q., 2022. Accurate Cobb Angle Estimation on Scoliosis X-Ray Images via Deeply-Coupled Two-Stage Network With Differentiable Cropping and Random Perturbation. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics* 27, 1488–1499. <https://doi.org/10.1109/JBHI.2022.3229847>
- Liedke, G.S., Spin-Neto, R., Vizzotto, M.B., Da Silveira, P.F., Silveira, H.E.D., Wenzel, A., 2015. Diagnostic accuracy of conventional and digital radiography for detecting misfit between the tooth and restoration in metal-restored teeth. *The Journal of prosthetic dentistry* 113, 39–47.
- Liu, S., Lu, Y., Wang, J., Hu, S., Zhao, J., Zhu, Z., 2020. A new focus evaluation operator based on max–min filter and its application in high quality multi-focus image fusion. *Multidimensional Systems and Signal Processing* 31, 569–590. <https://doi.org/10.1007/s11045-019-00675-2>
- Paszke, A., Gross, S., Massa, F., Lerer, A., Bradbury, J., Chanan, G., Killeen, T., Lin, Z., Gimelshein, N., Antiga, L., 2019. Pytorch: An imperative style, high-performance deep learning library. *Advances in neural information processing systems* 32. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.01703>
- Pineda, L., Fan, T., Monge, M., Venkataraman, S., Sodhi, P., Chen, R.T., Ortiz, J., DeTone, D., Wang, A., Anderson, S., 2022. Theseus: A library for differentiable nonlinear optimization. *Advances in Neural Information Processing Systems* 35, 3801–3818. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.09442>
- Pröbster, L., Diehl, J., 1992. Slip-casting alumina ceramics for crown and bridge restorations. *Quintessence International* 23.
- Recasens, A., Kellnhofer, P., Stent, S., Matusik, W., Torralba, A., 2018. Learning to zoom: a saliency-based sampling layer for neural networks, in: *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)*. pp. 51–66. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-01240-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-01240-3_4)
- Ren, S., He, K., Girshick, R., Sun, J., 2015. Faster r-cnn: Towards real-time object detection with region proposal networks. *Advances in neural information processing systems* 28. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1506.01497>
- Riad, R., Teboul, O., Grangier, D., Zeghidour, N., 2022. Learning strides in convolutional neural networks. *arXiv preprint arXiv:2202.01653*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.01653>
- Rippel, O., Snoek, J., Adams, R.P., 2015. Spectral representations for convolutional neural networks. *Advances in neural information processing systems* 28. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1506.03767>
- Russakovsky, O., Deng, J., Su, H., Krause, J., Satheesh, S., Ma, S., Huang, Z., Karpathy, A., Khosla, A., Bernstein, M., 2015. Imagenet large scale visual recognition challenge. *International journal of computer vision* 115, 211–252.
- Sakaguchi, R.L., Powers, J.M., 2012. *Craig’s restorative dental materials-e-book*. Elsevier Health Sciences.
- Scarfe, W.C., Farman, A.G., 2008. What is cone-beam CT and how does it work? *Dental Clinics of North America* 52, 707–730. <https://doi.org/10.1016/j.cden.2008.05.005>
- Shin, H.-C., Roth, H.R., Gao, M., Lu, L., Xu, Z., Nogues, I., Yao, J., Mollura, D., Summers, R.M., 2016. Deep convolutional neural networks for computer-aided detection: CNN architectures, dataset characteristics

and transfer learning. *IEEE transactions on medical imaging* 35, 1285–1298.

<https://doi.org/10.1109/TMI.2016.2528162>

Simonyan, K., Zisserman, A., 2014. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. *arXiv preprint arXiv:1409.1556*.

<https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.1556>

Szegedy, C., Ioffe, S., Vanhoucke, V., Alemi, A.A., 2017. Inception-v4, inception-resnet and the impact of residual connections on learning, in: *Thirty-First AAAI Conference on Artificial Intelligence*.

Top, A.E., 2023. Evaluation of Fixed Restorations on Panoramic Radiographs using Deep Learning and Auto-Crop (PhD Thesis). Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Top, A.E., Özdoğan, M.S., Yeniad, M., 2023. Quantitative level determination of fixed restorations on panoramic radiographs using deep learning. *International Journal of Computerized Dentistry* 26, 285-299

<https://doi.org/10.3290/j.ijcd.b3840521>

White, S.C., Heslop, E.W., Hollender, L.G., Mosier, K.M., Ruprecht, A., Shrout, M.K., 2001. Parameters of radiologic care: An official report of the American Academy of Oral and Maxillofacial Radiology. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology* 91, 498–511.

Yurttakal, A.H., Baş, H., 2021. Possibility Prediction Of Diabetes Mellitus At Early Stage Via Stacked Ensemble Deep Neural Network. *Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering* 21, 812–819.

<https://doi.org/10.35414/akufemubid.946264>

Zeiler, M.D., Fergus, R., 2014. Visualizing and understanding convolutional networks, in: *European Conference on Computer Vision*. Springer, pp. 818–833.



## Tunable Ultra-wideband Band-stop Filters Based on a Metal-insulator-metal Waveguide with Triangle Resonators

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 04.03.2024

Kabul/Accepted: 05.08.2024

Yayımlandı/Published: 02.12.2024

### Üçgen Rezonatörlü Metal-yalıtkan-metal Dalga Kılavuzu Temelli Ayarlanabilir Ultra-genişbant Bant Durdurma Filtreleri

Semih KORKMAZ\* 

Bandırma Onyedli Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Computer Engineering, Balıkesir, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Abstract

This study introduces the design and analysis of ultra-wideband band-stop filters based on a metal-insulator-metal (MIM) waveguide with triangle resonators. The optical features of the filters have been determined numerically. Transmission values and field distributions of the filters have been obtained. To show the tunability of the resonances of the filters, parameter sweep analysis has been done. This feature provides the shifted wideband bandwidths from visible to mid-infrared regimes. Analyses have been carried out for three different designs. While the designs are analyzed, higher bandwidths are obtained by increasing the number and dimensions of the triangle resonators in the structure. The highest bandwidth is 859 nm for band-stop filtering in this work. This research can potentially improve the filtering capabilities of optical devices that use high-efficiency MIM waveguide-resonator systems.

**Keywords:** Ultra-wideband; Bandwidth; Triangle resonators; Transmission; Field distributions; Band-stop filter.

#### Öz

Bu çalışma, üçgen rezonatörlü metal-yalıtkan-metal (MIM) dalga kılavuzu temelli ultra-genişbant bant durdurma filtrelerinin tasarımını ve analizini tanıtmaktadır. Filtrelerin optik özellikleri nümerik olarak belirlenmiştir. Filtrelerin iletim değerleri ve alan dağılımları elde edilmiştir. Filtrelerin rezonanslarının ayarlanabilirliğini göstermek için parametre tarama analizi yapılmıştır. Bu özellik, genişbant bant genişliklerinin görünürden orta kızılötesi bölgelere kaydırılmasını sağlar. Analizler, üç farklı tasarım için gerçekleştirilmiştir. Tasarımlar analiz edilirken, yapıdaki üçgen rezonatörlerinin sayılarının ve boyutlarının artırılmasıyla daha yüksek bant-geişlikleri elde edilmiştir. Bu çalışmada, bant-durdurma filtrelemesi için en yüksek bant genişliği 859 nm'dir. Bu araştırma, yüksek verimli MIM dalga kılavuzu-rezonatör sistemlerini kullanan optik cihazların filtreleme yeteneklerini geliştirme potansiyeline sahiptir.

**Anahtar Kelimeler:** Ultra-genişbant; Bant genişliği; Üçgen rezonatörler; İletim; Alan dağılımları; Bant-durdurma filtresi

#### 1. Introduction

The need for compact and efficient photonic devices that can process light with high precision has increased research on new structures in recent years [Tan *et al.* 2021, Lin *et al.* 2020, Luo *et al.* 2023]. Optical filters based on metal-insulator-metal (MIM) waveguides stand out as key components to control the light [Korkmaz 2024, Haque *et al.* 2024, Zeng *et al.* 2022]. In particular, the integration of MIM waveguides with resonators has received much interest thanks to its potential to achieve broadband spectral control and multi-purpose filtering capabilities [Chou *et al.* 2020, Patel *et al.* 2022, Chao *et al.* 2022, Ebadi *et al.* 2020]. This relationship offers an efficient platform for designing band-stop filters with tunable frequencies [Mohammadi *et al.* 2023, Liu *et al.* 2024]. Propagating waves within the MIM waveguide coupled with resonators makes it possible to realize band-stop functionalities over a wide range of frequencies. For that purpose, ultra-wideband band-stop filter designs

have been proposed with various shapes of nanoresonators which are hexagonal resonators [Zegaar *et al.* 2024], multi-circular ring resonators [Kamari *et al.* 2021], T-shaped resonators [Kamari *et al.* 2021], double-side trapezoidal resonators [Yu *et al.* 2020].

Triangle resonators are utilized for different applications which are band-pass filters [Mariselvam *et al.* 2022], switches [Zhang *et al.* 2022], absorbers [Ebadi *et al.* 2023], and sensors [Al Mahmud *et al.* 2021]. In this study, ultra-wideband band-stop filters based on a MIM waveguide with triangle resonators have been designed. These filters are analyzed numerically by the finite difference time domain (FDTD) method and have tunable resonances. During calculations, Lumerical FDTD solutions software is utilized [Int. Ref. 1]. The basic structure that has a metal-insulator-metal waveguide with triangle resonators has been investigated with the parameter sweep in the first step. By using the obtained ideal geometric parameters, three different ultra-wideband band-stop filters have

been designed and the bandwidths of the filters have been determined in the second step. Field distributions at the corresponding resonance wavelengths are visualized to show the band-stop feature of the filters. Increasing the number of adjacent resonators to the waveguide provides the larger bandwidths. This study presents important results in ultra-wideband filter designs. With high parameter sensitivity, it shows adjustable band-stop regions in the desired range from the visible region to the infrared region. The highest bandwidth is obtained as 859 nm. When the designed ultra-wideband band-stop filters are compared to the literature, the attained results are promising for effective tools in integrated optical circuits.

## 2. Design and Analysis Method

Figure 1(a) presents the basic filter design. The design has a 150 nm-thick metal plate with a 50 nm width straight waveguide and triangle resonators. The triangle resonators are positioned adjacent to the waveguide. For the lengths of the resonator,  $L_1$  and  $L_2$  are 225 nm and 200 nm, respectively. Perfectly matched layer (PML) boundary conditions are utilized for x and y-axes. The yellow and white areas on the proposed design are metal and air, respectively. The design is analyzed with the Johnson and Christy model for optical constants of the silver metal [Johnson and Christy 1972]. The refractive index of air is 1. Transverse magnetic polarized Gaussian light is transmitted along the straight waveguide. The transmission values of the proposed design are numerically attained. The transmission spectrum of the structure is obtained with the formula (1) [Chao *et al.* 2022].

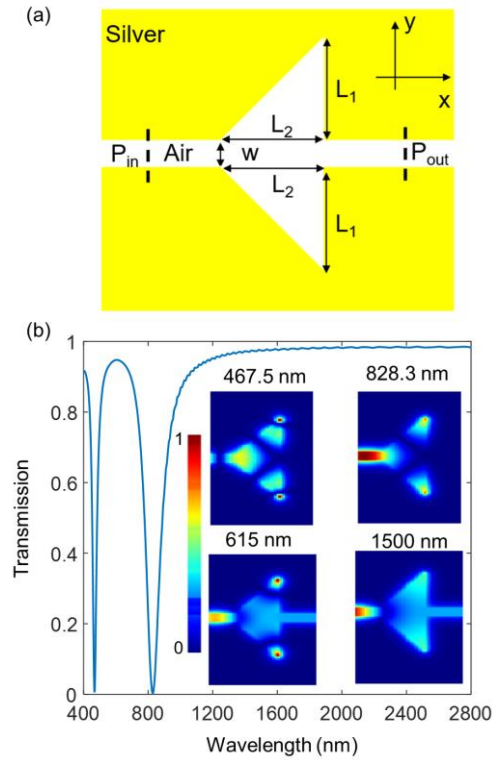
$$T = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (1)$$

Here,  $P_{in}$  and  $P_{out}$  indicate input and output power, respectively. The wavelength of the Gaussian light is larger than the width of the designed waveguide. So, the waveguide supports only a single transverse magnetic ( $TM_0$ ) mode. The resonance wavelength of the resonator for the  $TM_0$  mode can be determined in the formula (2) [Zegaar *et al.* 2022].

$$\lambda_m = \frac{2R_e(n_{eff})L_{eff}}{m}, m = 1,2,3, \dots \quad (2)$$

In the formula,  $R_e(n_{eff})$  indicates the real part of the effective refractive index of the surface plasmon polariton.  $L_{eff}$  describes the effective resonance length of the resonator and  $m$  is the mode number. Figure 1(b) presents resonance wavelengths at 467.5 nm and 828.3 nm with zero transmission. This figure also shows magnetic field distributions ( $|H|/|H_{in}|$ ) for the resonant wavelengths. While the electromagnetic waves are

stopped at 467.5 nm and 828.3 nm with zero transmission, they are transmitted at 615 nm and 1500 nm where the transmission values reach 95%.



**Figure 1.** (a) The view of basic filter design. The x-axis length and the y-axis length are 1  $\mu\text{m}$  for the structure. (b) The transmission spectrum and field distributions at different resonance wavelengths.

## 3. Results and Discussions

In the first step, the optimal geometrical parameter is obtained by parameter sweep. For this structure, the  $L_1$  lengths of the resonators are critical to determine the resonance wavelengths. Only the  $L_1$  lengths of the resonator are changed because the transmission spectra are mainly determined by the interaction of electromagnetic signals with  $L_1$ . Figure 2 shows the parameter sweep for  $L_1$  lengths while other parameters are fixed and  $L_2$  and  $w$  are 200 nm and 50 nm, respectively. The resonance wavelengths shift to longer wavelengths without any change in transmission values when  $L_1$  length is increased from 210 nm to 240 nm with a 10 nm increment. This parameter sweep analysis indicates that the proposed ultra-wideband band-stop filter can be designed for different lengths of resonators at similar transmission values. After obtaining the optimal geometric parameters for the basic filter design, the numbers of triangle resonators are increased to support the ultra-wideband band-stop filter feature of the design. For that purpose, three different designs are targeted in this study. Firstly, while increasing the number of triangle resonators, the dimensions of all resonators are equal.

Secondly, the structure is examined when the number and dimensions of the triangle resonators are increased.

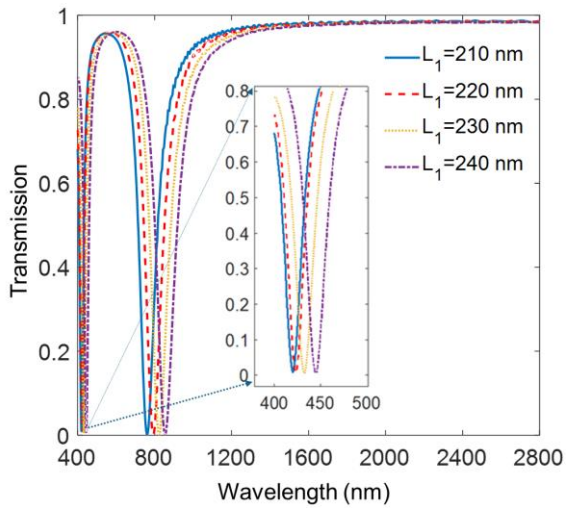


Figure 2. Parameter sweep analysis for the proposed structure.

Thirdly, while the number of triangle resonators is increased, the resonator size is kept constant and examined for the highest length value. Figure 3(a) visualizes the first band-stop filter design with six similar resonators. In this design,  $L_1$  and  $L_2$  lengths are 230 nm and 200 nm, respectively.  $w$  and  $d$  values are 50 nm. These four lengths are the same for all resonators. Figure 3(b) presents the transmission spectra for varied numbers ( $N$ ) of the resonator. The wideband band-stop filter feature of the structure is improved by increasing the number of resonators from  $N=1$  to  $N=6$ . When  $N=6$ , an ultra-wideband band-stop filter is obtained. These sweeps provide three different bandwidths which are  $\Delta\lambda_1 = 37$  nm,  $\Delta\lambda_2 = 119$  nm,  $\Delta\lambda_3 = 619$  nm. This figure also shows the field distributions at 652 nm and 1100 nm where the transmission has high and low levels, respectively.

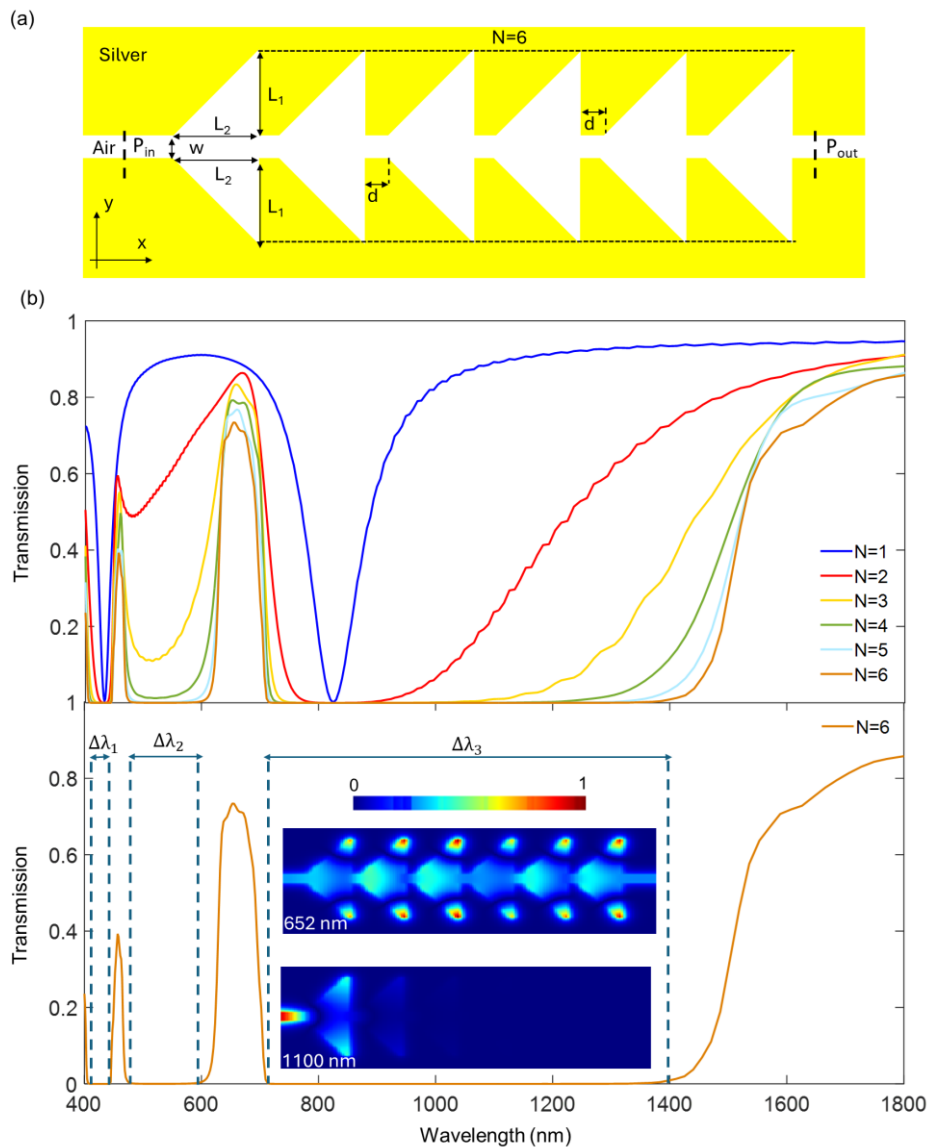
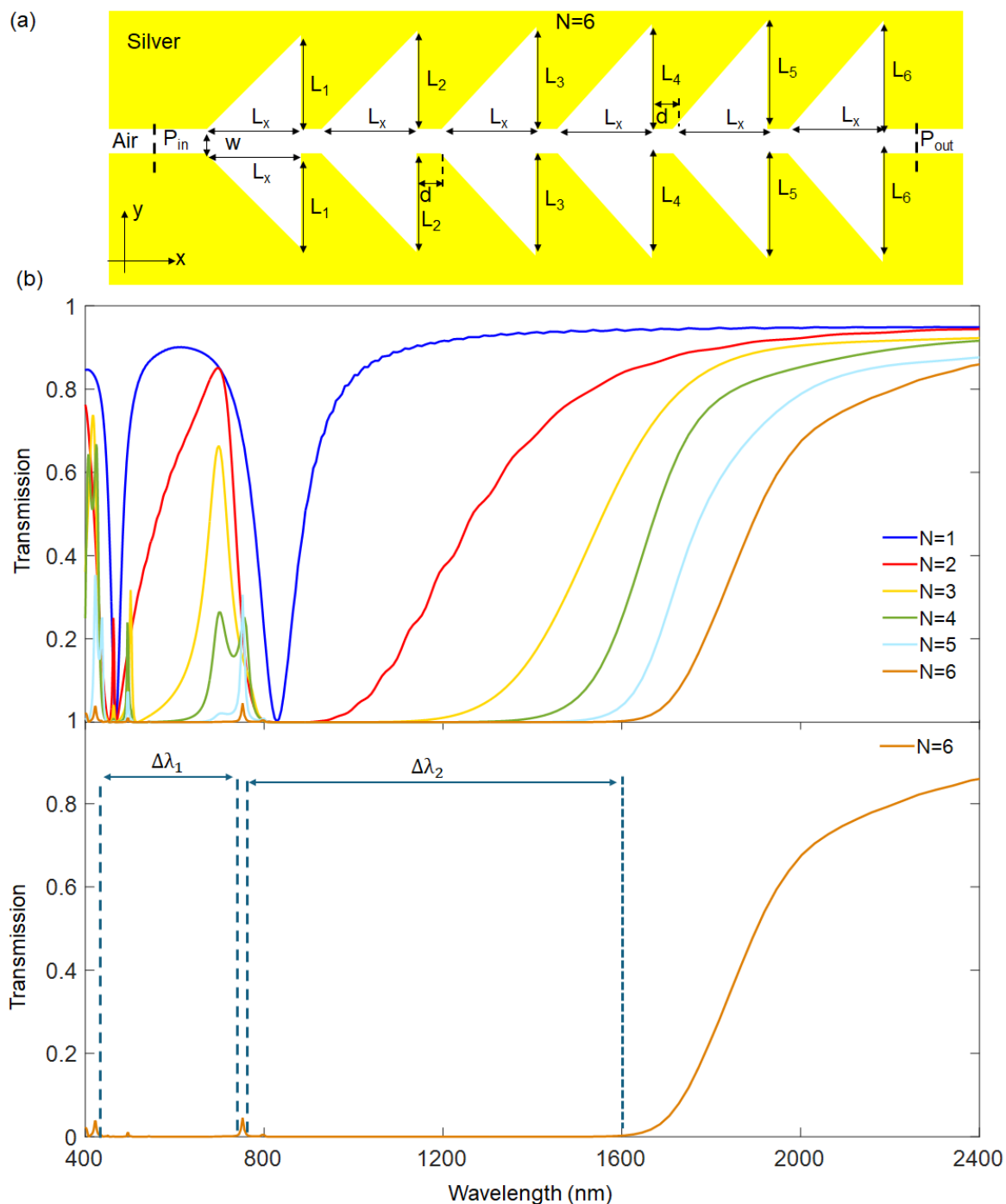


Figure 3. (a) The first proposed structure for the ultra-wideband band-stop filter. The x-axis length is  $1.8 \mu\text{m}$  and the y-axis length is  $1 \mu\text{m}$  for the structure. (b) The transmission spectra of the structure for the numbers of the resonator from  $N=1$  to  $N=6$ . The transmission spectrum for  $N=6$ , three band-stop regions, and field distributions of the structure at 652 nm and 1100 nm, respectively.

When the design transmits the signal at 652 nm, the signal is not transmitted at 1100 nm. Figure 4(a) presents the second band-stop filter design that has six different resonators. In that design,  $L_x=200$  nm and  $w=d=50$  nm.  $y$ -axis lengths of the resonators are  $L_1=225$  nm,  $L_2=250$  nm,  $L_3=275$  nm,  $L_4=300$  nm,  $L_5=325$  nm, and  $L_6=350$  nm in this design.  $w$  and  $d$  values are 50 nm. Figure 4(b) visualizes the transmission spectra for varied numbers ( $N$ ). The ultra-wideband band-stop filter behavior of the designed

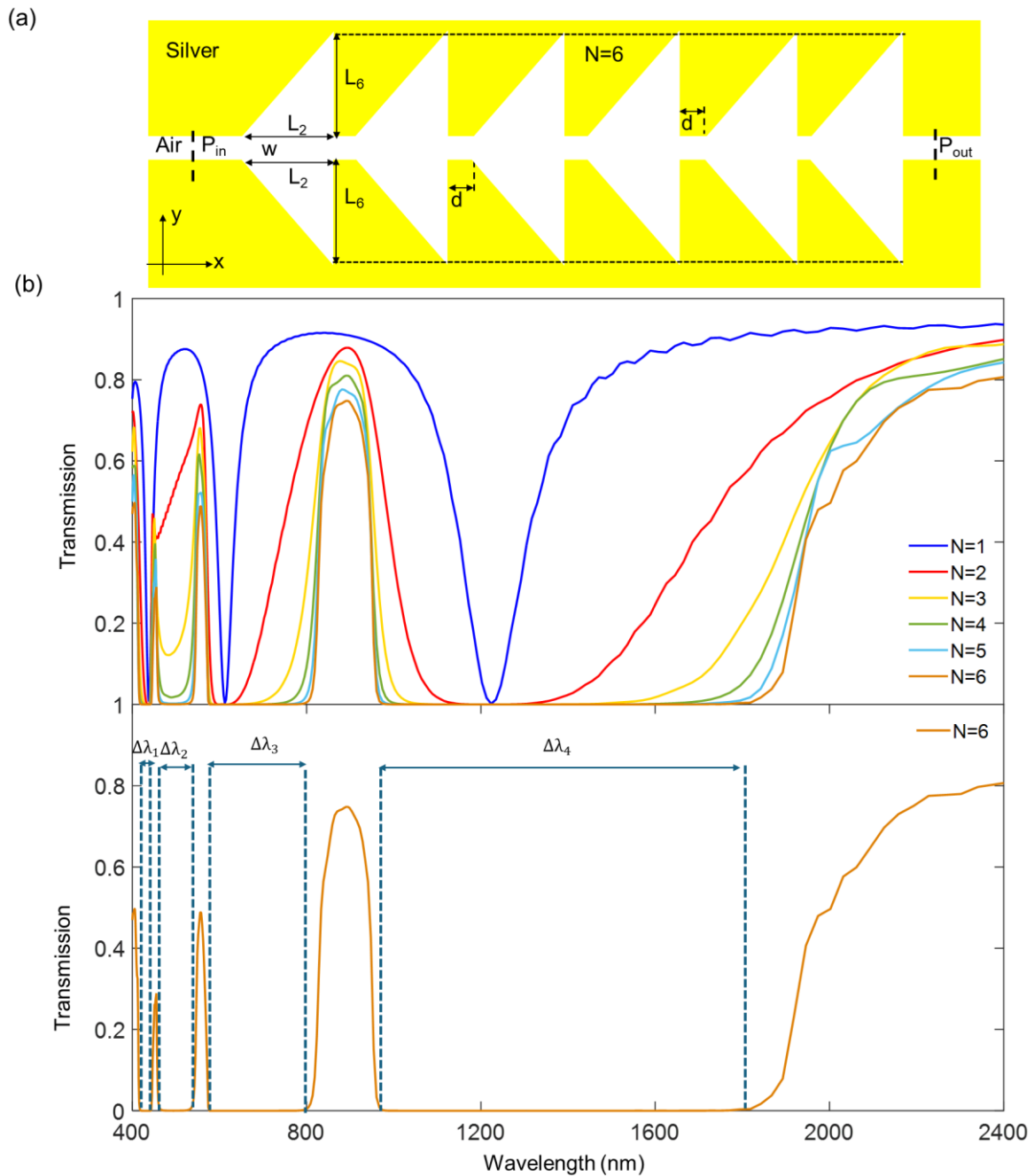
structure is developed by increasing the number of resonators from  $N=1$  to  $N=6$  and the  $y$ -axis lengths of the resonators. When  $N=6$ , the better ultra-wideband band-stop filter feature is achieved for this structure. These sweeps provide two different bandwidths which are  $\Delta\lambda_1 = 308$  nm and  $\Delta\lambda_2 = 837$  nm. When the second design is compared to the first design which has the same number of triangle resonators, the second one provides wider bandwidths for band-stop filtering.



**Figure 4.** (a) The second proposed structure for the ultra-wideband band-stop filter. The  $x$ -axis length is  $1.8 \mu\text{m}$  and the  $y$ -axis length is  $1 \mu\text{m}$  for the structure. (b) The transmission spectra of the structure for the numbers of the resonator from  $N=1$  to  $N=6$ . The transmission spectrum for  $N=6$  and two band-stop regions.

Figure 5(a) illustrates the third band-stop filter design that has six similar resonators.  $L_6$  and  $L_2$  lengths are 350 nm and 200 nm, respectively.  $w$  and  $d$  values are 50 nm for this design. These four lengths are valid for all resonators. Figure 5(b) presents the transmission spectra of the proposed design for the numbers of the resonator from  $N=1$  to  $N=6$ . Increasing the number of resonators from  $N=1$  to  $N=6$  in the design, the ultra-wideband band-stop filter feature of the proposed structure is further improved. When  $N=6$ , the best ultra-wideband band-stop filter is reached. These sweeps provide four different bandwidths  $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2, \Delta\lambda_3$  and  $\Delta\lambda_4$  that are 24 nm, 65 nm, 218 nm, and 859 nm, respectively. When comparing the

three designs with each other, the third structure shows higher bandwidths. As a result, increasing the lengths and the number of resonators provide better performance. Table 1 shows the results for the designed structures. In our study, when the maximum number of resonators is used, the design has a  $1.8 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$  size. A wider bandwidth can be achieved by increasing the size of the design and the number of resonators in it. In this case, the total structure size will increase. The most important parameter is to obtain the highest band-stop range using the maximum resonators at the minimum design size. Table 2 illustrates the performance comparison between the proposed study and previous studies in the literature.



**Figure 5.** (a) The third proposed structure for the ultra-wideband band-stop filter. The x-axis length is  $1.8 \mu\text{m}$  and the y-axis length is  $1 \mu\text{m}$  for the structure. (b) The transmission spectra of the structure for the numbers of the resonator from  $N=1$  to  $N=6$ . The transmission spectrum for  $N=6$  and four band-stop regions.

**Table 1.** Comparison between the proposed structures in this study.

Design	Bandgap width	Total bandgap width	The resonator lengths
1	$\Delta\lambda_1=37$ nm, $\Delta\lambda_2=119$ nm, $\Delta\lambda_3=619$ nm	775 nm	Similar triangle resonators ( $L_1=230$ nm)
2	$\Delta\lambda_1=308$ nm, $\Delta\lambda_2=837$ nm	1145 nm	Different triangle resonators ( $L_1=225$ nm-350 nm)
3	$\Delta\lambda_1=24$ nm, $\Delta\lambda_2=65$ nm, $\Delta\lambda_3=218$ nm, $\Delta\lambda_4=859$ nm	1166 nm	Similar triangle resonators ( $L_1=350$ nm)

**Table 2.** Comparison between the proposed study and previously reported studies.

Reference	Band-stop center wavelength (nm)	Maximum bandgap width (nm)	The resonator type
Lu <i>et al.</i> 2012	850	100	Side-coupled cavities and stub shaped
Chen <i>et al.</i> 2016	840	120	Single stub shaped
Li and Jiao 2019	1550	202	Tooth-shaped
Tao <i>et al.</i> 2010	1625	250	Double-sided teeth shaped
Yu <i>et al.</i> 2020	1020	340	Trapezoidal-shaped
Zegaar <i>et al.</i> 2022	2675	350	Triangular-shaped
Wang <i>et al.</i> 2016	1500	750	Multiple-teeth shaped
Zegaar <i>et al.</i> 2024	2825	1650	Hexagonal-shaped
This study	1395	859	Triangle-shaped

#### 4. Conclusion

In this study, tunable ultra-wideband band-stop filters based on a metal-insulator-metal waveguide with triangle resonators have been proposed and analyzed. The results provide zero transmission values in visible and infrared regimes with ultra-wideband regions. The largest bandwidth is 308 nm in visible and 859 nm in infrared regimes for this study. Increasing the number of adjacent resonators to the waveguide improves the yields of the filters in terms of lower transmission values and wider bandwidths. The presented tunable ultra-wideband band-stop filters can be used effectively for light control applications with their high-performance parameters.

#### Declaration of Ethical Standards

The authors declare that they comply with all ethical standards.

#### Credit Authorship Contribution Statement

Author-1: Conceptualization, investigation, methodology and software, visualization and writing – original draft, supervision, and writing – review and editing

#### Declaration of Competing Interest

The authors have no conflicts of interest to declare regarding the content of this article.

#### Data Availability Statement

All data generated or analyzed during this study are included in this published article.

#### Acknowledgement

The author would like to thank the referees and the editor who contributed to the development of the article for their valuable opinions.

#### 5. References

- Al Mahmud, R., Faruque, M. O. and Sagor, R. H., 2021. A highly sensitive plasmonic refractive index sensor based on triangular resonator. *Optics Communications*, **483**, 126634. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126634>
- Chao, C. T. C., Chau, Y. F. C., Kooh, M. R. R., Lim, C. M., Thotagamuge, R. and Chiang, H. P., 2022. Ultrawide bandstop filter with high sensitivity using semi-circular-like resonators. *Materials Science in Semiconductor Processing*, **151**, 106985. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2022.106985>.
- Chen, Z., Li, H., Li, B., He, Z., Xu, H., Zheng, M. and Zhao, M., 2016. Tunable ultra-wide band-stop filter based on single-stub plasmonic-waveguide system. *Applied Physics Express*, **9(10)**, 102002. <https://doi.org/10.7567/APEX.9.102002>
- Chou Chau, Y. F., Chou Chao, C. T., Huang, H. J., Kooh, M. R. R., Kumara, N. T. R. N., Lim, C. M. and Chiang, H. P., 2020. Ultrawide bandgap and high sensitivity of a plasmonic metal-insulator-metal waveguide filter with cavity and baffles. *Nanomaterials*, **10(10)**, 2030. <https://doi.org/10.3390/nano10102030>
- Ebadi, S. M., Örtengren, J., Bayati, M. S. and Ram, S. B. 2020. A multipurpose and highly-compact plasmonic



- filter based on metal-insulator-metal waveguides. *IEEE Photonics Journal*, **12(3)**, 1-9.  
<https://doi.org/10.1109/JPHOT.2020.2974959>
- Ebadi, S. M. and Khani, S., 2023. Design of a tetra-band MIM plasmonic absorber based on triangular arrays in an ultra-compact MIM waveguide. *Optical and Quantum Electronics*, **55(6)**, 482.  
<https://doi.org/10.1007/s11082-023-04756-2>
- Haque, M. A., Rahad, R., Faruque, M. O., Mobassir, M. S. and Sagor, R. H. 2024. Numerical analysis of a metal-insulator-metal waveguide-integrated magnetic field sensor operating at sub-wavelength scales. *Sensing and Bio-Sensing Research*, **43**, 100618.  
<https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2023.100618>
- Johnson, P. B. and Christy, R. W., 1972. Optical constants of the noble metals. *Physical Review B*, **6(12)**, 4370.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.6.4370>
- Kamari, M., Hayati, M. and Khosravi, S., 2021. Tunable infrared wide band-stop plasmonic filter using T-shaped resonators. *Materials Science in Semiconductor Processing*, **133**, 105983.  
<https://doi.org/10.1016/j.mssp.2021.105983>
- Kamari, M., Hayati, M. and Khosravi, S. 2021. Design of dual-wideband bandstop MIM plasmonic filter using multi-circular ring resonators. *Optical Materials*, **122**, 111678.  
<https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111678>
- Korkmaz, S. 2024. Multiple ultra-narrow band-stop filters based on MIM plasmonic waveguide with nanoring cavities. *Physica Scripta*, **99(3)**, 035503.  
<https://doi.org/10.1088/1402-4896/ad203d>
- Li, H. and Jiao, R. Z., 2019. Plasmonic band-stop filters based on tooth structure. *Optics Communications*, **439**, 201-205.  
<https://doi.org/10.1016/j.optcom.2019.01.017>
- Lin, J., Bo, F., Cheng, Y. and Xu, J., 2020. Advances in on-chip photonic devices based on lithium niobate on insulator. *Photonics Research*, **8(12)**, 1910-1936.  
<https://doi.org/10.1364/PRJ.395305>
- Liu, Y., Tian, H., Zhang, X., Song, J. and Wang, B. 2024. Dual control all-optical switch based on MIM door-type waveguide. *Optics Communications*, **552**, 130072.  
<https://doi.org/10.1016/j.optcom.2023.130072>
- Lu, H., Liu, X., Wang, G. and Mao, D., 2012. Tunable high-channel-count bandpass plasmonic filters based on an analogue of electromagnetically induced transparency. *Nanotechnology*, **23(44)**, 444003.  
<https://doi.org/10.1088/0957-4484/23/44/444003>
- Luo, W., Cao, L., Shi, Y., Wan, L., Zhang, H., Li, S., Wang Y., Sun S., Karim M. F., Cai H., Kwe L. C. and Liu, A. Q., 2023. Recent progress in quantum photonic chips for quantum communication and internet. *Light: Science & Applications*, **12(1)**, 175.  
<https://doi.org/10.1038/s41377-023-01173-8>
- Mariselvam, V., Preethi, A. A. P. and Akilarasu, G., 2022. Etched Triangle Resonator Dual Band Microstrip Band Pass Filter. *Wireless Personal Communications*, **125(2)**, 1537-1544.  
<https://doi.org/10.1007/s11277-022-09620-2>
- Mohammadi, G., Orouji, A. and Danaie, M. 2023. Highly compact tunable hourglass-shaped graphene band-stop filter at terahertz frequencies. *Results in Optics*, **13**, 100575.  
<https://doi.org/10.1016/j.rio.2023.100575>
- Patel, S. K., Surve, J., Prajapati, P. and Taya, S. A., 2022. Design of an ultra-wideband solar energy absorber with wide-angle and polarization independent characteristics. *Optical Materials*, **131**, 112683.  
<https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.112683>
- Tao, J., Huang, X. G., Lin, X., Chen, J., Zhang, Q. and Jin, X., 2010. Systematical research on characteristics of double-sided teeth-shaped nanoplasmonic waveguide filters. *Journal of the Optical Society of America B*, **27(2)**, 323-327.  
<https://doi.org/10.1364/JOSAB.27.000323>
- Tan, D., Wang, Z., Xu, B. and Qiu, J., 2021. Photonic circuits written by femtosecond laser in glass: improved fabrication and recent progress in photonic devices. *Advanced Photonics*, **3(2)**, 024002-024002.  
<https://doi.org/10.1117/1.AP.3.2.024002>
- Wang, H., Yang, J., Zhang, J., Huang, J., Wu, W., Chen, D. and Xiao, G., 2016. Tunable band-stop plasmonic waveguide filter with symmetrical multiple-teeth-shaped structure. *Optics letters*, **41(6)**, 1233-1236.  
<https://doi.org/10.1364/OL.41.001233>
- Yu, S., Wang, S., Zhao, T. and Yu, J., 2020. Tunable ultra-width bandgap U-shaped band-stop filters of chip scale based on periodic staggered double-side trapezoidal resonators in a metallic nanowaveguide. *Optics Communications*, **463**, 125439.  
<https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.125439>
- Zegaar, I., Hocini, A. and Khedrouche, D. 2022. *Plasmonic stop-band filter based on an MIM waveguide coupled with cavity resonators*. In Journal of Physics: Conference Series. Sozopol, Bulgaria, 012025.
- Zegaar, I., Hocini, A., Harhouz, A., Khedrouche, D. and Salah, H. B., 2024. An ultra-wideband bandstop plasmonic filter in mid-infrared band based on metal-insulator-metal waveguide coupled with an hexagonal resonator. *Journal of Optics*, **53**, 272-281.  
<https://doi.org/10.1007/s12596-023-01138-5>
- Zeng, L., Li, J., Cao, C., Li, X., Zeng, X., Yu, Q., Wen K., Yang J. and Qin, Y. 2022. An integrated-plasmonic chip of Bragg reflection and Mach-Zehnder interference based on metal-insulator-metal waveguide. *Photonic Sensors*, **12(3)**, 220303.  
<https://doi.org/10.1007/s13320-022-0650-0>



Zhang, J., Feng, H., Ran, L., Gao, Y. 2022. Theoretical design and analysis of multichannel plasmonic switch based on triangle resonator combined with silver bar. *Optics Communications*, **520**, 128437. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2022.128437>.

**Internet References**

1- <http://www.lumerical.com>, (05.01.2024)



## Sliding Mode Speed Estimation of Induction Motor with MPC Based Flux Weakening Control for Electric Vehicle

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 22.04.2024

Kabul/Accepted: 06.08.2024

Yayımlandı/Published: 02.12.2024

### Elektrikli Araç için MÖK Tabanlı Akı Zayıflatma Kontrolü ile Asenkron Motorun Kayan Modlu Hız Tahmini

Bariş ÇAVUŞ\* , Mustafa AKTAŞ 

Ondokuz Mayıs University, Engineering Faculty, Department of Electrical and Electronics Engineering, Samsun, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Abstract

It is very important to operate the motors used in electric vehicles above the rated speed. In order to operate electric motors with very high speed, the flux must be decreased in a controlled way. The Model Predictive Control (MPC) approach was employed in this study to reduce the flow. In the flux weakening area, the induction motor's performance without a speed sensor has been evaluated. As a result of the study, both the speed sensorless performance of the MPC based flux weakening control has been examined and performance of the Model Reference Adaptive System (MRAS) and the Sliding Mode Observer (SMO) in very high speed region over nominal value has been evaluated. It has been successfully demonstrated that MPC-based flux weakening control with two speed observers can be achieved based on the current, speed, flux, and torque data collected through the simulation study. In addition, as a result of the study, it is seen that SMO has given better results.

**Keywords** Model predictive control; Flux weakening; Model reference adaptive system; Sliding mode observer; Direct torque control.

#### Öz

Elektrikli araçlarda kullanılan motorların nominal hızın üzerinde çalıştırılması çok önemlidir. Elektrik motorlarının çok yüksek hızda çalıştırılabilmesi için akının kontrollü bir şekilde azaltılması gerekmektedir. Bu çalışmada akışı azaltmak için Model Öngörülü Kontrol (MÖK) yaklaşımı kullanılmıştır. Akı zayıflama bölgesinde hız sensörsüz asenkron motorun performansı değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda hem MÖK tabanlı akı zayıflatma kontrolünün hız sensörsüz performansı incelenmiş hem de Model Referans Adaptif Sistem (MRAS) ve Kayan Kipli Gözlemcinin (KKG) nominal değer üzerindeki hız bölgesinde performansı değerlendirildi. Benzetim çalışmasıyla elde edilen akım, hız, akı ve moment verilerine dayanarak iki hız gözlemcisi ile de MPC tabanlı akı zayıflama kontrolünün sağlanabileceği başarıyla gösterilmiştir. Ayrıca çalışma sonucunda KKG'nin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler** Model öngörülü kontrol; Akı zayıflatma; Model referans adaptif sistem; Kayan kipli gözlemci; Doğrudan moment kontrolü.

#### 1. Introduction

Electric vehicles are gaining popularity as a greener substitute for conventional fossil-powered automobiles (Global 2023). Low fuel costs and vehicle emissions are main benefits of electric vehicles, but their short driving range and lengthy charging times are their main drawbacks. In terms of lowering the greenhouse effect and resolving the energy issue, electric vehicles offer a significant benefit (De Santiago *et al.* 2011). Electric vehicles are expected to have a dynamic response, a high level of economy and torque, and dependability (Riba *et al.* 2016). Choosing the right motor, choosing the power electronic converter, and energy storage are the main

challenges for electric vehicles (Farasat *et al.* 2014; Mishra *et al.* 2022).

The choice of traction motor is influenced by various factors such as energy supply, fault tolerance, power density, efficiency, speed range, drive control flexibility, beginning torque, and driving cost per mile. In the context of electric vehicles traction requirements, permanent magnet synchronous motors, induction motors and brushless DC motors are common motor types. For electric vehicles, the induction motor is crucial since it complies with these requirements (Dias and Da Silva 2022). In addition, because of its simple design, simplicity of use, cheap maintenance costs, and durability,

induction motors are widely utilized in a wide range of industrial applications (Quintero-Manríquez et al. 2021, Emiroğlu 2023).

Direct Torque Control (DTC) is a control method used in AC motor drives to ensure high dynamic performance (Ren and Zhu 2014). It is a common control strategy for induction motors because of its ease of use, quick torque response, and resistance to changes in motor parameters (Alsofyani and Idris 2015). Furthermore, DTC eliminates the need for coordinate transformations, simplifying the control algorithm and lessening the computing load. This method chooses the optimal voltage vector for application to the motor by comparing the actual and reference values of torque and flux using hysteresis comparators. In this case, negative results such as high Total Harmonic Distortion (THD) value of stator current, high fluctuation in flux and torque, and difficulty in control at low speeds occur (Douiri and Cherkaoui 2013).

Flux weakening control strategy enables the motor's operational range to be expanded past its rated speed by reducing the magnetic flux in the rotor. A possible method for implementing flux weakening control is Model Predictive Control (MPC) (Zhang and Qi 2022). The MPC control approach makes use of a mathematical model of the system to predict future system behavior and optimize control measures accordingly (Gülbudak and Gökdağ 2022). MPC control reduces steady-state error when compared to other control methods (Alfaro et al. 2021). The MPC technique for flux weakening has only been applied in a very small number of experiments, and in these studies, the stator voltage or current d-axis component could be controlled (Chen et al. 2013; Su et al. 2017; Rubino et al. 2018). Because torque control in current controlled motor is implemented as an open loop, motor settings have a significant impact (Wang et al. 2015). Additionally, it responds slowly to changes in reference values (such as changes in speed or torque) (Rezgui et al. 2013).

The induction motor speed can be obtained using speed sensor in order to manage its speed and torque (Ammar et al. 2020). There are certain drawbacks to utilizing sensors to monitor speed in motor control, such as application challenges, high costs, and loud operation. There are drawbacks to using sensors in motor control, including application challenges, high costs, and noisy operation (Basar et al. 2013; Gómez-Peñate et al. 2019). Sensorless control of AC motors has therefore been suggested (Sengamalai et al. 2022). Different speed estimate techniques have so been put forth (Paicu et al. 2009). The most popular Sliding Mode Observer (SMO)

and Model Reference Adaptive System (MRAS) have been employed in this study. MRAS observer is based on a comparison of the stator currents or fluxes that are observed and those that are estimated (Jeong et al. 2014). An adjustable model and a reference model are used to generate the estimated values. Another important speed estimate technique that is simple to use, performs well, and has strong stability is the SMO (Ammar et al. 2017; Ye 2019). Additionally, it differs from other observers in that it does not require the speed and rotor time constant as inputs. The calculated fluxes and currents will remain unchanged regardless of changes to these values.

In this study, flux weakening control using MPC in DTC controlled induction motor is operated without speed sensor. The speed data required for the induction motor control has been estimated by two different methods which are SMO and MRAS observer. In this paper, the sensorless speed control performance of induction motor with MPC-based flux weakening control using SMO and MRAS have been evaluated. The current, speed (estimated and actual speed), flux and torque plots obtained consequence of the simulation research of the simulation study were evaluated. In addition, two estimation methods have been compared with stator currents THD values, flux and torque ripple amount and speed error values.

## 2. DTC of Induction Motor

As shown in Figure 1, the DTC block scheme for the induction motor is provided in a block design. In control scheme, induction motor driving system has 3 sections which are DTC, speed control and flux weakening control.

Voltage and current of the induction motor are kept track for DTC application. We use the observed voltage and current to calculate the motor torque, flux and flux sector. Flux and moment error values are evaluated with hysteresis comparators. The flux error is compared with a two-level comparator and the moment error is compared with a three-level comparator. As a result of the comparison, the control signal is obtained for both flux and torque. Using predicted flux sector and hysteresis controller signals, switching signals are determined and applied to power electronics switches in motor drivers.

Mathematical model of induction motor based on two axes system can be written as in Equations (1)-(6).

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_s \psi_{sq} \quad (1)$$

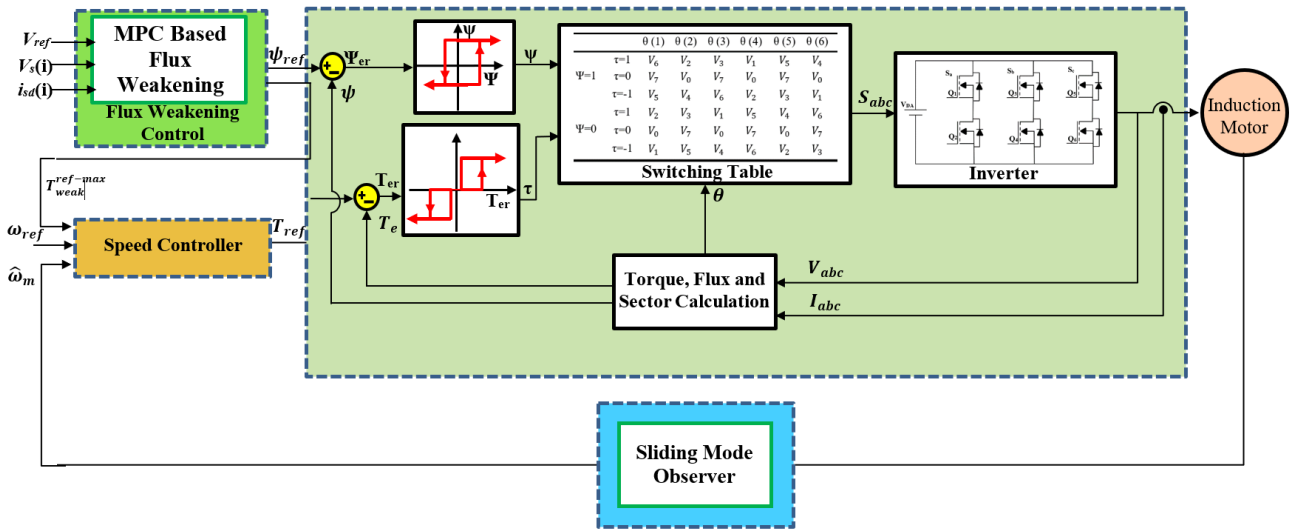


Figure 1. Block diagram of induction motor drive

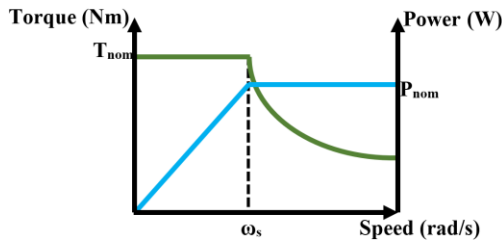


Figure 2. Induction motor power and torque characteristics for all speed range

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_s \psi_{sd} \quad (2)$$

$$\psi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \quad (3)$$

$$\psi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \quad (4)$$

$$T_e = p(i_{sq} \psi_{sd} - i_{sd} \psi_{sq}) \quad (5)$$

$$\omega_r = \frac{1}{B} \left( J \frac{d\omega_r}{dt} - T_e + T_l \right) \quad (6)$$

In (1)–(6), the terms two axes system (d and q-axis); stator and rotor current, stator voltage and stator flux are denoted by the following values:  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$ ,  $i_{rd}$ ,  $i_{rq}$ ,  $v_{sd}$ ,  $v_{sq}$ ,  $\psi_{sd}$ ,  $\psi_{sq}$ .

The stator inductance and resistance, pole pair number, mutual inductance, inertia, load and induced torque, motor speed and friction are represented by the symbols:  $L_s$ ,  $R_s$ ,  $p$ ,  $M$ ,  $J$ ,  $T_l$ ,  $T_e$ ,  $\omega_r$  and  $B$  respectively.

### 3. Flux Weakening Control with MPC

Two different regions can be identified in speed control conjuncture of an induction motor by analyzing the speed-torque-power curve presented in Figure 2. This

region, as shown in Figure 2, is known as the constant torque region because there is a constant highest torque that can be achieved. In this region, the motor speed may be at or below its nominal value and in this region, the control process is performed with the current and voltage vectors of the motor. Motor speed exceeding the nominal speed is the other situation. Current or voltage vectors cannot be used for controlling induction motor because these values reach their nominal values once the motor comes to its nominal speed. In this area, the motor flux can be controlled in order to perform the control function. This area is known as the constant power region because, as Figure 2 illustrates, the motor power is constant there.

Flux weakening is required when running the motor at a speed greater than its nominal speed. The most prevalent and straightforward method for specification the flux reference at high speed is as follows in Equation (7).

$$\psi_{weak}^{ref} = \psi_{nom}^{ref} \frac{\omega_{nom}}{\omega_r} \quad (7)$$

In (7), the terms  $\omega_{nom}$  and  $\omega_r$  indicate rated and instant motor speed,  $\psi_{nom}^{ref}$  and  $\psi_{weak}^{ref}$  indicate flux references for constant torque and power region, respectively. Equation (8) can be utilized for calculating the torque limit in a manner similar to that of the flux reference.

$$T_{weak}^{ref-max} = -T_{weak}^{ref-min} = T_{nom}^{ref-max} \frac{\omega_{nom}}{\omega_r} \quad (8)$$

The upper value of the reference torque is denoted by  $T_{nom}^{ref-max}$  in the preceding equation, and the higher and lower reference values of torque in the constant power zone are indicated by  $T_{weak}^{ref-max}$  and  $T_{weak}^{ref-min}$ , respectively.

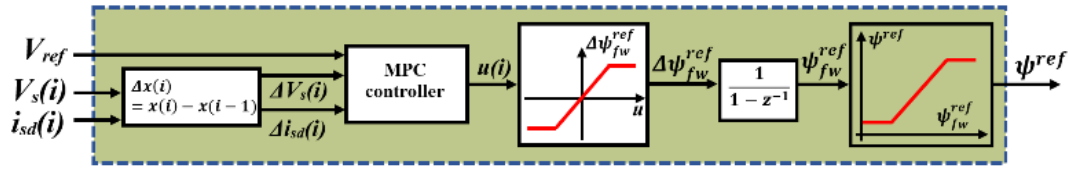


Figure 3. MPC based flux weakening control strategy

MPC has been used in this study to achieve better control performance in the region where flux is weakening. The flux weakening part of control scheme in Figure 1 is showed in greater detail in Figure 3.

The prediction model can be developed using the differential equations for the stator flux and current's d-axis components. The amount of variations in voltage is also taken into consideration. As seen in Equations (9) and (10), the d-axis component of stator flux, current, and voltage derivation in discrete time.

$$i_{sd}(i+1) = \left(1 - \frac{T_s}{\tau_c}\right) i_{sd}(i) + \frac{i_{sd}}{L_m \tau_c} \psi^{ref}(i) \quad (9)$$

$$\psi_{sd}(i+1) = \left(1 - \frac{T_s}{\tau_c}\right) \psi_{sd}(i) + \frac{T_s L_s}{\tau_r} \left(1 - \frac{\sigma \tau_r}{\tau_c}\right) i_{sd}(i) + \frac{\sigma T_s L_s}{L_m \tau_c} \psi^{ref}(i) \quad (10)$$

In the constant power region, for MPC based control of flux weakening, the steady-state model of the system can be expressed as in Equations (11) and (12).

$$x(i+1) = Ax(i) + Bu(i) \quad (11)$$

$$y(i) = Cx(i) \quad (12)$$

Here  $x(i) = [\Delta i_{sd}(i) \Delta u_s(i)]$ ,  $y(i) = u_s(i)$  and  $u(i) = \Delta \psi_{az}^{ref}(i)$ . Matrices A, B and C in Equations (11) and (12);

$$A = \begin{bmatrix} 1 - \frac{T_s}{\tau_c} & 0 \\ \frac{v_{sq}}{\sqrt{v_{sd}^2 + v_{sq}^2}} \frac{\omega_s T_s L_s}{\tau_r} \left(1 - \frac{\sigma \tau_r}{\tau_c}\right) & 1 - \frac{T_s}{\tau_r} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{T_s}{\tau_c} \\ \frac{v_{sq}}{\sqrt{v_{sd}^2 + v_{sq}^2}} \frac{\sigma \omega_s T_s L_s}{\tau_c} \end{bmatrix}, \quad C = [0 \quad 1]$$

If Equations (11) and (12) are rewritten;

$$Y = \Phi Z(i) + \theta \Delta U(i) \quad (14)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} ME \\ ME^2 \\ \vdots \\ ME^{N_c} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$\theta = \begin{bmatrix} MF & 0 & \cdots & 0 \\ MEF & MF & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ ME^{N-1}F & ME^{N-2}F & \cdots & ME^{N-N_c}F \end{bmatrix}$$

Two of the most critical variables in the flux weakening area are upper reference value of voltage and flux. Therefore, it's critical to develop the cost function to reduce both the voltage reference-to-motor differential and the flux reference at the same time. MPC problem in the flux weakening area may be solved by formulating the system's cost function in Equation (16).

$$J_{cf} = \min \left( \sum_{n=1}^N \|P(i) - u_s(i+n)\|_2^2 + k_p \sum_{m=1}^{N_c} \|\Delta \psi_{weak}^{ref}(i+m-1)\|_2^2 \right) \quad (16)$$

Equation (16) is used for performing flux weakening control using the cost function.

#### 4. Speed Estimation Methods

Due to the aforementioned drawbacks of sensor functioning, speed estimate techniques have been suggested in studies as a way to gather speed data without a sensor. Low cost and great dependability are offered by sensorless research. For speed estimate in this paper, MRAS and SMO were investigated.

##### 4.1. Model Reference Adaptive System

The AC motor current model with speed is regarded as the induction motor adaptive model in the MRAS observer. The current model may be used to compute position and speed of rotor. The induction motor adaptive model may be expressed as in Equations (17) and (18).

$$\frac{di_{sd}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left[ -R_s i_{sd} + \sigma L_s \omega_s i_{sq} + \frac{L_m R_r}{L_r^2} \psi_{rd} + \omega_s \frac{L_m}{L_r} \psi_{rq} + V_{sd} \right] \quad (17)$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left[ -R_s i_{sq} - \sigma L_s \omega_s i_{sd} - \omega_s \frac{L_m}{L_r} \psi_{rd} + \frac{L_m R_r}{L_r^2} \psi_{rq} + V_{sq} \right] \quad (18)$$

Equations (19), (20) and (21) can be used to estimate speed .

$$\frac{di'_{sd}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left[ -R_s \hat{i}'_{sd} + \sigma L_s \omega_s \hat{i}'_{sq} + \frac{L_m R_r}{L_r^2} \psi_{rd} + \omega_s \frac{L_m}{L_r} \psi_{rq} + V_{sd} \right] \quad (19)$$

$$\frac{di'_{sq}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left[ -R_s \hat{i}'_{sq} - \sigma L_s \omega_s \hat{i}'_{sd} - \omega_s \frac{L_m}{L_r} \psi_{rd} + \frac{L_m R_r}{L_r^2} \psi_{rq} + V_{sq} \right] \quad (20)$$

$$\hat{\omega}_m = \int k_1(i'_d \hat{i}'_q - i'_q \hat{i}'_d) dt + k_2(i'_d \hat{i}'_q - i'_q \hat{i}'_d) + \hat{\omega}_m(0), k_1, k_2 \geq 0 \quad (21)$$

Here, ' indicates that the parameter is derived from an adaptive model and ^ indicates that the parameter is estimated.

#### 4.2. Sliding Mode Observer

Since sliding mode is a changeable organization system, its reliance on the parameters of the system is quite low. The functioning of the sliding mode system is thus unaffected by uncertainties and disruptive forces inside the system. Stator resistance and rotor time constant are two examples of variables that change over time while AC motors operate. For improved control and reducing the negative effects of these variations during motor control, the sliding-mode structure is ideal.

An alternate approach for variable systems is sliding mode. The definition of a system with changeable structure is as follows. Additionally, the sliding surface (S) is described in the following description. In equations, the symbol  $\dot{x}$  denotes the derivative form of x.

$$\dot{x} = f(x, t, u), x \in R^n, u \in R^m \quad (22)$$

$$u = \begin{cases} u^+(x, t) & S(x) > 0 \\ u^-(x, t) & S(x) < 0 \end{cases} \quad (23)$$

$$S^T = (S_1, \dots, S_m) \quad (24)$$

Figure 4 demonstrates a sliding mode observer for induction motor. The following equations contain the induction motor current signals that can be examined by the observer.

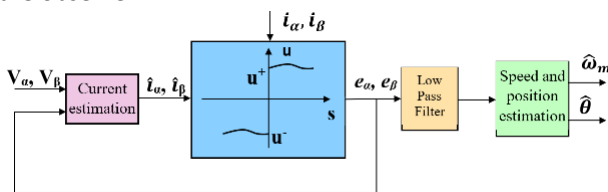


Figure 4. Sliding mode speed observer

$$\frac{d\hat{i}_\alpha}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left[ -R_s \hat{i}_\alpha + \sigma L_s \omega_s f(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) + \frac{L_m R_r}{L_r^2} \psi_{rd} + V_{sd} \right] \quad (25)$$

$$\frac{d\hat{i}_\beta}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left[ -R_s \hat{i}_\beta - \sigma L_s \omega_s f(\hat{i}_\beta - i_\beta) + \frac{L_m R_r}{L_r^2} \psi_{rq} + V_{sq} \right] \quad (26)$$

Here, ^ indicates that variable is estimated. The discontinuous control block receives the estimated and

measured current values, and  $e_\alpha$  and  $e_\beta$  control signals are produced.

$$e_\alpha = k_1 \text{sign}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \quad (27)$$

$$e_\beta = k_1 \text{sign}(\hat{i}_\beta - i_\beta) \quad (28)$$

Here,  $k_1$  is a positive gain. Equations (27) and (28) allow us to describe the sliding surface as following.

$$S = [s_\alpha \ s_\beta]^T = [\hat{i}_\alpha - i_\alpha \ \hat{i}_\beta - i_\beta]^T \quad (29)$$

According to Lyapunouv stability analysis;

$$V = \frac{1}{2} S^T S, V > 0 \quad (30)$$

$$\dot{V} = \frac{1}{2} S^T \dot{S}, \dot{V} < 0 \quad (31)$$

The low pass filter is applied to the resultant control signals ( $e_\alpha$  and  $e_\beta$ ), and the filter output values of  $e_\alpha$  and  $e_\beta$  are then calculated. These values can be used to predict the rotor position and speed in the manner shown in Equations (32) and (33).

$$\hat{\theta} = -\tan^{-1}\left(\frac{e_\alpha}{e_\beta}\right) \quad (32)$$

$$\hat{\omega}_m = \frac{d\hat{\theta}}{dt} \quad (33)$$

#### 5. Simulation Results

The speed control with sensorless method of DTC driven induction motor with MPC based flux weakening control is implemented in MATLAB m-file. For this reason, MATLAB is used for building the control system block diagram shown in Figure 1 utilizing the dynamic equations of an induction motor given in (1)-(6).

The block diagram showing the operation of the simulation program prepared in MATLAB is shown in Figure 5. As seen in the block diagram, the motor parameters given in Table 1 are first defined in the simulation program. The induction motor 3-phase currents are calculated with Equations (1)-(6). Using the calculated currents and voltage, the motor flux, torque and sector are calculated. After speed estimation with the sliding mode observer, moment is determined with the speed controller, flux reference is determined with the MPC, and the obtained signals are passed through the hysteresis controller. The appropriate voltage vector is determined using the sector and hysteresis controller outputs. The motor parameters utilized in the simulation study are listed in Table 1.

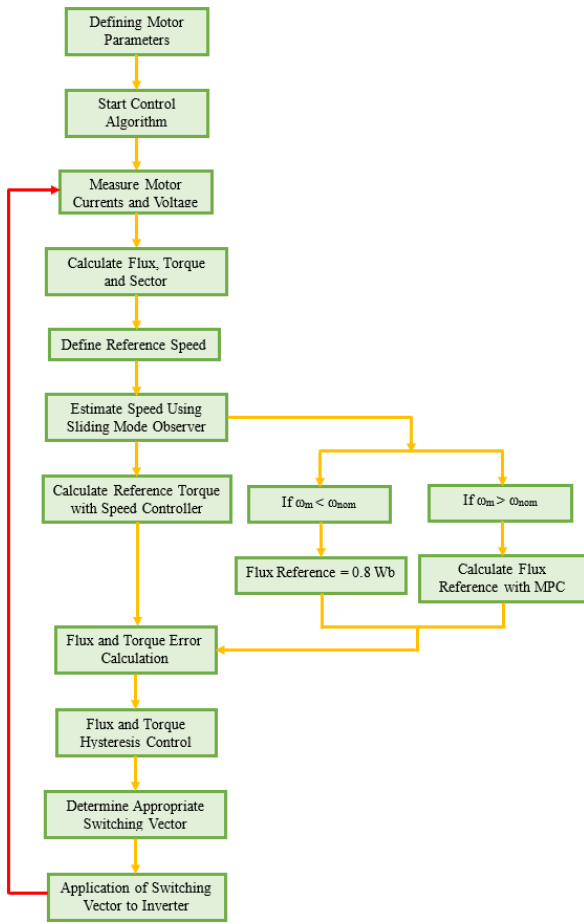
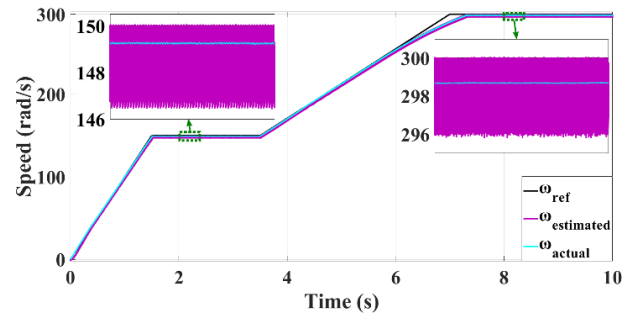


Figure 5. MATLAB simulation flowchart

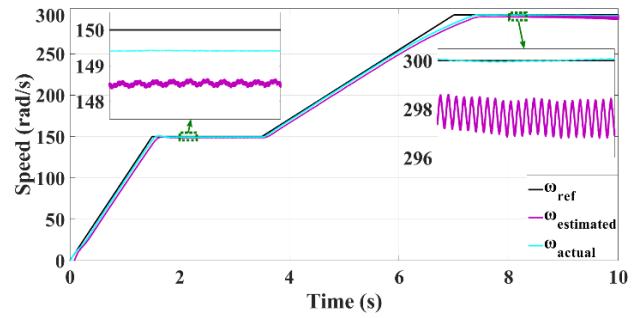
Table 1. Induction motor parameters

Parameter	Value
P	1,1 kW
R <sub>s</sub>	7,7 Ω
L <sub>s</sub>	0,0617 H
R <sub>r</sub>	15,704 Ω
L <sub>r</sub>	0,0617 H
R <sub>c</sub>	882,42 Ω
L <sub>m</sub>	0,04963 H
p	2
J	0,00689 kg m <sup>2</sup>
B	0,00689 Nm-s/rad

The speed reference given in Figure 6 has been utilized. Figure 6 represents the sensorless speed performance of the DTC driven induction motor driver with MRAS and SMO. When examining the speed graph for MRAS, the estimated speed is quite fluctuating. The predicted speed fluctuation with SMO is less. When the graphs given in Figure 6 are examined, the effect of the fluctuation in the estimated speeds on the speed control performance is seen. Speed control performance is better with less fluctuation SMO. In addition, when the Root Mean Squared Error (RMSE) values for the nominal speed and flux weakening region given in Table 2 are examined, it is seen that SMO is more successful.



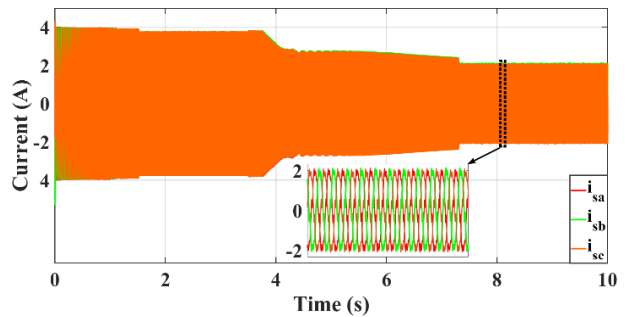
(a)



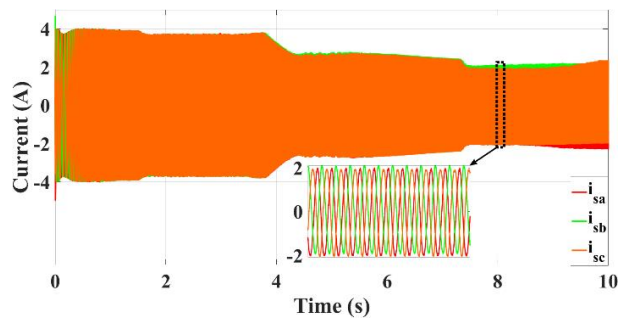
(b)

Figure 6. Speed performance of sensorless induction motor drive for (a) MRAS (b) SMO

Current graphs of DTC driven induction motor with MRAS and SMO are given in Figure 7. When analyzing the current graphs zoomed inside the flux weakening region, it becomes obvious there is a significant amount of current fluctuations with MRAS. When the THD values of the stator currents are examined, lower values are obtained in the MPC based flux weakening control region for the sensorless induction motor driver with SMO.



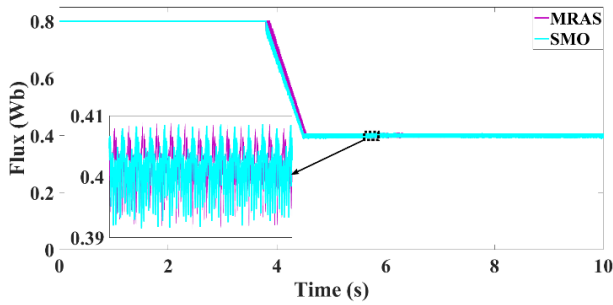
(a)



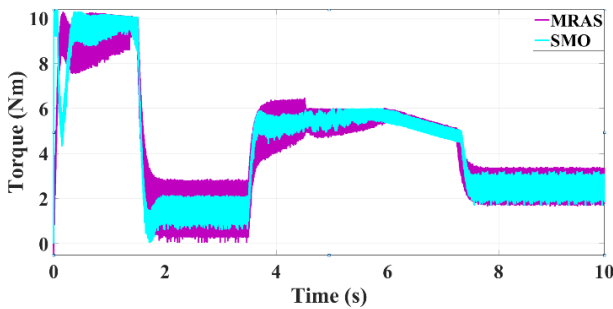
(b)

Figure 7. Stator currents of sensorless induction motor drive for (a) MRAS (b) SMO





**Figure 8.** Flux of sensorless induction motor drive for MRAS and SMO



**Figure 9.** Torque of sensorless induction motor drive for MRAS and SMO

Flux and torque graphs for MRAS and SMO for speed sensorless induction motor drive are given in Figure 8 and 9, respectively. For SMO, there is less ripple in the torque plot in the rated speed and flux weakening regions. When the flux plot was examined, SMO has given a faster response. However, there was no significant change in flux fluctuation.

**Table 2.** Performance comparison for speed observers

Parameter	MRAS	SMO
THD <sub>isa</sub>	8.5025	4.1979
THD <sub>isb</sub>	8.9263	4.7204
THD <sub>isc</sub>	8.9825	4.6073
RMSE <sub>nominal</sub>	0.7409	0.5905
RMSE <sub>flux-weakening</sub>	1.3105	0.3202

## 6. Conclusion

This study assesses an induction motor sensorless speed control capability using flux weakening control via MPC. The traction drive's overall performance, efficiency, and dependability are all negatively impacted by the use of speed sensors. Sensorless traction motor control offers dependable and incredibly effective performance. The speed required for speed control to be realized is estimated by MRAS and SMO. There are less speed errors with SMO when the speed graphs obtained by using the two speed estimating methods are analyzed. When comparing the two approaches, although there are no notable differences in terms of steady state ripple, upon examining the flux plot, SMO provides a more dynamic response. According to what is given in the Table 2, the performance of SMO is quite high, especially in the flux

weakening region. The performance obtained by using SMO has a positive effect on electric vehicle applications in terms of both precise speed adjustment and efficient operation. When the current, speed and torque graphs are evaluated, less ripple has been occurred with SMO. Low ripple in current, speed and torque causes low power loss during operation and provides energy efficiency in electric vehicle applications. When the THD values of the stator currents in the flux weakening region are examined, it is seen that SMO performs better than MRAS.

### Declaration of Ethical Standards

The authors declare that they comply with all ethical standards.

### Credit Authorship Contribution Statement

Author-1: Conceptualization, Methodology / Study design, Software, Validation, Formal analysis, Investigation, Resources, Writing – original draft, Writing – review and editing

Author-2: Conceptualization, Methodology / Study design, Software, Validation, Formal analysis, Investigation, Resources, Writing – original draft, Writing – review and editing

### Declaration of Competing Interest

The authors have no conflicts of interest to declare regarding the content of this article.

### Data Availability

All data generated or analyzed during this study are included in this published article.

## 7. References

- Alfaro C., Guzman R., de Vicuña L.G., Miret J., Castilla M., 2021. Dual-Loop Continuous Control Set Model-Predictive Control for a Three-Phase Unity Power Factor Rectifier. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **37(2)**, 1447-1460. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3107221>
- Alsofyani I.M. and Idris N.R.N., 2015. Simple flux regulation for improving state estimation at very low and zero speed of a speed sensorless direct torque control of an induction motor. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **31(4)**, 3027-3035. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2447731>
- Ammar A., Benakcha A. and Bourek A., 2017. Adaptive MRAC-based direct torque control with SVM for sensorless induction motor using adaptive observer. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **91(5)**, 1631-1641. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9840-5>
- Ammar A., Kheldoun A., Metidji B., Ameid T. and Azzoug Y., 2020. Feedback linearization based sensorless direct torque control using stator flux MRAS-sliding mode observer for induction motor drive. *ISA Transactions* **98**, 382-392. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.08.061>
- Basar M.S., Bech M.M., Andersen T.O., Scavenius P. and Thomas-Basar T., 2013. *Comparison of sensorless FOC*

- and SVM-DTFC of PMSM for low-speed applications. Proceedings of 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. Istanbul, Türkiye, 864-869.
- Chen N., Zheng Z., Zhou J., Li Y. and Wang K., 2013. A novel MPC flux weakening method for induction motor applied in electric wheel. Proceedings of 2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Busan, South Korea, 113-118.
- De Santiago J., Bernhoff H., Ekergård B., Eriksson S., Ferhatovic S., Waters R. and Leijon M., 2011. Electrical motor drivelines in commercial all-electric vehicles: A review. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* **61(2)**, 475-484.  
<https://doi.org/10.1109/TVT.2011.2177873>
- Dias C.G. and Da Silva L.C., 2022. Induction Motor Speed Estimation Based on Airgap Flux Measurement Using Hilbert Transform and Fast Fourier Transform. *IEEE Sensors Journal*, **22(13)**, 12690 - 12699.  
<https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3176085>
- Douiri M.R. and Cherkaoui M., 2013. Comparative study of various artificial intelligence approaches applied to direct torque control of induction motor drives. *Frontiers in Energy* **7(4)**, 456-467.  
<https://doi.org/10.1007/s11708-013-0264-8>
- Emiroğlu S., 2023. Parameter Estimation of Induction Motors using Hybrid GWO-CS Algorithm. *Sakarya University Journal of Science*, **27(2)**, 361-369.  
<https://doi.org/10.16984/saufenbilder.1175899>
- Farasat, Mehdi, Andrzej M Trzynadlowski and Mohammed Sami Fadali, 2014. Efficiency improved sensorless control scheme for electric vehicle induction motors, *IET Electrical Systems in Transportation*, **4(4)**, 122-31.  
<https://doi.org/10.1049/iet-est.2014.0018>
- Global E (2023) Global EV Outlook 2023: Catching up With Climate Ambitions.
- Gómez-Peñate S., Valencia-Palomo G., López-Estrada F.R., Astorga-Zaragoza C.M., Osornio-Rios R.A., Santos-Ruiz I., 2019. Sensor fault diagnosis based on a sliding mode and unknown input observer for Takagi-Sugeno systems with uncertain premise variables. *Asian Journal of Control*, **21(1)**, 339-353.  
<https://doi.org/10.1002/asjc.1913>
- Gülbudak O. and Gökdağ M., 2022. Performance evaluation of model predictive control method for neutral point clamped inverter. *Turkish Journal of Engineering*, **6(3)**, 245-250.  
<https://doi.org/10.31127/tuje.962857>
- Jeong I.W., Choi W. S. and Park K. H., 2014. Sensorless vector control of induction motors for wind energy applications using MRAS and ASO. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, **9(3)**, 873-881.  
<https://doi.org/10.5370/JEET.2014.9.3.873>
- Mishra, Saurabh, Anshul Varshney, Bhim Singh, and Hina Parveen, 2022. Driving-cycle-based modeling and control of solar-battery-fed reluctance synchronous motor drive for light electric vehicle with energy regeneration, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **58(5)**, 6666-75.  
<https://doi.org/10.1109/TIA.2022.3181224>
- Paicu M., Boldea I., Andreescu G.D. and Blaabjerg F., 2009. Very low speed performance of active flux based sensorless control: interior permanent magnet synchronous motor vector control versus direct torque and flux control. *IET electric power applications* **3(6)**, 551-561.  
<https://doi.org/10.1049/iet-epa.2008.0290>
- Quintero-Manríquez, Eduardo, Edgar N Sanchez, M Elena Antonio-Toledo, and Flavio Muñoz, 2021. Neural control of an induction motor with regenerative braking as electric vehicle architecture. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **104**, 1-14.  
<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2021.104275>
- Ren Y. and Zhu Z.Q., 2014. Enhancement of steady-state performance in direct-torque-controlled dual three-phase permanent-magnet synchronous machine drives with modified switching table. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **62(6)**, 3338-3350.  
<https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2376881>
- Rezgui S., Mehdi A., Legrioui S., Meddouche H., Boulahia A. and Benalla H., 2013. *IRFOC vs DTC performance comparison analysis*. Proceedings of 2013 3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems. Istanbul, Türkiye, 1-6.
- Riba J.R., López-Torres C., Romeral L. and Garcia A., 2016. Rare-earth-free propulsion motors for electric vehicles: A technology review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **57**, 367-379.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.121>
- Rubino S., Bojoi R., Odhano S.A. and Zanchetta P., 2018. Model predictive direct flux vector control of multi-three-phase induction motor drives. *IEEE Transactions on Industry Applications* **54(5)**, 4394-4404.  
<https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2829458>
- Sengamalai U., Anbazhagan G., Thamizh T.T., Vishnuram P., Khurshaid T. and Kamel S., 2022. Three Phase Induction Motor Drive: A Systematic Review on Dynamic Modeling, Parameter Estimation, and Control Schemes. *Energies* **15(21)**, 1-39.  
<https://doi.org/10.3390/en15218260>
- Su D., Zhang C. and Dong Y., 2017. An improved continuous-time model predictive control of permanent magnetic synchronous motors for a wide-speed range. *Energies* **10(12)**, 1-18.  
<https://doi.org/10.3390/en10122051>
- Wang Y., Shi Y., Xu Y. and Lorenz R.D., 2015. A comparative overview of indirect field oriented

control (IFOC) and deadbeat-direct torque and flux control (DB-DTFC) for AC Motor Drives. *Chinese Journal of Electrical Engineering* **1(1)**, 9-20.  
<https://doi.org/10.23919/CJEE.2015.7933134>

Ye S., 2019. Fuzzy sliding mode observer with dual SOGI-FLL in sensorless control of PMSM drives. *Isa Transactions* **85**, 161-176.  
<https://doi.org/10.1016/j.isatra.2018.10.004>

Zhang Y. and Qi R., 2022. Flux-weakening drive for IPMSM based on model predictive control. *Energies* **15(7)**, 1-14.  
<https://doi.org/10.3390/en15072543>



## Enerji Depolama Sistemini İçeren İletim Hattı için Uyarlanabilir Mesafe Koruması Röle Tasarımı

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 17.04.2024

Kabul/Accepted: 16.08.2024

Yayımlandı/Published:02.12.2024

### Design of Adaptive Distance Protection Relay for Transmission Lines Incorporating Energy Storage Systems

Medine İZGİ\*, Mehmet Rıdâ TÜR

Batman Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi - Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Batman, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

Enerji depolama sistemleri entegre edilmiş güç sistemleri, gerçek gücün sistemde kesintisiz enerji iletilmesine olanak tanır, ayrıca hattın reaktans kompanzasyonunu sağlamaktadır. Bu durum, iletim sisteminde gerçek ve reaktif gücün daha iyi kontrol edilmesini mümkün kılar. Ancak, bu sistemlerin çalışması, geleneksel iletim hattı korumasının doğru çalışması için ek sorunlar ortaya çıkarmaktadır. Bu makalede, hibrit seri kompanze model hat ortasına kurulu depolama sistemi tarafından simüle edilen reaktans ve direncin, uzak mesafe rölesinin performansı üzerindeki etkisinin analizi yapılmaktadır. Olası işletme modları ve depolama kontrol stratejileri ile birlikte bir inceleme gerçekleştirilerek uzak mesafe korumasının çalışma olasılığı Matlab/Simulink simülasyonu test modelinde araştırılmıştır. Seri kompanzasyon kullanarak enerji depolama/generatör entegrasyonunu içeren iletim sistemlerinin tamamını işletme kadranlarını kullanmasına yardımcı olacak EDS ile kompanze edilmiş hatların güvenilir korumasını sunmaktadır.

#### Abstract

Integrated energy storage systems in power grids facilitate continuous energy transmission and also offer compensatory measures for reactive power in the line. This results in enhanced management of both real and reactive power within the transmission network. Nevertheless, the operation of such systems introduces additional complexities that challenge the effectiveness of conventional transmission line protection mechanisms. In this paper, we delve into the implications of simulating reactance and resistance through a storage system placed centrally in the line, evaluating its impact on the performance of distance relay protection. We explore various operational modes and control strategies for storage, assessing the feasibility of distance protection within a Matlab/Simulink simulation framework. The primary objective of this study is to ensure robust protection for compensated lines utilizing EDS, thereby optimizing the operational spectrum of transmission systems incorporating energy storage/generator integration via series compensation.

**Anahtar Kelimeler:** Enerji Depolama Sistemleri; Uzak Mesafe Rölesi; Adaptif Röle; İletim Hatları.

**Keywords:** Energy Storage Systems; Long Distance Relay; Adaptive Relay; Transmission Lines.

#### 1. Giriş

FACTS (Flexible AC Transmission Systems) kontrol cihazları, sistem kontrol edilebilirliğini ve güç transfer kapasitesini artırarak AC iletim sistemini esnek hale getirir (Padiyar 2007, Hingorani vd. 2011, Rao 2016). Seri FACTS kontrol cihazları, genellikle uzun iletim hatlarında hat reaktansını telafi etmek ve bu nedenle güç transferini kontrol etmek için kullanılmaktadır. Seri FACTS kontrol cihazları aynı zamanda karmaşık AC/DC sistemlerinin geçici kararlılığını artırır (Bilel vd. 2018). Ekonomik nedenlerden dolayı, sabit bir seri kondansatör ile birlikte bir voltaj kaynağı kontrol cihazı (VSC) tabanlı bir kombinasyonunu kullanmak tercih edilir (Padiyar vd. 2003). Enerji Depolama Sisteminin (EDS) ek bir avantajı, (pil, yakıt hücresi veya süper iletken manyetik enerji depolama) entegre etme olanağıdır, bu da gerçek güç

sağlama açısından avantaj sağlar. Sonuç olarak, "güç transfer kontrolünün artırılması, geçici kararlılık iyileştirmesi ve güç salınımlarının sönümlenmesi" sağlanır (Beza vd. 2014). Ana iletim hattının kullanılmaması, sistemin büyük bir bölümüne güç kaybına ve tedarikçi ile müşteri arasında ekonomik kayba neden olabilir. Bu nedenle, kullanılan yöntem diğer yöntemler ile karşılaştırıldığında, iletim hatları için koruma düzeni, hasarı yerinde sınırlamak ve geçici kararlılığı sürdürmek için güvenilir ve hızlı bir şekilde çalışmalıdır.

Uzak mesafe koruması, birincil iletim hatları için en çok tercih edilen şemadır ve mevcut uygulama, dijital koruma tekniklerini benimsemektir (Hossain vd. 2018, Babu vd. 2011). Sistemdeki bir bozulma sırasında, seri veya şönt bağlı FACTS kontrol cihazları tarafından iletim hatlarının telafisi, kontrol eylemleri nedeniyle birincil güç sistem

parametrelerinin değiştirilmesine yol açar. Geleneksel uzak mesafe rölesi performansının, FACTS kontrol cihazlarının işletme ve kontrolü tarafından etkileneceği beklenmektedir. FACTS kontrol cihazlarının uzak mesafe rölesi işleminin doğruluğu üzerindeki etkisini incelemiştir. Seri FACTS kontrol cihazlarının işletilmesine bağlı olarak dijital uzak mesafe rölesi etkinliği incelenmiştir (Dash *vd.* 2000, Singh *vd.* 2007, Abdollahzadeh *vd.* 2015, Purohit Purohi *vd.* 2019).

Şönt bağlı FACTS kontrol cihazlarının etkisini tartışmış ve UPFC kompanse hatların uzak mesafe korumasını etkileyen faktörleri incelemiştir (Sidhu *vd.* 2005, Albasri *vd.* 2007, Niaki, *vd.* 2015, Mishra *vd.* 2020). FACTS kontrol cihazlarını içeren hatlar için adaptif uzak mesafe koruması tanımlanmıştır (Abidin *vd.* 2008, Dash *vd.* 2000, Dhenuvakonda *vd.* 2019). Rapor edilen çalışma, enerji depolama cihazı olmadan EDS ve STATCOM'un sınırlı bir aralıkta iki kadrant işlemlerini dikkate alınmaktadır. Enerji depolama cihazı olmadan EDS, sadece sınırlı bir reaktans telafisi aralığında çalışabilir (Çakmak *vd.* 2023, Oymak *vd.* 2022). Dönüştürücü ve kondansatör kayıplarını karşılamak için EDS, reaktif bir gerilim enjekte eder ve ihmal edilecek kadar küçük bir gerçek gerilim enjekte eder. Enjekte edilen gerilimin hat akımı ile olan açısı yaklaşık olarak 90 derecedir. Bir enerji depolama cihazı ile EDS tarafından enjekte edilen gerçek gerilim sıfır, büyük pozitif veya büyük negatif olabilir ve işletme bölgesi çok daha geniştir, tüm dört kadrantı kapsar. Enjekte edilen gerilimin açısı 0 ile 360 derece arasında olabilir (Paz *vd.* 2015).

Enerji depolama cihazlarını içeren FACTS kontrol cihazlarının güç sistemleri işletme ve kontrolü üzerindeki etkilerini analiz eden sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. "Enerji depolama ile donatılmış EDS'nin kararlı durum karakteristikleri" değişiklikleri vurgulanmıştır (Zhang *vd.* 2001). Birleşik bir STATCOM-yakıt hücresi ile geçici kararlılık artırımı tartışılmıştır (Stella *vd.* 2016). Ancak, FACTS kontrol cihazlarının DC hattına bağlı enerji EDS uzak mesafe rölesi işlemi üzerindeki etkisi araştırılmamıştır. İlk çabalar, enerji depolama cihazının (SMES) EDS ve UPFC ile entegrasyonunun iletim hattı korumasının performansı üzerindeki etkisini biraz aydınlatmıştır (Kazemi *vd.* 2008, Jamali *vd.* 2008) Ancak, EDS tarafından simüle edilen reaktans ve direnç etkisi ile EDS'nin kontrol stratejisi uzak mesafe rölesi performansı üzerinde tam olarak analiz edilmemiştir. EDS tarafından simüle edilen reaktans ve direnç ile bir enerji depolama cihazına sahip EDS sunulmuştur (Rao *vd.* 2019). Ancak, hatada uzak mesafe rölesi performansı üzerindeki etkisi araştırılmamıştır. Enerji depolama olmadan EDS, pozitif veya negatif reaktansı ve ihmal edilebilir pozitif direnç simüle eder ve

bu, EDS'nin kayıplarını karşılamak için kullanılır (Tur 2020). Bu nedenle, uzak mesafe rölesi tarafından görülen tek şeyin reaktansın değişeceği beklenir. Ancak, enerji depolama ile birlikte EDS, büyük pozitif veya negatif direnç simüle eder. Bu nedenle, uzak mesafe rölesi tarafından görülen hem reaktans hem de direnç önemli ölçüde değişir. EDS için uygun kontrol stratejisinin hatada ölçülen empedans üzerindeki etkisi tam olarak araştırılmamıştır. Simüle edilen reaktans ve direnç hesaplamasına dayalı adaptif röle ayarı için yeni bir metodoloji sunulmaktadır, böylece rölenin yanlış çalışması engellenir. Bu çalışmanın ikinci bölümünde iletim hatlarına yönelik hazırlanmış test modeli sunulmuş, üçüncü bölümünde yöntemle ilişkin içerik hazırlanmış ve dördüncü bölümde de sonuç kısmı sunulmuştur.

Yeni koruma yöntemleri tasarlanmanın yanı sıra, bazı araştırmacılar inverterin yüksek derecede kontrol edilebilir yeteneğine odaklanarak, koruma ve IIRG kontrolünü koordine ederek çözümü geliştirmişlerdir. (Liu *vd.* 20218) referansı, arıza sırasında sistem kararsızlık fenomeninin mekanizmasını incelemiş ve ortaya çıkan enerji depolama sistemine (ESS) dayalı bir kararlılık kontrol stratejisi önererek rüzgar güç sisteminin arıza sırasında kararlılığını sağlamıştır. Makine tarafı dönüştürücünün vektör kontrolünü rotor akım referans komutuna bir kompanzasyon terimi ekleyerek iyileştirmiş ve bu sayede DFIG'nin arıza döneminde röle koruması üzerindeki olumsuz etkiyi etkili bir şekilde azaltmıştır (Miao *vd.* 2020). Kontrol stratejisini dikkate alan matematiksel eşdeğer bir model oluşturulmuş ve bağlı olduğu IIRG'ye katkıda bulunan arıza akımının bir tahmini algoritması tanıtılmıştır (Han *vd.* 2018). Bu temelde, gelişmiş bir sanal çok terminall akım farklı koruma şeması önerilmiştir. Kendini senkronize etme teknolojisine dayanan adaptif bir frenleme akımını çıkış arıza akımının büyüklüğüne göre ayarlayabilen bir diferansiyel koruma yöntemi inverter kontrol stratejisi ile birlikte önermiştir (Zhou *vd.* 2021). Dağıtık Güç Üretimini Şebekeye Entegrasyonu ve Olası Etkilerinin İncelenmesi yapılmıştır (Gökçek, T., *vd.* 2019). Ayrıca şebekeye Bağlı ve Adalı Çalışma Modlarını Dikkate Alan Bir Dağıtım Sistemi için Uyarlanabilir Koruma Şeması tasarlanmıştır (Ateş Y, *vd.* 2016). Dağıtılmış üretim de dahil olmak üzere dağıtım sistemlerinde uyarlanabilir röle koordinasyonunun uygulanması gerçekleştirilmiştir (Ateş Y. *vd.* 2016).

Yenilenebilir enerjiyle ilgili güç sistemlerinin koruması için çağdaş çözümleri geniş kapsamlı olarak gözden geçirerek, yeni koruma yöntemleri tasarlama yöntemlerinin geleceğin sistem arıza özelliklerine karşılık verebileceği bulunmuştur. Ancak, güvenilirlik halen pratiğe yeterince güçlü değildir. Kontrol ve koruma arasındaki



$R_{line}$  ve  $X_{line}$  iletim hattının direnci ve endüktif reaktansdır. Jeneratör geriliminin büyüklüğü ve jeneratör tarafından sağlanan güç aşağıdaki şekildedir.

$$V_{gm} = \sqrt{V_{gQ}^2 + V_{gD}^2} \quad (10)$$

$$P_g = V_{gQ} * i_Q + V_{gA} * i_A \quad (11)$$

EDS tarafından enjekte edilen reaktif gerilim,

$$V_Q = (X_{EDS} * I) = V_A^i * \cos \varphi - V_Q^i * \sin \varphi \quad (12)$$

EDS tarafından çekilen aktif güç,

$$P = i_A * V_A^i + i_Q * V_Q^i \quad (13)$$

### 3. Materyal ve Metot

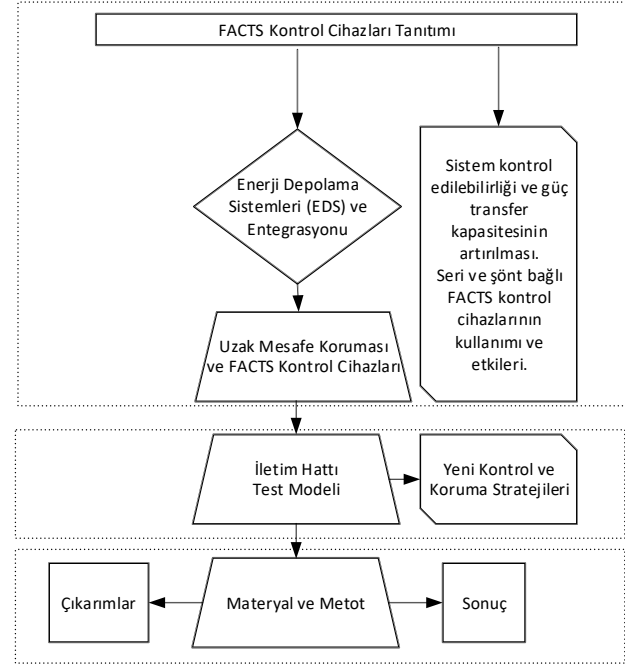
EDS enerji depolama ile entegre edildiğinde, genellikle hem  $V^i$  hem de  $\gamma$  'yı kontrol etmek için depolama sistemi denetleyicisi kullanılır. Gerçek gerilim enjeksiyonunu belirlemek için  $V_A$  sabit tutulabilir veya sabit  $R_{EDS}$  kontrolü veya sabit PI kontrolü uygulanabilir. Benzer şekilde, reaktif gerilim enjeksiyonunu belirlemek için  $V_Q$  sabit tutulabilir veya sabit  $X_{EDS}$  kontrolü uygulanabilir, Şekil 2'de gösterildiği gibi. Tüm PI denetleyicilerinin  $K_P$  ve  $K_I$  değerleri kök yerleşim tasarımı ve geçici analiz ile elde edilir (Rao vd. 2015, Kirpane vd. 2016, Pandey 2014).

Yenilenebilir enerji tesisinin iletim hattı genellikle ana koruma olarak diferansiyel korumayı ve yedek koruma olarak mesafe korumasını benimser. Bu bölüm, önceki kontrol yönteminin ayarlamasına göre koruma düzenlemelerini ve koordinasyonunu tanıtır. Yukarıdaki analizden, geleneksel korumanın IIRG hattında yaşanan arızaların temel olarak açığı bozulmasına dayandığını görebiliriz. Önerilen yöntem, IIRG çıkış voltajının faz kontrolünü tanıttı, bu da hem diferansiyel hem de mesafe koruma yapılandırılmalarının temelini oluşturuyor.

Bu çalışma, FACTS kontrol cihazlarının uzak mesafe koruması üzerindeki etkilerini incelemektedir. Şekil 3'te gösterilen akış diyagramı, makalenin temel adımlarını ve ana noktalarını özetleyerek, FACTS kontrol cihazlarının uzak mesafe koruması üzerindeki etkilerini ve bu etkileri incelemek için kullanılan yöntemleri göstermektedir.

FACTS cihazları ve seri ve şönt kontrol cihazlarının rolü tanıtılmaktadır. IEEE'den uyarlanan test sistemi ve iletim hattı parametreleri açıklanmakta, 80 km'lik bir hattın ortasında EDS'nin yerleştirilmesi ve hata simülasyonu detaylandırılmaktadır. EDS'nin gerilim enjeksiyonu denklemleri ve empedans hesaplamaları sunulmaktadır. EDS'nin enerji depolama ile entegrasyonu, koruma düzenlemeleri ve koordinasyon yöntemleri ele alınmaktadır. Arıza sırasında koruma stratejileri ve

empedans hesaplamaları incelenmektedir. Jeneratör ve EDS parametreleri, reaktans kompensasyonu ve mesafe rölesi ayarları değerlendirilmektedir. Mesafe rölesi işlemi, EDS'nin nominal işletme aralığında performansı ve röle çalışmasının etkileri özetlenmektedir.



Şekil 3. Test sistemi akış diyagramı

### 3.1. Yenilenebilir enerji iletim hattı koruma yapılandırması

Önerilen aktif kontrol stratejisine göre, inverter çıkış akımının faz farkının, arıza noktasının her iki tarafındaki nokta terminallerinin faz açısı farkını azaltmak için ayarlanması gerektiği kabul edilmektedir. İşletme akımı ile frenleme akımı arasındaki faz açısı farkının 90°'den küçük olduğu durumlarda, iki fasörün toplamı farktan büyüktür ilkesine göre hareket edilir. Bu eylem kriterine uygun olarak, bu zaman itibarıyla akım diferansiyel koruması doğru şekilde çalışacaktır, ki bu da diferansiyel korumanın uygunluğunun arttığı anlamına gelmektedir (Liang vd. 2023).

Yukarıda belirtilen analize göre, inverter çıkış akımının referans değerleri  $i_{dref} + q_{ref}$  alındığında, inverter istasyon tarafındaki çıkış arıza akımını sistem tarafındakiyle eşit hale getirebilir. Bu nedenle, sistem tarafı arıza akımı ile istasyon tarafı arıza akımı arasındaki faz farkı nedeniyle oluşan dirençli-kapasitif veya dirençli-indüktif ek bir empedans, saf dirençli ek bir empedansa dönüştürülür.

Şekil 4'te,  $Z_m$  ölçülen empedansı,  $Z_k$  etkili arıza empedansını ve  $\Delta Z$  ek arıza empedansını temsil eder.  $\phi_s$  etkili arıza empedans açısını,  $\phi_m$  ölçülen empedans açısını ve  $\phi_z$  arıza ek empedans açısını temsil eder;  $\phi_1, \phi_2, \phi_3$



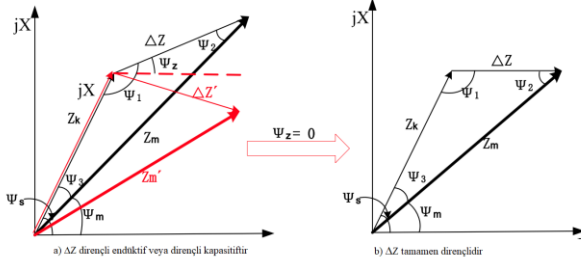
ise sırasıyla  $\Delta Z$ ,  $Z_m$  ve  $Z_k$  arasındaki açıyı temsil eder. Şekil 4'te, katı siyah çizgi ek arıza empedansının dirençli-indüktif olduğunu, katı kırmızı çizgi ise dirençli-kapazitif olduğunu gösterir. Şekil 4'ten görülebileceği gibi,  $\phi_1$  ve  $\phi_2$ 'nin aşağıdaki ilişkiyi izlediği görülmektedir:

$$\varphi_1 = \pi - \varphi_s \text{ ve } \varphi_1 = \varphi_m$$

$\varphi_m = \arg(Z_m)$  ve  $\varphi_s = \arg(Z_f)$  olarak tanımlansın. Karmaşık empedans düzleminde  $Z_m$  ve  $Z_k$  arasındaki matematiksel geometrik ilişkiye göre şunu elde edebiliriz:

$$\frac{|Z_m|}{|\sin\varphi_1|} = \frac{|Z_k|}{|\sin\varphi_2|}$$

$\varphi_s = \arg(Z_{set})$  ve  $Z_{set}$  ayar empedansı olarak tanımlansın. Arıza noktasından koruma kurulumuna kadar olan gerçek etkin empedans ( $Z_k$ ), yukarıdaki formülle elde edilebilir. Arıza meydana geldiğinde, yarı-dörtgen karakteristikli empedans elemanı kullanılarak etkin arıza empedansı elde edilir ve ayar değeriyle karşılaştırılır. Eğer eylem bölgesi içindeyse, koruma doğru şekilde çalışır; aksi takdirde, arıza meydana gelir.



Şekil 4. Arıza ek empedansının dönüşüm akış şeması.

### 3.1 İletim Hattı Kontrol Stratejileri

Generatör tarafından sağlanan güç ( $P_g$ ), 0.9 pu olarak sabitlenmiştir. EDS'nin DC gerilimi, enerji kaynağı tarafından 0.7 pu olarak sabitlenmiş kabul edilmektedir. Analiz için dikkate alınan sistemde, EDS'nin derecesi 150 MVA'dır. Temel MVA'sı 892.4 MVA ve hattın akımı 1 pu'dur.  $V_{max}^i$  0.16809 pu olarak bulunmuştur. Sistemin sabit bir seri kondansatörü vardır ve kapasitif reaktansı 0.45 pu'dur.  $X_{EDS}$ 'nin -0.15 pu (kapasitif) ile 0.15 pu (endüktif) arasında değişen bir seri reaktans telafi aralığı olduğu kabul edilmektedir.  $P_{ref}$  aralığını sabitlemek için çeşitli işletme modları için  $V_i$  belirlenir ve elde edilen değerler Çizelge 1'de tablo halinde sunulmuştur (tüm değerler pu cinsindedir).

Çizelge 1. Sabit Durum Koşulları Altında EDS Parametreleri.

Çalışma modu	$V^i$	$I$
$X_{EDS} = -0.1, P_{ref}=0$	$0.129 \angle -90^\circ$	$0.89 \angle 17^\circ$
$X_{EDS} = -0.1, P_{ref}=0.05$	$0.159 \angle -56^\circ$	$0.89 \angle 26^\circ$
$X_{EDS} = 0, P_{ref}=0.1$	$0.159 \angle 0^\circ$	$0.89 \angle 34^\circ$

Verilen denklemler, EDS tarafından sağlanan empedans katkısını belirlemek için kullanılır ve aşağıda gösterildiği gibi hesaplanır.

$$R_{EDS} = \frac{V_P}{|I|} \text{ ve } X_{EDS} = \frac{V_R}{I} \quad (14)$$

Reaktans telafisi sağlandığında EDS ile  $P_{ref}$ 'in aralığı -0.05 pu ile 0.05 pu arasında olur. Öte yandan, EDS olmadan ( $X_{EDS}=0$ ),  $P_{refmax}=0.1$  pu'dur. Başlangıçta, herhangi bir sistem bozulması olmadan (arıza yok) analiz yapılır. Yönlü dörtgen mesafe rölesi, -10 derece yönlü açı ayarı ve 110 derece negatif kısıtlama açı ayarı içermektedir (Oza vd. 2010). Hattın empedansı  $Z = (0.05 + j1)$  pu olarak kabul edilir. Mesafe rölesinin 1. bölge erişimi, korunan hattın %80'i olarak kabul edilir. Bu nedenle mesafe rölesi için reaktans ayarı  $X_{set} = 0.5$  pu olarak kabul edilir.

Bir arıza direnci olarak 15 ohm (0.05 pu) düşünülerek bir direnç ayarı seçilir. Bu nedenle röle için direnç ayarı  $R_{set} = 0.03 + 0.04 = 0.07$  pu olarak kabul edilir. Bu değerler, analiz için düşünülen çeşitli durum çalışmalarında jeneratör ucu rölesi için 1. bölge röle ayarları olarak kullanılır. Analitik olarak, empedans değerleri aşağıdaki denklemler kullanılarak elde edilebilir. EDS tarafından sunulan empedans;

$$Z_{SSSC} = \frac{V^i}{I} \quad (15)$$

Röle tarafından görülen görünür empedans;

$$Z_{relay} = Z_{line} + Z_{SSSC} - jX_C + jX_{S_{sys}} + \frac{E_b}{I} \quad (16)$$

Seri kondansatör ile reaktans kompensasyonunu %50'te sabit tutarken, net reaktans kompensasyonu %40 ila %40 arasında değiştirilebilir. %80 ve %40 net kompensasyon seviyeleri için elde edilen empedans değerleri Çizelge 2'de sunulmuştur.

Çizelge 2. Normal durum, reaktans, empedans ve direnç simülasyonu

Çalışma modu	$Z_{EDS}$	$Z_{röle}$
Durum 1 EDS yok	$0+j0$	$1+j0.18$
Durum 2 $X_{EDS}=0, P_{ref}=0.05$	$0.09+j0$	$1+j0.05$
Durum 3 $X_{EDS}=0, P_{ref}=-0.05$	$-0.08+j0$	$0.9+j0.28$

EDS'in işletme koşullarındaki değişiklik, hat akımında bir değişikliğe neden olacaktır (bkz. Çizelge 2). Bu nedenle, denklem (16) uyarınca, EDS'in çeşitli işletme modları için röle tarafından görülen hem direnç hem de reaktans farklı olacaktır.  $Z_{röle}$ 'nin röle karakteristikleri dışında olduğundan röle çalışmaz. Ölçülen  $Z_{röle}$  ayarlanan empedansın dışında olduğundan mesafe rölesi çalışmayacaktır. Yapılan çalışmaların temelinde, aşağıdaki çıkarımlar yapılmıştır:

- Durağan durum koşulları altında, nominal işletme aralığı içinde kullanıldığında mesafe rölesi işlemi EDS tarafından etkilenmez,
- EDS hat döngüsünde olmadığına, mesafe rölesinin işlemi EDS tarafından etkilenmez. EDS hat döngüsünde olduğunda,  $Z_{röle}$  işletme moduna ve EDS için kullanılan kontrol stratejisine bağlıdır. Bu nedenle, standart ayarlarla çalışan geleneksel mesafe rölesi işlemi güvenilir değildir,
- Kapasitif işletme modunda, mesafe rölesi negatif reaktans simülasyonunda aşırıya geçebilir ve indüktif işletme modunda pozitif reaktans simülasyonunda röle aşağıya geçebilir,
- Gerçek güç emilirken, mesafe rölesi pozitif direnç simülasyonunda aşağıya geçebilir ve gerçek güç sağlanırken, negatif direnç simülasyonunda aşırıya geçebilir.

Aşırıya geçme ve aşağıya geçme derecesi aynı zamanda EDS için kullanılan kontrol stratejisine bağlıdır. Belirli bir EDS işletme modu ve hata konumu için,  $Z_{röle}$  hat tipinden etkilenmez. Sabit reaktans ve sabit direnç kontrol stratejisine dayalı adaptif röle ayarıyla donatılmış sayısal dörtgen mesafe rölesi, mesafe rölesi yanlış işlemlerini önleyecektir. FACTS kontrol cihazları, AC iletim sistemlerinin kontrol edilebilirliğini ve güç transfer kapasitesini artırarak esnek hale getirir. Seri FACTS cihazları uzun iletim hatlarında hat reaktansını telafi etmek ve geçici kararlılığı artırmak için kullanılır. Ekonomik nedenlerle, sabit bir seri kondansatör ile VSC kombinasyonu tercih edilir. EDS, enerji depolama cihazlarıyla entegrasyon imkanı sunarak güç transfer kontrolünü ve kararlılığı artırır. Uzak mesafe koruması, iletim hatları için yaygın olarak kullanılır ve dijital koruma teknikleriyle daha da geliştirilir. FACTS cihazlarının uzak mesafe röle performansını etkileyebileceği belirtilmiştir. Seri ve şönt bağlı FACTS cihazlarının etkileri ve adaptif uzak mesafe koruması incelenmiştir. Enerji depolama cihazları olmadan EDS'nin sınırlı reaktans telafisi sağlayabildiği, ancak enerji depolama cihazlarıyla birlikte dört kadrantta çalışabildiği ve empedans değişimlerinin önemli ölçüde farklı olduğu vurgulanmıştır.

Enerji depolama cihazlarının FACTS kontrol cihazlarıyla entegrasyonu üzerine yapılan çalışmalar sınırlıdır. EDS ve STATCOM'un kararlılık artırıcı etkileri tartışılmış, ancak DC hatlarına bağlı enerji depolama cihazlarının uzak mesafe rölesi üzerindeki etkisi yeterince araştırılmamıştır. Uygun kontrol stratejileriyle adaptif röle ayarları sunulmuş ve sistem kararlılığını artıran stratejiler önerilmiştir. Kontrol ve koruma arasındaki koordinasyonun, ekonomik zorluklara rağmen, gelecekteki güç sistemleri için önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışma, arızalarda diferansiyel ve mesafe koruma performansını artırmak için yeni kontrol stratejileri önerir.

#### 4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu makalede, EDS içeren kademeli işletiminde simüle edilen reaktans ve direncin iletim hattı korumasına etkisi analiz edilmiştir. Hattın üzerinde simetrik ve asimetrik hatalarla bir araştırma yapılmıştır. Açıkça gösterilmiştir ki EDS, hata döngüsü dışındayken mesafe rölesi performansını etkilememektedir. EDS hat döngüsünde olduğunda, REDS, XEDS değerleri ve dolayısıyla  $Z_{röle}$ , EDS'nin işletme moduna ve EDS için kullanılan kontrol stratejisine bağlı olarak önemli ölçüde değişecektir. Tüm bunlar, mesafe rölesi ayarını zor bir görev haline getirir ve geleneksel mesafe rölesi standart ayarlarla yanlış çalışma gösterir, yani aşağıya veya aşırıya geçmektedir. EDS için sabit reaktans ve sabit direnç kontrol stratejisine dayalı sayısal dörtgen mesafe rölesi için yeni bir adaptif ayar, mesafe rölesi yanlış çalışmasını önlemek amacıyla sunulmuştur. EDS'ye enerji depolama cihazı eklenmiş bir DQ modeli ve EDS'nin işletme modunun ve kontrol stratejisinin, mesafe rölesinin performansına dört işletme kadranındaki etkisinin analizi yapılarak kesintisiz enerji destekli depolama teknolojisinin katkısı sunulmuştur. EDS ile kompanse edilmiş hatlarda dörtgen sayısal mesafe rölesinin yanlış çalışmasını önlemek için emüle edilmiş REDS ve XEDS kontrolüne dayalı yeni bir adaptif röle ayarları konusunda uygun parametreler sunulmuştur. Sonuç olarak, bu çalışmada sunulan EDS ile kompanse edilmiş hatların güvenilir koruması, iletim sistemlerinin enerji depolama/generatör entegrasyonunu içeren VSC tabanlı seri kompanasyonu kullanarak işletme kadranlarının tamamını kullanmasına yardımcı olacaktır. Bu çalışma özetle, geleneksel koruma yöntemlerinin, enerji depolama ve FACTS cihazlarının entegrasyonu ile ortaya çıkan yeni zorluklara nasıl yanıt verdiğini incelemektedir. Özellikle, seri kompanasyonu ve enerji depolama entegrasyonunun, iletim hattı reaktansı ve direnci üzerindeki etkilerini simüle ederek, uzak mesafe rölesi performansını nasıl etkilediğini ortaya koymaktadır. Bu da, enerji depolama cihazlarının entegre edildiği iletim sistemlerinin güvenilir ve verimli bir şekilde korunması için yeni adaptif koruma stratejileri geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

Gelecek çalışmalarda, EDS ve FACTS cihazlarının entegrasyonu ile ilgili daha sofistike kontrol stratejileri geliştirmek, koruma sistemlerinin hassasiyetini ve güvenilirliğini artırabilir. Bu, dinamik durumlarda bile daha kararlı bir sistem sağlamak için oldukça önemlidir. EDS ve FACTS cihazlarının entegre edilmesinin ekonomik etkilerini inceleyen çalışmalar, bu teknolojilerin maliyet etkinliğini değerlendirmeye yardımcı olabilir. Bu da, geniş çaplı uygulamalar için daha uygun maliyetli çözümler geliştirilmesine katkıda bulunabilir. Ayrıca, çalışmada kullanılan enerji depolama teknolojilerinin çeşitlendirilmesi ve farklı teknolojilerin (örneğin, lityum iyon piller, süper iletken manyetik enerji depolama)

etkilerinin incelenmesi, koruma sistemlerinin performansını ve etkinliğini artırabilir.

#### **Etik Standartlar Bildirgesi**

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

#### **Yazarlık Katkı Beyanı**

Yazar 1: Araştırma, Yazma

Yazar 2: Bıçimsel analiz, Doğrulama, Metodoloji, Görselleştirme

#### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

#### **Verilerin Kullanılabilirliği**

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

## **5. Kaynaklar**

- Oymak, A., Tür, M. R. and Hossain, E., 2022. Modeling of STATCOM Connected System to Microgrid, *Global Energy Conference (GEC)*, Batman, Turkey, 202-207, <https://doi.org/10.1109/GEC55014.2022.9986624>
- Abdollahzadeh, H., Mozafari, B., and Jazaeri, M., 2015. Realistic insights into impedance seen by distance relays of a SS-compensated transmission line incorporating shunt capacitance of line. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **1(65)**, 394-407, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.10.037>
- Abidin, A. F. B., Al-Dabbagh, M., and Mohamed, A., 2008. Adaptive distance protection relays: An Overview. *In Proc. Eng. Postgraduate Conf.(EPC)* 1-8.
- Albasri, F. A., Sidhu, T. S., & Varma, R. K., 2007. Performance comparison of distance protection schemes for shunt-FACTS compensated transmission lines. *IEEE transactions on Power delivery*, **22(4)**, 2116-2125. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.900283>
- Ates Y, Boynuegri AR, Uzunoglu M, Nadar A, Yumurtacı R, Erdinc O, Paterakis NG, Catalão JPS., 2016. Adaptive Protection Scheme for a Distribution System Considering Grid-Connected and Islanded Modes of Operation. *Energies*, **9(5)**, 37-38, <https://doi.org/10.3390/en9050378>
- Ates, Y., Uzunoglu, M., Karakas, A., Boynuegri, A. R., Nadar, A., & Dag, B., 2016. Implementation of adaptive relay coordination in distribution systems including distributed generation. *Journal of Cleaner Production*, **1(12)**, 2697-2705. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.066>
- Pandey Protection Subcommittee B.S., 2014. NRPC, New Delhi
- Babu, K. V., Tripathy, M., & Singh, A. K., 2011. Recent techniques used in transmission line protection: a review. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, **3(3)**, 1-8, <https://doi.org/10.4314/ijest.v3i3.68416>
- Beza, M., & Bongiorno, M., 2014. An adaptive power oscillation damping controller by STATCOM with energy storage. *IEEE Transactions on Power Systems*, **30(1)**, 484-493. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2320411>
- Bilel, A., Boukadoum, A., Leulmi, S., & Boukra, T., 2018. Improving the transient stability of the mixed AC/DC networks with FACTS. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEI)*, **6(4)**, 477-485. <https://doi.org/10.52549/ijeie.v6i4.473>
- Çakmak, F., Aydoğmuş, Z., & Tür, M. R., 2023. Analysis of Open Circuit Voltage MPPT Method with Analytical Analysis with Perturb and Observe (P&O) MPPT Method in PV Systems. *Electric Power Components and Systems*, 1-15. <https://doi.org/10.1080/15325008.2023.2296958>
- Dash, P. K., Pradhan, A. K., Panda, G., & Liew, A. C., 2000. Adaptive relay setting for flexible AC transmission systems (FACTS). *IEEE Transactions on Power Delivery*, **15(1)**, 38-43. <https://doi.org/10.1109/61.847226>
- Dash, P. K., Pradhan, A. K., Panda, G., & Liew, A. C., 2000. Digital protection of power transmission lines in the presence of series connected FACTS devices. *In 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37077)* **1(3)**, 1967-1972. <https://doi.org/10.1109/PESW.2000.847655>
- Dhenuvakonda, K. R., Singh, A., Thakre, M. P., Karasani, R. R., & Naidoo, R., 2019. Adaptive digital distance relay for SS-based double-circuit transmission line using phasor measurement unit. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, **29(4)**, 27-87. <https://doi.org/10.1002/etep.2787>
- Gökçek, T., & Ateş, Y., 2019. Dağıtık Güç Üretiminin Şebekeye Entegrasyonu ve Olası Etkilerinin İncelenmesi. *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, **1(15)**, 216-228. <https://doi.org/10.31590/ejosat.521350>
- Han B, Li H, Wang G, Zeng D, Liang Y., 2018. A virtual multi-terminal current differential protection scheme for distribution networks with inverter-interfaced distributed generators. *IEEE Trans Smart Grid*, **9(5)**, 5418-5431. <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2749450>
- Hingorani N.G. & Gyugyi L., 2011. Understanding FACTS. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 3 Park Avenue, ITth Floor, New York, NY 10016-5997.

- Hossain, E., Tür, M. R., Padmanaban, S., Ay, S., & Khan, I., 2018. Analysis and mitigation of power quality issues in distributed generation systems using custom power devices. *IEEE Access*, **6(1)**, 16816-16833. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2814981>
- IEEE SSR working group, 1977. First benchmark model for computer simulation of subsynchronous resonance. *IEEE transactions on power apparatus and systems*, **96(5)**, 1565-1572.
- Jamali, S., Kazemi, A., & Shateri, H., 2008. Effects of SMES equipped UPFC on distance relay tripping characteristic. In *2008 Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference*, 1-7. <https://doi.org/10.1109/ICPST.2008.4745270>
- Kazemi, A., Jamali, S., & Shateri, H., 2008. Effects of SMES equipped SS on distance relay tripping characteristic. In *2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/TDC.2008.4517157>
- Kirpane, R., & Bedekar, P. P., 2016. Removal of DC offset using digital mimic filtering technique. In *2016 International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication (ICGTSPICC)*, 470-475. <https://doi.org/10.1109/ICGTSPICC.2016.7955347>
- Liang, J., Yiqi T., Zilin Y., Enyu J., Ruiling X., Jiaming Y., Yang F., 2023. A control based protection adaptability improving strategy for transmission line with renewable energy integration, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **1(49)**, 0142-0615, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109009>
- Liu J., Yao W., Fang J., Wen J., Cheng S., 2018. Stability analysis and energy storage-based solution of wind farm during low voltage ride through. *Int J Electr Power Energy Syst*, **1(1)**, 75-84. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.03.013>
- Miao Y., Yafang T., Yixin H., Junwei L., Guolong M., 2020. Research on the influence of double-fed fan control mode on relay protection. *Power Syst Protect Control*, **48(02)**, 180-187, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109009>
- Mishra, S., Gupta, S., & Yadav, A., 2020. Study on factors affecting distance protection scheme of UPFC compensated transmission lines. In *2020 First International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T)* 143-148. <https://doi.org/10.1109/ICPC2T48082.2020.9071515>
- Niaki, A. M., & Amiri, I. D., 2015. The impact of shunt-FACTS devices on distance relay performance. In *2015 2nd International Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation (KBEI)* 348-354. <https://doi.org/10.1109/KBEI.2015.7436070>
- Oza, B. A., Nair, N. C., Mehta, R. P., & Makwana, V. H. 2010. Power system protection and switchgear. In Chapter-1, Introduction and Philosophy of a Protective Relaying System. Tata McGraw Hill Education Private Limited.
- Padiyar, K. R., 2007. FACTS controllers in power transmission and distribution. K. R. Padiyar, *Department of Electrical Engineering Indian Institute of Science, Bangalore-560 012, India*
- Padiyar, K. R., & Prabhu, N., 2003. Analysis of subsynchronous resonance with three level twelve-pulse VSC based SS. In *TENCON 2003. Conference on Convergent Technologies for Asia-Pacific Region* 76-80. <https://doi.org/10.1109/TENCON.2003.1273229>
- Paz, M. C. R., Leborgne, R. C., & Bretas, A. S., 2015. Adaptive ground distance protection for UPFC compensated transmission lines: A formulation considering the fault resistance effect. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **7(3)**, 124-131. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.04.008>
- Purohit, A., & Gohokar, V., 2019. Maloperation of distance relay under faulty conditions in presence of static synchronous series compensator. In *2019 IEEE 2nd International Conference on Power and Energy Applications (ICPEA)*, 66-70. <https://doi.org/10.1109/ICPEA.2019.8818520>
- Rao, H. G., Prabhu, N., & Mala, R. C., 2015. Investigations on stability of a hybrid series compensated system with SS. In *2015 International Conference on Technological Advancements in Power and Energy (TAP Energy)*, 57-64. <https://doi.org/10.1109/TAPENERGY.2015.7229593>
- Rao, H. G., Prabhu, N., & Mala, R. C., 2019. Emulated reactance and resistance by a SS incorporating energy storage device. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, **9(2)**, 8-40. <https://doi.org/10.11591/ijece.v9i2.pp840-850>
- Rao, M. V., Sivanagaraju, S., & Suresh, C. V., 2016. Available transfer capability evaluation and enhancement using various FACTS controllers: *Special focus on system security. Ain Shams Engineering Journal*, **7(1)**, 191-207. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2015.11.006>
- Sidhu, T. S., Varma, R. K., Gangadharan, P. K., Albasri, F. A., & Ortiz, G. R., 2005. Performance of distance relays on shunt-FACTS compensated transmission lines. *IEEE Transactions on Power delivery*, **20(3)**, 1837-1845. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.848641>
- Singh, M., Panigrahi, B. K., & Maheshwari, R. P., 2011. Transmission line fault detection and classification. In *2011 International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology* 15-22.

<https://doi.org/10.1109/ICETECT.2011.5760084>

Stella, M., Ezra, M. A., Fathima, A. P., & Jiunn, C. K., 2016. Research on the efficacy of unified Statcom-Fuel cells in improving the transient stability of power systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, **41(3)**, 1944-1957.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.11.130>

Tur, M. R. 2020. Reliability assessment of distribution power system when considering energy storage configuration technique. *IEEE Access*, **8(1)**, 77962-77971.

<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2990345>

Zhang, I., Crow, M. L., Yang, Z., & Chen, S., 2001. The steady state characteristics of an SSSC integrated with energy storage. In *2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings* (Cat. No. 01CH37194), 1311-1316.

<https://doi.org/10.1109/PESW.2001.917271>

Chenghan, Z. H. O. U., Guibin, Z. O. U., Lindong, Z. A. N. G., Xuhui, W. E. N., Liangzhi, S. U. N., & Xiaogong, D. U., 2021. Novel differential protection for distribution network with inverter-interfaced distributed generations. In *2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*, 19-23.

<https://doi.org/10.1109/ACPEE51499.2021.9436957>

7

## Üniversite Kampüsünde Solar Panel Kullanımının Teknik ve Ekonomik Analizi: ISUBU Örneği

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 05.06.2024

Kabul/Accepted: 21.08.2024

Yayımlandı/Published: 02.12.2024

### Technical and Economic Analysis of Solar Panel Use on University Campus: ISUBU Example

Betül Zehra GENÇGÖNÜL<sup>1\*</sup>, Abdullah Senih GENÇGÖNÜL<sup>2</sup>, Reşat SELBAŞ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Hacettepe Üniversitesi, Fen Fakültesi, Aktüerya Bilimleri Bölümü, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup> Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, Türkiye

<sup>3</sup> Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

Bu çalışmada, bir üniversite kampüsünün elektrik enerjisi ihtiyacının güneş enerjisi santrali ile karşılanabilirliğinin örnek uygulamasının yapılması amaçlanmıştır ve Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi için bir güneş enerjisi santrali tasarlanmıştır. En uygun panel tipi olarak gerekli verim analizleri sonucu monokristal half-cut panel seçilmiştir ve üniversite çatılarında yerleşim planları Autocad ve Sketchup yazılımları kullanılarak yapılmıştır. Üretim analizleri için PVsyst, SAM ve PVSOL programları kullanılmış ve minimal farklarla en yüksek üretim SAM programı ile elde edilmiştir. Üniversite batı yerleşkesine kurulan güneş enerji santralinin PVsyst programı ile elde edilen üretim miktarı ile tüm kampüsün elektrik tüketiminin karşılanması hedeflenmiştir. Sistem karlılığının analizi için 6 yıllık bir sürede sistemin kampüse sağlayacağı muhtemel kazanç hesaplanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Güneş enerji santrali; Yenilenebilir enerji; PVsyst; SAM; PVSOL.

#### Abstract

In this study, it is aimed to make an example of how the electrical energy needs of a university campus can be met with a solar power plant, and a solar power plant was designed for Isparta University of Applied Sciences. As a result of the required efficiency analysis, monocrystalline half-cut panel was selected as the most suitable panel type, and layout plans on university roofs were made using Autocad and Sketchup software. PVsyst, SAM and PVSOL programs were used for production analysis and the highest production with minimal differences was obtained with the SAM program. It is aimed to meet the electricity consumption of the entire campus with the production amount obtained through the PVsyst program of the solar power plant installed in the western campus of the university. To analyze the system profitability, the possible gain that the system will provide to the campus in a 6-year period was calculated.

**Keywords:** Solar power plant; Renewable energy; PVsyst; SAM; PVSOL.

#### 1. Giriş

Ülkelerin enerjiye olan ihtiyacı, nüfustaki artış ve teknolojik ilerlemelerle birlikte sürekli artmaktadır. Bununla birlikte kömür, doğalgaz ve petrol gibi çok tercih edilen enerji kaynaklarının tükenmekte olması ve çevreye bıraktığı karbon emisyonları geleceğimizi tehdit etmektedir. Bu durum, doğal kaynakların yetersizliği ve çevresel etkileriyle birlikte, yenilenebilir enerji arayışlarını hızlandırmıştır. Yenilenebilir enerji, günümüzde temiz, güvenli ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak önem kazanmıştır. Türkiye konumu nedeniyle güneş enerjisinden faydalanabilecek potansiyele sahiptir. Ölçümler neticesinde, Türkiye'nin %63'ünde 10 ay süresince, %17'lik kısmında ise 1 yıl süresince güneş enerjisinden yararlanılabileceği tespit edilmiştir. (Buldu 2008). Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nden alınan ışınım şiddeti ve güneşlenme süresi verilerine dayanarak Elektrik İşleri Etüt İdaresi'nin yaptığı çalışmada,

fotovoltaik enerjiden yıllık 380 milyar kWh elektrik üretim potansiyeli olduğu belirlenmiştir. (Ortaçtepe, 2011).

Son yıllarda güneş enerji santralleri kullanımının pek çok alanda etkisi ve doğaya ve ekonomiye olan katkısı akademik olarak incelenmektedir. Özellikle tarımda güneş enerji sistemlerinden çok fazla faydalandığı bilinmekte ve literatürde bu konuda pek çok çalışmaya rastlanılmaktadır. Saxena ve Kumar'ın (2011) çalışmasında Hindistan tarımında hem pahalı hem de ekolojik açıdan zararlı olan geleneksel olmayan kaynaklardan elektrik tüketimini azaltmak için kullanılabilecek güneş enerjisinin kullanımındaki farklı gelişmeleri incelemiştir. Aliyu vd. (2018) tarımda su pompalama sistemlerinde dizel gücü yerine güneş enerjisi kullanımını incelemiştir. Literatürde havacılık endüstrisinde ve uzay sistemlerinde güneş enerjili uçak sistemlerinin geçerliliğini anlatan çalışmalar da mevcuttur (Zhang vd. 2017, Cardinaletti vd. 2018, Zhu vd.

2014). Muhida ve arkadaşları Malezya'nın Putrajaya kentindeki müstakil bir eve güneş pili sisteminin entegre eden bir sistem kurmuştur(2009). Bu sistemin amacı aylık ortalama 255 kWh elektrik enerjisi elde etmektir. Sistemin performansının artırılması için benzetim çalışmaları yapılmıştır. Çalışma sonucunda güneş pili sisteminden elde edilecek tahmini elektrik enerjisi miktarı ve bunun ekonomik getirisinin ne olacağı hesaplanmıştır.

Dehshiri ve arkadaşları İran tekstil endüstrisinde güneş enerjisi kullanımının temiz üretime yönelik değerlendirilmesi için çalışma yapmış ve kurdukları sistemin sürdürülebilir planlama ve fizibilite analizini elde etmiştir (2023). İran'ın güney kıyısındaki güneş enerjisi projelerinin uygulanması için uygun alanların değerlendirilmesi Zahedi ve arkadaşları tarafından incelenmiştir (2023). Bu değerlendirmede uygun olmayan coğrafi alanlar CBS yöntemi kullanılarak alan dışında bırakılmıştır. Sonuçlar Makran'ın yalnızca %37'sinin güneş enerjisi geliştirmeye uygun olduğunu göstermiştir.

GES'in uygulama alanları üzerine Türkiye'de yapılan güncel akademik çalışmalardan bazıları ise şöyledir: Akyazı ve arkadaşları güneş enerjisi ile şarj edilebilen, akü destekli akıllı LED aydınlatma armatürü tasarlayıp uygulamışlardır (2019). Bu armatür, ışık şiddetini trafik yoğunluğuna göre ayarlayarak enerji tasarrufu sağlamaktadır. Güner ve Muharremoğlu İzmir Adnan Menderes Havalimanı otoparkı için bir FV sistem

tasarlamış ve enerji ihtiyacı için sistemin yeterliliğini analiz etmişlerdir (2020). Dandıl ve Gürgen farklı eğitim açılarında yerleştirilen FV panellerin güç çıkışlarını tahmin etmek için hibrit bir yapay sinir ağı modeli geliştirmişlerdir (2019). Türkdoğan ve arkadaşları 40 hanelik bir yerin elektrik ihtiyaçlarını karşılamak için bazı hibrit enerji sistemlerini ekonomik açıdan analiz etmiştir (2020). Yağlı ve Koç Gaziantep bölgesinde güneş enerjisi tesisleri için panellerin optimum açılarını belirlemişlerdir (2020).

Bu çalışmada ise amaç bir üniversite kampüsünde güneş enerji sisteminden en verimli alanı kullanarak en yüksek üretimin nasıl elde edebileceği sorusuna cevap bulmaktır. Bu amaçla Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi (ISIBÜ) için uygulama yapılmıştır. GES tasarım sürecinin kritik adımlarından biri doğru ekipman seçimidir. Böylece üretim artar ve sistem ömrü daha uzun olur. Fotovoltaik paneller için yazılım aracılığıyla verimlilik analizi yapılmış ve santralde kullanılacak uygun panelin belirlenmesi hedeflenmiştir. Panel seçimi yapıldıktan sonra, çatı yapısına uygun bir yerleşim düzeni oluşturularak kaç panelin sığacağı ve bu panellerden elde edilecek enerji miktarı hesaplanmıştır. Bu santralin verimlilik analizi üç farklı yazılım ile karşılaştırılarak daha kesin tahminler elde edilmesi amaçlanmıştır. Son olarak üretim değerlerinin üniversite ihtiyacının ne kadarını karşıladığı hesaplanmış ve sistemin üniversiteye katkısı hakkında değerlendirme yapılmıştır.

**Çizelge 1.** ISUBÜ aylık hava durumu verileri

Aylar	Global Yatay kWh/m <sup>2</sup>	Yatay Difüz kWh/m <sup>2</sup>	Dünya Dışı kWh/m <sup>2</sup>	Netlik Endeks Oran	Ortam Sıcak. °C	Rüzgar Hızı m/s
1	66,7	27,5	143,9	0,463	1,7	1,7
2	78,3	42,4	172,1	0,455	3,4	1,9
3	123,9	56,2	246,1	0,503	7,0	2,1
4	153,1	68,3	294,2	0,520	11,0	2,0
5	193,2	76,2	343,0	0,563	15,7	1,6
6	212,0	72,4	347,6	0,610	20,4	1,6
7	222,4	72,1	351,9	0,632	24,7	1,7
8	194,5	68,4	320,8	0,606	24,5	1,6
9	162,6	51,0	260,7	0,624	19,2	1,5
10	111,5	47,5	210,2	0,530	13,4	1,3
11	77,0	31,6	151,6	0,508	7,6	1,4
12	59,1	27,7	130,5	0,452	3,3	1,5
Yıl	1.654,0	641,3	2.972,4	0,556	12,7	1,7

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1 Uygun Panel Tipinin Seçilmesi

Uygulamada sistem kurulumu ve analizinden önce uygun panel tipinin belirlenmesi gerekmektedir. Verim ve fiyat performansı panel tipi seçiminde etkili olacaktır. ISUBÜ'de tasarımı planlanan santral için farklı tip panellerle kıyaslama yapılarak en uygun panel tipinin belirlenebilmesi amacıyla seçilen bir bina (38.83°N 30.52°B'da bulunan ISUBÜ Enerji Fakülte binası) üzerinde

konumlanacak paneller için ışınım ve hava şartları sabit tutulmuştur. Farklı tipte paneller PVsyst yazılımında ikiye bölünmüş olarak karşılaştırılmıştır. Binanın Coğrafi Bilgi Sistemleri'nden (CBS) alınan görüntüleri kullanılarak ölçüleri çıkarılmış ve bu ölçüler Autocad'te çizilmiştir. Çizelge 1'de, 38.83°N 30.52°B koordinatlarında yer alan ve PVsyst kullanılarak analiz edilecek olan ISUBÜ Teknoloji Fakültesi binasının aylık hava durumu verileri sunulmuştur



İlk olarak yaygın kullanılan polikristal ve monokristal panellerin karşılaştırılması yapılmıştır. Karşılaştırmanın daha homojen koşullarda yapılabilmesi amacıyla aynı güçte ve markaları da aynı iki panel seçilmiştir. Seçilen paneller 345 Wp'dır. Kullanılacak panellerin veri bilgisi Çizelge 2'de yer almaktadır.

Kullanılan panel sayısı her iki türde de 414 adettir. Çatıda gölgeli alanlara yerleştirme yapılmamıştır. İki farklı panel için de aynı sayıda dizilim gerçekleştirilmiştir. PVsyst yazılımı kullanılarak, eşit koşullarda hangi panel tipinin daha fazla üretim sağladığını belirlemek amacıyla analizler yapılmıştır. PVsyst'te, santralin kaydedilen ışınım ve panel sıcaklık değerleri esas alınarak ve panel üreticisinin sağladığı PAN dosyaları kullanılarak benzetim yapılmıştır. Daha doğru sonuçlar elde edebilmek için, SketchUp'da modellenmiş üç boyutlu yapı, yakın gölgeleme bölümüne dahil edilmiştir. Bu sayede eğim ve gölgeleme gibi faktörler daha hassas bir şekilde analiz edilerek gerçeğe daha yakın sonuçlara ulaşılmıştır.

**Çizelge 2. Panel Bilgileri**

MODÜL BİLGİLERİ		
	Polikristal panel bilgileri	Monokristal panel bilgileri
Modül Bilgileri	Solar Panel Polikristal 345 WATT	Solar Panel Monokristal 345 WATT
Toplam Panel Sayısı	414 Adet	414 Adet
Modül Boyutları (LxWxH)	1 970x992x40 mm	1 996x992x40 mm
Hücre Sayısı	72 Adet	
Kablo	4 mm <sup>2</sup> Solar Kablo	4 mm <sup>2</sup> Solar Kablo
MODÜL ELEKTRİKSEL BAĞLANTISI		
	Polikristal panel bilgileri	Monokristal panel bilgileri
Panel Maksimum Gücü - Pmax	345 Wp	345 Wp
Güç Toleransı	(0, +4,99)	(0, +4,99)
Maksimum Güç Gerilimi - Vmpp	38,1 V	38,7 V
Maksimum Güç Akımı - Impp	9,06 A	8,92 A
Açık Devre Gerilimi - Voc	46,5 V	46,3 V
Açık Devre Akımı - Isc	9,41 A	9,37 A
NOCT (°C)	45±2°C	45±2°C
Maksimum Sistem Gerilimi	1 500V DC	1 500V DC
Sıcaklık Katsayısı [V] - [I] - [P]	-0,27 %/°C, +0,05 %/°C, -0,35 %/°C	-0,28 %/°C, +0,05 %/°C, -0,38 %/°C
Maksimum Ters Akım	20 A	20 A

Benzetim sonucunda Polikristal ve monokristal panellerden elde edilen üretim şu şekildedir; polikristal panel yıllık toplam 176.410 kWh üretim yaparken monokristal panel 177.310 kWh üretim yapmaktadır. Monokristal yapılı panel polikristal panelden 0,9 MWh daha yüksek üretim sağlamaktadır. Bu uygulama için verimli olan panelin monokristal yapılı panel olduğu söylenebilir.

Polikristal ve monokristal panelin karşılaştırmasında monokristal panel daha verimli çıktığı için bu kez monokristal panel ile monokristal bifacial panel arasında PVsyst üzerinden karşılaştırma yapılmıştır. Aynı bina üzerinde eşit koşullar altında aynı yerleşim yapılmıştır. Bu kez her iki türde de 400 Wp gücünde 342 adet panel kullanılmıştır. Bifacial paneller sistem analizinde

karşılaştırmanın yapılabilmesi için yapısı nedeniyle üçgen ayak sistemiyle tasarlanarak yerleştirilmiştir. Ancak bu panel çeşidi gerçek hayatta çatıya uygulanabilir bir seçenek olmadığından gerçek uygulamada kullanılmayacaktır. PVsyst için eşit koşullarda elde edilen sonuçlara göre monokristal bifacial panel, monokristal panelden daha fazla üretim sağlamıştır. Monokristal bifacial panel yıllık 170.380 kWh üretirken, monokristal panel yıllık 164.030 kWh üretmektedir. Ancak, çatıya monte edilecek panellerin yere yakın olması nedeniyle yeterli yansımının alınamaması, monokristal bifacial panelin tasarlanacak çatı uygulamalı güneş enerji santrali (GES) için uygun bir seçim olmayacağını göstermektedir.

**Çizelge 3. Panel Bilgileri**

MODÜL BİLGİLERİ			
	Monokristal panel bilgileri	Bi-facial Monokristal panel bilgileri	Monokristal panel bilgileri
Modül Bilgileri	Solar Panel Monokristal 400 WATT	Solar Panel Bifacial Monokristal 400 WATT	
Toplam Panel Sayısı	342 Adet	342 Adet	
Modül Boyutları (LxWxH)	1 941x1 048x40 mm	2 045x1 008x30 mm	
Kablo	4 mm <sup>2</sup> Solar Kablo	4 mm <sup>2</sup> Solar Kablo	
MODÜL ELEKTRİKSEL BAĞLANTISI			
	Monokristal panel bilgileri	Bi-facial Monokristal panel bilgileri	Monokristal panel bilgileri
Güç Toleransı	(0, +4,99)	(0, +4,99)	
STC		Ön Taraf	Arka Taraf
Panel Maksimum Gücü - Pmax	400 Wp	400 Wp	298 Wp
Maksimum Güç Gerilimi - Vmpp	37,2 V	41,7 V	38,5 V
Maksimum Güç Akımı - Impp	9,19 A	9,60 A	7,75 A
Açık Devre Gerilimi - Voc	47,0 V	49,5 V	45,8 V
Açık Devre Akımı - Isc	9,51 A	10,12 A	8,20 A
NOCT (°C)	45±2°C	45±2°C	
Maksimum Sistem Gerilimi	1 000 / 1 500V DC	1 500V DC	
Sıcaklık Katsayısı [V] - [I] - [P]	-0,28 %/°C, +0,05 %/°C, -0,38 %/°C	-0,28 %/°C, +0,05 %/°C, -0,36 %/°C	
Maksimum Ters Akım	20 A	20 A	

Polikristal ve monokristal panellerin karşılaştırılması için kullanılan panellerin gücü ve sayısı sırasıyla 345 Wp ve 414 adet iken, monokristal panel ile monokristal bifacial panel karşılaştırılması için sırasıyla 400 Wp ve 342 adet olması nedeniyle monokristal panellerden elde edilen üretim ilk karşılaştırmada 177.310 kWh iken ikinci karşılaştırmada 164.030 kWh olmuştur.

Son olarak Monokristal normal tasarım panel ile Monokristal half-cut tasarım panel karşılaştırılmıştır. Aynı marka ve 350 Wp gücündeki iki farklı panelde hücre sayısının üretim üzerine etkileri gözlemlenmiştir. Daha fazla hücre sayısı olan half cut panel ile daha az hücre sayısına sahip normal panelin üretimi karşılaştırılmıştır. Çizelge 4'de tasarımın veri bilgileri yer almaktadır. Her iki panel çeşidi için de 414 tane panel kullanılmıştır. PVsyst üretim raporları incelendiğinde half-cut teknolojisine sahip panel yılda 183.610 kWh üretebilirken, monokristal panelin yılda 181.590 kWh ürettiği görülmektedir. Aradaki üretim farkı 2,02 MWh olarak kaydedilmiştir. Half-cut teknolojisine sahip ve daha fazla hücre sayısı olan half-cut

tipi monokristal panel kullanımının beklenildiği gibi daha verimli olduğu görülmüştür.

Polikristal ve monokristal panellerin karşılaştırılması için kullanılan panellerin gücü ve sayısı sırasıyla 345 Wp ve 414 adet iken, monokristal panel ile monokristal half-cut panel karşılaştırılması için sırasıyla 350 Wp ve 414 adet olması nedeniyle monokristal panellerden elde edilen üretim ilk karşılaştırmada 177.310 kWh iken ikinci karşılaştırmada 181.590 kWh olmuştur.

**Çizelge 4. Panel Bilgileri**

MODÜL BİLGİLERİ		
Modül Bilgileri	Monokristal panel bilgileri	Monokristal half-cut panel bilgileri
	Solar Panel Mono Crystalline 350 WATT	Solar Panel Mono Crystalline 350 WATT
Toplam Panel Sayısı	414 Adet	414 Adet
Modül Boyutları (LxWxH)	1.970x992x40 mm	1.776x1.052x35 mm
Hücre Sayısı	72 Adet	120 Adet
Kablo	4 mm <sup>2</sup> Solar Kablo	4 mm <sup>2</sup> Solar Kablo
MODÜL ELEKTRİKSEL BAĞLANTISI		
	Monokristal panel bilgileri	Monokristal half-cut panel bilgileri
Panel Maksimum Gücü - Pmax	350 Wp	350 Wp
Güç Toleransı	(0, +4,99)	(0, +4,99)
Maksimum Güç Gerilimi - Vmpp	38,1 V	33,8 V
Maksimum Güç Akımı - Imp	9,19 A	10,37 A
Açık Devre Gerilimi - Voc	47,0 V	40,8 V
Açık Devre Akımı - Isc	9,51 A	10,99 A
NOCT (°C)	45±2°C	45±2°C
Maksimum Sistem Gerilimi	1 000 / 1 500V DC	1 000V DC
Sıcaklık Katsayısı [V] - [I] - [P]	-0,28 %/°C, +0,05 %/°C, -0,38 %/°C	-0,28 %/°C, +0,05 %/°C, -0,36 %/°C
Maksimum Ters Akım	20 A	20 A

**Çizelge 5. Panel bilgileri**

Modül	Solar Panel (Mono) Crystalline 550 WATT
Top. Panel Sayısı	11.290 Adet
Hücre Sayısı	144 Adet
Modül Boyutları (LxWxH)	2.279x1.134x35 mm
Solar Kablo	4 mm <sup>2</sup>
Elektriksel Bağlantı Bilgileri	
Panelin Maks. Güç - Pmax	550 Wp
Güç Toleransı	(0, +3%)
Maks. Güç Gerilimi - Vmpp	42,05 V
Maks. Güç Akımı - Imp	13,08 A
Açık Devre Gerilimi - Voc	49,70 V
Açık Devre Akımı - Isc	14,00 A
NOCT (°C)	45±2 °C
Maks. Sistem Gerilimi	1.500V DC
Sıcaklık Katsayısı [V] - [I] - [P]	-0,27 %/°C, +0,05 %/°C, -0,35 %/°C
Maks. Ters Akım	25 A

## 2.2 Kampüs İçin GES Yerleşimi

ISUBÜ batı yerleşkesi, 37°49'48.30''K enlem ve 30°31'30.29''D boylamında yer almaktadır. Yerleşim yapılacak çatı alanı yaklaşık 4.054,875 m<sup>2</sup>'dir. Planlanan panel için uygun yerleşim ve toplam modül alanı 28.656 m<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir. Half-cut monokristal panel kullanılabilir en verimli panel olarak belirlendiği için

yerleşimde 550 Wp half-cut monokristal panel kullanılmıştır. Panelin ve inverterin veri bilgileri Çizelge 5 ve Çizelge 6'da verilmiştir. String (dizi) inverterler genellikle daha ekonomik olup, bakım ve değişim süreçleri daha kolaydır. Herhangi bir arıza olması durumunda merkezi inverterlerde daha fazla kayıp oluşmakta iken string inverterler kullanıldığında daha az kayıpla, daha kolay bakım ve onarım ile sistem arızaları düzeltilmektedir. Bu nedenle bu çalışmada merkezi 1 ya da 2 adet inverter kullanmak yerine 62 tane 100 kW'lık string inverter kullanılmıştır.

**Çizelge 6. İnverter bilgileri**

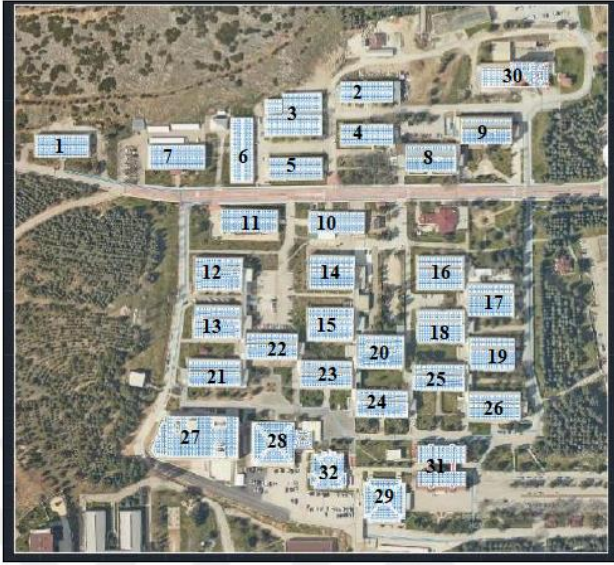
İnverter Tipi	String
Giriş Kısmı Özellikleri	
Maks. DC Giriş Gerilimi	1.100 V
DC Giriş Bağlantı Tipi	PV Konnektör
Mppt Giriş Gerilim Aralığı	200-1.000 Vac
Bağımsız MPPT Sayısı/Dizi Giriş Sayısı	10 / 2
Maks. Giriş Akımı/Kısa Devre Akımı	26A / 40A
Bağımsız MPPT sayısı	10
ÇIKIŞ	
Çıkış Fazları / Hat Bağlantıları	3 Faz/N/PE
Maks. AC Çıkış Akımı	3x160,4 A
AC Gerilim Aralığı	380V-480V
Nominal AC Şebeke Gerilimi	400 V
Nominal Güç Faktörü	0,98
AC Güç Frekansı	50 Hz, 60 Hz
KORUMA (GİRİŞ-ÇIKIŞ)	
Toprak Hata Gösterimi	Mevcut
Koruma Sınıfı	IP66
DC Ters Polarite Koruması	Mevcut
AC Kısa Devre Akım Kapasitesi	Mevcut
DC Ters Bağlantısız Koruma Aygıtı	Mevcut
DC Parafudr	Mevcut
Şebeke Hata Gösterimi	Mevcut
ÇALIŞMA PERFORMANSI	
Maks. Verimlilik	98,60%
Ortalama Verimlilik	98,40%

Binaların tamamının ölçüleri çıkarılmış, hepsi için uygun kriterlerde yerleştirilebilecek en fazla sayıda panel konulmuştur. Bina üzerinde yer alan havalandırma, baca gibi cisimlerin gölge düşen bölgelerine panel konulmasına özen gösterilmiş, paneller arasında işçiler için yeterli yürüyüş yolu bırakılmış, güvenlik nedeniyle çatı uçlarında 35 cm'lik boşluklar bırakılmış ve uygun dizileme ile maksimum verim hedeflenmiştir. Şekil 1'de ISUBÜ çatı GES için yapılan yerleşim ve bina numaralandırması verilmiştir. Toplam 11.290 Adet 550 Wp panel kullanılmıştır. Buradan elde edilen güç  $11.290 \times 0,550 = 6.209,5$  kWp'dir. Bire bir oran gözetilerek AC güç 6.200 kWp olarak alınmıştır.

## 3. Bulgular

### 3.1 ISUBÜ batı yerleşkesi binaların PVsyst, SAM ve PVSOL analizi

ISUBÜ batı yerleşkesinde toplam 32 bina ve 40.542,87 m<sup>2</sup>'lik alana yapılan yerleşimde, tüm binaların üretim verileri ayrı ayrı sırasıyla PVsyst, System Advisor Model (SAM) ve PVSOL üzerinden hesaplanıp toplam üretimler Çizelge 6'da gösterilmiştir. 32 bina için çatı alanları ve aylara göre üretimler tek tek hesaplanmıştır. Binaların çatı alanları, panel sayıları, panel yüzeyleri ve yıllık enerji üretimleri de Çizelge 6'da mevcuttur. SAM yazılımı Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı tarafından geliştirilmiştir ve güneş enerjisi ile çalışan sistemlerin tasarımı ve analizi için kullanılmaktadır.



Şekil 1. ISUBÜ çatılarına yapılan yerleşim ve binaların numaralandırılması

Bu yazılımda belirlenen koordinatla çağrılan hava verileri girilmiştir. ISUBÜ batı yerleşkesi koordinatlarına dair kullanılan veriler şu şekildedir; global yatay ışınım değeri 4,67 kWh m<sup>2</sup>/gün, direkt ışınım değeri 5,34 kWh m<sup>2</sup>/gün, yatay difüz ışınım 1,49 kWh m<sup>2</sup>/gün, ortalama sıcaklık değeri 13,3°C, ortama rüzgar hızı 2,1 m/s. PVsyst yazılımında kullanılan aynı inverter ve panel kullanılmıştır. Sistem tasarımı aşamasında inverter sayıları ve panellerin dizeleme sayıları, baktıkları yön ve derece detayları girilmiştir. Sistem tasarımı verileri PVsyst verileri ile benzer tutularak sağlıklı bir kıyaslama yapılması planlanmıştır. SAM yazılımında sonuç olarak, 32 binadan oluşan 40.542,87 m<sup>2</sup> alana 6.209,5kWp / 6.200 kWe olacak şekilde tasarlanan Güneş Enerji Santralinde; 62 tane 100 kW'lık inverter 11.290 tane 550 Wp'lık monokristal panel, kullanılmıştır.

PVSOL ise fotovoltaik projelerin tasarımının yapılması optimizasyonun sağlanması ve performans analizi için kullanılan bir diğer yazılımdır. PVSOL bataryalar, güneş panelleri, kablolar ve invertörler gibi sistem

parametreleriyle alarak GES'in performansını benzetim yoluyla elde eder. Güneş ışığı, gölgelenme, hava yönlendirme ve eğim açıları gibi faktörleri de göz önünde bulundurduğu için bu program gerçeğe oldukça yakın analizler elde etmektedir. PVSOL analizi için diğer iki yazılımda olduğu gibi yazılımın kullandığı meteorolojik hava verileri kullanılmıştır. Binaların sistem tasarımları, malzemeleri ve yönleri PVsyst ve SAM analizlerindekiyle aynı tutulmuştur.

Çizelge 7. ISUBÜ binalarından elde edilen üretimler

Bina no	Çatı Alanı (m <sup>2</sup> )	Panel Sayısı (Adet)	Panel Yüzeyi (m <sup>2</sup> )	PVsyst analizi Yıllık Üretim (MWh)	SAM analizi Yıllık Üretim (MWh)	PVSOL analizi Yıllık Üretim (MWh)
1	940	294	759,8	213,09	206,86	210,83
2	940	294	759,8	213,09	206,86	210,83
3	1.757,5	536	1.385,2	388,15	397,36	382,72
4	955	294	759,8	215,69	211,83	210,78
5	955	294	759,8	215,69	211,83	210,78
6	1.160,25	350	904,5	253,10	268,32	249,43
7	1.112,8	374	966,6	275,92	281,36	269,52
8	2.332,4	291	752,1	211,51	216,16	226,08
9	2.332,4	291	752,1	211,51	216,16	226,08
10	1.033,5	330	852,8	243,66	248,53	237,63
11	1.086,5	352	749,9	259,73	262,16	177,77
12	1.247	366	945,9	262,4	259,36	269,13
13	1.247	366	945,9	262,4	259,36	263,13
14	1.247	360	930,4	265,03	276,59	265,23
15	1.247	360	930,4	265,03	276,59	265,23
16	1.290	360	930,4	268,19	271,34	265,88
17	1.290	360	930,4	268,19	271,34	265,88
18	1.290	360	930,4	268,19	271,34	265,88
19	1.290	360	930,4	268,19	271,34	265,88
20	1.268,5	374	966,6	273,3	275,77	274,29
21	1.104	300	775,3	221,06	228,71	220,23
22	1.104	300	775,3	221,06	228,71	220,23
23	1.104	300	775,3	221,06	228,71	220,23
24	1.104	300	775,3	221,06	228,71	220,23
25	1.104	300	775,3	221,06	228,71	220,23
26	1.104	300	775,3	221,06	228,71	220,23
27	3.056	692	1.788,4	490,24	507,88	493,78
28	1.841,05	484	1.250,8	344,14	354,68	348,14
29	1.369	352	1.308,53	256,59	264,34	244,21
30	1.419,37	322	832,2	234,76	244,13	233,42
31	1.422	440	1.137,1	321,33	333,13	314,04
32	1.122	234	604,7	182,5	173,38	169,83
<b>toplam</b>	<b>40.542,87</b>	<b>11.290</b>	<b>18.221,03</b>	<b>8.257,98</b>	<b>8.410,43</b>	<b>8.143,93</b>

SAM yazılımının toplam üretim değeri 8.410,43 MWh iken PVsyst verilerine göre 8.257,98 MWh olarak kaydedilmiştir. Buradan iki yazılım arasında 152,45 MWh fark gözlemlenmiştir. PVSOL üzerinden toplam 8.143,93 MWh üretim gerçekleştirildiği görülmektedir. Sam yazılımda en fazla üretim elde edilmiştir PVSOL'de ise en düşük üretim görülmüştür. Aradaki farklar oldukça düşüktür ve bu farkların yazılımların kendi boyutlandırma



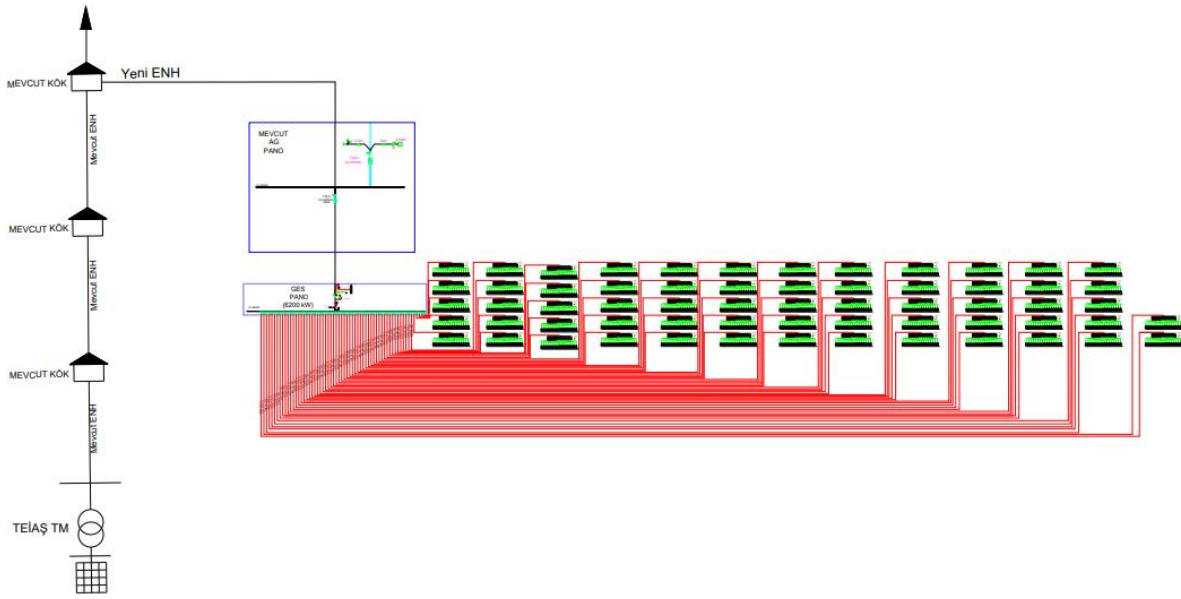
hesaplarından ve veri tabanlarından kaynaklandığı öngörülmektedir.

### 3.2 Güneş Enerji Santralinin Modellenmesi

SketchUp, kullanıcıların yüzeyleri birleştirme, geometrik çizim, düzenleme ve boyutlandırma gibi işlemleri yapabildiği, 3 boyutlu modelleme ve tasarım yapmak için kullanılan bir yazılımdır. Bu yazılım, çizimleri daha gerçekçi görebilmek için ışık, renk ve malzeme özelliklerine de sahiptir. SketchUp programında tasarımı yapılan ISUBU GES için ISUBU batı yerleşkesi 3 boyutlu modellemesi çizilip panellerin yerleşimleri gösterilmiştir. 3 boyutlu modellenen binalar Şekil 2.'de gösterilmiştir. GES elektiriksel bağlantı şeması ise Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 2. ISUBU üç boyutlu modeli



Şekil 3. GES elektiriksel bağlantı şeması

### 3.3 Panellerin Dizi Hesabı

Fotovoltaik panel dizileri, uygun inverter gerilim ve akımına göre belirlenir ve MC4 konektörler aracılığıyla eviriciye bağlanır. Güvenli dizi değerini bulmak amacıyla Isparta'da en yüksek sıcaklık 45°C, en düşük sıcaklık ise -15°C olarak kabul edilmiştir. Diziler 18 ve 19'lu olarak hesaplanmış ancak uygunluk 18'li diziler üzerinden değerlendirilecektir. Hesaplama sırasında Çizelge 5 ve Çizelge 6'daki panel ve inverter bilgileri kullanılmıştır. Dizideki evirici sayısı 60, modül sayısı ise 18 olarak belirlenmiştir ve toplam dizi sayısı 604 olarak hesaplanmıştır.

- $V_{ocmax}$  = En yüksek açık devre gerilimi
- $V_{ocmin}$  = En düşük açık devre gerilimi
- $V_{oc}$  = Açık devre gerilimi
- $TC_{VOC}$  = Açık devre gerilimi sıcaklık katsayısı
- $t_{min}$  = En düşük sıcaklık değeri
- $t_{max}$  = En yüksek sıcaklık değeri
- $t_{nom}$  = PV standart test koşulları

- $V_{mmpmax}$  = En yüksek mppt gerilimi
- $V_{mmp}$  = En yüksek güç gerilimi
- $TC_{Vmpp}$  = Gerilimi sıcaklık katsayısı
- $V_{mmpmin}$  = En düşük mppt gerilimi
- $N_{max}$  = En yüksek panel sayısı
- $N_{min}$  = En düşük panel sayısı
- $U_{max.mpp}$  = İnverter en yüksek gerilim akımı
- $U_{min.mpp}$  = İnverter en düşük gerilim akımı
- $V_{mmp}$  = En yüksek güç gerilimi

ifade eder ve eviriciye gelebilecek en yüksek elektrik yükü hesabı (-15 °C 'de modüllerdeki elektrik yükü) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$V_{ocmax} = V_{oc} \left[ \left( 1 + \left( TC_{VOC} \frac{t_{min} - t_{nom}}{100} \right) \right) \right] \quad (1)$$

Değerler yerine konursa sonuç  $49,7 \times [1 + (-0,27 \times ((-15) - 25)/100)] = 55,07$  olarak hesaplanır.

Dizede 18 tane modül vardır ve dizedeki toplam elektrik yükü aşağıdaki eşitlik ile bulunur

$$V_{ocmax} = V_{oc} * \text{modül sayısı} \quad (2)$$

Açık devre gerilimi 1100 volttan düşük olmalıdır. Buradan  $55,07 \times 18 = 991,22 < 1100$  V UYGUNDUR.

En yüksek mppt gerilimi (-15 °C 'de modüllerdeki elektrik yükü) eşitlik 3 'ten hesaplanır

$$V_{mmpmax} = V_{mmp} \left[ \left( 1 + \left( TC_{V_{mpp}} \frac{t_{min} - t_{nom}}{100} \right) \right) \right] \quad (3)$$

Eşitlikte ifadelerin yerine sayısal değerler konulduğunda  $42,05[(1+(-0,35((-15)-25)/100))]= 47.94$  olarak bulunur. Dizedeki toplam elektrik yükü aşağıdaki eşitlikten hesaplanır.

$$V_{mmpmax} = V_{mmp} * \text{modül sayısı} \quad (4)$$

Toplam elektrik yükü 1000 volttan düşük olmalıdır. Buradan  $47,94 * 18 = 862,87 < 1000$  V UYGUNDUR.

Eviriciye gelebilecek En düşük mppt gerilimi (45 °C 'de modüllerdeki elektrik yükü) aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanır

$$V_{mmpmin} = V_{mmp} \left[ \left( 1 + \left( TC_{V_{mpp}} \frac{t_{max} - t_{nom}}{100} \right) \right) \right] \quad (5)$$

Eşitlikte ifadelerin yerine sayısal değerler konulduğunda  $42,05[(1+(-0,35((45)-25)/100))]= 39,11$  olarak bulunur. Dizedeki toplam elektrik yükü aşağıdaki eşitlikten hesaplanır.

$$V_{mmpmin} = V_{mmp} * \text{modül sayısı} \quad (6)$$

Eşitliğinde en düşük mppt gerilimi 200 volttan yüksek olmalıdır.  $18 * 39,11 = 703,92 > 200$  V UYGUNDUR.

En düşük dizi gerilimi (45°C 'de modüllerdeki elektrik yükü ) aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanır;

$$V_{ocmin} = V_{oc} \left[ \left( 1 + \left( TC_{V_{oc}} \frac{t_{max} - t_{nom}}{100} \right) \right) \right] \quad (7)$$

Eşitlikten  $49,7 * [(1 + (-0,27 * (45-25)/100))] = 47,02$  olarak bulunur. Dizedeki toplam elektrik yükü aşağıdaki eşitlikten hesaplanır

$$V_{ocmin} = V_{oc} * \text{modül sayısı} \quad (8)$$

Minimum açık devre gerilimi 200 volttan büyük olmalıdır.  $18 * 47,02 = 846,29 > 200$  V UYGUNDUR .

En düşük ve en yüksek DC giriş kontrolü için dizideki maksimum panel sayısı:  $N_{max} = U_{max.mpp} / V_{mmp}$  olmalıdır Buradan  $1000/42,05 = 23,8$  olarak bulunur ve dizelerde en yüksek panel sayısı aşılmamıştır.

Dizideki en düşük panel sayısı;  $N_{min} = U_{min.mpp} / V_{mmp}$  olmalıdır ve değeri  $200/42,05 = 4,8$ 'dir. Bu sayede dizelerde en düşük panel sayısı aşılmamış olur.  $N_{max} > N > N_{min}$  18 UYGUNDUR. Eşitliği sağladığı için 18'li dize uygunluğu bulunur.

### 3.4 GES'in Fizibilite Hesabı

ISIBÜ batı yerleşkesi için yapılan GES benzetim çalışmasında elde edilen üretim verileri ile üniversitenin hem doğu hem de batı yerleşkelerinin tamamı için hesaplanan tüketim miktarının ne kadarını karşıladığı incelenmiştir.

#### Kampüs elektrik tüketimi

ISIBÜ yapı işleri ve teknik daire başkanlığı tarafından sağlanan kampüsün hem doğu hem de batı yerleşkelerini kapsayan üniversitenin 2019 yılı tüketimleri Çizelge 8'de verilmiştir. Kampüsün su ihtiyacı, su kuyularından karşılanmaktadır bu nedenle elektrik tüketimi hesabına dâhil edilmiştir.

**Çizelge 8.** 2019 Yılı ISIBÜ toplam elektrik tüketimi (kWh)

Aylar	Rektörlük Merkez Yerleşkesi	İçme Suyu Bozanönü Yolu Tr-1	İçme Suyu Bozanönü Yolu Tr-2	İçme Suyu Bozanönü Yolu Tr-3
1	1.055.400,00	44.060,08	13.686,73	9.500,00
2	985.123,32	41.608,80	13.244,19	10.175,60
3	1.055.300,00	42.873,32	15.474,63	7.163,08
4	980.841,25	44.300,20	15.783,70	3.538,44
5	839.753,00	44.866,44	28.340,08	17.212,72
6	702.689,09	79.797,04	34.142,50	30.905,92
7	816.840,00	94.478,24	45.119,58	43.104,44
8	768.918,75	88.167,76	48.251,96	46.193,57
9	681.375,00	81.994,74	45.373,33	39.664,16
10	878.345,9	63.426,95	34.746,00	30.978,73
11	1.027.465,21	38.588,75	13.335,00	15.585,34
12	1.179.130,70	43.249,74	11.324,65	7.536,65
<b>Toplam</b>	<b>10.971.182,22</b>	<b>668.823,31</b>	<b>318.822,35</b>	<b>2.611.558,65</b>

Çizelge 8’de görüldüğü üzere üniversitenin toplam elektrik tüketimi 12.220.387 kWh olarak belirlenmiştir.

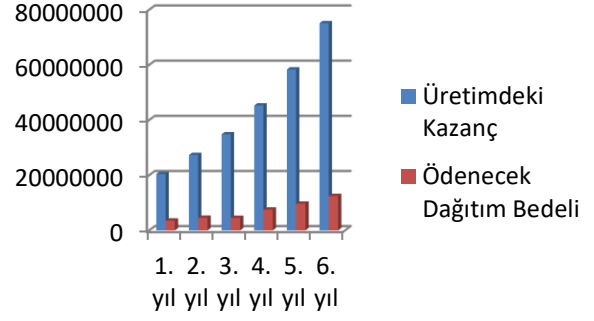
### Sistem Karlılığı

Kampüsün tüketim ve üretim miktarları karşılatılarak sistem karlılığını hesaplamak hedeflenmiştir. Bu sayede yatırım maliyeti ve yıllık kazanç oranları belirlenebilecektir. Dağıtım bedeli ve elektrik satış fiyatları EPDK’nın sitesinden alınmıştır. 1/4/2023’ten itibaren geçerli elektrik tarife fiyatları kullanılmıştır. “Kamu ve özel hizmetler sektörü ile diğer” başlığında yer alan orta gerilimli, tek terimli tarifeleri kullanılmıştır. Enerji bedeli (kr/kWh) 2,2637 TL alınırken dağıtım bedeli (kr/kWh) 0,6684 TL olarak alınmıştır(epdk.gov.tr,2024). Bu bilgiler ışığında 6 yıllık sistem kazancı hesaplamak amacıyla Çizelge 8’den başlayarak ilk yılın üretim - tüketim tablosu hazırlanıp sistem kazancı hesaplanmıştır. 6 yıl boyunca aylık ve yıllık üretim ve tüketim miktarları Çizelge 9’da görüldüğü gibi sabit varsayılmıştır.

Çizelge 9. Kampüs enerji üretim ve tüketim miktarı

	Üretim (kW/h)	Tüketim (kW/h)
Ocak	348.550	1.122.647
Şubat	417.060	1.050.152
Mart	655.860	1.120.811
Nisan	786.520	1.044.464
Mayıs	950.210	930.172
Haziran	1.044.890	847.535
Temmuz	1.061.580	999.542
Ağustos	930.310	951.532
Eylül	793.710	848.407
Ekim	561.180	1.007.498
Kasım	397.830	1.056.386
Aralık	310.280	1.241.242
Toplam	8.257.980	12.220.387

6 yıl boyunca her ay için üretimdeki kazanç; üretim miktarı ile enerji bedeli çarpımı üzerinden ve ödenecek dağıtım bedeli ise tüketim miktarı ile üretim miktarı arasındaki mutlak farkın dağıtım bedeli ile çarpımı üzerinden hesaplanmıştır. Yıllık toplam sistem kazancı ise; üretimdeki yıllık kazanç iler yıllık toplam ödenecek dağıtım bedeli arasındaki farktır. Geçmiş yıllardaki artışlar göz önünde bulundurularak yıllar itibariyle enerji bedeli ve dağıtım bedelinde yıllık ortalama %28,8’lik bir artış olacağı varsayılmıştır. Aynı zamanda yıl içerisinde de her yılın Nisan ayında %13 ve Ekim ayında %14’er artış olacağı varsayılmıştır.6 yıl boyunca üretimdeki kazanç ile ödenecek dağıtım bedellerindeki değişimi gösteren sütun grafik Şekil 4’de sunulmuştur. 6. yılın sonunda toplam sistem kazancı 218.948.402 TL olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4. Sistem karlılığı grafiği

### Sistem Ömrü

ISIBÜ için hazırlanan GESin kampüsün enerji ihtiyacının karşılanması hedeflenmiştir. Ancak sistem ömrü ve maliyetini de göz önünde bulundurmak gerekir. Kurulum aşamasında sistemin tahmini ilk yatırım maliyeti 182.500.000 TL olarak hesaplanmıştır. Çizelge 10 maliyet kalemlerini ve tutarlarını göstermektedir.

Çizelge 10. Sistemin tahmini ilk yatırım maliyeti (TL)

Maliyet Kalemleri	Tutarlar
Panel	94.000.000
İnverter	12.000.000
Haberleşme Cihazı, Trafolar	590.000
Taşıyıcı Sistem	16.500.000
(DC, AC, AG) Kablolar	13.750.000
Elektirik Sarf Malzemeleri, Sayaç vb.	44.500
İşçilik, Nakliye, Vinç Taşıma	8.200.000
Projelendirme	7.000.000
Ara Toplam	152.084.500
Vergiler	30.416.900
Toplam	182.501.400

Santral gerek çevresel gerekse donanımsal sebeplerden belli bir süre içerisinde yıpranmaya başlayacaktır. Yıpranmaya sebebiyet verecek temel etkenler; aşırı soğuk kışlarla ilişkili donma suyu, yüksek yoğunluklu UV radyasyonu ile birlikte aşırı sıcaklıklar, kuvvetli rüzgar, dolu fırtınası, yüksek sıcaklık dalgaları ve uzun süreli yüksek miktarda nem oranı olarak gösterilebilir. Bu etkenler göz önünde bulundurulduğunda kurulan santral ömrü ortalama 40 yıl olarak belirlenmiştir. Bu sürenin sonunda panel verimliliğinin %40 seviyelerine düşmesi beklenmektedir. Sistem panel değişimi ile birlikte tamamlanan panellerin hurda değeri ise hesap tarihi itibariyle ortalama piyasa değerleri üzerinden 21.400.000 TL olarak ön görülmüştür.

### 4. Sonuçlar ve Tartışma

Dünyada nüfus artışı ve teknolojik gelişmelerle enerjiye olan bağımlılık artmaktadır. Yenilenemez kaynakların

çevreye zarar vermesi ve yetersiz kalması yeni kaynak arayışlarını zorunlu kılmıştır. Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynakları çevre dostu, güvenli ve sürdürülebilir olmalarıyla öne çıkmaktadır. Güneş enerjisi, temiz enerji kaynaklarının başında gelmektedir ve bu çalışmaya da temel olmuştur.

Bir GES çalışmasını yapılabilmesi için Güneşten ulaşan ışınım değerlerinin elde edilmesi gerekmektedir. Daha sonra uygun ekipman seçimi yapılmalıdır. Bu çalışmada uygulamanın yapılacağı alan olan ISIBÜ kampüsü için ilgili değerler hesaplanmış ve en uygun panel seçimi araştırılmıştır. PVSyst yazılımında eşit şartlar gözetilerek kampüste seçilen tek bir bina üzerinde ikiye bölünmüş biçimde sırasıyla polikristal ve monokristal, monokristal ve monokristal bifacial, half-cut monokristal ve monokristal panel karşılaştırmaları yapılmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda half-cut monokristal panel daha verimli ve yüzeye uygulanabilir bulunmuştur.

ISIBÜ batı kampüsünde yer alan 32 binaya yapılan tasarımında toplam 40.542,87 m<sup>2</sup> çatı alanına 11.290 panel yerleştirilmiştir. Bu yerleşimlerde 550 Wp'lik paneller kullanılmıştır. 32 bina toplamında panel yüzeyi 18.221,03 m<sup>2</sup>'dir. Tüm santral için toplamda 62 adet 100 kW'lık inverter seçimi yapılmıştır.

Daha sonra GESin yılda ne kadar üretim sağlayacağı araştırılmıştır ve daha iyi sonuç elde edebilmek için üç farklı yazılım programı kullanılmıştır. Sırasıyla bu yazılım programları PVSyst, SAM ve PVSOL olarak seçilmiş ve üretim için analiz yapılmıştır. Amaç tasarlanan bu GES projesinin ne kadar üretim yapabileceğini öngörmektir. Yazılımların aynı konum için kendi hava durumları verileri kullanılarak hesaplamalarda meydana gelen farklar izlenmiştir. SAM yazılımı için 8.410,43 MWh, PVSyst verilerine göre 8.257,98 MWh, PVSOL üzerinden toplam 8.143,93 MWh şeklindedir. Meydana gelen farklılıkların nedenleri; hava durumu verilerindeki farklılıklar, yazılımlardaki hata oranı, kayıp oranı vb.dir. ISIBÜ doğu ve batı yerleşkelerinin bir yıldaki toplam tüketimi 12.220.387kWh'dir. Yapılan analiz sonucu sadece batı yerleşkesine yapılacak GES tüm üniversitenin yaklaşık %67'lik enerji ihtiyacını karşılayabilir. Sistemin kampüse altı yılda 218.948.402 TL mali kazanç sağlaması beklenmektedir.

Yenilenebilir bir enerji kaynağı olan güneş enerjisi, sera gazı üretimini engelleyerek küresel ısınmaya karşı direnç sağlar. Bu prensip doğrultusunda hazırlanan GES santrali, karbon ayak izini azaltmada önemli bir rol oynar. Bu bağlamda kurulan bu GES sistemi ile 3.967,42 kg/yıl CO<sub>2</sub> emisyonu engellenmiştir. Engellenen bu emisyon değeri ise yılda 176.330 ağaca denktir.

Yapılan bu çalışma ile ISIBÜ örneğinde kampüsler için kurulacak güneş enerji santralinin kampüsün enerji tüketimini karşılama yeterliliği, doğaya katkısı ve sağlayacağı mali kazanç araştırılmış ve sonuçları sunulmuştur.

#### **Etik Standartlar Bildirgesi**

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

#### **Yazarlık Katkı Beyanı**

Yazar 1: Kaynaklar, Araştırma, Yazma – orijinal taslak Görselleştirme, Yorumlama, Biçimsel analiz

Yazar2: Araştırma, Deneyleme, Doğrulama, Metodoloji, Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak, Fikir Sahibi

Yazar 3: Araştırma, Fikir Sahibi, Doğrulama, Danışmanlık

#### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

#### **Verilerin Kullanılabilirliği**

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

## **5. Kaynaklar**

- Buldu, B., ve Külekçi C., 2008. *Mersin İlinin Güneş Potansiyeli ve Mevcut Durumu*. VII Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu., İstanbul, Türkiye, 385-394.
- Ortaçtepe, Y. C., 2011. Güneş Pillerinden Elektrik Üreten Bir Sistemin Analizi ve Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,96.
- Saxena, N.N., Kumar, P., 2021. A Review on Application of Solar Energy in Agriculture Sector. *International Journal of Innovative Research in Engineering & Management (IJIREM)*, **8**, **6**, 136-139.
- Aliyu, M., Hassan, G., Said, S.A., Siddiqui, M.U., Alawami, A.T., Elamin, I.M., 2018. A review of solar-powered water pumping systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **87**, 61–76  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.010>.
- Zhang, L., Lv, M., Meng, J., Du, H., 2017. Optimization of solar-powered hybrid airship conceptual design. *Aerospace Science and Technology*, **65**, 54–61.  
<https://doi.org/10.1016/j.ast.2017.02.016>.
- Cardinaletti, I., Vangerven, T., Nagels, S, Cornelissen, R., Schreurs, D., Hruby, J., Vodnik, J., Devisscher, D., Kesters, J., D'Haen, J., 2018. Organic and perovskite solar cells for space applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **182**, 121–127.  
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.03.024>.
- Zhu, X., Guo, Z., Hou, Z., 2014. Solar-powered airplanes: A historical perspective and future challenges. *Progress in Aerospace Sciences*, **71**, 36–53.  
<https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2014.06.003>
- Muhida R., Ali M., Kassim P.S.J., Eusuf M.A., Sutjipto A., Afzeri, 2009. A Simulation Method to Find the Optimal Design of Photovoltaic Home System in Malaysia, Case Study: A Building Integrated Photovoltaic in Putra



Jaya. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, **53**, 694-698.

Hosseini Dehshiri, S.S., Hosseini Dehshiri, S.J., Firoozabadi, B., 2023. Evaluation of using solar energy in Iran's textile industry towards cleaner production: sustainable planning and feasibility analysis. *Journal of Cleaner Production*, **421**, 138447  
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.138447>

Zahedi, R., Sadeghitabar, E., Ahmadi, A., 2022. Solar energy potential assessment for electricity generation in the southeastern coast of iran. *Future Energy*, **2(1)**,15-22.  
<https://doi.org/10.55670/fpll.fuen.2.1.3>

Akyazı, Ö., Şahin, E. & Kahveci, D. C. ,2019. Fotovoltaik panel ve şebeke entegrasyonlu akıllı sokak lambası tasarımı ve uygulaması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (Özel Sayı), 356-360.  
<https://doi.org/10.31590/ejosat.638314>

Güner, S. & Muharremoğlu, A., 2020. Bir Havalimanı Otoparkına Kurulabilecek Fotovoltaik Üretim Sisteminin Tasarımı ve Enerji Analizi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, **19**, 182-188.  
<https://doi.org/10.31590/ejosat.713529>

Dandıl, E. & Gürgen, E., 2019. Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Fotovoltaik Panel Güç Çıktılarının Tahmini ve Sezgisel Algoritmalar ile Karşılaştırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, **16**, 146-158.  
<https://doi.org/10.31590/ejosat.540262>

Türkdoğan, S., Mercan, M.T.& Çatal, T., 2020. Şebekeden bağımsız hibrit enerji sistemleri kullanılarak 40 hanelik bir topluluğun elektrik ve termal yük ihtiyacının karşılanması: teknik ve ekonomik analizleri. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, **18**, 476-485.  
<https://doi.org/10.31590/ejosat.688048>

Yağlı, H. & Koç, Y. (2020). Gaziantep Bölgesi İçin Güneş Enerjisinden Elektrik Üretiminde Kurulacak Panellerin Optimum Eğim Açılarının Belirlenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, **19**, 475-483.  
<https://doi.org/10.31590/ejosat.733530>

### **İnternet kaynakları**

1-<https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-327/elektrik-faturalarina-esas-tarife-tablolari>  
(29/05/2024)



## Bal Kabağı Sapı Tozunun Katyonik Tekstil Boyası Gideriminde Biosorbent Olarak Kullanımı ve Optimum Koşulların Belirlenmesi

\*Makale Bilgisi / Article Info  
Alındı/Received: 02.03.2024  
Kabul/Accepted: 01.08.2024  
Yayımlandı/Published:02.12.2024

### Use of Powdered Pumpkin Stalk as a Biosorbent in Cationic Textile Dye Removal and Determination of Optimum Conditions

Sevgi FERSİZ \*

Kocaeli Üniversitesi, İzmit Meslek Yüksekokulu, Çevre Koruma Teknolojileri Bölümü, Kocaeli, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

Bu çalışmada kabak sapı tozu, sulu çözeltilerden Astrazon Red 5BL boyasının adsorpsiyon yöntemiyle gideriminde adsorban olarak kullanılmıştır. Adsorpsiyon çalışmaları kesikli sistemde çalışılarak pH, adsorban miktarı, karıştırma hızı, temas süresi, sıcaklık ve iyonik yükün boya giderim verimliliğine etkisi araştırılmıştır. pH 5, 0,5 g/100 ml adsorban miktarı, 250 rpm karıştırma hızı, 15 dakika temas süresi ve 25 °C sıcaklık gibi çalışma şartlarında en yüksek boya giderimi verimi %94,5 olarak elde edilmiştir. Kinetik veriler değerlendirildiğinde adsorpsiyonun hızlı bir şekilde 15 dakikada tamamlandığı ve yalancı ikinci dereceden kinetik modeline uyumlu olduğu görülmüştür ( $R^2=0,999$ ). Elde edilen verilerin Langmuir, Freundlich ve Temkin izoterm modellerine uygunluğu incelenmiştir. Freundlich ve Temkin izotermelerinin korelasyon katsayısına göre ( $R^2=0,941-0,940$ ) en iyi temsil eden modeller olduğu görülmüştür. Ayrıca çözeltinin tuz içerme durumunda adsorpsiyon veriminin tuzun varlığında olumsuz olarak etkilenmediği ortaya konmuştur. Bir tarımsal atık olan kabak sapı tozunun, katyonik boya gideriminde; elde edilmesi kolay, ilave işletme ve kimyasal masrafı gerektirmeyen bir adsorban olduğu ortaya konmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Adsorpsiyon; Kabak sapı tozu; Katyonik boya; Kinetik; İzoterm.

#### Abstract

In this study, powdered pumpkin stalk was used as an adsorbent in the removal of Astrazon Red 5BL dye from aqueous solutions by adsorption method. Adsorption studies were conducted in a batch system and the effects of pH, adsorbent dosage, mixing speed, contact time, temperature and ionic strength on dye removal efficiency were investigated. The highest dye removal efficiency was obtained as 94,5% under operating conditions such as pH5, 0,5 g/100 ml adsorbent dosage, 250 rpm mixing speed, 15 minutes contact time and 25 °C temperature. When the kinetic data were evaluated, it was seen that the adsorption was completed quickly in 15 minutes and was compatible with the pseudo-second order kinetic model ( $R^2= 0,999$ ). The suitability of the obtained data to Langmuir, Freundlich and Temkin isotherm models was examined and it was found that the Freundlich and Temkin isotherms were the most representative model according to the correlation coefficient ( $R^2 = 0,941-0,940$ ). It has also been shown that if the solution contains salt, the adsorption efficiency is not negatively affected by the presence of salt. In the cationic dye removal of powdered pumpkin stalk, which is an agricultural waste; It has been demonstrated that it is an adsorbent that is easy to obtain and does not require additional operating and chemical costs.

**Keywords:** Adsorption; Powdered pumpkin stalk; Cationic dye; Kinetic; Isotherm.

#### 1. Giriş

Nüfus artışı ve paralel olarak insan ihtiyaçlarının giderek çoğalması, teknolojinin hızla gelişmesine neden olmuştur. Bu gelişmeler sebebiyle endüstriyel faaliyetlerin sayısı ve çeşitliliği artmış, ham madde kaynaklarına olan talep de çoğalmıştır (Wang et al. 2021, Chen et al. 2021). Tüm dünyada olduğu gibi Türkiye’de de tekstil sektörü, imalat sanayileri içerisinde sürekli gelişmekte olan bir endüstri dalıdır. Tekstil endüstrileri, su kirliliğine neden olan en önemli sektörlerden birisidir. Tekstil endüstrilerinde kullanılan boya maddeleri kimyasal yapılarına, çözünürlüklerine, uygulama alanlarına ve boyama

özelliklerine göre sınıflandırılmaktadır. Boya maddeleri renk verecekleri yüzeylere hidrojen bağları, Van der Waals ve koordine kovalent bağlar ile bağlanmaktadır (Kıranşan 2021, Marin et al. 2019). Akrilik elyafları boyamak için kullanılan en önemli boya sınıfı olan katyonik boyalar düşük maliyetleri, yüksek dayanıklılık özellikleri ve stabiliteyi nedeniyle birçok malzemenin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Parlaklık ve yüksek renklendirme gücü ile katyonik boyalar suya renkli katyonlar vererek ayrışmaktadır (Kamel et al. 2010). Bu olumlu özellikleri yanında katyonik boyalar, anyonik boyalara göre daha toksiktirler. Katyonik boya maddeleri,

negatif yüklü hücre yapısıyla etkileşime girerek hücre içerisinde birikebilir ve besin zincirine dahil olabilirler (Tanyıldızı ve Uygut 2015). Ayrıca tekstil endüstrilerinden kaynaklanan atıksuların içeriğindeki toksik madde bileşenleri, suyun doğal yapısını bozarak alerjik deri iltihabına, mutasyona ve kanser gibi hastalıklara sebebiyet verebilirler (Bansal et al. 2021). Bununla birlikte tekstil atıksularının yapısındaki renk bileşenleri su ortamındaki ışık geçirgenliğini azaltmakta, oksijenin ana kaynağı olan fotosentez reaksiyonlarını olumsuz etkilemekte ve su ekosistemlerine zarar vermektedirler. Bu nedenle boya içeren tekstil endüstrisi atıksularının çevreye salınmadan önce arıtılarak boya maddelerinin giderilmesi veya zararsız hale getirilmesi gerekmektedir (Homagai et al. 2022). Boya içeren atıksularının kompleks ve sentetik yapıda olması nedeniyle biyolojik yöntemler ile arıtılabilirliği güçtür. Dolayısıyla bu tür atıksuların arıtılmasında adsorpsiyon (Aravindhhan et al. 2024), koagülasyon (Zafar et al. 2024), iyon değiştirme (Xu et al. 2021), elektrokimyasal oksidasyon (Santos et al. 2020), membran filtrasyon (Liu et al. 2018), fenton (Riccobono et al. 2017) gibi arıtma yöntemleri kullanılmaktadır.

Tekstil atıksularının arıtılmasında kullanılan adsorpsiyon yöntemi, diğer yöntemler ile karşılaştırıldığında uygulanabilirliği kolay olması, düşük maliyeti, yüksek etkinliği nedeniyle son yıllarda ilgi çeker hale gelmiştir (Felista et al. 2020). Adsorpsiyon prosesinde kullanılan adsorbanın gözenek yapısı ve yüzey alanı adsorpsiyonun başarısını etkilemektedir. Ayrıca adsorbanın adsorpsiyon kapasitesi, seçiciliği, stabilitesi, difüzyon direnci, düşük çözünürlüğü, sertliği, uzun kullanım ömrü, yan ürünler oluşturmaması ve uygun maliyetli olması adsorban seçimindeki önemli kriterlerdir (Gören et al. 2023).

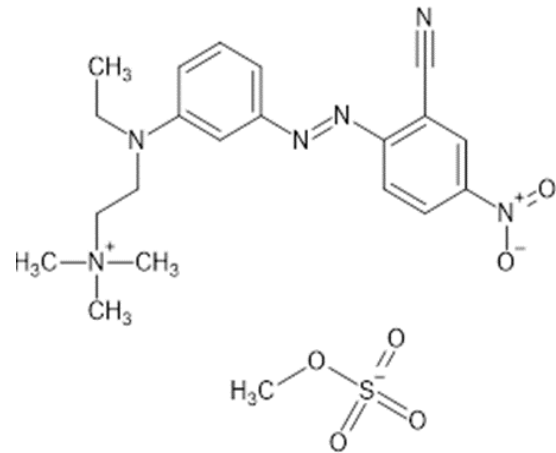
Adsorpsiyon yönteminde aktif karbon yüksek arıtma verimliliği nedeniyle birçok endüstride yaygın olarak kullanılan adsorbandır. Ancak, yüksek üretim maliyetlerinin yanı sıra bertaraf, yenileme ve kayıp sorunları, aktif karbon kullanımını sınırlandırmaktadır (Lim et al. 2017). Bu nedenlerden dolayı uygun maliyetli, çevre dostu adsorbanlara ihtiyaç doğmuştur. Tarımsal ve ormansal atıklar gibi biyokütlelerin adsorban malzeme olarak kullanıldığı biyosorpsiyon yöntemi ile kirletici maddelerin giderimi ilgi çekici hale gelmiştir. Bu amaçla zeytin çekirdeği (Banat et al. 2003), pirinç atıkları (Chowdhury et al. 2011), mısır koçanı (Tseng et al. 2006), buğday kepeği (Mousa and Taha 2015), fındık kabuğu (Güneş and Atav 2017), kayısı çekirdeği (Kavci et al. 2023) gibi birçok malzeme araştırılmıştır. Alternatif adsorban malzemelerin ekonomik, çevre dostu, doğada kolay bulunabilmeleri nedeniyle adsorpsiyon proseslerinde kullanılabilirliği oldukça yüksektir (Amar et al. 2022).

Katyonik boyaların birçok ürünün üretiminde yaygın olarak kullanılması, düşük maliyetli, dayanıklı ve yüksek stabilite özelliklerine sahip olması nedeniyle bu çalışmada katyonik boya sınıfına giren Astrazon Red 5 BL (AR) boyası kullanılmıştır. Adsorban olarak doğada kolayca bulunabilen, sıfır maliyetli bal kabağı sapı tozu (KT) kullanılmıştır. pH'nın adsorpsiyon verimi üzerine etkisini değerlendirmek amacı ile PHpzc noktası (sıfır yük noktası) bulunmuştur (pH drift yöntemi kullanılarak). Adsorpsiyon prosesini etkileyen parametreler olarak pH, adsorban miktarı, karıştırma hızı, temas süresi ve sıcaklık seçilmiştir. KT ile boya maddesi adsorpsiyonunda adsorpsiyon kinetiğinin belirlenmesi için yalancı birinci dereceden kinetik modeli ve yalancı ikinci dereceden kinetik modeli değerlendirilmiştir. KT'nin adsorpsiyon kapasitesinin belirlenmesi için ise Langmuir, Freundlich ve Temkin adsorpsiyon izotemleri kullanılmıştır. Ayrıca adsorban kullanım ömrünün değerlendirilmesi için adsorpsiyon-desorpsiyon çalışmaları 3 döngülü olarak gerçekleştirilmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Adsorbanın hazırlanışı

Adsorpsiyon çalışmalarında kullanılan KT, Kocaeli şehir pazarlarından temin edilmiştir. KT çeşme suyu ve saf su ile yıkandıktan sonra kuruması için etüvde 80 °C sıcaklıkta bekletilmiştir. Daha sonra öğütülmüş ve 50 mesh gözenek çapına sahip elek ile elenerek 300 µm sabit parçacık boyutuna getirilmiştir. Deneysel çalışmalar süresince nem almayacak bir ortamda muhafaza edilmiştir.



Şekil 1. AR boyarmaddesinin molekül yapısı.

### 2.2 Adsorbatın hazırlanışı

Astrazon Red 5BL (AR, C.I. Basic Red 24, C.I.11088, MA: 492,55 g/mol, λ<sub>max</sub> = 513 nm) boya maddesi Dystar firmasından temin edilmiştir. Kapalı molekül formülü C<sub>21</sub>H<sub>28</sub>N<sub>6</sub>O<sub>6</sub>S olan AR'nin kimyasal yapısı Şekil 1'de gösterilmektedir. Belirli konsantrasyonlarda hazırlanan

AR kullanılarak, UV-GB spektrofotometresi cihazı ile ölçülen aborbans değerleri bulunmuş ve kalibrasyon grafiği hazırlanmıştır. 1g AR 1000 ml hacimli balon joje içerisinde saf su ile çözülerek standart çözeltisi hazırlanmış ve deneysel çalışmalarda istenen diğer konsantrasyonlar, bu stok çözeltiden saf su ile seyreltmeler yapılarak hazırlanmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan çözeltilerin pH değerleri 0,1 mol/L HCl and 0,1 mol/L NaOH kullanılarak ayarlanmıştır.

### 2.3. Adsorpsiyon çalışmaları

Kabak sapı kullanılarak AR boya maddesi giderilmesi çalışmaları kesikli sistemde gerçekleştirilmiştir. Kesikli deneysel çalışmalarda pH ( 3-7), adsorban miktarı (0,3-1 g/100 ml), karıştırma hızı (50-250 rpm), temas süresi (5-90 dk), başlangıç konsantrasyonu (25-400 mg/L) ve sıcaklık (25-55 °C) gibi parametrelerin adsorpsiyon verimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmalar 250 ml'lik erlenler içerisinde 100 ml çalışma hacminde, NUVE ST-402 model çalkalayıcıda gerçekleştirilmiştir. Belirli zaman aralıklarında alınan numuneler 47 mm gözenek çapına sahip Whatman 0,45 µm filtre kağıdından süzölmüş ve boya konsantrasyonları 513 nm dalga boyunda UV-GB spektrofotometresi (Shimadzu 1240) kullanılarak tayin edilmiştir. Deneysel veriler, kalibrasyon grafiği yardımıyla adsorplanan boya miktarları ve çözeltiden giderilen boya yüzdesi aşağıdaki Denklem (1-2) ile hesaplanmıştır (Chen et al. 2021).

$$q_e = \frac{V(C_0 - C_e)}{m} \quad (1)$$

$q_e$  = Bir gram adsorban tarafından adsorplanan boya miktarı (mg/g)

$C_0$  = Boya çözeltinin başlangıç konsantrasyonu (mg/L)

$C_e$  = Boya çözeltisinin denge konsantrasyonu (mg/L)

$V$  = Boya çözeltisinin hacmi (L)

$m$  = Adsorban miktarı (g)

$$\text{Boya giderim yüzdesi (\%)} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} * 100 \quad (2)$$

$C_0$  = Boya çözeltinin başlangıç konsantrasyonu (mg/L)

$C_e$  = Boya çözeltisinin denge konsantrasyonu (mg/L)

Deneysel olarak elde edilen veriler değerlendirilerek denge izotermi ve kinetik parametreler belirlenmiştir.

### 2.4. Adsorpsiyon izotermi

Adsorpsiyon izotermi, adsorban üzerine adsorplanan madde miktarı ile çözeltide adsorplanmadan kalan madde arasındaki denge durumunu ifade etmek için kullanılır (Çelik Okumuş ve Doğan 2019). Bu çalışmada Langmuir, Freundlich ve Temkin izotermi kullanılmıştır. Langmuir izoterm modeli adsorpsiyonun homojen bir yüzeyde tek

tabaka halinde gerçekleştiğini varsayar (Denklem 3). Bu izotermde bütün aktif noktaların adsorplanacak moleküllere karşı aynı enerji ve eşit afiniteye sahip olduklarını kabul eder.

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{max}K_L} + \frac{C_e}{q_{max}} \quad (3)$$

Burada,  $q_e$ , dengedeki adsorpsiyon kapasitesi (mg/g),  $C_e$ , adsorplanan maddenin denge konsantrasyonu (mg/L),  $K_L$ , Langmuir adsorpsiyon sabiti (L/mg),  $q_{max}$ , tek tabaka maksimum adsorpsiyon kapasitesidir (mg/g) (Langmuir 1918); Freundlich izoterm modeli heterojen yüzeylerde adsorpsiyon prosesinin çok tabakalı olduğunu varsayar (Denklem 4).

$$\log q_e = \log K_F + n \log C_e \quad (4)$$

Burada  $q_e$ , dengedeki adsorpsiyon kapasitesi (mg/g),  $C_e$ , adsorplanan maddenin denge konsantrasyonu (mg/L),  $K_F$ , Freundlich sabiti (mg/g)/(L/mg)<sup>1/n</sup> ve  $n$ , Freundlich adsorpsiyon izotermine ait sabit parametre olup adsorpsiyon yoğunluğunun veya yüzeyin heterojen karakteri hakkında bilgi vermektedir (Freundlich, 1906, Tran et al. 2017 ); Temkin izoterm modeli Denklem 5-6'da verilmiştir (Temkin and Pyzhev, 1940).

$$q_e = B_T \ln K_T + B_T \ln C_e \quad (5)$$

$$B_T = \frac{RT}{b} \quad (6)$$

Burada  $B_T$ , adsorpsiyon ısı ile ilişkili Temkin izoterm sabiti (J/mol),  $T$ , ortamın sıcaklığı (Kelvin),  $R$ , ideal gaz sabiti (8,314 J/mol K),  $K_T$ , Temkin izoterm sabitidir (L/mg).

### 2.5 Adsorpsiyon kinetiği

Adsorpsiyon mekanizmasının ve adsorpsiyon hızının kontrol adımlarını araştırmak için adsorpsiyon kinetik modellerinin belirlenmesi önemlidir. Bu amaçla bu çalışmada yalancı birinci dereceden kinetik modeli, yalancı ikinci dereceden kinetik modeli kullanılmıştır (Denklem 7-8) (Lagergren 1898, Sh. Gohr et al. 2022).

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (7)$$

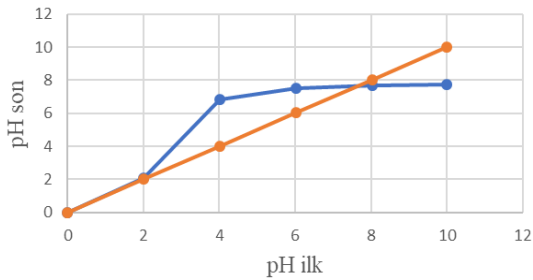
$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (8)$$

Burada,  $q_e$  (mg/g) denge olduğunda adsorpsiyon kapasitesini,  $q_t$  (mg/g) ise herhangi bir  $t$  süresindeki adsorpsiyon kapasitesini gösterir.  $k_1$  (1/dk),  $k_2$  (g/mg dk) ve  $t$  (dk) ise sırasıyla yalancı birinci dereceden hız sabiti ve yalancı ikinci derece hız sabiti ve süredir.

### 3. Bulgular

#### 3.1 KT'nin İzoelektrik noktasının belirlenmesi ve çözelti pH'sının etkisi

Adsorpsiyon prosesini etkileyen en önemli faktörlerden biri çözeltinin pH'ıdır. pH, adsorbanın hem yüzey yükünü, çözeltide bulunan maddenin iyonlaşma derecesini ve adsorbanın aktif bölgelerindeki fonksiyonel grupların ayrışmasını etkiler (Yönten et al. 2020). pH'ın adsorpsiyon üzerindeki etkisini anlayabilmek için adsorpsiyonu gerçekleştiren elektriksel yük yoğunluğunun sıfır olduğu pH noktasının (pHpzc) anlaşılması önemlidir (Kaykıoğlu 2016). Bu amaçla, pH drift yöntemi kullanılarak KT için pHpzc bulunmuştur. Yöntemde 0,1 M NaCl, 0,05 g KT 100 mg/L konsantrasyonlu AR çözeltisine eklenmiş ve numunelerin pH'ları 2-10 aralığında ayarlanarak 24 saat 150 rpm karıştırılmıştır. Daha sonra numunelerin son pH değerleri ölçülmüştür. İlk pH ve son pH arasındaki fark hesaplanmıştır. Elde edilen fark, ilk pH değerine karşı grafiğe geçilmiş ve eğrinin yatay eksenine pHpzc değeri 7,6 olarak bulunmuştur (Şekil 2). Çözeltinin pH değeri pHpzc'den düşük olduğunda adsorban yüzeyi pozitif yüklenirken büyük olduğunda ise negatif yüklenir (Kaykıoğlu 2016).



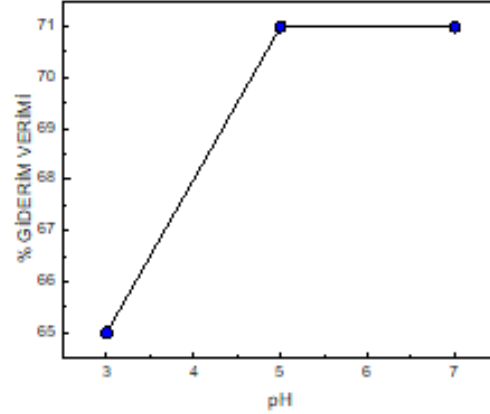
Şekil 2. KT'nin pH drift yöntemi ile izoelektrik nokta tayini.

Ancak, AR katyonik bir boya olması nedeniyle yüksek pH değerlerinde çalışılması adsorpsiyon verimini yükselteceği öngörülmesine rağmen adsorpsiyon prosesi öncesinde AR boyasının adsorban eklenmeden pH değişimine karşı direncinin incelendiği ön çalışmalarda, yüksek pH'larda (pH 9-11) bozulmaya uğrayarak dibe çöktüğü ve orijinal rengini kaybettiği görülmüştür. Bu nedenle sonuçların güvenilirliğini tehlikeye atmamak için adsorpsiyon çalışmaları pH 3-7 aralığında çalışılmıştır (Şekil 3). Elde edilen veriler incelendiğinde optimum pH değerinin çözeltinin kendi pH değeri olan pH 5'te olduğu görülmüştür.

#### 3.2 Adsorban miktarının etkisi

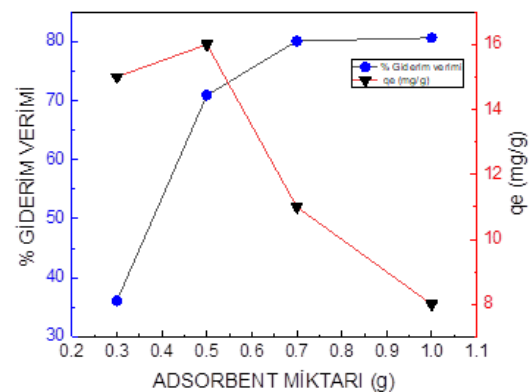
Adsorban dozunun incelenmesi adsorban etkinliği ve absorplama yeteneği hakkında bize önemli bilgiler vermektedir. Ayrıca adsorban israfının önlenmesi ve böylece prosesin ekonomik olarak işletilebilmesi için de

gerekli bir çalışmadır (Salleh et al. 2011). Optimum adsorban miktarının belirlenebilmesi için 100 mg/L başlangıç konsantrasyonunda, pH5'te, 150 rpm karıştırma hızında, 1 saatlik adsorpsiyon çalışmalarında değişen oranlarda (0,3-1 g KT/100 ml) adsorban miktarı kullanılmıştır.



Şekil 3. AR gideriminde pH'nın etkisi, sıcaklık: 25 °C, başlangıç konsantrasyonu: 100 mg/L AR, karıştırma hızı: 150 rpm, temas süresi: 1 sa.

DeneySEL çalışmalarda kullanılan adsorban miktarı 0,3 g/100 ml'den 0,5 g/100 ml'ye çıktığında adsorpsiyon verimi %36'dan %71'e yükselmiştir. Verimdeki bu artışı artan yüzey miktarı ve adsorpsiyon bölgesi ile açıklayabiliriz (Garg et al. 2003). Adsorban miktarının 0,5 g/100ml'den 0,7-1 g/100ml düzeyine çıkarılması durumunda ise adsorpsiyon verimi %80 değerinde kalmasına rağmen qe değeri 16 mg/g'dan 11 mg/g'a düşmüştür (Şekil 4). Adsorbanın maksimum kapasitesinin kullanılması ve hammadde (KT) kullanımını minimize etmek için 0,5 g/100 ml adsorban miktarı optimum değer olarak kabul edilmiş ve çalışmaya bu miktar ile devam edilmiştir.

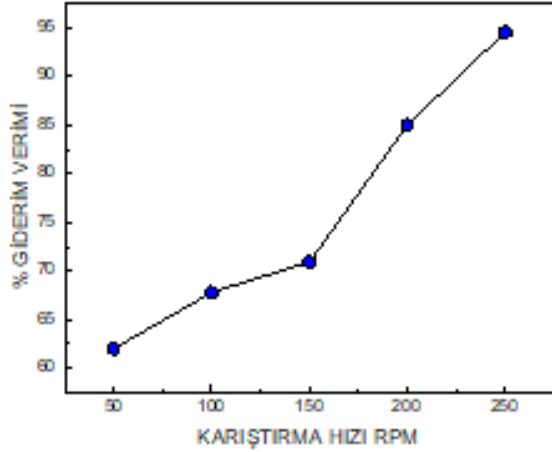


Şekil 4. AR gideriminde KT miktarının etkisi, pH: 5, sıcaklık: 25 °C, başlangıç konsantrasyonu: 100 mg/L AR, karıştırma hızı: 150 rpm, temas süresi: 1 sa.

#### 3.3 Karıştırma hızının etkisi

Adsorban ve boya molekülleri arasındaki etkileşimin artması için deney ortamının karıştırılması gerekmektedir.

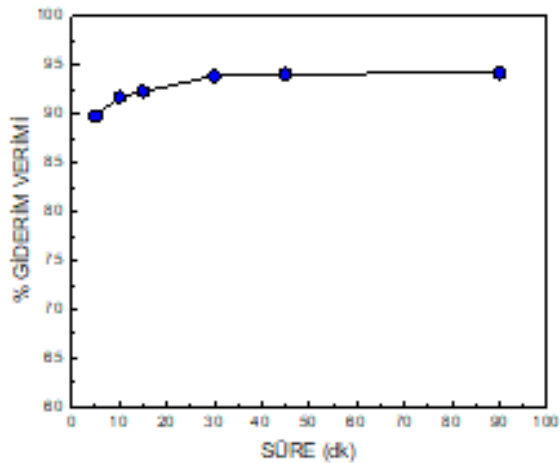
Karıştırma hızı adsorpsiyon verimi ve maksimum adsorplama kapasitesi için önemli bir parametredir. Uygun karıştırma hızının etkisi (50-250 rpm), 100 mg/L AR konsantrasyonunda, pH 5'te, 0,5g KT/100 ml adsorban miktarında, 1 saat temas süresi sonunda belirlenmiştir (Şekil 5). 250 rpm karıştırma hızında %94,5 boya giderimi gözlenmiştir ve sonraki çalışmalarda optimum karıştırma hızı 250 rpm olarak kullanılmıştır.



Şekil 5. AR gideriminde karıştırma hızının etkisi. Sıcaklık: 25 °C, pH: 5, başlangıç konsantrasyonu: 100 mg/L AR, adsorban miktarı: 0,5 g KT, temas süresi: 1 sa.

### 3.4 Temas süresinin etkisi

Adsorpsiyon prosesinde optimum temas süresinin belirlenmesi, zaman ve işletme maliyetinin tasarrufu için önemli bir kriterdir. Adsorpsiyon verimi temas süresine bağlı olarak değişebilmektedir (Solangi et al. 2021). Belirlenen optimum koşullarda, 5-90 dakika aralıklarında çalışılarak temas süresinin boya giderimi verimi üzerindeki etkinliği belirlenmiştir. Deneyin başlangıcında daha fazla kullanılabilir adsorban yüzeylerinin varlığı nedeniyle ilk 5 dakika temas süresi sonunda adsorpsiyon veriminde hızlı bir artış gözlenerek %89,8 verime ulaşılmıştır (Şekil 6).

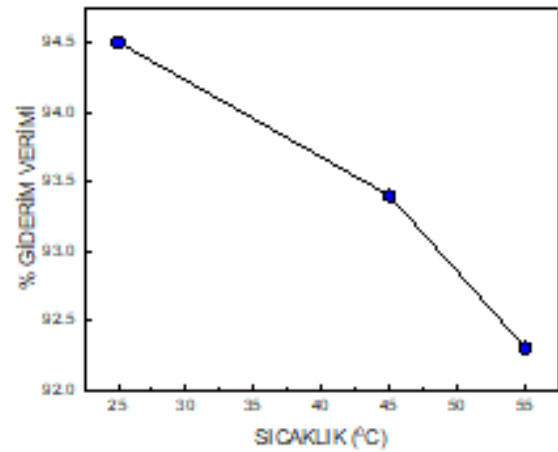


Şekil 6. AR gideriminde temas süresinin etkisi. Sıcaklık: 25 °C, pH: 5, başlangıç konsantrasyonu: 100 mg/L AR, karıştırma hızı: 250 rpm, adsorban miktarı: 0,5 g KT

Temas süresi arttıkça adsorbe olan boya miktarı artarak 30 dakika sonunda optimum değere ulaşılmıştır. 30-90 dakika temas süreleri sonunda boya gideriminde belirgin bir artış gözlenmemiştir. Adsorpsiyon verimi açısından değerlendirildiğinde her ne kadar reaksiyon 30 dakikada maksimum verime ulaşmış olsa da 15. dakikadan sonra anlamlı bir artış olmadığından optimum süre 15 dakika olarak seçilmiştir.

### 3.5 Sıcaklığın Etkisi

Sıcaklık değişiklikleri, çözeltinin viskozitesini değiştirmesinin yanı sıra, adsorbanın dış sınır tabakası ve iç gözenek yapısı üzerinde boyanın difüzyon hızını kontrol edebilen önemli bir parametredir (Felista et al. 2020). Sıcaklığın AR giderim verimliliği üzerindeki etkisi 25-55 °C sıcaklık aralıklarında çalışılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 7'te verilmiştir.



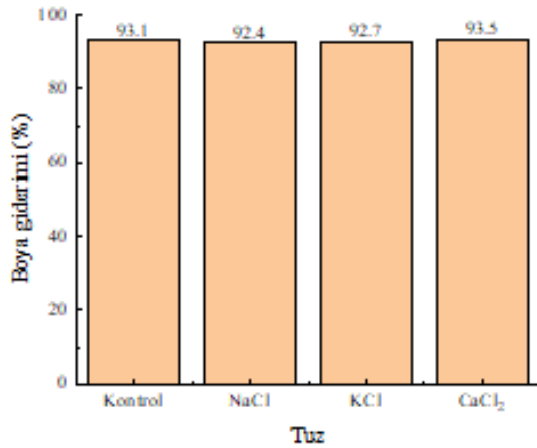
Şekil 7. AR gideriminde sıcaklığın etkisi. Başlangıç konsantrasyonu: 100 mg/L AR, pH 5'te, karıştırma hızı: 250 rpm, adsorban miktarı: 0,5 g KT, temas süresi: 15 dk

Sonuçlara bakıldığında 25 °C'de %94,5 boya giderimi sağlanmıştır. Deneysel çalışmalarda sıcaklığın artışı ile AR'nin adsorpsiyon verimi azalmıştır. 55°C'de boya giderimi %92 olarak elde edilmiştir. AR'nin KT'e üzerine adsorpsiyonun artan sıcaklıkla beraber artması entalpi değişiminin negatif olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durumda KT yüzeyindeki adsorpsiyon olayının ekzotermik bir reaksiyon olduğu söylenebilir. Artan sıcaklıkla adsorplanan moleküllerin desorbe olma eğiliminin artması; adsorbanın yüzeyindeki aktif alanların küçülmesi ve değişimi, boya moleküllerinin hareketinin artması, aktif yüzey alanının azalması gibi birçok faktörden kaynaklanabilir (Chowdhury et al. 2011).

### 3.6 KT adsorpsiyonu ile AR boyasının giderim prosesinde tuz varlığının etkisi

Tekstil endüstrisi atıksuları organik ve inorganik karakterde birçok kirleniciyi bir arada içerebilmektedir. Bu kirleniciler arasında var olan inorganik tuzlar adsorpsiyon

verimi üzerinde etki yaratma potansiyeli taşımaktadır (Cebeci ve Şentürk 2020, Kaykıoğlu 2016). KT üzerine AR boyasının adsorpsiyonuna yabancı iyon etkisinin araştırılabilmesi amacı ile bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde 100 mg/L konsantrasyona sahip AR çözeltilerine, NaCl, KCl ve CaCl<sub>2</sub> tuzları 0,1M tuz içerecek şekilde ilave edilmiştir. İdeal koşul olarak belirlenen şartlarda (0,5 g adsorban, 25°C sıcaklık, 15 dk temas süresi ve 250 rpm karıştırma hızı) gerçekleştirilen adsorpsiyon deneylerinden elde edilen boya giderim verimleri Şekil 8’te verilmiştir. Şekil 8’den görüldüğü üzere çözeltilere ilave edilen tuzların varlığı genel olarak AR boyasının adsorpsiyonuna anlamlı bir etki yapmadığı görülmüştür. Bu durum, tuzlar ile adsorbanın yüzeyi arasında veya tuzlar ile boya arasında herhangi bir etkileşimin olmadığı sonucunu doğurmaktadır (Banat et al. 2003). Bu sonuçlar KT’nin farklı tuzları da içermeye ihtimali olan tekstil endüstrisi atıksularından AR boyasını başarı ile adsorplama kabiliyetine sahip bir adsorban olduğunu göstermektedir.

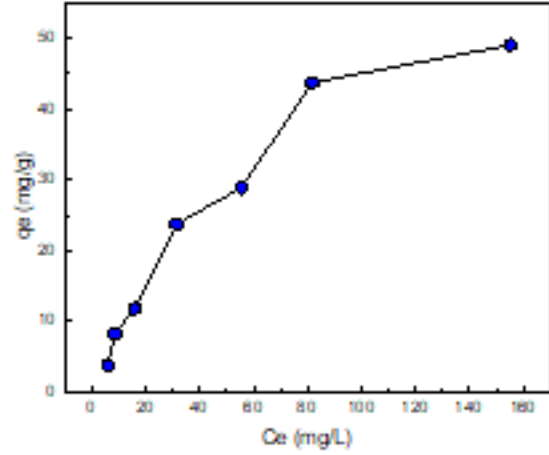


Şekil 8. Farklı tuzların varlığında adsorpsiyon verimi (0,1 M NaCl, KCl, CaCl<sub>2</sub>)

### 3.7 Adsorpsiyon izotermeleri

Adsorpsiyon prosesi üzerinde başlangıç boya konsantrasyonunun etkisini gözlemleyebilmek için AR’dan 25-400 mg/L başlangıç konsantrasyonlarında örnekler hazırlanarak daha önce belirlenen optimum şartlarda çalışmış ve boya konsantrasyonları ölçülmüştür. Artan başlangıç boya konsantrasyonu ile KT üzerinde tutulan boya miktarı artmıştır. Başlangıç AR konsantrasyonu 25

mg/L’den 400 mg/L’ye yükseldiğinde adsorpsiyon kapasitesi 3,92 mg/g’dan 49,1 mg/g’a yükselmiştir (Şekil 9). Giderim verimi ise %80,24’e yükselmiştir.



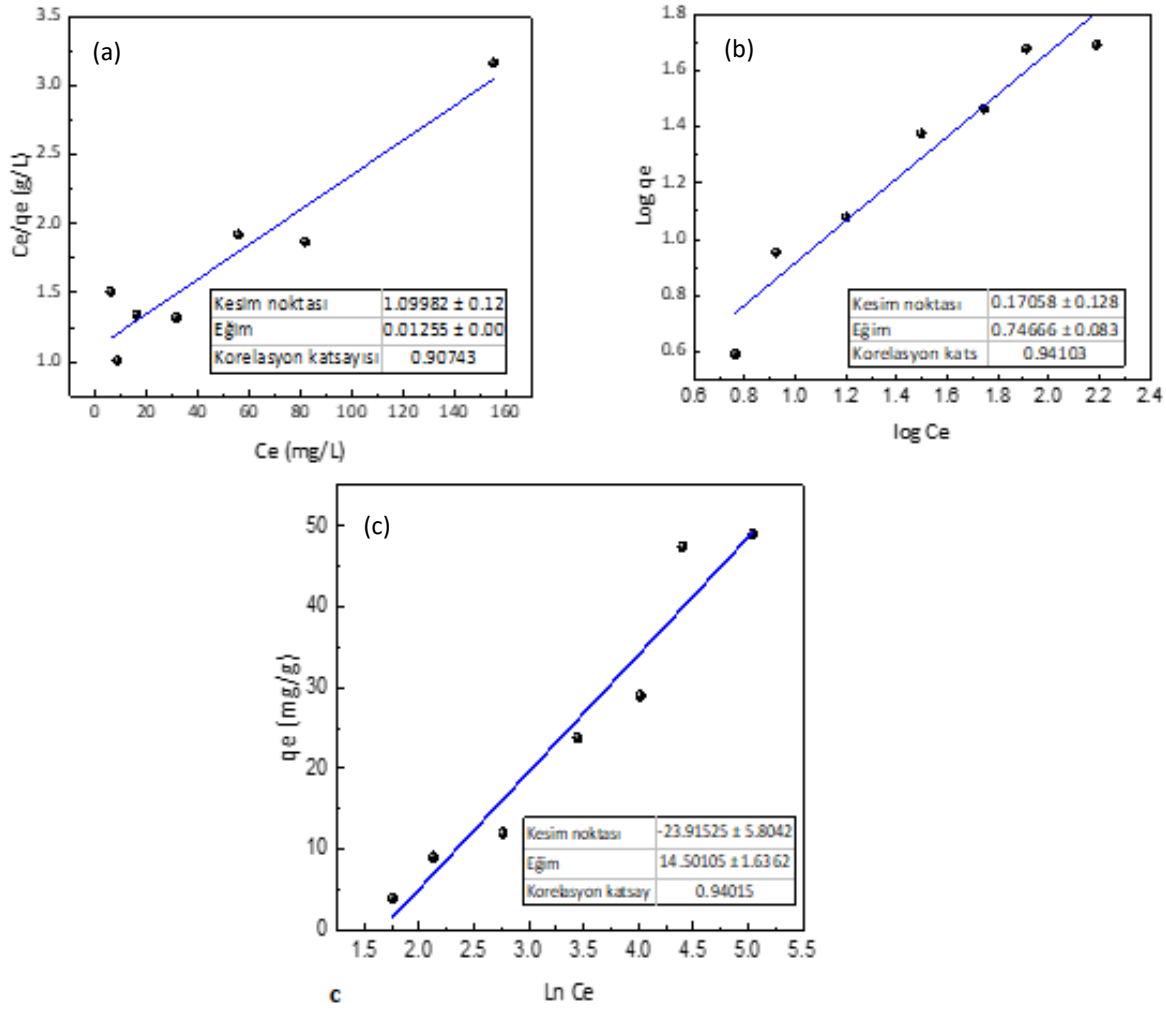
Şekil 9. AR’nin KT üzerine adsorpsiyonunda Ce-qe grafiği (Sıcaklık: 25°C, karıştırma hızı=250 rpm)

Ayrıca adsorpsiyon izotermelerinin ortaya konması adsorban ve adsorbat molekülleri arasındaki ilişkinin ifade edilebilmesi için önemlidir. Bu amaçla çalışmamızdan elde edilen deneysel sonuçlara Langmuir, Freundlich ve Temkin izotermeleri uygulanmış ve bu izoterm modellerinden elde edilen katsayılar ve sabitler Çizelge 1’de, AR boyasının KT adsorbanına adsorpsiyonuna ait izoterm grafikleri Şekil 10’da verilmiştir. Uygulanan modeller birbiri ile kıyaslandığında Langmuir izotermine R<sup>2</sup> değerlerinin diğer izoterm modellerinden küçük olması nedeniyle adsorpsiyon prosesinin Freundlich ve Temkin izotermine uyduğu ve en yüksek korelasyon katsayılarına sahip olduğu (R<sup>2</sup>=0,941-0,940) görülmüştür. Bu çalışmada 1/n değeri 0,7467 olarak bulunmuştur. Buradan yola çıkarak adsorpsiyon elverişli olduğu ve adsorbatın adsorbe olabileceği çok sayıda aktif bölgenin mevcut olduğu sonucuna varılır. Freundlich izotermine 1/n değeri ayrıca adsorbatın, adsorbana olan afinitesinin bir göstergesidir (Han et al. 2023). 1/n değerinin 1’den küçük olması adsorpsiyon prosesinin kimyasal bağlanma yolu ile gerçekleştiğini, 1’den büyük olması ise fiziksel kuvvetlerin etkisi ile gerçekleştiğini ifade etmektedir. 1/n değeri 0’a yaklaştıkça adsorban yüzeyinin heterojenitesi artma eğilimindedir (Mustapha ve Bawa-Allah 2020).

Çizelge 1. İzoterm modellerinden elde edilen katsayılar ve sabitler.

Langmuir	Freundlich	Temkin
q <sub>e</sub> (mg/g)	49	1/n
q <sub>maks</sub> (mg/g)	79,68	K <sub>F</sub> ((mg/g)(L/mg) <sup>1/n</sup> )
K <sub>L</sub> (L/mg)	0,01141	-
R <sup>2</sup>	0,907	R <sup>2</sup>
		B <sub>T</sub> (J/mol)
		14,50
		K <sub>T</sub> ( L/mg )
		0,19
		-
		-
		R <sup>2</sup>
		0,940





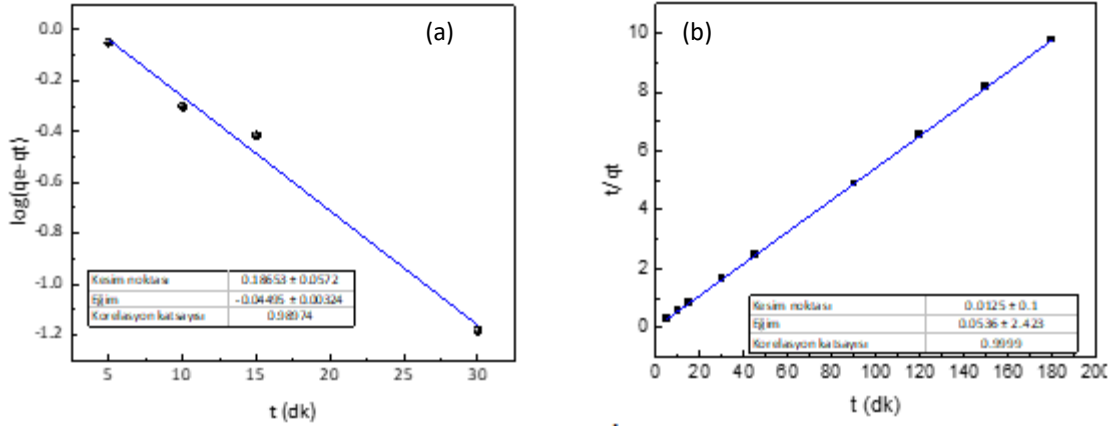
Şekil 10. AR boyasının KT'ye adsorpsiyonuna ait izoterm grafikleri

Çalışmada  $1/n$  değeri 0,7467 olması prosesin kimyasal olarak gerçekleşme eğiliminde olduğunu göstermektedir. Ayrıca adsorban yüzeyi 0 noktasına uzaktır. Temkin izotermi sonuçları yorumlanırken adsorpsiyon ısısını temsil eden  $B_T$  (J/mol) değerinden faydalanılır. Bu değer 20 J/mol'ün altında kaldığı adsorpsiyon prosesleri fiziksel adsorpsiyon, üzerinde olduğu prosesler kimyasal adsorpsiyon olarak kabul edilir. Tablodan  $B_T$ 'nin bu çalışma için 14,50 J/mol olarak elde edildiği görülmektedir. Bu nedenle adsorpsiyon prosesi fiziksel hem de kimyasal proses olarak değerlendirilebilir. Ayrıca maksimum bağlanma enerjisi sabiti ( $K_T$ ) 0,19 L/mg olarak bulunmuştur. Tüm bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde bu çalışmada kullanılan adsorban ile boya arasındaki adsorpsiyon prosesinin çoklu mekanizmalar tarafından kontrol edildiği sonucuna varılır.

### 3.8 Adsorpsiyon Kinetiği

Adsorpsiyonun dengeye gelme noktası boyanın adsorban üzerine tutunmasının sona erdiği ve artık başka bir boya molekülünün adsorban ile etkileşime girmediği noktadır. Yapılan çalışmalardan AR boyasının KT'ye adsorpsiyonunun %80'inin çok hızlı olarak ilk beş dakikada

gerçekleştiği ardından boya giderim veriminin çok yavaş bir şekilde 30. dakikaya kadar artarak devam ettiği görülmektedir (Hassan et al. 2020). 30. dakikadan sonra ise anlamlı bir artış izlenmemiştir. Adsorpsiyon kinetiği çalışmaları adsorpsiyonun mekanizması hakkında fikir verir ve kirletici maddelerin uzaklaştırılmasının kontrol edilmesinde sorpsiyon prosesinin hızı önemlidir (Dalle et al.2018). Çalışmada kullanılan boyanın, KT adsorbanına adsorpsiyon kinetiğinin ortaya konması amacı ile deneysel verilere 1. ve 2. dereceden yalancı kinetik modelleri uygulanmıştır. Bu modellerden elde edilen eğriler Şekil 11'da, model parametreleri ise Tablo 2'de verilmiştir. Bu tablodan görüldüğü üzere elde edilen yalancı 1. ve 2. Derece modellerin her ikisi için de korelasyon katsayısı oldukça yüksektir ve sırasıyla  $R^2$  değeri 0,989 ve 0,999 olarak elde edilmiştir. Ancak bu modellerden elde edilen  $q_e$  değerleri birbiri ile karşılaştırıldığında yalancı ikinci derece modelden elde edilen sonucun ( $q_e=18,38$ ) deneysel  $q_e$  (18,40) ye daha yakın olduğu görülmektedir. Bu sebeple AR boyasının KT'ye adsorpsiyonunun yalancı ikinci derece kinetik model ile uyumlu olduğu saptanmıştır.



Şekil 11. Kinetik grafikleri: a. Yalancı 1. derece, b. Yalancı 2. derece kinetik modeli

**Çizelge 2.** Kinetik model katsayıları

Kinetik model	R <sup>2</sup>	k <sub>1</sub> (dk <sup>-1</sup> )	k <sub>2</sub> (mg g <sup>-1</sup> dk <sup>-1</sup> )	q <sub>e</sub> hesaplanan mg/g	q <sub>e</sub> deneysel mg/g
Yalancı 1. derece kinetik model	0,989	0,103405	-	1,536385	18,40
Yalancı 2. derece kinetik model	0,999	-	0,15996	18,38235	18,40

**3.9 Desorpsiyon ve Yeniden Kullanım**

Adsorpsiyon prosesinin işletme maliyeti açısından kullanılan adsorbanın verimliliği kadar yeniden kullanılabilirliği de önemlidir (Cebeci ve Şentürk 2020). Bu amaçla belirlenen miktarda KT, pH ayarlaması yapılmaksızın, 100 mg/L AR içerecek şekilde 15 dakika temas süresinde 250 rpm 'de karıştırılarak adsorpsiyona tabi tutulmuştur. Rejenerasyon amacıyla deneyden elde edilen kullanılmış adsorban filtre kağıdı ile süzülüp sabit tartıma gelinceye kadar 80 °C'de kurutulmuştur. Rejenerasyon amacıyla, kurutulmuş 0,5 g adsorban, 100 ml 0,1 M HCl çözeltisi ile muamele edilmiştir. Rejenerasyon edilen adsorban, filtre edilerek ayrılmış ve kurutulmuştur. Daha sonra tekrar boya çözeltisi ile adsorpsiyona tabi tutularak verimi araştırılmıştır. Rejenerasyon çalışmalarına devam edilerek bu işlem 3 döngü olacak şekilde tekrarlanmıştır. Bu sonuçlara göre 1., 2. ve 3. rejenerasyondan sonra adsorbanın giderim verimi sırasıyla %96, %93, %89 olarak yüksek değerlerde kalmaya devam etmiştir. Bu çalışma sonuçlarına göre KT rejenerasyon ile yeniden kullanılabilirliği yüksek bir adsorban olarak değerlendirilmiştir.

**4. Sonuçlar**

Astrazon Red 5BL'nin ham kabak sapı tozu üzerine olan adsorpsiyonunda, farklı işletme şartları olan; pH (3-7), adsorban miktarı (0,3-1 g/100 ml), karıştırma hızı (50-250 rpm), temas süresi (5-90 dk) ve sıcaklık (25-55 °C) parametrelerinin giderim verimi üzerine etkileri incelenmiştir. Bu çalışmalar sonucunda optimum çalışma koşulları pH 5, KT dozajı 0,5 g/100 ml, karıştırma hızı 250 rpm, temas süresi 15 dakika ve sıcaklık 25 °C olarak belirlenmiştir. Ayrıca atıksuda bulunan NaCl, KCl, CaCl<sub>2</sub>

gibi tuzların adsorpsiyon verimi üzerinde gerçekleştirme ihtimali olan etkisi araştırılmış ve bu tuzların varlığının KT'nin adsorpsiyon başarısı üzerinde anlamlı bir etkisi olmadığı görülmüştür. Deneysel sonuçlara farklı izoterm ve kinetik modelleri uygulanarak adsorpsiyon mekanizması hakkında bilgi edinilmeye çalışılmıştır. Elde edilen veriler ışığında KT'nin AR boyası üzerine adsorpsiyonunun Freundlich ve Temkin izotermine (R<sup>2</sup>=0,941-0,940) ve kinetik çalışmaların sonuçlarına göre ise yalancı ikinci derece kinetik modele (R<sup>2</sup>=0,999) yüksek korelasyon ile uyduğu görülmüştür. Yapılan rejenerasyon çalışması sonuçlarına göre KT çok kez kullanılabilen ve boya giderim kapasitesini koruyan bir adsorbandır. Tüm bulgular birlikte değerlendirildiğinde kabak sapı tozunun renkli atıksuların arıtımında yüksek giderim verimine sahip, çevre dostu, düşük maliyetli bir adsorban olduğu sonucuna varılmıştır. Bu avantajlarıyla kabak sapı tozu, boya endüstrisi atıksuları için yüksek bir kullanım potansiyeline sahiptir.

**Etik Standartlar Bildirgesi**

Yazar tüm etik standartlara uyduğunu beyan eder.

**Yazarlık Katkı Beyanı**

Yazar: Araştırma, Fikir Sahibi, Deney tasarımı, Proje Yöneticisi, Görselleştirme, Yazma –orijinal taslak

**Çıkar Çatışması Beyanı**

Yazarın bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edeceği hiçbir çıkar çatışması yoktur.

**Verilerin Kullanılabilirliği**

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir

## 5. Kaynaklar

- Amar, I. A., Zayid, E. A., Dhikeel, S. A. and Najem, M. Y., 2022. Biosorption removal of methylene blue dye from aqueous solutions using phosphoric acid-treated balanites aegyptiaca seed husks powder. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, **12(6)**, 7845–7862. <https://doi.org/10.33263/BRIAC126.78457862>
- Aravindhana, S., Bharath Kumar, G., Saravanan, M. and Arumugam, A., 2024. Delonix regia biomass as an eco-friendly biosorbent for effective Alizarin Red S textile dye removal: Characterization, kinetics, and isotherm studies. *Bioresource Technology Reports*, **25**, 101721. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101721>
- Banat, F., Al-Asheh, S. and Al-Makhadmeh, L., 2003. Evaluation of the use of raw and activated date pits as potential adsorbents for dye containing waters. *Process Biochemistry*, **39(2)**, 193–202. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(03\)00065-7](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(03)00065-7)
- Bansal, S., Pandey, P. K. and Upadhyay, S., 2021. Methylene Blue Dye Removal from Wastewater Using Ailanthus Excelsa Roxb as Adsorbent. *Water Conservation Science and Engineering*, **6(1)**, 1–9. <https://doi.org/10.1007/s41101-020-00097-3>
- Cebeci, M. S. ve Şentürk, İ., 2020. Tarımsal Atık Materyal Kullanılarak Sucul Çözümlerden Chrysoïdine Y Boyasının Giderimi. *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, **4(1)**, 18-28.
- Chen, M., Wang, X. and Zhang, H., 2021. Comparative research on selective adsorption of Pb(II) by biosorbents prepared by two kinds of modifying waste biomass: Highly-efficient performance, application and mechanism. *Journal of Environmental Management*, **288**, 112388. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112388>
- Chowdhury, S., Mishra, R., Saha, P. and Kushwaha, P., 2011. Adsorption thermodynamics, kinetics and isosteric heat of adsorption of malachite green onto chemically modified rice husk. *Desalination*, **265(1-3)**, 159–168. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.07.047>
- Çelik Okumuş, Z. ve Doğan, T. H., 2019. Biyodizeldeki suyun reçine ile uzaklaştırılması: Adsorpsiyon izotermi, kinetiği ve termodinamik incelemesi. *European Journal of Science and Technology*, **15**, 561–570. <https://doi.org/10.31590/ejosat.535977>
- Dallel, R., Kesraoui, A. and Seffen, M., 2018. Biosorption of cationic dye onto »phragmites australis» fibers: Characterization and mechanism. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **6(6)**, 7247–7256. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.10.024>
- Felista, M. M., Wanyonyi, W. C. and Ongera, G., 2020. Adsorption of anionic dye (Reactive black 5) using macadamia seed Husks: Kinetics and equilibrium studies. *Scientific African*, **7**, e00283. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00283>
- Freundlich H.M.F., 1906. Over the adsorption in solution, *The Journal of Physical Chemistry*, **57**, 385-470.
- Garg, V. K., Gupta, R., Yadav, A. B. and Kumar, R., 2003. Dye removal from aqueous solution by adsorption on treated sawdust. *Bioresource Technology*, **8(2)**, 121–124. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00058-0](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00058-0)
- Gören, M., Murathan, H. B., Kaya, N. ve Murathan, A. M., 2023. Çam kozalağından üretilmiş modifiye aktif karbon ile sulu çözeltiden Rodamin B boyasının adsorpsiyonu. *Politeknik Dergisi*, **26(1)**, 283–292. <https://doi.org/10.2339/politeknik.989900>
- Güneş, E. and Atav, R., 2017. The use of nutshell firstly as a natural dye for cotton and wool and then as a natural adsorbent for colour removal of basic dye effluent. *Coloration Technology*, **133(1)**, 88–93. <https://doi.org/10.1111/cote.12255>
- Han, Z., Sun, L., Chu, Y., Wang, J., Wei, C., Jiang, Q., Han, C., Yan, H. and Song, X., 2023. States of graphene oxide and surface functional groups amid adsorption of dyes and heavy metal ions. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **63**, 197–208. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2023.05.005>
- Hassan, W., Noreen, S., Mustaqeem, M., Saleh, T. A. and Zafar, S., 2020. Efficient adsorbent derived from Haloxylon recurvum plant for the adsorption of acid brown dye: Kinetics, isotherm and thermodynamic optimization. *Surfaces and Interfaces*, **20**. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100510>
- Homagai, P. L., Poudel, R., Poudel, S. and Bhattarai, A., 2022. Adsorption and removal of crystal violet dye from aqueous solution by modified rice husk. *Heliyon*, **8(4)**, e09261. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09261>
- Kamel, M. M., Helmy, H. M., Mashaly, H. M. and Kafafy, H. H., 2010. Ultrasonic assisted dyeing: Dyeing of acrylic fabrics C.I. Astrazon Basic Red 5BL 200%. *Ultrasonics Sonochemistry*, **17(1)**, 92–97. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2009.06.001>
- Kavci, E., Erkmen, J. and Bingöl, M. S., 2023. Removal of methylene blue dye from aqueous solution using citric acid modified apricot stone. *Chemical Engineering Communications*, **210(2)**, 165–180. <https://doi.org/10.1080/00986445.2021.2009812>
- Kaykioğlu, G., 2016. Kolemanit ve üleksit atığı ile sulu çözümlerden metilen mavisi giderimi: Kinetik ve izoterm Değerlendirmesi. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, **12(3)**, 499–509.

- Kıraşan, M., 2021. An investigation on the removal of anionic and cationic dyes in wastewater by using sonophotocatalytic oxidation processes, *Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences*, **8(19)**, 43–54.  
<https://doi.org/10.38065/euroasiaorg.908>
- Lagergren, S., 1898. About the theory of so-called adsorption of soluble substances. *K. Sven. Vetensk. Handl.*, **24 (4)**, 1-39.
- Langmuir, I. 1918. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society*, **40**, 1361-1403.
- Lim, L. B. L., Priyantha, N., Tennakoon, D. T. B., Chieng, H. I., Dahri, M. K. and Suklueng, M., 2017. Breadnut peel as a highly effective low-cost biosorbent for methylene blue: Equilibrium, thermodynamic and kinetic studies. *Arabian Journal of Chemistry*, **10**, S3216–S3228.  
<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.12.018>
- Liu, Y., Zhu, W., Guan, K., Peng, C. and Wu, J., 2018. Freeze-casting of alumina ultra-filtration membranes with good performance for anionic dye separation. *Ceramics International*, **44(10)**, 11901–11904.  
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.03.160>
- Marin, N. M., Pascu, L. F., Demba, A., Nita-Lazar, M., Badea, I. A. and Aboul-Enein, H. Y., 2019. Removal of the Acid Orange 10 by ion exchange and microbiological methods. *International Journal of Environmental Science and Technology*, **16(10)**, 6357–6366.  
<https://doi.org/10.1007/s13762-018-2164-2>
- Mousa, K. M. ve Taha, A. H., 2015. Adsorption of reactive blue dye onto natural and modified wheat straw. *Journal of Chemical Engineering & Process Technology*, **06**.  
<https://doi.org/10.4172/2157-7048.1000260>
- Mustapha, D. S., Bawa-Allah, K. A., 2020. Differential toxicities of anionic and nonionic surfactants in fish. *Environmental Science and Pollution Research*, **27(14)**, 16754–16762.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-020-08212-6>
- Riccobono, G., Pastorella, G., Vicari, F., D'Angelo, A., Galia, A., Quatrini, P. and Scialdone, O., 2017. Abatement of AO7 in a divided microbial fuel cells by sequential cathodic and anodic treatment powered by different microorganisms. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **799**, 293–298.  
<https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.06.003>
- Salleh, M. A. M., Mahmoud, D. K., Karim, W. A. W. A. and Idris, A., 2011. Cationic and anionic dye adsorption by agricultural solid wastes: A comprehensive review. *Desalination*, **280(1–3)**, 1–13.  
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.07.019>
- Santos, D. H. S., Duarte, J. L. S., Tavares, M. G. R., Tavares, M. G., Friedrich, L. C., Meili, L., Pimentel, W. R. O., Tonholo, J. and Zanta, C. L. P. S., 2020. Electrochemical degradation and toxicity evaluation of reactive dyes mixture and real textile effluent over DSA® electrodes. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, **153**, 107940.  
<https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.107940>
- Sh. Gohr, M., Abd-Elhamid, A. I., El-Shanshory, A. A. and Soliman, H. M. A., 2022. Adsorption of cationic dyes onto chemically modified activated carbon: Kinetics and thermodynamic study. *Journal of Molecular Liquids*, **346**, 118227.  
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.118227>
- Solangi, N. H., Kumar, J., Mazari, S. A., Ahmed, S., Fatima, N. and Mubarak, N. M., 2021. Development of fruit waste derived bio-adsorbents for wastewater treatment: A review. *Journal of Hazardous Materials*, **416**, 125848.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125848>
- Takabi, A. S., Shirani, M. and Semnani, A., 2021. Apple stem as a high performance cellulose based biosorbent for low cost and eco-friendly adsorption of crystal violet from aqueous solutions using experimental design: Mechanism, kinetic and thermodynamics. *Environmental Technology and Innovation*, **24**, 101947.  
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101947>
- Tanyıldızı, M. Ş. ve Uygut, M. A., 2016. Çam kozalağıyla bazik mavi 3 Adsorpsiyonu. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **28(2)**, 169–174.
- Temkin, M., Pyzhev, V., 1940. Recent modifications to langmuir isotherms. *Acta Physico-Chimica Sinica*, **12**, 217–222.
- Tran, H. N., You, S. J., Hosseini-Bandegharaei, A. and Chao, H. P. 2017. Mistakes and inconsistencies regarding adsorption of contaminants from aqueous solutions: a critical review. *Water Research*, **120**, 88-116.
- Tseng, R. L., Tseng, S. K., Wu, F. C. 2006. Preparation of high surface area carbons from Corn cob with KOH etching plus CO<sub>2</sub> gasification for the adsorption of dyes and phenols from water. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **279(1–3)**, 69–78.  
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.12.042>
- Wang, J., Sun, C., Huang, Q., Chi, Y. and Yan, J., 2021. Adsorption and thermal degradation of microplastics from aqueous solutions by Mg / Zn modified magnetic biochars. *Journal of Hazardous Materials*, **419**, 126486.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126486>
- Xu, L., Pan, C., Li, S., Yin, C., Zhu, J., Pan, Y. and Feng, Q., 2021. Electrostatic Self-Assembly Synthesis of Three-

Dimensional Mesoporous Lepidocrocite-Type Layered Sodium Titanate as a Superior Adsorbent for Selective Removal of Cationic Dyes via an Ion-Exchange Mechanism. *Langmuir*, **37(19)**, 6080–6095.

<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.1c00913>

Yönten, V., Sanyürek, N. K. and Kivanç, M. R., 2020. A thermodynamic and kinetic approach to adsorption of methyl orange from aqueous solution using a low cost activated carbon prepared from *Vitis vinifera* L. *Surfaces and Interfaces*, **20**, 1–8.

<https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100529>

Zafar, A. M., Naeem, A., Minhas, M. A., Hasan, M. J., Rafique, S. and Ikhlâq, A., 2024. Removal of reactive dyes from textile industrial effluent using electrocoagulation in different parametric conditions of aluminum electrodes. *Total Environment Advances*, **9**, 200087.

<https://doi.org/10.1016/j.teadva.2023.200087>



## 30 Ekim 2020 Mw:6.9 Sisam Depremi Sonrası İzmir ve Çevresinde Postsismik Deformasyonların İzlenmesi

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 05.04.2024

Kabul/Accepted: 20.08.2024

Yayımlandı/Published:02.12.2024

### Monitoring Postseismic Deformations in Izmir and Its Surroundings After the 30 October 2020 Mw:6.9 Samos Earthquake

Halil İbrahim SOLAK<sup>1,2\*</sup>, İbrahim TIRYAKIOĞLU<sup>2,3</sup>, Sefa YALVAÇ<sup>4</sup>, Cemal Özer YİĞİT<sup>5</sup>, Bahadır AKTUĞ<sup>6</sup>, Haluk ÖZENER<sup>7</sup>, Ergin DÖNMEZ<sup>8</sup>, Ertuğrul DEMİRELLİ<sup>3</sup>, Eda Esmâ EYÜBAGİL<sup>3</sup>, Ece Bengünaz ÇAKANŞİMŞEK<sup>3</sup>, Cemil GEZGİN<sup>9</sup>, Furkan ŞAHİNER<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, Uzaktan Eğitim Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye

<sup>2</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, Deprem Uygulama ve Araştırma Merkezi, Afyonkarahisar, Türkiye

<sup>3</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye

<sup>4</sup> Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane, Türkiye

<sup>5</sup> Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye

<sup>6</sup> Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

<sup>7</sup> Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

<sup>8</sup> Pamukkale Üniversitesi, Çivril Atasay Kamer Meslek Yüksekokulu, Emlak Yönetimi Bölümü, Denizli, Türkiye

<sup>9</sup> Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Aksaray, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

30 Ekim 2020 tarihinde Sisam adası kuzeyinde Mw:6.9 büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiştir. Bu deprem İzmir şehir merkezinde ve bazı ilçelerinde can ve mal kayıplarına yol açmıştır. Deprem sonrası İzmir ve güneyinde yapılan çalışmalar, en büyüğü Seferihisar'da olmak üzere İzmir ve güneyinde 4-14 cm arasında değişen miktarlarda yatay atım meydana geldiğini göstermiştir. İzmir ve güneyinde ise Mw:6.1-6.9 arasında depreme kaynaklık edebilecek diri faylar yer almaktadır. Meydana gelen bir depremin civardaki fayların neden olabileceği depremleri etkileyebilmesi nedeniyle bu bölgede postsismik deformasyonun takip edilmesi amacıyla 27 noktalık bir GNSS ağı kurulmuştur. Bu ağda 2020-2022 arasında 6 aylık periyotlar halinde 4 kampanya GNSS ölçümü gerçekleştirilmiştir. GNSS verileri kullanılarak tüm noktaların Avrasya sabit hızları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ağdaki noktaların hem deprem sonrasında kendi aralarındaki hem de deprem öncesi hızlarla aralarındaki farkların 6 mm'ye ulaştığını, buna bağlı olarak bölgede postsismik etkinin devam ettiğini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Sisam Depremi; GNSS; Postsismik Deformasyon; Tektonik

#### Abstract

A devastating (Mw: 6.9) earthquake occurred in the north of Samos island on October 30, 2020. This earthquake caused loss of life and property in Izmir city center and some districts. After the earthquake, studies conducted in Izmir and its south showed that there was a horizontal displacement of 4-14 cm in Izmir and its south, the largest of which was in Seferihisar. In this region, there are many active faults with the potential to produce earthquakes between Mw:6.1 and Mw:6.9. A 27-site GNSS network has been established to monitor the postseismic deformation in this region since an earthquake can affect the earthquakes that may be caused by other surrounding faults. 4 GNSS campaign measurements were conducted over 6-month periods between 2020 and 2022 in this network. Eurasian fixed velocities of all sites were obtained using GNSS data. The results obtained show that the differences between both the current velocities and the pre-earthquake velocities in the network have reached 6 mm, and accordingly, the postseismic deformation continues in the region.

**Keywords:** Samos Earthquake; GNSS; Postseismic Deformation; Tectonic

#### 1. Giriş

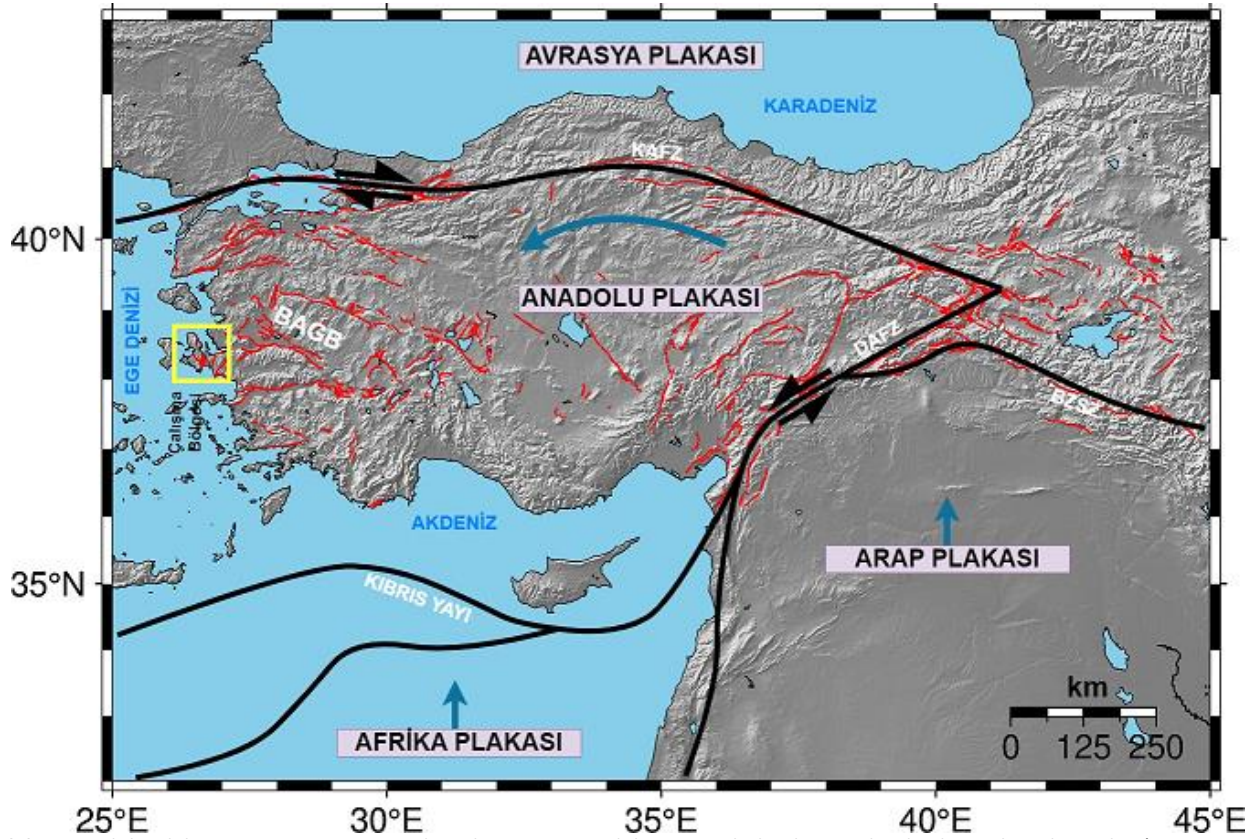
Anadolu Plakası, Afrika ve Arap Levhalarının Avrasya Levhasına dönük hareketlerinin bir sonucu olarak saat yönünün tersi yönünde hareket etmekte ve "Helen Yayı" boyunca Afrika Plakasına doğru kıvrılmaktadır. Bu durum bu bölgede bir dalma-batma zonu meydana getirerek Anadolu Plakasının batısında (Batı Anadolu Genişleme Bölgesi (BAGB)) sırasıyla düşük açılı ve yüksek açılı normal faylarla sınırlanan üst sıyrılma ve rift havzalarının oluşumuna neden olmuştur (Dewey and Şengör 1979,

Şengör et. al. 1985, Seyitoğlu and Scott 1991, Emre and Sözbilir 1997, Koçyiğit et. al. 1999, Sözbilir 2001, Lips et al. 2001, Bozkurt 2001, 2003, Bozkurt and Sözbilir 2004, Özkaymak and Sözbilir 2008, Özkaymak et. al. 2013, Tepe et. al. 2021). Batı Anadolu'nun tektonik aktivitesi, Arap ve Avrasya levhalarının çarpışmasıyla Anadolu levhasında ortaya çıkan jeodinamik süreçlerle karakterize edilir. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından 2011 yılında yayımlanan diri fay haritası BAGB'de yıkıcı deprem üretebilecek çok sayıda aktif fay



olduğunu göstermektedir (Emre et al. 2018, Şekil 1). Bu özelliği ile BAGB hem tarihsel hem de aletsel dönemdeki deprem aktivitesinden dolayı çeşitli disiplinlerden birçok araştırmacının çalışmasına konu olmuştur (McKenzie 1972, McKenzie 1978, Dewey and Şengör 1979, Le Pichon and Angelier 1979, Şengör 1980, Şengör and Şaroğlu 1985, Seyitoğlu and Scott, 1991, Taymaz et. al. 1991, Reilinger et. al. 1997, McClusky et. al. 2000, Bozkurt 2001, Pavlides and Caputo 2004, Caputo and Helly 2005, Çırmık et. al. 2017, Eyübagil vd. 2021, Aktuğ et. al. 2021, Öncü et. al. 2024, Özarpacı 2024).

Anadolu levhasının sağ yanal Kuzey Anadolu (KAFZ) ve sol yanal Doğu Anadolu (DAFZ) fay zonları boyunca batıya kaçışı, batı Yunanistan'da meydana gelen kıtasal kalınlaşma tarafından engellenmesiyle Batı Anadolu'da hem aletsel hem de tarihsel dönem boyunca çok sayıda deprem meydana gelmiştir (Şekil 4). Bu çalışma kapsamında İzmir-Karaburun-Menderes üçgeninde yer alan bölgenin depremselliği ve 30 Ekim 2020 Mw:6.9 Sisam depremi sonrası postsismik dönemdeki hareketleri incelenmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Anadolu Plakası ve çevresinin neotektonik yapı içerisindeki yeri ve bölgede yer alan başlıca tektonik yapıları (KAFZ: Kuzey Anadolu Fay Zonu, DAFZ: Doğu Anadolu Fay Zonu, BZSZ: Bitlis Zagros Sütür Zonu, BAGB: Batı Anadolu Genişleme Bölgesi, Sarı çerçeveli alan: Çalışma Bölgesi, Kırmızı çizgiler: Diri faylar) (Özkaymak et. al. 2015'ten derlenmiştir.)

## 2. Çalışma Bölgesinin Jeolojik Yapısı ve Depremselliği

### 2.1 Jeolojik Yapı

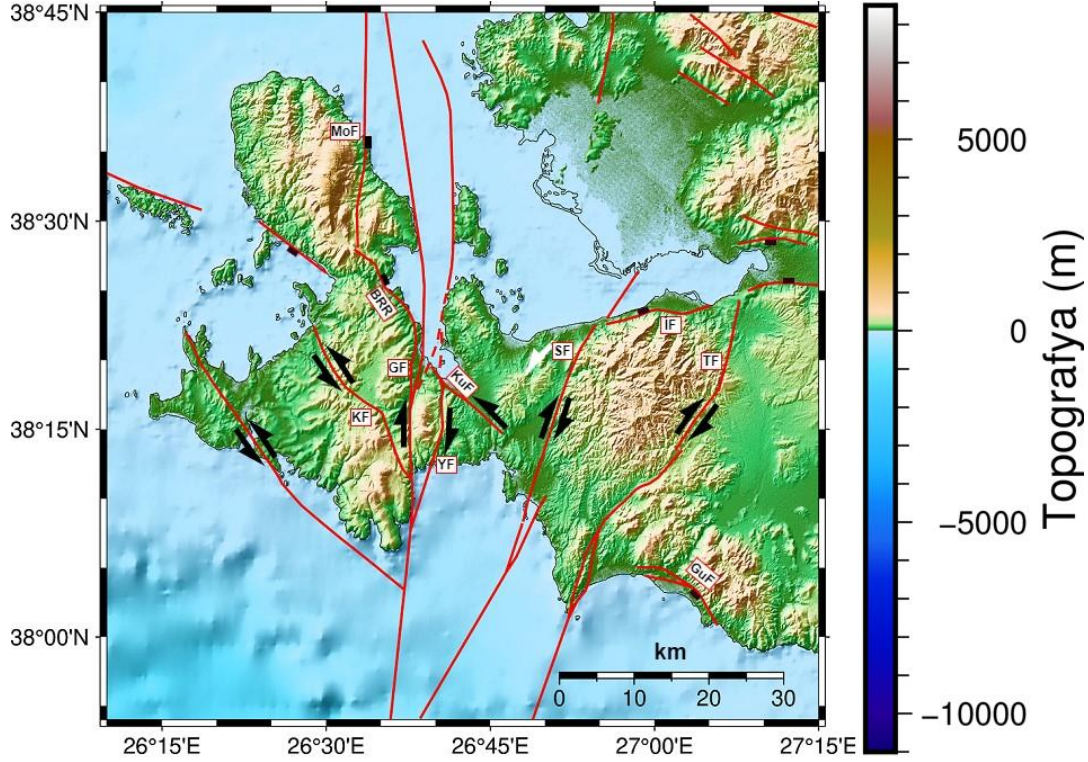
İzmir bölgesi yoğun sismik aktivite ile karakterizedir. İzmir ve yakın çevresinde uzunlukları 12 ile 70 km arasında değişen faylar K-G, KD-GB, KB-GD ve D-B doğrultulu olup bunların önemli çoğunluğu Emre vd. (2011, 2018)'e göre aktif (diri) fay olarak tanımlanmaktadır (Şekil 2, Çizelge 1). Bunlardan İzmir Fayı pür eğim atımlı kinematığe sahipken diğerleri doğrultu atımlı veya eğim atımlı normal faylardır. (Emre vd., 2005, 2018). Odak mekanizma çözümleri doğrultu atımlı fay niteliğinde olan 6 Kasım 1992 Doğanbey (Mw=6.0), 10 Nisan 2003 Seferihisar (Mw=5.7) ve 17-21 Ekim 2005 Sığacık (Mw=5.7, Mw=5.7 ve Mw=5.2) depremleri bölgedeki bazı fayların günümüzde diri

olduğunu göstermektedir (Sözbilir vd. 2005). Bölgede gerçekleştirilen jeolojik ve sismolojik çalışmalar bölgenin doğrultu atımlı ve eğim/oblik atımlı normal faylanma olmak üzere iki tip aktif fay sistemi ile deforme edildiğini göstermektedir (Çizelge 1). Bu iki tip faylanma mekanizmasının ilki tipik olarak KD-GB uzanımlı sağ yönlü ve KB-GD uzanımlı sol yönlü doğrultu atımlı faylar, diğeri ise genel olarak D-B uzanımlı eğim/oblik atımlı normal faylardır. Bu aktif yapılar beraber çalışırlar ve hem tarihsel hem de aletsel dönemde bölgede meydana gelen birçok büyük depreme kaynaklık etmişlerdir (Taymaz et. al. 1991, Emre vd. 2005, Akyol et. al. 2006, Zhu et. al. 2006, Aktar et. al. 2007, Tan et. al. 2008, Sözbilir vd. 2008, 2009, Özkaymak et. al. 2011, Uzel et. al. 2012, Tepe et. al. 2021).



Fayların ortaya çıkarabileceği depremlerin maksimum büyüklüklerinin tahmin edilebilmesi için literatürde büyüklük, yırtılma uzunluğu, yırtılma genişliği, kırılma alanı ve yüzey yer değiştirme arasındaki ampirik ilişkilere dayanan bağıntılar yer almaktadır. Büyüklük tahmini için en sık kullanılan ise yırtılma uzunluğudur (yüzey kırığı) (Wells and Coppersmith 1994). Emre et. al. (2018), İzmir ve güneyince yer alan fayların kaynaklık edebilecekleri

maksimum deprem büyüklüklerini Wells and Coppersmith (1994) tarafından tanımlanan modeli (maksimum büyüklük ve yüzey kırığı uzunluğu arasındaki ilişki) kullanarak hesaplamıştır (Çizelge 1). Buna göre bölgede çalışma bölgesinde bulunan faylar Mw:6.1-6.9 arasında değişen büyüklüklerde depremlere kaynaklık etme potansiyeline sahiptir.



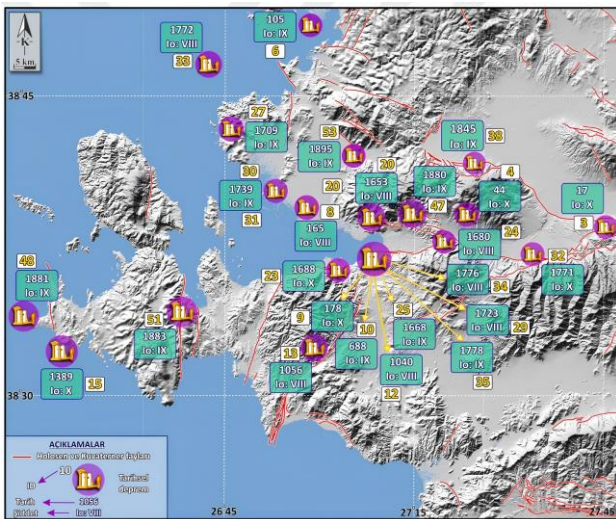
Şekil 2. Çalışma bölgesinde yer alan diri faylar (İF: İzmir Fayı, SF: Seferihisar Fayı, KuF: Kuşçular Fayı, YF: Yağcılar Fayı, GF: Gülbahçe Fayı, KF: Kenelidağ Fayı, AF: Alaçatı Fayı, MoF: Mordoğan (Karaburun) Fayı) (Bozkurt 2001, Ocakoğlu vd. 2005, Emre vd. 2011)

Çizelge 1. Çalışma bölgesinde bulunan faylar ve meydana getirebilecekleri depremlere ait maksimum büyüklükler (Duman vd. 2017, Emre et. al. 2018,)

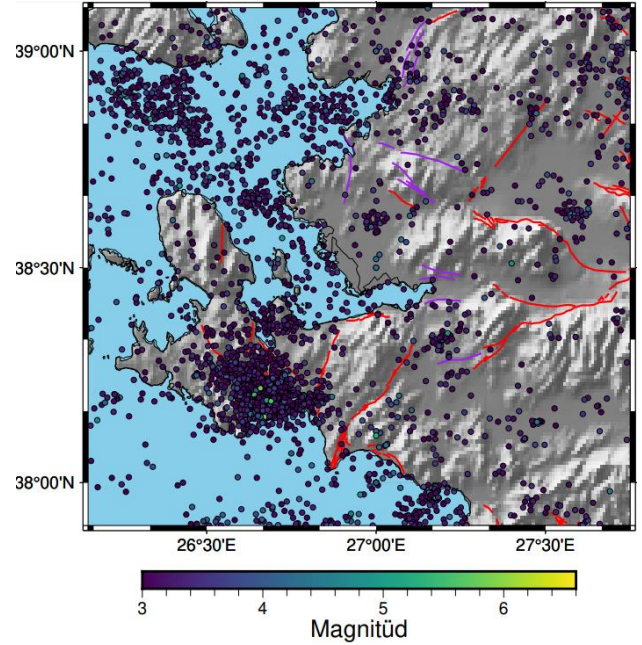
Fay/Segment	Fay Adı		Fay uzunluğu (km)	Eğim Açısı (°)		Max. Deprem Büyüklüğü
	Türü	Yaş		Min.	Max.	
Yenifoça F.	Normal	K	14	87	90	6.4
	Normal	K	15	87	90	6.4
Mordoğan F.	Normal	K		65	70	6.3
	Sağ Yanal	H	21	87	90	6.6
Gülbahçe F.Z.	Sağ Yanal	H	24	87	90	6.7
	Sağ Yanal	H	24	87	90	6.7
Yağcılar F.	Sağ Yanal	YK	12	87	90	6.4
Seferihisar F.	Sağ Yanal	H	25	87	90	6.7
Güzelhisar F.	Sağ Yanal	K	24	0	90	6.7
Menemen F.Z.	Normal	H	11	65	70	6.2
	Normal	H	19	65	70	6.6
İzmir F.	Normal	H	19	65	70	6.6
	Normal	H	19	65	70	6.6
Tuzla F.	Sağ Yanal	H	24	87	90	6.7
	Sağ Yanal	H	16	87	90	6.5
Gümüldür F.	Normal	H	14	55	65	6.4
Dağkızılca F.	Sağ Yanal	H	27	87	90	6.8

## 2.2 Depremsellik

M.Ö. 3. binyılda İzmir Körfezi'nin kuzeydoğusunda Bayraklı-Tepekule bölgesinde kurulan İzmir kent yerleşimi (antik adı Smyrna), İzmir iç körfezinin güneyinde yer alan ovaya taşınmıştır (Baykara 1974, Akurgal, 1997; Döğe 2006). Bu alan aynı zamanda İzmir Fayı'nın da geçtiği yerdir ve morfolojik olarak öne çıkmaktadır. Tarihi kayıtlar, Batı Anadolu'nun en güçlü depremlerinden biri olan M.S.17 depreminin birçok şehirle birlikte İzmir'de etkilediğini gösterse de doğrudan İzmir şehrine atfedilen ilk kayıt, İmparator Claudius döneminde gerçekleşmiştir (M.S. 41-54) (Cadoux 1938; Döğe 2006). Bu olaydan sonraki kayıt, İzmir tarihinin en büyük sismik afetlerinden biri olarak bilinen M.S. 178 depremdir (Bonito, 1691; von Hoff 1840, Mallet and Mallet 1858, Schmidt 1881; Cadoux 1938, Calvi 1941, Lahn and Pınar 1952, Guidoboni et. al. 1994, Ambraseys and Finkel 1995, Papazachos and Papazachou 1989; Ambraseys 2009). 6. yüzyılda İzmir'de yıkıma neden olan bir depreme ait arkeolojik buluntuların varlığından bahseden bazı kaynaklar vardır (M.S. 551) (Döğe 2006, Ersoy et. al. 2012). Ancak bahsi geçen depremlerle ilgili net bir kayıt bulunmamakla birlikte, kayıtlara göre 7. yüzyıldan 11. yüzyıla kadar İzmir ve çevresinde sismik bir faaliyet yaşanmamıştır. Sonraki her yüzyılda en az bir yıkıcı deprem kaydı vardır. Kayıtlara göre 10 Temmuz 1688 depremi İzmir'de büyük yıkıma neden olan bir diğer güçlü depremdir. Tarihi kayıtlar, MS 688, 1025, 1040, 1056, 1654, 1668, 1680, 1739, 1778 ve 1880 yıllarında meydana gelen depremlerin özellikle İzmir şehrini etkilediğini göstermektedir (Şekil 3, Çizelge 2). Bu depremlerin sismik kaynaklarının, İzmir kent yerleşiminin içinden veya yakınından geçen İzmir Fayı, Tuzla Fayı, Seferihisar Fayı, Gülbahçe Fayı ve Yağcılar Fayı gibi başlıca aktif yapılar olması muhtemeldir (Tepe et. al. 2021).



Şekil 3. İzmir ve yakın çevresinde meydana gelen yıkıcı tarihsel depremleri (Io ≥ VIII) gösteren harita (Tepe et. al. 2022)



Şekil 4. İzmir ve yakın çevresinde meydana gelen M≥3 aletsel dönem depremleri (int. Kyn. 1)

Çizelge 2. Çalışma bölgesinde yer alan Urla ve çevresinde tarihsel dönem boyunca I ≥ 6 olan depremler (Geçkin 2021)

Zaman	Enlem/ Boylam	Yer	Şiddet
M.Ö. 494	38.40°N/26.20°E	Sakız Adası	VII
M.Ö. 496	38.36°N / 26.13°E		
178	38.60°N / 26.65°E	İzmir ve Ege Adaları	X
190	38.66°-26.75°	Foça	IV
688	38.40°-26.75°	Foça	VI
1040	38.40°-27.18°	İzmir ve Çeşme	IX
20 Mart 1389	38.16°N/26.31°E	Sakız Adası Gülbahçe Fay Zonu	VIII-IX
1396	38.37°N / 26.13°E	Sakız Adası	VII
1700	38.67°N / 26.76°E	Foça	VI
3 Temmuz 1709		Foça	X
1738	..... / 26.30°E	Sakız Adası	VI
24 Kasım 1772	_38.80°N/26.10°E	Foça	VIII
11 Kasım 1865	38.37°N / 26.13°E	Sakız Adası	VI
11 Ekim 1865	_37.77N/2697E	Sisam Adası	VIII
31 Ağustos 1875	38.78°N / 26.70°E	Sisam Adası	VIII
01 Kasım 1875	38 59x / 26.40°E	Karaburun, Mordoğan	VIII
05 Kasım 1875	38.56°N/26.57°E	Karaburun	VIII
3 Nisan 1881	38.25°N /		
15 Ekim 1883	38.30°N / 26.43°E	Çeşme Yarımadası	IX-X
Şubat 1884	38.40°N / 27.00°E	Urla, İzmir	VII
Ocak 1887	38.00°N/ 28.00°E	Urla, İzmir	VIII
Haziran 1893	38.31°N/26.30°E	İzmir ve Çeşme	VIII

AFAD (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı) Deprem Kataloğuna göre aletsel dönemde İzmir ve yakın çevresinde 18 binden fazla deprem meydana gelmiştir (int. Kyn. 1.). Bunlardan 1400'den fazlası M≥3'tür. 6 Kasım 1992 Doğanbey (Mw:6.0), 10 Nisan 2003 Seferihisar (Mw:5.7) ve 17-21 Ekim 2005 Sığacık (Mw:5.7, Mw:5.7 ve Mw:5.2) ve 30

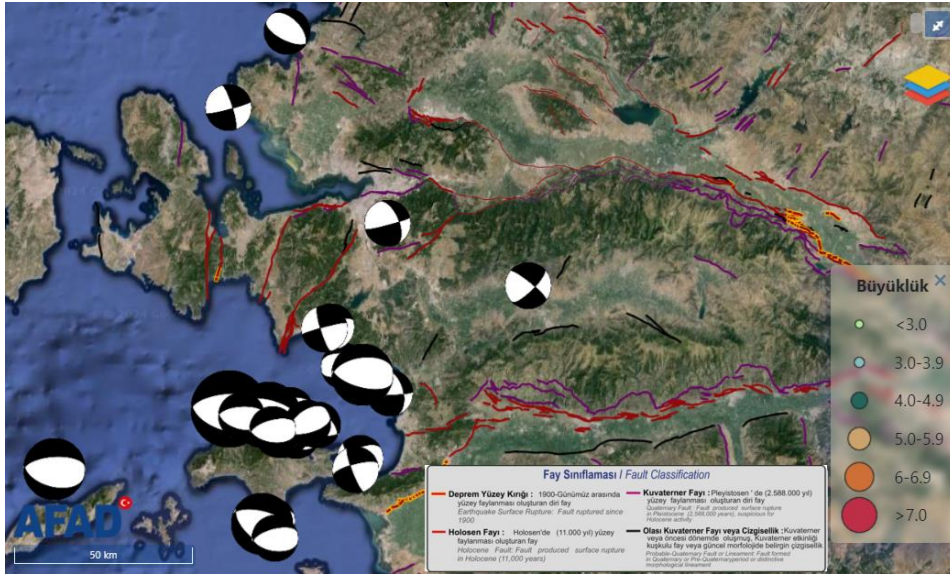


Ekim 2020 Mw:6.6 Sisam depremi (KRDAE'ye göre (Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü) Mw: 6.9) yıkıcı etkiye sahip olmuştur (İnt. Kyn. 2.).

### 3. 30 Ekim 2020 Mw:6.9 Sisam Depremi

İzmir ve çevresini etkileyen, can ve mal kaybına neden olan son büyük deprem 30 Ekim 2020 tarihinde Sisam adası kuzeyinde (Mw:6.9) meydana gelmiştir (Şekil 5). Bu depreme neden olan fay 30 km uzunluğunda yaklaşık DB uzanımlı ve normal fay yapısına sahiptir. Bu deprem Sisam adasının birkaç km kuzeyinde olmasına rağmen deprem merkez üssüne ~75 km uzaklıktaki İzmir'de daha çok hasar meydana gelmiştir (Papadimitriou et. al. 2020, İnt. Kyn. 3). Bu depremin büyüklüğü KRDAE'ye göre (Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü) Mw: 6.9, derinlik:10 km, GFZ'ye (GeoForschungs Zentrum, Helmholtz-Zentrum Postdam Deutsches) göre Mw: 7.0, derinlik:15 km, AFAD'a göre Mw: 6.6 derinlik:16 km ve OCA'ya (GéoAzur, Université de Nice Sophia-Antipolis, Valbonne, France) göre ise Mw: 7.2 derinlik:10 km'dir (İnt. Kyn. 4, İnt. Kyn. 5). Deprem merkez üssü İzmir iline bağlı

Seferihisar-Teos, Bornova ve Bayraklı ilçeleri sırasıyla yaklaşık 40 km, 65 km ve 70 km uzaklıktadır. Ana şokun ardından büyüklükleri 1.0 ile 5.3 arasında değişen 3000'e yakın artçı deprem kaydedilmiştir (İnt. Kyn.6, İnt. Kyn.7). Meydana gelen ana şok ve artçı deprem verilerine göre, fayın kırıldığı yer tektonik açıdan önemli olan, ~30 km uzunluğundaki yaklaşık D-B uzanımlı normal fay karakterli Kuzey Samos Fayı üzerinde yoğunlaşmış ve oluşan diğer artçı depremler ise Karlovassi Fayı ve Tuzla Fayının deniz içerisindeki uzanımlarının birleşim noktalarına yakın yerde meydana gelmiştir. Deprem sonrasında ise Bornova ve Bayraklı ilçelerinde yer alan metruk yapılarda tamamen çökme, ağır-orta-hafif hasar olarak yapısal hasarların oluştuğu, 115 insanın hayatını kaybettiği ve 1035 insanın yaralandığı belirtilmiştir (DEÜ DUAM 2020). Deprem ardından bölgede gerçekleştirilen jeodezik ve jeofiziksel çalışmalar bölgede biriken gerininin doğuya ve kuzeydoğuya aktarıldığını ortaya koymuştur (İnt. Kyn. 8, Aktuğ et. al. 2021). 30 Ekim Samos depremi sonrasında depremin etkilerinin belirlenmesi amacıyla çeşitli bilim insanları tarafından çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar aşağıda özetlenerek verilmiştir.



Şekil 5. 30 Ekim 2020 Mw:6.9 Sisam depremi ve sonrasında meydana gelen depremlere ait odak çözümleri ( Boylam: 25.9763-29.0564, Enlem: 37.4547,38.9099) (Sarı-Kırmızı Çizgi: Deprem Yüzey Kırığı, Kırmızı çizgi: Holosen Fayı, Mor Çizgi: Kuvaterner Fayı, Siyah Çizgi: Olası Kuvaterner Fayı veya Çizgisellik) (İnt. Kyn. 6)

Papadimitriou et. al. (2020) tarafından yürütülen çalışmada Samos adasının batısındaki yükselme ve çökmelere dikkat çekilerek depremin kuzeye eğimli normal Samos Fayı üzerinde meydana geldiği ifade edilmektedir. Ana şoktan sonra büyük artçıların belirlenen merkez üssünün doğusunda, küçüklerin ise batısında yoğunlaşmasından yola çıkarak fayın D-B yönünde kırıldığını ve Coulomb stres transfer analizi ile enerjisinin büyük bir bölümünün doğuya aktarıldığını, depremin büyüklüğünün ise M:6.9 olduğu belirtilmiştir.

30 Ekim 2020 Sisam depremi sonrası İzmir ve yakın çevresinde meydana gelen kosmik deformasyonların belirlenmesi amacıyla Aktuğ et. al. (2021) tarafından yürütülen çalışmada İzmir ve çevresini kapsayan ve 62 GNSS noktasından oluşan bir GNSS ağı oluşturulmuştur. Bu ağda yer alan noktalara ait GNSS verilerinden hesaplanan kosmik yer değiştirmelere göre Sisam adasında yatayda ~37 cm'lik atım meydana gelmiştir. Dağıtılmış kayma (distributed slip) modeline göre ise neredeyse tüm kaymanın 12.5 km'lik bir derinlikle sınırlı



2020, Eyübagil 2020, Kavak 2020, Aktuğ et. al. 2021). Bu ağ bölgeyi temsil eden en yoğun ağ olup postsismik deformasyonun geniş bir alanda takip edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu noktalar yoğunluklu olarak ölçü hatalarından kaçınarak konum doğruluğunu arttırmaya yarayan pilye tipi tesise sahip olmakla birlikte kosismik deformasyonların en büyük değerlere ulaştığı İzmir'in Karaburun, Seferihisar, Urla ve Menderes ilçeleri arasında yer alan fayları temsil edecek yoğunluk ve dağılıma sahiptir (Şekil 6). Bu ağda yer alan noktalarda Sisam depremi sonrası kosismik deformasyonu belirlemek için gerçekleştirilmiş 1 kampanya kosismik GNSS ölçüsü de bulunmaktadır (Aktuğ et. al. 2021).

GNSS ağında toplam 27 nokta yer almaktadır (Şekil 6). Bu noktalardan üçü sabit istasyon (CES1, MNTS, IZMI), 24'ü ise kampanya tipi olup 4'ü TUTGA ağına ait noktalardır. Ağda yer alan noktalardan 26'sı deprem öncesi dönemde çalışma ekibindeki araştırmacılar tarafından takip edilen

noktalardan oluşmakta olup bu noktaların 19'unun deprem öncesine ait hızları ve GNSS verileri bulunmaktadır (Solak 2020, Eyübagil 2020, Kavak 2020, Aktuğ et. al. 2021, Solak et. al. 2024).

30 Ekim 2020 Mw:6.9 Sisam depremi sonrası postsismik deformasyonun takip edilmesi için 2021 yılı Mayıs-Haziran (2021\_1) aylarında 12, 2021 yılı Aralık (2021\_2) ayında ise 15 noktada GNSS ölçümleri gerçekleştirilmiştir. 2022 yılı Nisan (2022\_1) ve Eylül (2022\_2) aylarında ise TÜBİTAK 121Y259 numaralı proje kapsamında ağda yer alan tüm kampanya tipi noktalarda GNSS ölçümleri gerçekleştirilmiştir (Çizelge 3). Bu ölçümler pilye tipi tesise sahip noktalarda 1 gün min. 8 saat, kayada bronz tipi tesise sahip noktalarda ise 2 gün tekrarlı günlük min. 8 saat şeklinde gerçekleştirilmiştir. Ağda yer alan sabit istasyonlara ait veriler ise Tapu Kadastro Genel Müdürlüğü ve Harita Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiştir (İnt. Kyn. 10)

**Çizelge 3:** Post-sismik deformasyon izleme ağında yer alan noktalara ait ölçü bilgileri

Nokta	Kosismik	ÖLÇÜ BİLGİLERİ			
		2021_1	2021_2	2022_1	2022_2
AHMB	+	+	+	+	+
ASKE	+			+	+
CES1			+	+	+
CKOY	+			+	+
CTAL	+		+	+	+
DMRC	+	+	+	+	+
GBHC	+	+	+	+	+
GEMR	+	+		+	+
GORA	+			+	+
HZUR	+		+	+	+
IZMI	+	+	+	+	+
KADI	+	+		+	+
KBR1	+	+	+	+	+
KBR3	+	+	+	+	+
KBR4	+	+	+	+	+
KBR5	+	+	+	+	+
MNTS	+	+	+	+	+
NRDR	+		+	+	+
ORHL	+		+	+	+
OZDE	+		+	+	+
SASA	+	+	+	+	+
SFRH	+		+	+	+
SIGA	+	+	+	+	+
TRA2	+		+	+	+
TURG	+		+	+	+
UZUN	+	+	+	+	+
ZEYT	+		+	+	+

#### 4.2 GNSS Verilerinin Değerlendirilmesi

Elde edilen GNSS verileri GAMIT/GLOBK yazılımı kullanılarak hassas uydu yörünge bilgileri ile (IGSF) ve hem mevcuttaki hem de yeni ölçülen tüm noktalar için aynı IGS istasyonları kullanılarak yapılmıştır (Herring et. al. 2018). Değerlendirmede dünya geneline yayılmış, zaman serilerinde sorun olmayan toplam 29 International GNSS Service (IGS) istasyonu kullanılmıştır (ADIS, ANKR, BAHR, BAKU, BOR1, BUCU, CRAO, DRAG, GLSV, GRAS, GRAZ, ISTA, KOSG, KUWT, LAUG, MATE, NICO, NOT1, Nssp, ONSA, POLV, POTS, RAMO, SOFI, TEHN, TELA, TUBI, VILL,

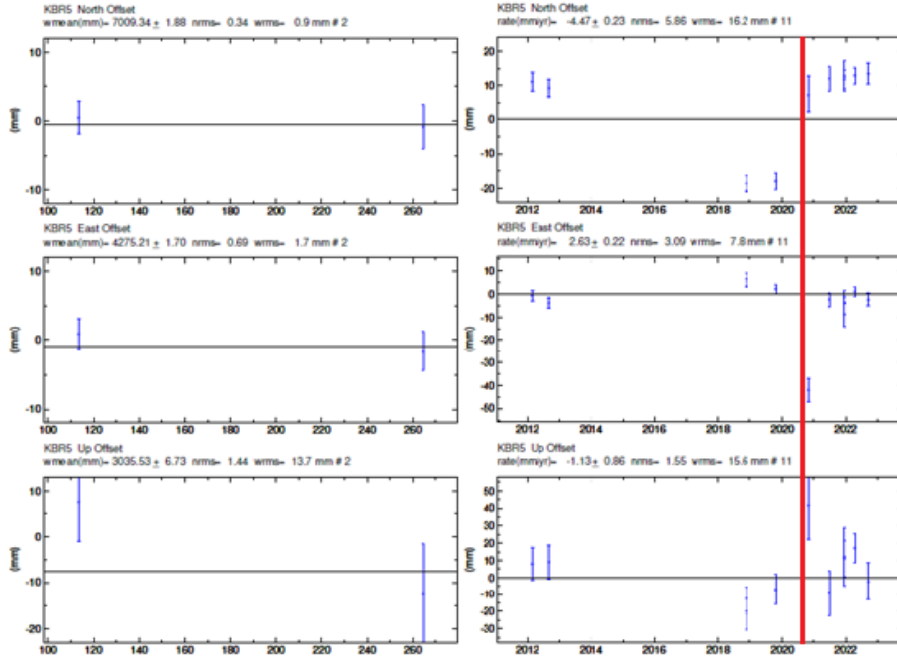
ZECK). Değerlendirme sonucunda tüm noktalara ait günlük ve yıllık zaman serileri ile noktaların hızları elde edilmiştir (Şekil 7, Şekil 8).

GAMIT/GLOBK yazılımı ile GNSS verilerinin değerlendirilmesinden sonra tüm noktalara ait Avrasya sabit (ITRF2014) hız alanı elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bölge post-sismik dönemde 14-32 mm/yıllık hızlarla güneybatı yönünde hareket etmektedir (Şekil 8). Hızlara ait standart sapma değerleri yüksek doğrulukta elde edilmiş olup 1-3 mm/yıl arasında değişmektedir (Şekil 9). Çalışma bölgesinin

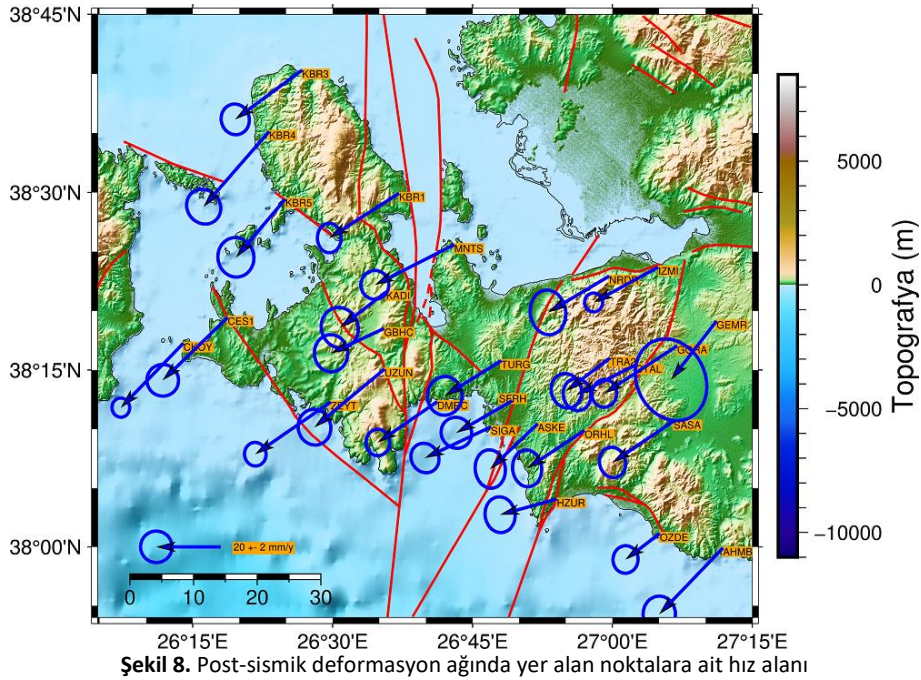


kuzeydoğusunda yer alan GEMR noktasının hız doğruluğu ise 5-6 mm/yıl arasındadır. Bunun nedeninin ise noktanın bulunduğu bölgedeki uydu görünürlüğünün olduğu değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme GAMIT/GLOBK çözüm dosyalarından ikili farklar incelenerek

doğrulanmıştır. Bu nokta için daha az uydudan çözüm yapılmıştır. Çalışmada kullanılan haritalar Generic Mapping Tools kullanarak görselleştirilmiştir (Wessel et al., 2019).



Şekil 7. Kosmik ve postsismik deformasyonun net olarak gözlemlendiği, piye tipi tesise sahip KBR5 noktasının günlük (solda) ve yıllık (sağda) tekrarlılıkları (kırmızı çizgi 30 Ekim 2020 Mw:6.9 Sisam depremini temsil etmektedir.)



Şekil 8. Post-sismik deformasyon ağında yer alan noktalara ait hız alanı

## 5. Bulgular ve Tartışma

Deprem sonrasında post-sismik etkinin meydana gelebileceği değerlendirilen İzmir ve çevresine, 27 noktadan oluşan bir GNSS ağı oluşturulmuştur. Bu ağ kampanyalar halinde ölçülmüş ve kampanyadan elde edilen GNSS verileri GAMIT/GLOBK yazılımıyla değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme sonucunda

noktalara ait hızlar ve hız doğrulukları elde edilmiştir (Şekil 8).

Şekil 8 incelendiğinde ağda yer alan noktaların hızları arasında hem vektörel büyüklük farkı hem de açısal fark olduğu görülmektedir. Örneğin Karaburun yarımadası etrafında bulunan KBR1, KBR3, KBR4 e KBR5 noktaları arasındaki farklılıklar göze çarpmaktadır. Özellikle KBR3,

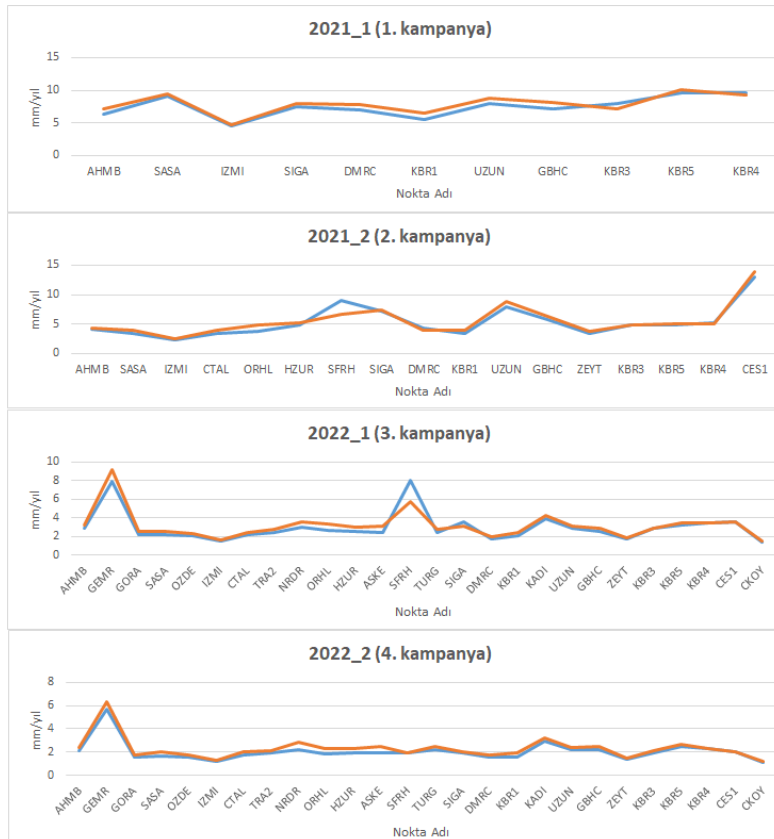
KBR4 ve KBR5'in MoF'un batısında yer aldığı değerlendirildiğinde buradaki uyumsuzluk dikkat çekmektedir. Benzer şekilde hız büyüklükleri ve açılal farkın görüldüğü diğer bir bölge ise GF civarında yer alan KADI, GBHC ve UZUN civarıdır. Yine SF ve TF bölgesinde yer alan SFRH, SIGA, ASKE, ORHL ve HZUR noktaları arasındaki farklar da belirgindir. Bölge genelindeki hız farkları incelendiğinde farkların 6 mm/yıl'a ulaştığı görülmüştür.

Bölgede postsismik dönemle ilgili yorumları güçlendirmek için GNSS ağına yer alan 19 noktanın deprem öncesi hızlarından yararlanılmıştır. Bu 19 noktanın deprem öncesine ait uzun dönem GNSS verileri aynı değerlendirme stratejisi kullanılarak Avrasya sabit (ITRF2014) hızlar elde edilmiştir (Şekil 10). Sonrasında ise ağıdaki noktaların güncel hızları ile geçmiş dönem (deprem öncesi) hızları karşılaştırılmıştır (Şekil 10). Şekil 10 incelendiğinde ağıda yer alan noktaların deprem öncesi ve sonrasındaki hızları arasında hem vektörel hem de açılal farklılıkların devam ettiği görülmektedir.

Depremi oluş mekanizması gereği (normal fay) kosismik deformasyonlar K-G yönlü maksimum D-B yönünde ise minimum seviyededir (Aktuğ et. al. 2021). Depremleri izleyen 2 yıl içinde, hız alanında intersismik dönemden sapmalar, deprem merkez üssünden kuzey yönünde 100 km'lik bir alan içinde meydana gelmiştir. Maksimum sapma miktarları yaklaşık 6 mm civarındadır. Bu fark

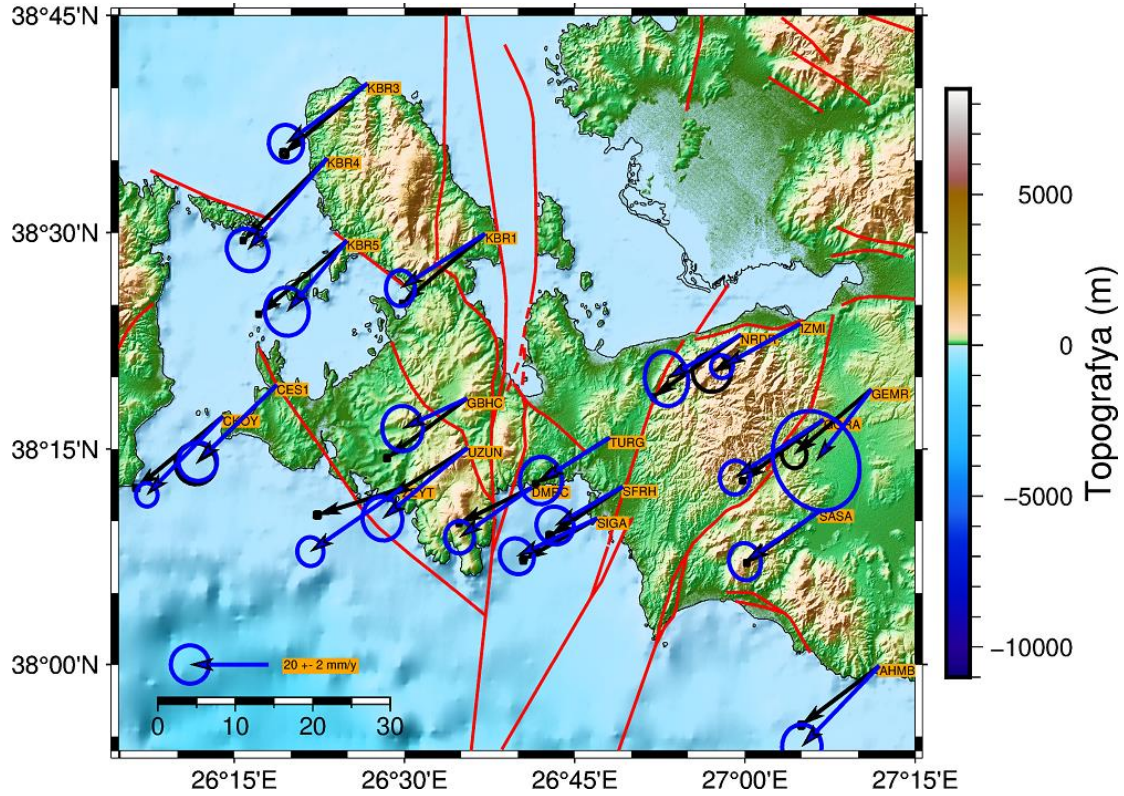
deprem öncesi hızların yaklaşık %25'ine karşılık gelmektedir. Bu farklılık noktaların post-sismik dönemdeki hızlarının yanı sıra noktaların hızlarının standart sapmalarının büyüklüğünden de kaynaklanmaktadır.

Literatürde GNSS verilerinden elde edilen hızlara ait doğrulukların ölçü süresi ve kampanya sayısı ile ilişkili olduğunu ortaya koyan çalışmalar bulunmaktadır (Şafak vd. 2020, Tiryakioğlu et. al. 2022). Bu amaçla her bir kampanya sonrası elde edilen hızlara ait doğruluklar incelenmiştir (Şekil 9). Buna göre hız doğrulukları kampanya sayısı arttıkça yükselmektedir. Örneğin 6 ay aralıklarla gerçekleştirilen GNSS ölçümlerinde, 2. kampanyada 20'den fazla noktada hız doğrulukları 2 mm/yıl'ın üzerinde iken 4. kampanyadan sonra yalnızca 5 noktada hız doğrulukları 2 mm/yıl'dan büyüktür. Bu durum gelecek dönem kampanya ölçüsü ile birlikte hız doğruluk değerlerinin düşeceği şeklinde değerlendirilmiştir. GNSS ağına yer alan noktaların hem postsismik dönem hem de deprem öncesi hızları ile arasındaki açılal ve vektörel farkların hız doğruluklarının ( $> 1\sigma$ ) üzerinde olması nedeniyle deprem sonrası bölgede düzensizliğin yani post sismik kaynaklı etkinin devam ettiği değerlendirilmektedir. Bölgede gelecek dönemlerde yapılacak GNSS ölçümleri ile postsismik dönemin takip edilmesi gerekmektedir.



Şekil 9. Postsismik deformasyon ağına gerçekleştirilen her bir kampanyadan sonra hesaplanan hızlara ait doğruluklar





Şekil 10. GNSS ağındaki noktaların deprem öncesi (siyah) ve deprem sonrası (hızları)

#### Etik Beyanı

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar 2023 yılı Türkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu (TUJK) Sempozyumunda sözlü bildiri olarak sunulmuştur.

#### Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar-1: Araştırma, Analiz ve yorumlama, Metodoloji, Proje Yönetimi, Yazma – orijinal taslak, Görselleştirme  
Yazar-2: Araştırma, Biçimsel analiz, Analiz ve yorumlama, Danışmanlık, Yazma/inceleme ve düzenleme  
Yazar-3: Kavramsallaştırma, Danışmanlık  
Yazar-4: Veri iyileştirme, Doğrulama  
Yazar-5: Metodoloji, Danışmanlık  
Yazar-6: Metodoloji, Danışmanlık  
Yazar-7: Araştırma, Yazma – orijinal taslak  
Yazar-8: Araştırma, Doğrulama  
Yazar-9: Araştırma  
Yazar-10: Araştırma  
Yazar-11: Araştırma

#### Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

#### Teşekkür

Bu çalışmayı 121Y259 numaralı proje kapsamında destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederiz. Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir. Çalışmada kullanılan TUTGA ve TUSAGA-Aktif verilerini temin eden Harita Genel Müdürlüğü ve Tapu Kadastro Genel Müdürlüğüne teşekkür ederiz.

#### 6. KAYNAKLAR

- Akıncı, A., Cheloni, D. and Dindar, A.A, 2021. The 30 October 2020 Samos (Eastern Aegean Sea) Earthquake: effects of source rupture, path and local-site conditions on the observed and simulated ground motions, PREPRINT (Version 1). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-215817/v1>
- Aktar, M., Karabulut, H., Özalaybey, S., Childs, D., 2007. A conjugate strike-slip fault system within the extensional tectonics of Western Turkey, *Geophysical Journal International*, **171(3)**, 1363-1375. <https://doi.org/10.1111/j.1365246X.2007.03598.x>
- Aktuğ B., Tiryakioğlu İ., Sözbilir H., Özener H., Özkaymak Ç., Yiğit C.Ö., Solak H.İ., Eyübagil E.E., Gelin B., Tatar O., Softa M., Kavak S., 2021. GPS derived finite source mechanism of the 30 October 2020 Samos earthquake, Mw =6.9, in the Aegean extensional region, *Turkish Journal of Earth Sciences*, **30(8)**, 718-737. <https://doi.org/10.3906/yer-2101-18>
- Akurgal, E., 1997. Eski İzmir I Yerleşme Katları ve Athena Tapınağı, *Türk Tarih Kurumu Basımevi*, 264.
- Akyol, N., Zhu, L., Mitchell, B. J., Sözbilir, H. Kekovalı, K., 2006. Crustal structure and local seismicity in western Anatolia. *Geophysical Journal International*, **166(3)**, 1259-1269.
- Ambraseys, N.N., 2009. Earthquakes in the Mediterranean and Middle East: a multidisciplinary

- study of seismicity up to 1900. Cambridge University Press.
- Ambraseys, N.N., and Finkel, C., 1995. The seismicity of Turkey and adjacent areas: a historical review 1500-1800, Virginia University, 240.
- Cadoux, C.J., 1938. Ancient Smyrna: a history of the city from the earliest times to 324 AD, Oxford: Blackwell, 438.
- Baykara, T., 1974. İzmir şehri ve tarihi, Ege Üniversitesi Matbaası, 173.
- Bonito, M., 1691. Terra tremante, o vero continuatione de' terremoti dalla Creatione del Mondo sino al tempo presente, Napoli, 460 p.
- Bozkurt, E., 2001. Neotectonics of Turkey—a synthesis, *Geodinamica acta*, **14(1-3)**, 3-30.  
<https://doi.org/10.1080/09853111.2001.11432432>
- Bozkurt, E., 2003. Origin of NE-trending basins in western Turkey, *Geodinamica acta*, **16(2-6)**, 61-81.
- Bozkurt, E. and Sözbilir, H., 2004. Tectonic evolution of the Gediz Graben: field evidence for an episodic, two-stage extension in western Turkey, *Geological Magazine*, **141(1)**, 63-79.  
<https://doi.org/10.1017/S0016756803008379>
- Calvi, V.S., 1941. Erdbebenkatalog der Turkei und Einiger Benaehbarter Gebiete, MTA Enstitüsü, 276.
- Caputo, R. and Helly, B., 2005. The Holocene activity of the Rodia Fault, *Central Greece. Journal of Geodynamics*, **40(2-3)**, 153-169.  
<https://doi.org/10.1016/j.jog.2005.07.004>
- Çirmik, A., Pamukçu, O. and Gönenç, T., 2017. The Stress/Strain Analysis of Kinematic Structure at Gülbahçe Fault and Uzunkuyu Intrusive (İzmir, Turkey). *Pure and Applied Geophysics*, **174**, 1425-1440.  
<https://doi.org/10.1007/s00024-017-1474-5>
- Dokuz Eylül Üniversitesi Deprem Araştırma ve Uygulama Merkezi (DUAM) 2020, 30 EKİM 2020 Sisam (Samos) depremi (Mw: 6.9) değerlendirme raporu.
- Dewey, J.F. and Şengör, A.M.C., 1979. Aegean and Surrounding Regions: Complex Multiple and Continuum Tectonics In a Convergent Zone, *Geological Society of America Bulletin*, **90**, 84-92.  
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1979\)90<84:AASRCM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1979)90<84:AASRCM>2.0.CO;2)
- Döğer, E., 2006. İzmir'in Smyrna'sı: Paleolitik Çağ'dan Türk Fethine Kadar, İletişim Yayıncılık, 196.
- Duman, T.Y., Emre, Ö., Özalp, S., Çan, T., Olgun, Ş., Elmacı, H., Şaroğlu, F., 2017. Türkiye Sismotektonik Haritası Açıklama Kitabı, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Özel Yayınlar Serisi, 34-12.
- Emre, Ö., Özalp, S., Doğan, A., Özaksoy, V., Yıldırım, C., Göktaş, F., 2005. İzmir yakın çevresinin diri fayları ve deprem potansiyelleri, 10754, MTA, 1-80.
- Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Olgun, Ş., Elmacı, H., 2011. Active Fault Map of Turkey (Scale 1:250,000), General Directorate of Mineral Research and Exploration Special Publication Series, MTA, Quadrangle,16, (NJ 36-5).
- Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Olgun, Ş., Elmacı, H., Şaroğlu, F., Çan, T. 2018. Active fault database of Turkey, *Bulletin of Earthquake Engineering*, **16(8)**, 3229-3275  
<https://doi.org/10.1007/s10518-016-0041-2>
- Emre, T. and Sözbilir, H., 1997. Field evidence for metamorphic core complex, detachment faulting and accommodation faults in the Gediz and Büyük Menderes grabens, western Anatolia, *Iesca Proceedings*, **1**, 73-93.
- Ersoy, E.Y., Helvacı, C., Uysal, I., Karaoğlu, O., Palmer, M.R., ve Dindi, F., 2012. Petrogenesis of the Miocene volcanism along the İzmir-Balıkesir Transfer Zone in western Anatolia, Turkey: implications for origin and evolution of potassic volcanism in postcollisional areas. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **241-242**: 21-38.  
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.05.022>
- Eyübagil, E.E., 2020. GNSS ölçüleri ile tektonik hareketlerin modellenmesi: Gülbahçe fayı örneği , Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar, 87.
- Eyübagil, E.E., Solak, H.İ., Kavak, U.S., Tiryakioğlu, İ., Sözbilir, H., Aktuğ, B., Özkaymak, Ç., 2021. Present-day strike-slip deformation within the southern part of İzmir Balıkesir Transfer Zone based on GNSS data and implications for seismic hazard assessment, western Anatolia, *Turkish Journal of Earth Science*, **30**, 143-160.  
<https://doi.org/10.3906/yer-2005-26>
- Foumelis, M., Papazachos, C., Papadimitriou, E., Karakostas, V., Ampatzidis, D., Moschopoulos, G., Chatzipetros, A., 2021. On rapid multidisciplinary response aspects for Samos 2020 M7. 0 earthquake, *Acta Geophysica*, **69**, 1025-1048.  
<https://doi.org/10.1007/s11600-021-00578-6>
- Geçkin, B.Ş. 2021. Gülbahçe Fay Zonunun Paleosismolojisi ve Deprem Üretim Potansiyeli, İzmir, Batı Anadolu, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 219
- Guidoboni, E., Traina, G. and Comastri, A., 1994. Catalogue of ancient earthquakes in the Mediterranean sea up to the 10th century. Istituto Nazionale di Geofisica, 486.  
<https://hdl.handle.net/11587/112165>
- Herring, T.A., King, R.W., Floyd, M.A., McClusky, S.C., 2018. Introduction to GAMIT/GLOBK, Release 10.7,

- Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Mass. Inst. of Technology,168.
- Kavak, U.S., 2020. GNSS ölçüleriyle fayların izlenmesi: Karaburun Fayı Örneği, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar, 47.
- Kiratzı, A., Papazachos, C., Özacar, A., Pinar, A., Kkallas, C., Sopac, E., 2021. Characteristics of the 2020 Samos earthquake (Aegean Sea) using seismic data, *Bulletin of Earthquake Engineering*,07713–7735. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01239-1>
- Koçyiğit, A., Yusufoglu, H. and Bozkurt, E., 1999. Evidence from the Gediz Graben for episodic two-stage extension in western Turkey, *Journal of Geological*, **79**, 605–616. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.156.3.0605>
- Lahn, N.P.E. and PINAR, N., 1952. Türkiye depremleri izahlı kataloğu, Akın Matbaacılık. 153.
- Lentas, K., Gkarlaouni, C.G., Kalligeris, N., Melis, N. S. (2022). The 30 October 2020, Mw= 7.0, Samos earthquake: aftershock relocation, slip model, Coulomb stress evolution and estimation of shaking. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **20**(2), 819-851. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01260-4>
- Lentas, K., Gkarlaouni, C.G. and Kalligeris, N., Melis, N.S., 2022. The 30 october 2020, mw = 7.0, samos earthquake: aftershock relocation, slip model, coulomb stress evolution and estimation of shaking, *Bulletin of Earthquake Engineering*, **20**, 819–851. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01260-4>
- Le pichon, X. and Angelier, J., 1979. The Hellenic Arc and Trench System: a key to the neotectonic evolution of the Eastern Mediterranean Area, *Tectonophysics* , **60**(1-2), 1-42. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(79\)90131-8](https://doi.org/10.1016/0040-1951(79)90131-8)
- Lips, A.L., Cassard, D., Sözbilir, H., Yilmaz, H.,Wijbrans, J. R. (2001). Multistage exhumation of the Menderes massif, western Anatolia (Turkey), *International Journal of Earth Sciences*, **89**, 781-792. <https://doi.org/10.1007/s005310000101>
- Mallet, R., and Mallet, J.W., 1858. The Earthquake Catalogue of the British Association: With the Discussion, Curves, and Maps, Taylor & Francis, 136.
- McKenzie, D.P., 1972. Active Tectonics of the Mediterranean Region, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, **30**, 109-185. <https://doi.org/10.1111/j.1365246X.1972.tb02351.x>
- McKenzie, D.P., 1978. Active Tectonics of the Alpin-Himalayan Belt: The Aegean sea and Surrounding Regions, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, **55**, 217- 254. <https://doi.org/10.1111/j.1365246X.1978.tb04759.x>
- McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., Gurkan, O., Mahmoud, S., Mishin, A., Nadriya, M., Ouzounis, A., Paradissis, D., Peter, Y., Prilepin, M., Reilinger, R, Sanli, I., Seeger, H., Tealeb, A., Toksoz, M.N., Veis, G., 2000. Global Positioning System Constraints On Plate Kinematics and Dynamics in The Eastern Mediterranean and Caucasus, *Journal of Geophysical Research*, **105**, 5695-5719. <https://doi.org/10.1029/1999JB900351>
- Öncü, U., Sözbilir, H., Özkaymak, Ç., Softa, M., Sümer, Ö., Eski, S., Topaksu, M., 2024. Palaeoseismological assessment for a seismic gap located very close to the epicentre of the 30 October 2020 Samos Earthquake (M6. 9), western Anatolia, Turkey, *Natural Hazards*, 1-29. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06290-6>
- Özarpacı, S., 2024. Stability Analysis of GNSS Stations Affected by Samos Earthquake, *Applied Sciences*, **14**(6), 2301. <https://doi.org/10.3390/app14062301>
- Özkaymak, Ç. and Sözbilir, H., 2008. Stratigraphic and structural evidence for fault reactivation: the active Manisa fault zone, western Anatolia, *Turkish Journal of Earth Sciences*, **17**(3), 615-635. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2012.06.004>
- Özkaymak, Ç., Sözbilir, H., Uzel, B., Akyüz, H.S., 2011. Geological and palaeoseismological evidence for late Pleistocene– Holocene activity on the Manisa Fault Zone, western Anatolia. *Turkish Journal of Earth Sciences*, **20**(4), 449-474.
- Özkaymak, Ç., Sözbilir, H., & Uzel, B. 2013. Neogene– Quaternary evolution of the Manisa Basin: Evidence for variation in the stress pattern of the İzmir-Balıkesir Transfer Zone, western Anatolia. *Journal of Geodynamics*, **65**, 117-135.
- Özkaymak, Ç., 2015. Tectonic analysis of the Honaz Fault (western Anatolia) using geomorphic indices and the regional implications, *Geodinamica Acta*, **27**(2-3), 110-129.
- Papadimitriou, P., Kapetanidis, V., Karakonstantis, A., Spingos, I., Kassaras, I., Sakkas, V., Kouskouna, V., Karatzetzou, A., Pavlou, K., Kaviris, G., Voulgaris, N., 2020. First Results on the Mw=6.9 Samos Earthquake of 30 October 2020, *Bulletin of the Geological Society of Greece*, **56**(1), 251-279. <https://doi.org/10.12681/bgsg.25359>,2020
- Papazachos, B. and Papazachou, C., 1989. The earthquakes of Greece, Ziti, P., & Co. I.K.E., 356.
- Pavlidis, S. and Caputo, R., 2004. Magnitude versus faults' surface parameters: quantitative relationships from the Aegean Region, *Tectonophysics*, **380**(3-4), 159-188. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2003.09.019>
- Plicka, V., Gallovič, F., Zahradník, J., Serpetsidaki, A., Sokos, E., Vavlas, N., Kiratzı, A., 2022. The 2020 Samos

- Mw7 earthquake: Source model depicting complexity and rupture directivity, *Tectonophysics*, **843**, 229.  
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229591>
- Reilinger, R.E., McClusky, S.C., Oral, M.B., King, R.W., Toksöz, M.N., Barka, A.A., Kinik, I., Lenk, O., Sanli, I., 1997. Global Positioning System measurements of present-day crustal movements in the Arabia-Africa-Eurasia plate collision zone, *Journal Of Geophysical Research*, **102 (b5)**, 9983-9999.  
<https://doi.org/10.1029/96JB03736>
- Sakkas, V., 2021. Ground deformation modelling of the 2020 Mw6. 9 Samos earthquake (Greece) based on INSAR and GNSS data, *Remote Sensing*, **13(9)**, 1665.  
<https://doi.org/10.3390/rs13091665>
- Schmidt, J.J., 1881. *Studien über Vulkane und Erdbeben.*, 361.
- Seyitoğlu, G. and Scott, B.C., 1991. Late Cenozoic crustal extension and basin formation in west Turkey, *Geological Magazine*, **128**, 155-166.  
<https://doi.org/10.1017/S0016756800018343>
- Solak, H.İ. 2020. İzmir-Balıkesir transfer zonu ve çevresindeki güncel deformasyonların GNSS yöntemi ile incelenmesi, Doktora Tezi, Afyonkocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar, 147  
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.230194>
- Solak, H.İ., Tiryakioğlu, İ., Özkaymak, Ç., Sözbilir, H., Aktuğ, B., Yavaşoğlu, H.H., Özkan, A., 2024. Recent tectonic features of Western Anatolia based on half-space modeling of GNSS Data, *Tectonophysics*, **872**, 230194.
- Sözbilir, H., 2001. Extensional tectonics and the geometry of related macroscopic structures: field evidence from the Gediz detachment, western Turkey, *Turkish Journal of Earth Sciences*, **10(2)**, 51-67.
- Sözbilir, H., 2005. Oligo-Miocene extension in the Lycian orogen: evidence from the Lycian molasse basin, SW Turkey. *Geodinamica Acta*, **18(3-4)**, 255-282.
- Sözbilir, H., Uzel, B., Sümer, Ö., İnci, U., Ersoy, E. Y., Koçer, T., Demirtaş, R., Özkaymak, Ç., 2008. D-B Uzanımlı İzmir Fayı ile KD-Uzanımlı Seferihisar Fayı'nın birlikte çalıştığına dair veriler: İzmir Körfezi'ni oluşturan aktif faylarda kinematik ve paleosismolojik çalışmalar, Batı Anadolu, *Türkiye Jeoloji Bülteni*, **51(2)**, 91-114.
- Sözbilir, H., Sümer, Ö., Uzel, B., Ersoy, Y., Erkül, F., İnci, U., Özkaymak, Ç., 2009. 17-20 Ekim 2005-Sığacık Körfezi (İzmir) depremlerinin sismik jeomorfolojisi ve bölgedeki gerilme alanları ile ilişkisi Batı Anadolu, *Türkiye Jeoloji Bülteni*, **52(2)**, 217-238.
- Şafak, Ş., 2019. Gns Hız Doğruluklarına Etki Eden Parametrelerin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar, 87.
- Şafak, Ş., Tiryakioğlu, İ., Erdoğan, H., Solak, H. İ., Aktuğ, B. 2020. Determination of parameters affecting the accuracy of GNSS station velocities", *Measurement*, **164**.  
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108003>
- Şengör, A.M.C., 1979. The North Anatolian transform fault: its age, offset and tectonic significance, *Journal of the Geological Society of London*, **136**, 269-282.  
<https://doi.org/10.1144/gsjgs.136.3.0269>
- Şengör, A.M.C., 1980. Türkiye'nin Neotektoniğinin Esasları, Türkiye Jeoloji Kurumu, 40.
- Şengör, A.M.C., Görür, N. and Şaroğlu, F., 1985. Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study, *Society for Sedimentary Geology*, **37**.  
<https://doi.org/10.2110/pec.85.37>
- Tan, O., Tapirdamaz, M. C. and Yörük, A., 2008. The earthquake catalogues for Turkey, *Turkish Journal of Earth Sciences*, **17(2)**, 405-418.
- Taymaz, T., Jackson, J.A. and McKenzie, D., 1991. Active tectonics of the North and Central Aegean Sea, *Geophysical Journal International*, **106**, 433-490.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365246X.1991.tb03906.x>
- Tepe, Ç., Sözbilir, H., Eski, S., Sümer, Ö., Özkaymak, Ç., 2021. Updated historical earthquake catalog of İzmir region (western Anatolia) and its importance for the determination of seismogenic source, *Turkish Journal of Earth Sciences*, **30(8)**, 779-805.  
<https://doi.org/10.3906/yer-2101-14>
- Tiryakioğlu, İ., Çalışkan, K., Yigit, C., Hastaoğlu, K., Poyraz, F., Baybura, T., Özkaymak, Ç., 2022. The velocity of aseismic surface deformations between 2016-2020 detected by precise leveling surveys of the Akşehir Simav Fault System in the Bolvadin district, western Anatolia. *Annals of Geophysics*, **65(5)**  
<https://doi.org/10.4401/ag-8784>
- Uzel, B., Sözbilir, H., and Özkaymak, Ç., 2012. Neotectonic evolution of an actively growing superimposed basin in western Anatolia: The inner bay of İzmir, Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, **21(4)**, 439-471.  
<https://doi.org/10.3906/yer-0910-11>
- von Hoff, K.E.A., 1840. *Chronik der Erdbeben und Vulcan-Ausbrüche* (Vol. 1), 4, Gotha Bei Justus Perthes, 469 .
- Wells, D.L. and Coppersmith, K.J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, *Bulletin of the seismological Society of America*, **84(4)**, 974-1002.  
<https://doi.org/10.1785/BSSA0840040974>
- Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F., & Tian, D. (2019). The Generic Mapping Tools version 6. *Geochemistry, Geophysics*,

Geosystems, 20, 5556–5564.  
<https://doi.org/10.1029/2019GC008515>

Zhu, L., Akyol, N., Mitchell, B. J., & Sozbilir, H., 2006. Seismotectonics of western Turkey from high resolution earthquake relocations and moment tensor determinations, *Geophysical Research Letters*, **33(7)**.  
<https://doi.org/10.1029/2006GL025842>

### 7. İnternet kaynakları

1-<https://deprem.afad.gov.tr/event-instrumental>,  
(26.03.2024)

2-<http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/zeqdb/>,  
(26.03.2024)

3-<https://avesis.deu.edu.tr/yayin/6865b31f-1ea9-4b05-b95a-327a7456b04c/the-30-october-2020-1151-utc-izmir-samos-earthquake-and-tsunami-post-tsunami-field-survey-preliminary-results>, (28.03.2024)

4-<https://geofon.gfzpostdam.de/eqexplorer/?startdate=now14days&enddate=now&minmag=0.0&maxmag=10.0&minlon180.00&maxlon=180.00&minlat90.00&maxlat=90.00> (20.03.2024)

5- <https://geoazur.oca.eu/>, (20.03.2024)

6-<https://deprem.afad.gov.tr/earthquake-reports>,  
(21.03.2024)

7-[https://emsc-csem.org/Special\\_reports/?id=263](https://emsc-csem.org/Special_reports/?id=263),  
(21.03.2024)

8-<https://daum.deu.edu.tr/SamosDeprem-Raporu.pdf>,  
(23.03.2024)

9-<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020EGUA22.1068/abstract>, (25.03.2024)

10-<https://www.tusaga-aktif.gov.tr/>, 01.03.2024)



## Su Kalitesi Gözlem İstasyonlarında Örneklenerek Değişkenlerin Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) Desteği ile Belirlenmesi: Gediz Havzası Örneği

**Makale Bilgisi / Article Info**  
Alındı/Received: 24.11.2023  
Kabul/Accepted: 08.08.2024  
Yayımlandı/Published: 02.12.2024

### Determination of Variables to be Sampled at Water Quality Observation Stations with Analytical Hierarchy Process (AHP) Support: Gediz River Basin Case Study

Filiz BARBAROS

Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

Akarsu havzalarında yüzeysel su kalitesi izleme çalışmalarında örneklenerek su kalitesi değişkenlerinin seçimi, aralarından seçim yapılabilecek değişken sayısının çok olması nedeni ile önemli maliyet sonuçları olan oldukça karmaşık bir konudur. Bu sorunu ele almak için farklı yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bazı durumlarda, su kalitesi gözlemlerine ilişkin kimyasal, fiziksel ve biyolojik parametreler, çeşitli su kullanımlarına dayanarak belirlenirken; bazı durumlarda ise, bir gözlem ağı için her düzeyde farklı değişkenler içerecek şekilde izleme seviyeleri tanımlanmaktadır. İstatistiksel temelli olan bir yaklaşım, gözlemi yapılacak değişkenlerin sayısını azaltmak için, düzenli olarak izlenen su kalitesi değişkenleri ile az sayıda gözlemleri olanlar arasındaki ilişkileri araştırmaktır. Sunulan çalışma, ölçüm ağlarında gözlenmesi gereken değişken seçimi ve sonrasında karar verici makamlar için değerlendirme sürecini kolaylaştırabilecek bir yaklaşım önermektedir. Önerilen yaklaşım, değişken seçiminden önce izleme hedeflerinin tanımlanmasını ve bunu, hedeflere göre önceden seçilen değişkenlerin sayısını azaltmak için ilave seçim kriterlerinin takip edilmesini gerektirmektedir. Sunulan çalışmada su kullanımları ve etki değerlendirmeleri dikkate alınarak öncelikli izlenecek değişkenler belirlendikten sonra, karar vermede yaygın şekilde kullanılan çoklu kriterli karar verme yöntemi Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) kullanılarak bu değişkenlerin aynı değerlendirme düzlemine alınması prensibi benimsenmiştir. Burada, su kullanımları suyun halk tarafından faydalı kullanımını hedeflerken, etki değerlendirmesi noktasal ve noktasal olmayan suların kalite özelliklerinin belirlenmesini hedeflemektedir. Çalışmada, Gediz Nehri Havzası örneğinde, yoğun faaliyet alanı içindeki 6 istasyonda öncelikli izlenecek değişkenler belirlenmiş, değişkenlere ait ağırlıklı katsayılar belirlenmiş ve ölçüm güvenilirlikleri çerçevesinde yorumlanmıştır. Önerilen yaklaşım, mevcut veya yeni kurulacak su kalitesi gözlem ağında, gözlemi yapılan/yapılacak değişkenlerin alıcı ortam kirlilik düzeyini en doğru şekilde temsil edilebilmesi için etkili bir araç olacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Su Kalitesi Değişkenleri; Su Kullanımı; Kirlilik Etkisi; Analitik Hiyerarşi Süreci; Gediz Nehri Havzası.

#### Abstract

Selection of water quality variables to be sampled is a highly complex issue with significant cost implications due to the large number of variables to choose from. In some cases, chemical, physical and biological parameters related to water quality observations are determined based on various water uses; where different monitoring levels are defined for a network, including different variables at each level. A statistically based approach is commonly used to investigate the relationships between regularly observed water quality variables and those with few observations, to reduce the number of variables to be observed. The presented study proposes an approach that can facilitate the selection of variables to be observed for the use of decision-making authorities. In the presented study, the principle of getting the variables to the same evaluation level was adopted by using the Analytical Hierarchy Process (AHP), a multi-criteria decision-making method that is widely used in decision-making, considering water use and impact assessments. Here, while water use targets the beneficial use of water by the public, impact assessment aims to determine the quality characteristics of point and non-point inputs. In the study, the variables to be monitored primarily in six stations in Gediz River Basin case study were determined, the weighted coefficients are executed, and the results are evaluated within the framework of measurement reliability. The proposed approach will be an effective tool to represent the environmental pollution level of the observed variables in the existing or newly established water quality observation network in the most accurate way.

**Keywords:** Water Quality Variables; Water Use; Pollution Impact; Analytical Hierarchy Process; Gediz River Basin



## 1. Giriş

Su kalitesi ölçüm ağı tasarımında, istasyon yeri seçimi kadar istasyonlarda ölçülecek kalite değişkenlerinin seçimi de büyük önem taşımaktadır. Ülkemizde bu alanda süregelen uygulama, akım gözlemi amacıyla kurulmuş istasyonlarda, alıcı ortamda standart denetiminin yapılmasını sağlayacak veya o yöredeki teknik ve laboratuvar imkanları çerçevesinde, ya da tamamen rastgele seçilmiş bazı değişkenlerin gözlenmesi şeklinde yer almaktadır. Bu tür bir yaklaşımın, ilgili bilimsel literatürde sıkça işaret edilen sistematik bir ölçüm ağı kavramına uymadığı, bu şekilde akarsudaki kalite değişiminin sağlıklı olarak gözleminin yapılmasının mümkün olamayacağı; bunun da havza yönetiminde isabetli kararlar verilmesini engelleyeceği açıktır. Dolayısıyla, ölçüm ağı tasarımında gözlemi yapılacak değişkenlerin de belli bir sistematik yaklaşım çerçevesinde belirlenmesi zorunlu olmaktadır.

Ölçüm ağı tasarımı, performansının belirlenmesi ve örneklenecek su kalitesi değişkenlerinin seçimi, su kaynaklarının yönetiminde ele alınan önemli başlıklardan biridir (Canter 1985, Çetinkaya ve Yiğit 2019, Çetinkaya ve Engin 2018, İnt.Kay.1). Doğru seçilmiş değişkenlerin sistematik şekilde gözleminin yapılması, sürdürülebilir bir izleme planının ve dolayısıyla planlı bir yönetim planının yapılabilmesindeki temel adımlardandır (Gündüz 2015). Bu adımda tanımlanmış belirli bir prosedürün olmaması günümüzde hala konu üzerinde çeşitli zorluklar yaşanmasına neden olmaktadır. Bu amaçla, sunulan çalışmada değişken seçimi özelinde, bahsedilen konunun bir bölümüne çözüm alternatifleri sunulmaktadır.

Örneklenecek su kalitesi değişkenlerinin seçimi, aralarından seçim yapılacak değişken sayılarının büyük miktarları nedeniyle oldukça karmaşık bir konudur. Seçim yöntemlerinden bazılarında, “su kullanımı” başlığı gözlemi yapılacak değişkenler için ana ölçüt olarak dikkate alınırken; bazılarında ise “örnek izleme çeşitliliği” (gözetim, yoğun kontrol veya proje odaklı programlar türünden) dikkate alınmaktadır (UNESCO-WMO 1972). Yevjevich ve Harmancıoğlu (1985) ve Harmancıoğlu ve Yevjevich (1986), sürekli olarak örneklenmesi gereken ve diğer değişkenlerle korelasyonları aracılığıyla tahmin edilebilen değişkenleri belirlemek amacıyla, günlük gözlenen su kalitesi değişkenleri arasındaki bilgi transferini araştırmışlardır. Benzer çalışmalar Harmancıoğlu vd. (1987) tarafından kirlilik değerleri yüksek bir nehir havzasına ait aylık gözlem verileri üzerinde örneklendirilmiştir. Regresyon yoluyla bilgi transferinin uygunluğunu değerlendirmek üzere bu çalışmalarda entropi temelli ölçümler kullanılmıştır. Bu

çalışmaların sonuçları, temelde su kalitesi değişkenlerinin birçoğu arasındaki ilişkinin önemsiz olduğunu ortaya koymuştur.

Huthmann (1979), bir su kalitesi değişkeni üzerinde, mabdan toplanan verileri kullanarak, mansap noktasındaki değişken değerlerini simüle etmiş; aynı zamanda, nehir için “çoklu giriş-tek çıkış sistemi modeli” geliştirerek örnekleme istasyonlarının sayısını ve zamansal frekansları azaltma sorununu da ele almıştır. Ölçülecek değişken sayısının azaltılması amacıyla uygulanabilecek bir yaklaşım da gözlenmiş kalite değişken değerleri arasında korelasyon ve regresyon analizi yapılmasıdır. Elde edilen korelasyon sonucunda, aralarındaki korelasyon katsayısı yüksek bulunan herhangi iki değişkenden birinin ölçülmesi; diğerinin ise, aralarındaki matematiksel ilişkiden kestirilmesi yoluna gidilebilir. Ancak bugüne kadar yapılan çeşitli çalışmalarda, su kalitesi değişkenleri arasında güvenilir ve anlamlı ilişkilere rastlanamamıştır (Harmancıoğlu vd 1986, 1987, Harmancıoğlu ve Yevjevich 1986; Sanders vd. 1983). Diğer çalışmalarda gözlemi yapılacak değişkenlerin sayısını azaltmak için, temel bileşen analizi gibi çok değişkenli istatistiksel yöntemler kullanılmış (Karpuzcu vd. 1987) ve bu tür yöntemler ile temsil kapasitesi en yüksek su kalitesi değişkenlerinin, geleneksel korelasyon analizleri ile elde edilen sonuçlara göre daha iyi tahmin edildiği iddia edilmiştir. Tüm bu çalışmalar, gözlem istasyonları tasarımlarında temel alınan adımlar olmuştur (Literathy 1997).

Örneklenecek değişkenlerde daha fazla azaltma sağlamak için, regresyon ve temel bileşen analizleri de uygulanabilmekte olup sonuçlar gözlemi yapılacak değişkenlerinin seçimine bir temel oluşturabilir (Harmancıoğlu vd. 1999a, Yılmaz ve Özçelik 2018, Abed vd. 2019). Bu seçim, su kalitesine yönelik değerlendirme ihtiyacı temelinde, izlemeden kaynaklanan maliyetlerin minimizasyonu açısından oldukça önemlidir. Herhangi bir ölçüm ağında ölçülen değişkenlerin irdelenmesinde veya yeni bir ölçüm ağı için değişken seçilmesinde kullanılacak standart bir yöntem veya yaklaşım mevcut değildir. Bu amaçla, Harmancıoğlu vd. (1993, 1994, 1998, 1999a, 1999b ve 2003), değişken seçimi veya değerlendirme prosedürünü kolaylaştırmak için Chapman (1992) tarafından yapılan bir çalışmaya dayalı bir yaklaşım önermiş ve temel adımlarını aşağıdaki şekilde detaylandırmıştır.

- ölçüm ağı için değişken seçimi, önceden belirlenen izleme amaçları çerçevesinde yapılmalıdır;
- ölçüm ağının, gözlemi yapılan değişkenler ve sıklık gibi teknik özellikler açısından birbiriyle uyumlu



- çalışan istasyonlardan oluşması gerektiği; başka bir deyişle, ölçüm ağının sistematikliği dikkate alınmalıdır;
- (c) gözlemi yapılacak değişkenler, sucul ekosistemin biyokimyasal yapısının tanınmasına, doğal ve antropojen faktörlerin su kalitesine olası etkilerinin belirlenmesine olanak sağlayacak tür ve nitelikte olmalıdır;
- (d) çok sayıda değişken arasından seçim yapabilmek adına şu faktörler; (i) kirlilik envanterleri; (ii) su kullanımları açısından uyulması gereken su kalitesi standartları ve kriterleri; (iii) havzada potansiyel kirlilik kaynaklarının belirlenmesine yönelik ön araştırmaların sonuçları ve (iv) niteliği bilinmeyen yeni kirleticiler; dikkate alınmalıdır;
- (e) değişken seçiminde ölçüm ekonomisi önemli rol oynadığından, maliyet analizi için gerekli olan tüm bilgiler ölçüm yapan kuruluş tarafından detaylı olarak kaydedilip saklanmalıdır.

Mazlum (2002), ölçülmesi gereken su kalitesi değişkenlerinin belirlenmesi için yukarıda özetlenen izlenmesi gereken adımları uluslararası platformlara da sunma imkânı bulmuştur.

2000 yılı itibari Avrupa Birliği Su Çerçeve Direktifleri (SÇD)'nin yürürlüğe girmesi ile su kaynaklarının korunması çerçevesinde birçok alt başlığa temel oluşturmuş (İnt.Kay.3) ve 30/11/2012 tarihli ve 28483 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan ve 2015 yılında güncellenen "Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği" ile de su kalitesi izlenmesi belirli çerçevede ile tanımlanmıştır (İnt.Kay.2). SÇD'nin Türkiye'de su kaynakları yönetimine etkisi, direktifler kapsamında biyolojik kalite unsurları ile su kalitesinin gözlemi yapılması gereken değişkenlerinin tespiti için yapılan çeşitli çalışmalar ile konu detaylı bir şekilde çalışma alanı bulmuştur (Bulut ve Birben 2019, Uyanık ve Cebe 2017, Doğanay vd. 2019).

WWF (World Wildlife Fund)'nin Türkiye temsilcisi olan Doğal Hayatı Koruma Vakfı'nın "Yaşayan Nehirler, Yaşayan Ege Projesi" kapsamında, 4 Mayıs 2012 tarihinde gerçekleştirdiği "Su Kalitesi ve İzleme Çalıştayı" 'nda tartışılan temel başlıklardan biri su kalitesinin izleme yöntemleridir. Konu paydaşlar tarafından çeşitli açılardan ele alınmış; su kaynaklarının kalite ve miktarının birlikte ele alınarak bütüncül yaklaşımların benimsenmesi, Türkiye'de su kalitesi izlemenin sistematik olarak geliştirilmesi için gerekli çalışmaların yapılması yönünde ortak karara varılmıştır (İnt.Kay.4). Karar içeriğinde SÇD'ne uyum sağlanması da desteklenmiştir.

Sunulan çalışma ile su kaynakları yönetimi çerçevesinde, su kalitesinin izlenmesinde önemli bir temel oluşturan

yukarıda listelenen adımların, karar vericiler için uygulanabilirliği pratik bir araç olabilmesi amacı ile, karar vermede yaygın şekilde kullanılan çoklu kriterli bir karar verme yöntemi olan Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) kullanılarak değişken seçiminde ortak bir değerlendirme düzlemi oluşturulması da amaçlanmıştır. AHS su kalitesinin değerlendirilme süreçlerinde etkin kullanım alanı bulmuş bir yöntemdir (Barış vd. 2007, Pang vd. 2008, Do vd. 2013). AHS yöntemi, değerlendirilmeye alınan bölgelere özgü su kullanımları ve etki değerlendirilmeleri dikkate alınarak belirlenen öncelikli su kalitesi değişkenlerinin ortak bir kıyas düzlemine alınarak, öncelikli olarak nitelendirilen su kalitesi değişkenlerinin belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Önerilen yaklaşım, mevcut su kalitesi gözlem ağlarında gözlemi yapılan değişkenler açısından akarsu boyunca su kirliliğinin tespitinde verimli ve ekonomik güncellemeler sağlayacağı gibi, yeni tasarımı yapılacak ölçüm ağında gözlemi yapılması gereken değişkenlerin seçiminde etkili bir araç olacaktır.

Gözlem istasyonlarında su kalitesini belirlemek için kullanılan geleneksel yöntemlerde, tüm kalite parametrelerinin ölçülmesi genellikle maliyetli ve zaman alıcı olacağından, öncelikli değişkenlerin ölçülmesi, ekonomik, çevresel ve sosyal açıdan sağlanabilecek faydalar aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

- ✓ Sadece öncelikli değişkenlerin ölçülmesi, laboratuvar ve ekipman maliyetlerini azaltabilir,
- ✓ Öncelikli değişkenlerin daha hızlı ölçülmesi, karar alma süreçlerini hızlandırabilir ve uygulamada verimliliği artırabilir,
- ✓ Daha az sayıda numunenin analiz edilmesi, laboratuvar atıklarının azaltılmasına yardımcı olabilir,
- ✓ Daha az ölçüm için daha az enerji tüketimi gerekebilir, bu da karbon ayak izini azaltabilir,
- ✓ Sınırlı su kaynaklarının yönetiminde daha etkili ve hızlı kararlar alınabilir,
- ✓ Öncelikli parametrelerin izlenmesi, suyun insan sağlığına olan etkilerinin daha iyi anlaşılmasına ve koruma önlemlerinin alınmasına yardımcı olabilir.

Bu faydalar, su kalitesi yönetimindeki stratejilerin geliştirilmesine ve sürdürülebilir su kaynaklarının korunmasına katkıda bulunabilir. Ancak, öncelikli değişkenlerin belirlenmesi ve bu değişkenlerin su kaynaklarının özelliklerine göre uygun şekilde seçilmesi önemlidir. Bu seçim süreci, yerel koşullar ve su kaynaklarının özellikleri göz önünde bulundurularak yapılmalıdır.

Sunulan çalışma, Gediz Nehri Havzası örneğinde, yoğun faaliyet alanı içindeki 6 gözlem istasyonunda hâlihazırda

gözlemi yapılan değişkenler üzerinde uygulanmıştır. İlk adım olan Chapman (1992) tarafından önerilen öncelikli değişken seçimi ve ağırlıklı katsayılar hesabı yapıldıktan sonra, gözlemi yapılan değişkenler öncelikleri ve ölçüm güvenilirlikleri çerçevesinde yorumlanmıştır. Yöntem, araştırmacılar ile paylaştığı günden bugüne hala güncelliğini koruyabilmiş, konu ile ilgili ilave somut öneriler mevcut yapının korunarak yürütülmesi şeklinde yapılmıştır.

## **2. Kalite Değişkenlerinin Seçiminde Geleneksel Yöntem**

Öncelikli değişken seçimi yaklaşımı, Chapman (1992) tarafından tanımlanan;

- a) her istasyonda gözlemi yapılacak baz değişkenler,
- b) su kullanımına göre gözlemi yapılması gereken değişkenler,
- c) etki değerlendirmesi açısından gözlemi yapılması gereken değişkenler,

olmak üzere üç değişken grubunun ele alındığı bir çalışmaya dayanmaktadır.

İkinci ve üçüncü gruplar (b ve c) ayrıca endüstriyel ve endüstriyel olmayan su kullanımı ve etki değerlendirme değişkenleri olarak tekrar ikiye ayrılır. Harmancıoğlu vd. (1994) aşağıdaki başlıkları da tanımlamak için bu yaklaşımı bir adım daha geliştirmiştir;

- a) havza çapında bir ağıdaki her istasyonda örneklenmesi gereken değişkenler,
- b) her istasyonda özel olarak örneklenmesi gereken değişkenler.

Bu yaklaşım, gözlemi yapılacak değişkenleri belirlemek için, istasyonların havza drenaj özelliklerini ile bölgesel hidrolojik ve meteorolojik özelliklerini dikkate alınarak, önem derecelerine göre sıralanır. Örnekleme maliyeti, dikkate alınan değişkenin zamansal değişkenliği ve örnekleme kolaylığı gibi diğer hususlar da sıralamada dikkate alınabilmektedir.

### **2.1 Baz değişkenlerin seçimi**

Baz değişkenler, doğal veya kirletilmemiş akarsuların su kalitesinin ortaya konmasında önem taşır. Bu değişkenler, bir havzanın, su ortamındaki iyon dengelerine, mineral kalitesine ve biyolojik doğası üzerine etkisi olacak, yerel jeolojik, biyolojik ve iklimsel özelliklerine bağlıdır. Bu özellikler, su içindeki mineral kalitesini, iyon dengesini ve su kütlesindeki biyolojik döngüleri kontrol ederler. Su ortamında kalitenin korunabilmesi, doğal dengenin mevcudiyetine bağlıdır. Suyun baz değişkenlerinin bilinmesi, çeşitli su kullanımlarının ve antropolojik etkilerin söz konusu dengelye ne yönde etkileyeceğinin tahmini için gereklidir ve su kalitesinde olan değişimlerin

açısından bu değişkenler bir baz oluştururlar. Chapman (1992), "Arka Plan Su Kalitesi" olarak adlandırdığı ve baz değişkenler ile temsil edilen bu durumun, "suyun kullanımı için uygunluğunu değerlendirmek ve gelecekteki insan etkilerini tespit etmek" amacıyla gerekliliği üzerinde durmuştur. Yöntemin ortaya konması üzerinden uzun yıllar geçse de, 1992 de tanımlanan "Arka Plan Su Kalitesi" kavramı, yıllar içinde antropojenik etkilerden zarar gören bölgelerdeki koşulları araştırmak üzere "kontrol" işlevi görmesi özelliği ile çeşitli araştırmacılar tarafından kullanılmıştır (Mast vd. 2007, Erina vd. 2021, Debasitis 2022).

Baz değişkenler, havzadaki gözlem istasyonlarının tümünde gözlemi yapılması gereken kalite değişkenleri olup, havzanın bütün istasyonlarında aynıdır. Baz değişkenler, yukarıda bahsedildiği gibi, çeşitli havza özelliklerine bağlı olmakla birlikte, birçok havzada sıralanan ortak değişkenleri içerir. Chapman (1992) bu değişkenleri üç öncelik sınıfına göre ayırmıştır. Birincil öncelikli değişkenler olarak, sıcaklık, pH, askıda katı madde, çözünmüş oksijen ve biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ); ikincil öncelikli değişkenler olarak, renk, iletkenlik, kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), azot/fosfor bileşikler, toplam organik karbon (TOK), klorür ve magnezyum ve üçüncül öncelikli değişkenler olarak ise bulanıklık, kalsiyum (Ca), sodyum (Na), sülfat (SO<sub>4</sub>), klorofil-a, amonyak (NH<sub>3</sub>) ve potasyum (K) listelenmiştir (Chapman, 1992).

### **2.2 Diğer değişkenlerin seçimi**

Su kalitesi gözlem ağlarında ölçülmesi gereken diğer değişkenlerin belirlenmesi için, ölçüm amaçlarının ortaya konması gerekir. Amaçlar, gözlem ağının teknik tasarımını önemli ölçüde etkilemekte olup, iyi tanımlanmamış amaçlar gereksiz verinin toplanmasına ve gereksiz para, işgücü ve zaman kaybına neden olmaktadır. Ölçüm amaçları, temel olarak su kalitesinin mevcut durumunun ve zamana göre değişim eğilimlerinin belirlenmesi şeklinde tanımlanır. Bu hedeflerin temelinde ise iki ana unsur bulunmaktadır. Bunların birincisi, su kullanımı ve su kalitesinin mevcut veya değişen özelliklerinin, çeşitli kullanım amaçları için uygun olup olmadığının bilinmesi; ikinci unsur ise, etki değerlendirmesidir. Bu da, su kalitesinin yine mevcut ve değişen özelliklerine etki eden faktörlerin, akarsuya yapılan çeşitli deşarjlar dikkate alınarak ortaya konması işlevini tanımlamaktadır.

Bir havzada gözlemi yapılacak değişkenler, bir taraftan suyun kullanım amaçlarına, diğer taraftan kirleticilerin etkilerinin belirlenmesine yardımcı olan değişkenlerin süperpozisyonu olan bir liste olarak ortaya çıkar. Temel

olarak, bir izleme programı için seçilecek değişkenler hem su kullanımı hem de etki odaklı olabilmektedir.

Havzadaki farklı bölgeler, farklı etkileri ve farklı su kullanım amaçlarını yansıtabilirler. Bu nedenle, bir ağdaki her istasyon farklı bir değişken listesini izlemek zorunda kalabilir. Bu durum, istasyonlar arasında bilgi transferini azaltarak sistematik olmayan bir ağ işleyişine yol açabilir. Ancak yine de tüm istasyonlar aynı temel değişkenleri izlediğinden ve birkaç değişken hem su kullanımına hem de etki değerlendirme amaçlarına hizmet edebileceğinden, bu sorun pek sık ortaya çıkmaz. Böylece iki amaç için ortak bir liste oluşturulabilir. Ayrıca, su kullanımları ve etkileri kesinlikle belirli bir sahaya özgü değildir ve farklı bölgelerde su kalitesinin gözleminin yapılmasını gerektirebilir. Buna göre, belirli bir istasyonda gözlemi yapılacak değişkenlerin listesi, su kullanımı ve/veya etki değerlendirme amaçları ile ilgili baz değişkenler ve diğer değişkenler üst üste getirilerek elde edilmelidir (Harmancıoğlu vd. 2003).

Su kullanımlarıyla ilgili olarak, insanların suyu yaşam faaliyetleri çerçevesinde pek çok alanda kullandığı açıktır. Çeşitli su kullanımlarında önem ya da öncelik sırasını, toplumun ihtiyaçları belirlemektedir. Söz konusu kullanım yerleri aşağıdaki gibi listelenebilir:

- (a) Evsel su ihtiyacı
- (b) Endüstriyel su ihtiyacı
- (c) Tarımsal su ihtiyacı
- (d) Enerji üretimi
- (e) Balık yetiştiriciliği
- (f) Kabuklu su ürünleri yetiştiriciliği
- (g) Hayvan yetiştiriciliği
- (h) Yüzme ve diğer su sporları
- (i) Rekreatif ve estetik
- (j) Ekolojik/ can suyu ihtiyacı
- (k) Atıklar için alıcı ortam olarak kullanım

Yüzeysel sular, havzada bulunan doğal veya insan kaynaklı kirletici kaynaklardan etkilenirler. Bu kirletici kaynaklar, yüzeysel sulara ya yeni kirleticiler verirler ya da yüzeysel sularda mevcut bulunan kirletici konsantrasyonlarında artışa neden olurlar. Etki değerlendirmesi, bu kirletici kaynakların akarsulara verdiği kirlilikleri gözlem yapmak suretiyle belirlemeyi amaçlamaktadır. Doğal ve antropolojik kirletici kaynakları, kirlilik yüklerini alıcı su ortamına noktasal ya da yayılı kaynak biçiminde boşaltırlar. Noktasal kaynak kirliliği başlıca endüstriyel işletmelerden ve kentsel faaliyetlerden kaynaklanmakta ve yüzeysel sularda meydana gelen kirliliklerin ana kirletici kaynağını oluşturmaktadır. Noktasal olmayan kaynak kirliliği ise, su kullanımlarını olumsuz yönde etkileyen maddelerin yayılı halde alıcı sulara ulaşması biçiminde tanımlanabilir. Yayılı kaynak kirliliği, genellikle yağmur suyunun (veya kar suyunun) yüzeysel akışı veya zirai

sulama suyunun drenajı vasıtasıyla toprağın yüzeyinden veya arasından taşınır.

Değişken seçiminde su kullanımları ile bölgedeki etkin sektörlerin belirlenmesinden sonra, etki değerlendirmesi amacıyla da gözlemi yapılması gereken değişkenlerin saptanması, havzadaki noktasal, noktasal olmayan, endüstriyel ve endüstriyel olmayan kirletici kaynakların belirlenerek bu kaynakların denetimi için gözlemi yapılması zorunlu değişkenlerin, yine amaca göre önem sırası belirtilerek listelenmesine olanak sağlamaktadır. Su kullanımı değişkenlerinin seçiminde ülkeden ülkeye değişebilen su kalitesi standartları, yönetmelikleri, kılavuzları veya kriterleri etkin rol oynamaktadır. 2018 yılında T.C. Kalkınma Bakanlığı tarafından 2019-2023 yılları için hazırlanan “Su Kaynakları Yönetimi ve Güvenliği” başlıklı On Birinci Kalkınma Planı’na göre ülkemiz su kaynaklarının yaklaşık %73’ü sulama, %11’i sanayi ve %16’sı kentsel tüketim için kullanılmaktadır (T.C. Kalkınma Bakanlığı 2018). Ülkemiz koşullarında, alıcı ortam korunması amacı ile hâlihazırda geçerli çevre mevzuatı ve etkin su kullanım sektörleri öncelikleri çerçevesinde, gözlenmesi gereken su kalitesi değişkenlerinin, su kullanımları ve etki değerlendirilmesi açısından listelenmesinden sonra, “endüstriyel” ve “endüstriyel olmayan” şeklinde iki alt başlıkta daha detaylandırılmasının uygun olduğu görülmüştür. Böylelikle, su kullanımı odaklı değişkenlerin tüketimi ile çeşitli noktasal ve noktasal olmayan kaynakların yaydıkları kirleticiler açısından önem dereceleri listelenmiş olmaktadır.

Değişken seçimi için önerilen yaklaşımın birinci adımı olarak baz değişkenler, sonrasında ise “Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği” ile tanımlanan su kalitesi değişkenleri arasından, su kullanım sektörlerine ve etki değerlendirmesine yönelik ilgili değişkenleri içeren, gözlemi yapılması öncelikli su kalitesi değişkenleri belirlenmiş; su kullanımı ve etki odaklı değişkenler, endüstriyel ve endüstriyel olmayan tüketimlere göre ayrıldıktan sonra, her birine öncelik belirleyici işaretler verilmesi yoluyla listelenmiştir (Harmancıoğlu vd. 1993, 1999b, 2003).

Öncelikli değişkenlerin ülke çapında belirlenmesinden sonra, havza ölçeğine geçilerek, incelenen havzaya özgü ölçülmesi gereken değişkenlerin belirlenmesi hedeflenir. Bunun için, havzadaki tüm su kullanım düzenleri ile noktasal/noktasal olmayan kirletici kaynaklarının tür ve konumları saptanır. Bu çalışma sonunda, baz değişkenler değişmeyecek; buna karşılık su kullanımları ve etki odaklı sektörler havzaya özel olarak güncellenir. Havzada özel kirletici kaynakların mevcudiyeti saptanmış ise, bunlar

etki değerlendirmesi değişkenleri listesine yine önem derecelerine göre ilave edilir (Harmancıoğlu vd. 1999b, 2003).

Önerilen yaklaşımın üçüncü aşamasında ise, havza bazında oluşturulan tablolar esas alınarak, değişken seçimi istasyon bazına indirilir. Buna göre, mevcut istasyonlar civarındaki endüstriyel ve endüstriyel olmayan su kullanımları ve kirlenici kaynakları saptanır; daha sonra havza bazında belirlenen öncelikli değişkenler yardımıyla, bu kez istasyonların her biri için gözlemi yapılacak kalite değişkenleri ve bunların önem derecelerini gösteren listeler oluşturulur (Harmancıoğlu vd. 1999b, 2003).

Su kalitesi gözlem istasyonları özelinde belirlenen öncelikli değişkenler listesi, havzada etkili karar vermek amacı ile ilgili süreçlerde kullanılmak üzere alt yapı oluşturacak veri tabanını teşkil etmiş olur.

### **3. Kalite Değişken Seçimi için Önerilen AHS Destekli Yöntem**

Su kalitesinin izlenmesinde önemli bir temel oluşturan ve Chapman (1992) tarafından önerilen ve sonrasında Harmancıoğlu vd. (2003) tarafından geliştirilen öncelikli su kalitesi değişkenlerinin belirlenmesi adımlarından sonra, karar vericiler için pratik bir araç olabilmesi amacı ile karar vermede yaygın şekilde kullanılan çoklu kriterli bir karar verme yöntemi olan Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) kullanılarak değişken seçiminde ortak bir değerlendirme düzlemi oluşturulur. Anılan yöntem ile değişkenlere ait ağırlıklı katsayılar belirlenir ve tüm değişkenlerin ortak bir düzlemde değerlendirilmesi imkânı sağlanır.

Adımları sonraki bölümlerde detaylandırılan yaklaşımın uygulanması ile her kalite gözlem istasyonunda, o bölgeye ait su kalitesinin belirlenmesinde etkili olan/olmayan tüm değişkenlerin izlenmesi yerine, sadece ilgili değişkenlerin gözleminin yapılması, ölçüm maliyetlerinin azaltılmasının yanı sıra doğrudan amaca yönelik ölçümler yapılarak gereksiz işgücünü de ortadan kaldıracaktır.

Etkili bir karar verme sürecinde, hedeflenen amaçlara ulaşabilmek için mevcut seçenekler arasından en uygununu seçmek üzere kullanılan, Saaty (1980) tarafından geliştirilen AHS yöntemi en yaygın olarak kullanılan karar verme mekanizmasıdır. AHS, karmaşık problemlerin çözümünde basit bir karar verme aracıdır (Saaty 2006). Süreç, bir olayda etkili kriterlerin birbirleri ile ilişkilerinin belirlenmesinin yanı sıra, olayda etkili mekanizmaların ağırlıklarının belirlenmesinde de kullanılır. Havzaya ve sonrasında istasyon özelinde değişkenlerin aldığı önceliklendirme işaretleri sayısallaştırılarak, değişkenler, alacakları ağırlık katsayılarına göre ortak bir değerlendirme düzlemine

alınmış olur. Değişkenlerin AHS ağırlık katsayıları aşağıdaki Eş. 1 ile hesaplanır.

$$X_{ij} = \sum W_i * a_j \quad (1)$$

Burada;  $W_i$ , önceliklendirme listesinde  $i$  değişkeninin sahip olduğu sayısal önem değeri;  $a_j$ ,  $j$  sektörüne ait sektör ağırlık oranı ve  $X_{ij}$ , AHS ağırlık katsayısıdır.

AHS Değerlendirme Ölçeği'ne (Saaty 1980) göre, sektörler özelinde belirlenen değişkenlerin, sektör ağırlık oranları değerinde, AHS ağırlık katsayıları belirlenir. Bu değerlendirme işlemleri seçilen havza bazında ve istasyonlar özelinde yapılır. Önceliklendirme listelerinde değişkenlere atanan öncelik değerleri inceleme kriteri olarak kabul edilir. Bu inceleme kriteri, o istasyon özelinde belirlenen ve eşit önemde kabul edilen su kullanımı ve etki odaklı sektörler göre kıyaslanır.

Eğer uygulama mevcut bir gözlem ağının güncellenmesi için yapılıyor ise, değerlendirme sonucunda öncelikli olarak belirlenen su kalitesi değişkenleri, mevcut ölçüm güvenilirlikleri ile kıyaslanmaya tabi tutularak, mevcut sistemin etkinliği değerlendirilebilir. Eğer uygulama yeni bir gözlem ağının tasarımında kullanılıyor ise, hesaplamalar sonucunda belirlenen önceliklere göre ölçüm ağının oluşturulması çevresel ve ekonomik açılardan avantaj sağlayacaktır.

### **4. Yöntem ve Uygulama**

Su kalitesi gözlem istasyonlarında ölçümü yapılacak değişkenlerin seçimi işlemine önceki bölümlerde tanımlandığı gibi, standart ve yönetmeliklerde listelenen değişkenlerin tamamı yerine öncelikle, Chapman (1992) tarafından tanımlanan ve Çizelge 1'de listelenen baz değişkenlerden (Barbaros ve Harmancıoğlu 2019) başlanmalıdır. "Arka Plan Su Kalitesi" ni tanımlayan bu değişkenler, sonrasında, bölgedeki su kullanımları ve etki değerlendirilmesi kapsamındaki kirlilik deşarjları dikkate alınarak, inceleme yapılan bölge özelinde literatür değerler ve uzman görüşlerine de dayandırılacak şekilde güncellenmelidir. Güncellemeler, her bir değişkene ait öncelikler özelinde, o değişkene verilen "\*" değerlerine göre işlenmelidir. Öncelikli değişkenler listeleri oluşturulurken, istasyonun konumuna göre farklı su kullanımı ve etki odaklı değişkenlerin listelenmesi mümkündür. Farklı sayıda su kullanımı ve etki odaklı sektörler listelendiğinde, yine bölgeye özel literatür değerleri ve uzman görüşleri ışığında, sektörlerin farklı derecede öneme sahip oldukları dikkate alınmalıdır. Sonrasında ise önceliklendirme işleminin sayısallaştırılması yapılmalıdır. Sayısallaştırılmış değerler, Eş. 1 kullanılarak

her bir değişken için hesaplanan ağırlık katsayılarıdır. Bu katsayılar hesaplandıktan sonra, katsayı değerlerine göre değişkenler büyükten küçüğe doğru sıralanmalı ve ilgili istasyonda ölçülmesi gereken birincil, ikincil ve üçüncül derecede öncelikli değişkenler belirlenmelidir.

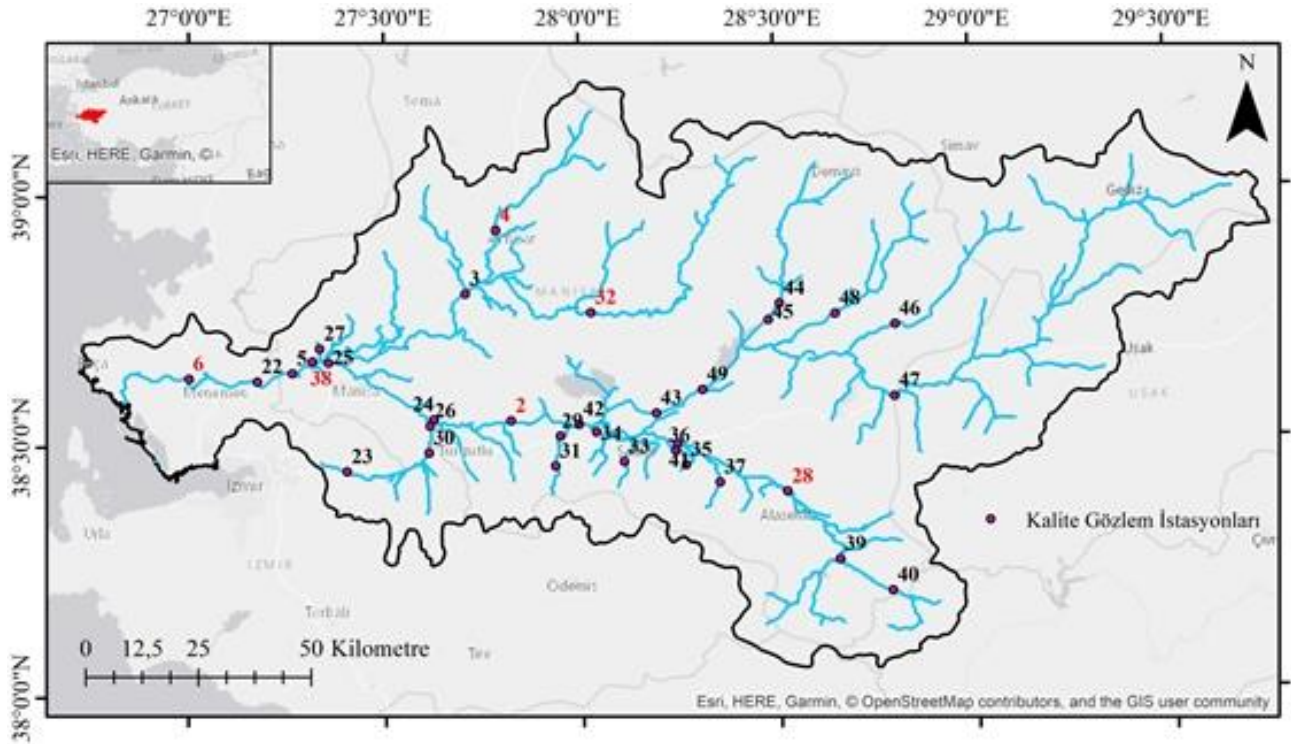
Sunulan çalışmada önerilen yaklaşım, Türkiye'nin batısında yer alan Gediz Nehri Havzası'ndaki izleme çalışmalarının programlanması için uygulanmıştır. Gediz Nehri Havzası, tarımsal faaliyetlerin yoğun olduğu nüfusu yüksek bir bölgedir. Nehir, 16775 km<sup>2</sup>'lik bir drenaj alanına sahiptir ve su kalitesi, konumları Şekil 1'de sunulan 33 örnekleme istasyonunda izlenmektedir.

Çalışma kapsamında nehrin farklı noktalarını temsil etmesi amacıyla seçilerek değerlendirilmesi yapılan, konumları Şekil 2'de gösterilen 6 istasyona ait su kullanımları ve deşarj kaynaklarına göre etkili olan faaliyet alanları Çizelge 2'de özetlenmiştir. Seçilen istasyonlar Şekil 1'de de farklı renk gösterimleri ile belirtilmiştir.

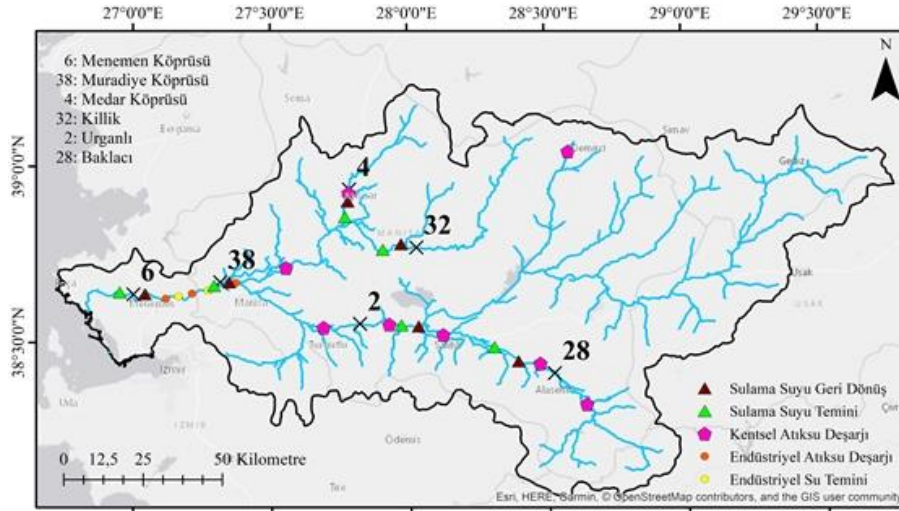
Gediz Nehri Havzası'nın yoğun faaliyet alanı içindeki bu 6 istasyonu için, önerilen yaklaşımın tüm adımları tamamlanmış, örnek olması açısından sadece 6 no.lu Menemen Köprüsü istasyonuna ait işlemler detayları ile sunulmuştur.

Çizelge 1. Baz değişkenler (Barbaros ve Harmancıoğlu 2019).

Değişkenler	Önem derecesi	Değişkenler	Önem derecesi
<b>Genel</b>		<b>Organik Madde</b>	
Sıcaklık	***	Toplam organik karbon	**
Renk	**	KOİ	**
Askıda katılar	***	BOİ	***
Bulanıklık/geçirgenlik	*	<b>İyonlar</b>	
İletkenlik	**	Sodyum	*
pH	***	Potasyum	*
Çözünmüş Oksijen	***	Kalsiyum	*
Klorofil a	*	Magnezyum	**
<b>Besi Maddesi</b>		Klorür	**
Amonyak	*	Sülfat	*
Nitrat/nitrit	**		
Fosfor/fosfat	**		



Şekil 1. Gediz Nehri Havzası'ndaki su kalitesi gözlem istasyonları.



Şekil 2. Gediz Nehri Havzası'ndaki su kullanımları ve havzaya yapılan deşarjlar.

Çizelge 2. Değerlendirmeye alınan 6 istasyonda etkili olan faaliyetler ve birim sektör ağırlık oranları.

İstasyonlar		Su Kullanımları		Etki Değerlendirmesi		Her bir faaliyet alanı için alınan birim sektör ağırlık oranı $a_j$
No.	Adı	Endüstriyel Olmayan	Endüstriyel	Endüstriyel Olmayan	Endüstriyel	
2	Urganlı	Sulama suyu	-	Sulama geri dönüş suyu Evsel atıksu (Salihli, Ahmetli ve Demirci)	-	0,33
4	Medar	Sulama suyu	-	Sulama geri dönüş suyu	-	0,33
6	Menemen	Sulama suyu	-	Sulama geri dönüş suyu Evsel atıksu (Akhisar)	Petrol (Petkim), Kâğıt (Viking), Makina Üretimi (Manisa OSB)	0,20
28	Baklacı	Sulama suyu	-	Sulama geri dönüş suyu	-	0,33
32	Killik	Sulama suyu	-	Sulama geri dönüş suyu	-	0,50
38	Muradiye Köprüsü	Sulama suyu	Petrol (Petkim) Kâğıt (Viking)	Sulama geri dönüş suyu Evsel atıksu (Saruhanlı ve Manisa)	Gıda, kimya ve makina sanayi (Nif Çayı)	0,125

Baz değişkenler listesine ilave olarak, Menemen Köprüsü istasyonuna ait öncelikli değişkenler listesi, bölgede yapılan önceki çalışmalar, literatür değerleri ve uzman görüşleri ile desteklenerek Çizelge 3'te sunulduğu şekli ile genişletilmiştir. Çizelge incelendiğinde, Menemen Köprüsü istasyonunun bulunduğu bölgedeki "su kullanımı kaynaklı" faaliyetin sadece sulama olduğu; bunun yanında "etki kaynaklı" faaliyetlerin (kirlilik kaynağı faaliyetlerin) sulama ile petrol, kâğıt ve makine endüstrileri olduğu görülmektedir. Çizelgedeki "\*" değerleri, değişkenlerin hangi öncelikte ölçülmesi gerektiği konusunda bilgi vermekte; örneğin, makine endüstrisinden kaynaklı kirliliği tespit etmek üzere ilgili istasyonda ağır metallerin ölçümünün yapılmasının, fekal koliform ölçümü yapılmasına göre daha öncelikli olduğunu; ağır metallerin

"\*\*\*", fekal koliformun ise "\*" değerini alması ile tanımlanmaktadır.

Önceliklendirme işleminde su içeriğinin, istasyonun bulunduğu kayaç yapısının ve/veya suya deşarj edilen kirlilik derecesinin herhangi bir etkisi dikkate alınmamakta, sadece bölgede etkin olan kullanım ve deşarjların belirlenebilmesine yönelik izleme yapılan istasyonlarda hangi değişkenlerin öncelikli olarak ölçülmesi gerektiğine yönelik literatür ve uzman bilgileri değerlendirilmeye alınmaktadır. İlgili değişken ölçümü yapıldıktan sonra kirlilik dereceleri ile ilgili ileri çalışmalar yapılabilir.

Seçilen 6 istasyona ait farklı sayıda su kullanımı ve etki odaklı sektörler listelense de çalışma kapsamında bu sektörlerin etki değerlendirmesinde eşit öneme sahip oldukları kabul edilmiştir. Örneğin, sunulan çalışmada,

Menemen Köprüsü istasyonu için tanımlanan 5 farklı temel sektörün bölgede eşit ağırlıkta etkili olduğu düşünülerek, birim sektör ağırlık oranı 0,20 olarak alınırken; bölgesinde 3 farklı temel sektörü olan Urganlı istasyonu için ise birim sektör ağırlık oranı 0,33 olarak alınmıştır (Çizelge 2). Önerilen yaklaşım farklı çalışma alanlarına uygulanırken, o bölgeye özgü olarak alınan bu oranlar, sektör adedi ve/veya etki derecelerine göre değişiklik gösterebilir. Bir sonraki adımda, Çizelge 3'te verilen önceliklendirme işaretlerinin (“\*”) sayısallaştırma işlemine geçilmiştir. Menemen Köprüsü istasyonuna ait su kullanımları ve etki değerlendirmelerine ait sayısallaştırılmış değişkenler listesi, her bir değişkene ait sektör ağırlık oranları ve Eş. 1 kullanılarak her bir değişken için hesaplanan AHS ağırlık katsayıları Çizelge 4'te verilmektedir. Önerilen yaklaşımda

kullanılan “\*” adetleri 1 ila 3 arasında olduğundan, birincil öncelikli kabul edilen “\*\*\*\*” toplam değerinin sayısallaştırıldıktan sonra 1 olması için, her bir yıldız değeri, 0,33 puana karşılık gelecek şekilde değerlendirmeye alınmıştır. Gediz Nehri Havzasından seçilen 6 istasyon için tüm bu adımlar tekrarlanmış ve Çizelge 5'te sunulduğu şekilde, su kullanımı ve etki odaklı sektörlerin ağırlıklı katsayılarına göre istasyonlarda öncelikli olarak ölçülmesi gereken değişkenlerin listesi belirlenmiştir. Bu liste belirlenirken, değişkenlere ait katsayılar % 30'luk dilimler üzerinden 3 gruba ayrılmış ve öncelik sıralandırılması bu üç grup özelinde renklendirilerek Çizelge 5'te sunulmuştur. Diğer bir deyişle; 0,70 – 1,00 aralığı “Birincil Öncelikli”, 0,30 – 0,69 aralığı “İkincil Öncelikli” ve 0 – 0,29 aralığı “Üçüncül Öncelikli” değişkenler olarak belirlenmiştir.

**Çizelge 3.** Gediz Nehri Menemen Köprüsü İstasyonu için su kullanımı ve etki odaklı değişkenlerin öncelikleri.

Değişkenler	Su Kullanımı Kaynaklı		Etki Kaynaklı		
	Endüstriyel olmayan		Endüstriyel		
	Sulama	Sulama	Petrol	Kâğıt	Makina
Ağır Metaller	*		**	*	***
Amonyak		***	**	*	*
Arsenik ve Selenyum	*	***			*
Askıda Katılar		***	***	***	***
Bakır		**			
BOİ		***	**	***	*
Bor	**	*	*	*	*
Bulanıklık	*	**	***	***	***
Cıva		***			
Çözünmüş Oksijen		***	***	***	*
Deterjanlar		*	**	*	*
Diğer Organikler				***	
Eh (redoks potansiyeli)		*	*	*	*
Fekal Koliform	***	**			
Fenoller			**	***	
Florür	*		*		
Fosfor bileşikleri		***			*
Kalıntı madde		***	*	*	*
Kalsiyum	*	*	*	*	*
Karbonat bileşikleri	*		*		
Klorür	***	***	**	*	*
KOİ		*	*	***	*
Koku		*	*	*	*
Magnezyum		*	*	*	
Mineral yağ	*		***		***
Nitrat/Nitrit		***		*	
Organik Azot		***		*	
Organik çözücüler				***	*
Patojen	*	**			
Pestisitler		***			
pH	**	*	*	*	*
Potasyum		*	*		
Renk		*	*	*	*
Sertlik		*	*	*	*
Sıcaklık		*	*	*	*
Silis			*		*
Siyanür					*
Sodyum	***	**	*		
Sülfat		*	**	***	*
Sülfid		*	***	***	
Toplam Çözünmüş Katılar	***				
Toplam Organik Karbon		*	*	***	*

\*\*\*: Birincil öncelikli değişkenler

\*\* : İkincil öncelikli değişkenler

\*: Üçüncül öncelikli değişkenler



Çizelge 4. Gediz Nehri Menemen Köprüsü İstasyonu için su kullanımı ve etki odaklı değişkenlerin AHS ağırlık katsayıları.

Değişkenler	Etkin Sektörlerde değişkenin sahip olduğu sayısal önem değeri, $W_i$						Sektör Ağırlık Oranları, $W_i * a_j$				Değişkene ait AHS ağırlık katsayıları $X_{ij} = \sum W_i * a_j$								
	Su Kullanımı Kaynaklı		Etki Kaynaklı				Su Kullanımı Kaynaklı					Etki Kaynaklı							
	Endüstriyel olmayan		Endüstriyel olmayan		Endüstriyel		Sulama		Petrol			Kâğıt		Makina					
	Sulama	0,33	Sulama	0	Sulama	0,66	Petrol	0,33	Kâğıt	0,99		Makina	0,99	Sulama	0,066	Petrol	0,132	Kâğıt	0,066
Ağır Metaller	0,33	0	0,66	0,33	0,33	0,99	0,33	0,99	0,132	0,066	0,198	0,462							
Amonyak	0	0,99	0,66	0,33	0,33	0,99	0,66	0,33	0,198	0,066	0,198	0,462							
Arsenik ve Selenyum	0,33	0,99	0	0,33	0,33	0,99	0,33	0,33	0,198	0,066	0,198	0,33							
Askıda Katılar	0	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,198	0,066	0,198	0,792							
Bakır	0	0,66	0	0	0	0	0	0	0,132	0	0	0,132							
BOİ	0	0,99	0,66	0,99	0,33	0,33	0,99	0,66	0,198	0,066	0,198	0,594							
Bor	0,66	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,132	0,066	0,066	0,396							
Bulanıklık	0,33	0,66	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,132	0,066	0,198	0,792							
Cıva	0	0,99	0	0	0	0	0	0	0,198	0	0	0,198							
Çözünmüş Oksijen	0	0,99	0,99	0,99	0,99	0,33	0,33	0,33	0,198	0,066	0,066	0,66							
Deterjanlar	0	0,33	0,66	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,066	0,132	0,066	0,33							
Diğer Organikler	0	0	0	0,99	0	0	0,99	0	0	0	0,198	0,198							
Eh (redoks potansiyeli)	0	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,066	0,066	0,066	0,264							
Fekal Kolliform	0,99	0,66	0	0	0	0	0	0	0,198	0,132	0	0,33							
Fenoller	0	0	0,66	0,99	0	0	0,99	0	0	0,132	0,198	0,33							
Florür	0,33	0	0,33	0	0	0	0,33	0	0,066	0	0	0,132							
Fosfor bileşikleri	0	0,99	0	0	0	0,33	0,33	0,33	0	0,198	0	0,264							
Kalıntı madde	0	0,99	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0	0,198	0,066	0,396							
Kalsiyum	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,066	0,066	0,066	0,33							
Karbonat bileşikleri	0,33	0	0,33	0	0	0,33	0,33	0	0,066	0	0	0,132							
Klorür	0,99	0,99	0,66	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,198	0,132	0,066	0,66							
KOİ	0	0,33	0,33	0,33	0,99	0,33	0,33	0,33	0	0,066	0,198	0,396							
Koku	0	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0	0,066	0,066	0,264							

Çizelge 4. (Devamı).

Değişkenler	Etkin Sektörlerde değişkenin sahip olduğu sayısal önem değeri, $W_i$						Sektör Ağırlık Oranları, $W_i * a_j$						Değişkene ait AHS ağırlık katsayıları $X_{ij} = \sum W_i * a_j$	
	Su Kullanımı Kaynaklı			Etki Kaynaklı			Su Kullanımı Kaynaklı			Etki Kaynaklı				
	Endüstriyel olmayan		Endüstriyel	Endüstriyel olmayan		Endüstriyel	Sulama		Petrol	Sulama		Kâğıt		Makina
	Sulama	0,33		Petrol	0,33		Sulama	0,33		Sulama	0,066			
Magnezyum	0	0,33	0	0,33	0,33	0	0	0,066	0,066	0,066	0	0	0,198	
Mineral yağ	0,33	0	0,99	0	0,99	0	0,99	0,066	0	0,198	0	0,198	0,462	
Nitrat/Nitrit	0	0,99	0	0,33	0	0,33	0	0	0,198	0	0,066	0	0,264	
Organik Azot	0	0,99	0	0,33	0	0,33	0	0	0,198	0	0,066	0	0,264	
Organik çözücüler	0	0	0	0,99	0,33	0,33	0	0	0	0,198	0	0,066	0,264	
Patojen	0,33	0,66	0	0	0	0	0,066	0,132	0	0	0	0	0,198	
Pestisitler	0	0,99	0	0	0	0	0	0,198	0	0	0	0	0,198	
pH	0,66	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,132	0,066	0,066	0,066	0,066	0,066	0,396	
Potasyum	0	0,33	0,33	0,33	0	0	0	0,066	0,066	0	0	0	0,132	
Renk	0	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0	0,066	0,066	0,066	0,066	0,066	0,264	
Sertlik	0	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0	0,066	0,066	0,066	0,066	0,066	0,264	
Sıcaklık	0	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0	0,066	0,066	0,066	0,066	0,066	0,264	
Silis	0	0	0,33	0	0,33	0	0	0,066	0,066	0	0,066	0,066	0,132	
Siyanür	0	0	0	0	0	0,33	0	0	0	0	0	0,066	0,066	
Sodyum	0,99	0,66	0,33	0	0	0	0,198	0,132	0,066	0	0	0	0,396	
Sülfat	0	0,33	0,66	0,99	0,33	0,33	0	0,066	0,132	0,198	0,066	0,066	0,462	
Sülfitt	0	0,33	0,99	0,99	0	0	0	0,066	0,198	0,198	0	0	0,462	
Toplam Çözünmüş Katılar	0,99	0	0	0	0	0	0,198	0	0	0	0	0	0,198	
Toplam Organik Karbon	0	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0	0,066	0,066	0,198	0,066	0,066	0,396	

Çizelge 5. Çalışma kapsamında incelenen 6 istasyondaki öncelikli değişkenlerin AHS ağırlık katsayıları ve önceliklere göre sıralanmış listesi.

5002 - Organik		5003 - Killik		5004 - Medar		5005 - Muradiye		5006 - Menemen		5041 - Baklaci	
Değişkenler	$X_{ij}$	Değişkenler	$X_{ij}$	Değişkenler	$X_{ij}$	Değişkenler	$X_{ij}$	Değişkenler	$X_{ij}$	Değişkenler	$X_{ij}$
Klorür	1,0	Klorür	1,0	Klorür	1,0	Klorür	0,7	Askıda Katılar	0,8	Klorür	1,0
Fekal koliform	0,9	Fekal koliform	0,8	Fekal koliform	0,9	Çözünmüş Oksijen	0,6	Bulanıklık	0,8	Fekal koliform	0,9
Diğer patojenler	0,7	Sodyum	0,8	Diğer patojenler	0,7	Askıda Katılar	0,6	Klorür	0,7	Diğer patojenler	0,7
Sodyum	0,7	Arsenik/Selenyum	0,7	Sodyum	0,7	pH	0,6	Çözünmüş Oksijen	0,7	Sodyum	0,7
Çözünmüş oksijen	0,7	Diğer patojenler	0,5	Çözünmüş oksijen	0,7	Fosfor bileşikleri	0,5	BOI	0,6	Çözünmüş oksijen	0,7
Amonyak	0,7	pH	0,5	Amonyak	0,7	Amonyak	0,5	Amonyak	0,5	Amonyak	0,7
Nitrit/Nitrat	0,7	Çözünmüş oksijen	0,5	Nitrit/Nitrat	0,7	BOI	0,5	Sülfat	0,5	Nitrit/Nitrat	0,7
Organik azot	0,7	Amonyak	0,5	Organik azot	0,7	iletkenlik	0,5	Süfit	0,5	Organik azot	0,7
Fosfor bileşikleri	0,7	Nitrit/Nitrat	0,5	Fosfor bileşikleri	0,7	Nitrat/Nitrit	0,5	Ağır Metaller	0,5	Fosfor bileşikleri	0,7
Askıda katı madde	0,7	Organik azot	0,5	Askıda katı madde	0,7	Sertlik	0,5	Mineral yağ	0,5	Askıda katı madde	0,7
BOI	0,7	Fosfor bileşikleri	0,5	BOI	0,7	Fekal Koliform	0,5	Sodyum	0,4	BOI	0,7
iletkenlik	0,5	Askıda katı madde	0,5	iletkenlik	0,5	Kalsiyum	0,4	Kalıntı madde	0,4	iletkenlik	0,5
pH	0,4	BOI	0,5	pH	0,4	Sodyum	0,4	Bor	0,4	pH	0,4
Kalıntı maddesi	0,4	Kalıntı maddesi	0,5	Kalıntı maddesi	0,4	Organik Azot	0,4	KOI	0,4	Kalıntı maddesi	0,4
Arsenik/Selenyum	0,4	Cıva	0,5	Arsenik/Selenyum	0,4	Sülfat	0,4	pH	0,4	Arsenik/Selenyum	0,4
Cıva	0,4	iletkenlik	0,5	Cıva	0,4	Deterjanlar	0,4	Toplam Organik Karbon	0,4	Cıva	0,4
Kalsiyum	0,3	Toplam çözünmüş katı madde	0,5	Kalsiyum	0,3	Diğer Patojenler	0,4	Fekal Koliform	0,3	Kalsiyum	0,3
Bor	0,3	Pestisitler	0,5	Bor	0,3	KOI	0,3	Kalsiyum	0,3	Bor	0,3
Sülfür	0,3	Bor	0,5	KOI	0,3	Mineral yağ	0,3	Deterjanlar	0,3	KOI	0,3
Bakır	0,3	Kalsiyum	0,3	Sülfür	0,3	Kalıntı madde	0,3	Arsenik ve Selenyum	0,3	Süfit	0,3
Deterjanlar	0,3	Bakır	0,3	Bakır	0,3	Pestisitler	0,3	Fenoller	0,3	Bakır	0,3

\* Değişkenlerin öncelik sıralandırılması, %30'luk dilimler üzerinden yapılmış ve renklendirilmiştir.

Birincil öncelikli ölçümü yapılması gereken değişkenler

İkincil öncelikli ölçümü yapılması gereken değişkenler

Üçüncül öncelikli ölçümü yapılması gereken değişkenler



Çizelge 5. (Devamı).

İstasyonlar											
5002 - Urganlı		5003 - Kılık		5004 - Medar		5005 - Muradiye		5006 - Menemen		5041 - Baklacı	
Değişkenler	$X_{ij}$	Değişkenler	$X_{ij}$	Değişkenler	$X_{ij}$	Değişkenler	$X_{ij}$	Değişkenler	$X_{ij}$	Değişkenler	$X_{ij}$
Mineral yağ	0,3	KOI	0,2	Deterjanlar	0,3	Magnezyum	0,3	Nitrat/Nitrit	0,3	Deterjanlar	0,3
Toplam çözünmüş katı madde	0,3	Sülfür	0,2	Mineral yağ	0,3	Karbonat bileşikleri	0,3	Organik Azot	0,3	Mineral yağ	0,3
Pestisitler	0,3	Deterjanlar	0,2	Toplam çözünmüş katı madde	0,3	Sıcaklık	0,2	Fosfor bileşikleri	0,3	Toplam çözünmüş katı madde	0,3
KOI	0,2	Mineral yağ	0,2	Pestisitler	0,3	Arsenik ve Selenyum	0,2	Sıcaklık	0,3	Pestisitler	0,3
Demir	0,2	Sıcaklık	0,2	Demir	0,2	Sülfür	0,2	Renk	0,3	Demir	0,2
Kurşun	0,2	Renk	0,2	Kurşun	0,2	Toplam Organik Karbon	0,2	Koku	0,3	Kurşun	0,2
Sıcaklık	0,2	Koku	0,2	Sıcaklık	0,2	Ağır Metaller	0,2	Eh (redoks potansiyeli)	0,3	Sıcaklık	0,2
Renk	0,2	Eh (redoks potansiyeli)	0,2	Renk	0,2	Bor	0,2	Sertlik	0,3	Renk	0,2
Koku	0,2	Sertlik	0,2	Koku	0,2	Renk	0,2	Organik çözücüler	0,3	Koku	0,2
Eh (redoks potansiyeli)	0,2	Potasyum	0,2	Eh (redoks potansiyeli)	0,2	Koku	0,2	Patogen	0,2	Eh (redoks potansiyeli)	0,2
Sertlik	0,2	Magnezyum	0,2	Sertlik	0,2	Eh (redoks potansiyeli)	0,2	Cıva	0,2	Sertlik	0,2
Potasyum	0,2	Sülfat	0,2	Potasyum	0,2	Silis	0,2	Toplam Çözünmüş Katılar	0,2	Potasyum	0,2
Magnezyum	0,2	Toplam organik karbon	0,2	Magnezyum	0,2	Organik çözücüler	0,2	Pestisitler	0,2	Magnezyum	0,2
Sülfat	0,2	Flor	0,2	Sülfat	0,2	Çözünmüş katılar	0,2	Magnezyum	0,2	Sülfat	0,2
Toplam organik karbon	0,2	Ağır metaller	0,2	Toplam organik karbon	0,2	Florür	0,2	Diğer Organikler	0,2	Toplam organik karbon	0,2
Flor	0,1	Karbonat bileşikleri	0,2	Flor	0,1	Fenoller	0,2	Bakır	0,1	Flor	0,1

\* Değişkenlerin öncelik sıralandırılması, % 30'luk dilimler üzerinden yapılmış ve renklendirilmiştir.

Birincil öncelikli ölçümü yapılması gereken değişkenler İkincil öncelikli ölçümü yapılması gereken değişkenler Üçüncül öncelikli ölçümü yapılması gereken değişkenler

#### **4. Sonuçlar ve Değerlendirme**

Gözlemi yapılacak su kalitesi değişkenlerinin seçimi, aralarından seçim yapılabilecek birden çok değişkenin olması nedeniyle, önemli maliyet sonuçları olan oldukça karmaşık bir konudur. Pratik olarak ne değişkenlerin seçiminde ne de gözlemi yapılan mevcut seçilmiş bir değişken listesinin değerlendirilmesinde kullanılabilir standart bir yöntem bulunmamaktadır. Bu amaçla, sunulan çalışma ile gözlem istasyonlarında hangi su kalitesi değişkenlerinin izlenmesi gerektiğine ilişkin değişken seçimi sürecini kolaylaştırabilecek bir yaklaşım ortaya koyulmuştur. Sunulan çalışma, su kullanımı ve etki odaklı değişken seçimini takiben ağırlık katsayılarının belirlenmesi ile karar verme süreçlerinde etkin bir yaklaşım önermiştir.

Havzadaki mevcut ölçüm ağında, klasik bir şekilde her istasyonda aynı değişkenlerin gözleminin yapılması, ekonomik olmayan da bir çözümdür. Aksine, bölgeye özgü su kullanımları ve etki odaklı derecelendirme ile belirlenen öncelikli değişkenlerin gözleminin yapılması ile su kirliliğinin tam anlamıyla belirlenebileceği etkin bir ölçüm ağı tasarımı daha etkin bir yaklaşımdır. Önerilen yaklaşım Gediz Nehri Havzası'ndaki su kalitesi izleme ağında örneklendirilmiştir.

Gediz Nehri Havzasında yoğun faaliyet alanlarında bulunan 6 istasyon için önerilen yaklaşım adımları takip edilmiş ve sonuç tablolar incelendiğinde, her istasyonda öncelikli değişkenlerin farklı olduğu görülmüştür. Karar vericilerin amaç fonksiyonundaki değerlerine göre öncelik grup sayıları yine farklılık gösterebilecektir.

Çalışma kapsamında, incelenen tüm istasyonlar için, su kullanımı ve etki değerlendirmelerine göre literatür ve uzman görüşlerine göre önceliklendirmeler ile her bir değişkene ait hesaplanan ağırlık katsayıları ile önceliklendirme yaklaşımının örtüştüğü gözlenmiştir. Sektör ağırlık oranları sunulan çalışmada eşit olarak alınmış olsa da çalışma alanlarına özgü koşullar dikkate alınarak bu oranların değiştirilebileceği ifade edilmelidir.

Belirlenen birincil önceliğe sahip değişkenler içinde, hemen hemen her istasyonda çözülmüş oksijen, sodyum, klorür, fekal koliform ve nitrit/nitrat değişkenleri görülmektedir. Suda ölçülen yüksek miktarlardaki nitrit ve nitrat değerleri ağırlıklı olarak evsel atıksu deşarjlarının göstergesidir. Sodyum ve klorür ise suda doğal olarak bulunabileceği gibi (kayaçlardan suya geçmesi vb. sebeplerle) tarımsal drenaj sularının etkisi, endüstriyel deşarjlar ile yüzeysel sularda bulunabilecektir. Çözülmüş oksijen de organik kirliliğin bir göstergesidir ve sucul yaşamın sürdürülebilirliği için izlenmesi gereken değişkendir.

Farklı öncelik derecelerine sahip olarak, yine tüm istasyonlarda gözlemi yapılması gereken değişkenler arasında listelenen arsenik (As) ise toksik olarak bilinen, ana kaynağı madencilik faaliyetleri, pestisitler ve volkanik

kayaçlar olan ve suda yüksek değerlerde ölçülmesi ile havzadaki yoğun tarım faaliyetlerine işaret eder.

Bu değerlendirmelerin ardından ağırlıklı olarak evsel deşarjlar ve tarımsal drenaj sularının yüzeysel sudaki etkilerinin belirlenmesinde gösterge değişkenler havzada öncelikli olarak izlenmesi gerektiği sonucuna varılabilir.

Öncelikli değişkenlerin izlenmesi ile su kalitesi izleme programlarının maliyet etkinliği artırılabilir ve kaynakların daha verimli kullanılması sağlanabileceği gibi, öncelikli değişkenlere odaklanmak, su kaynaklarının yönetimini daha etkili hale getirebilir. Aynı zamanda, daha az değişkenin izlenmesi, veri toplama, işleme ve analiz süreçlerini basitleştirebilir. Bu da daha net ve anlamlı sonuçların elde edilmesine yardımcı olabilir. Sıralanan bu avantajlarının yanı sıra, olabilecek dezavantajlar ise tüm kalite değişkenlerinin ölçülmemesi, su kaynağındaki geniş bir yelpazedeki potansiyel riskleri ve değişiklikleri yakalamakta yetersiz kalabilir. Bu durum, özellikle nadir görülen veya beklenmeyen kirlilik olaylarında eksiklikler ortaya çıkarabilir; sadece öncelikli değişkenler üzerine odaklanmak, sucul ekosistemlerin karmaşıklığını ve etkileşimlerini tam olarak değerlendirmeyi zorlaştırabilir. Bu durumun uzun vadeli risk yönetimi stratejilerinin geliştirilmesini zorlaştırabileceği düşünülerek, önerilen yaklaşımın belirli zaman aralıklarında uygulama bölgesindeki etkinliğinin kontrol edilmesi ve güncellenmesi gerekecektir.

Bu avantajlar ve dezavantajlar göz önünde bulundurularak, su kalitesi gözlem istasyonlarında hangi değişkenlerin ölçülmesi gerektiği ve hangi sıklıkla ölçüm yapılması gerektiği, spesifik bir sucul sistem ve hedeflenen amaçlara bağlı olarak dikkatlice değerlendirilmelidir. Her durumda, karar alıcılar, kaynakların en etkin şekilde kullanılması ve su kaynaklarının korunması için uygun dengeyi bulmak için bilimsel ve bölgesel bilgilere dayalı kararlar almaları önemlidir.

Sonuç olarak, yüzeysel sularda kalite gözlem istasyonlarında izlenmesi gereken değişkenlerin seçiminde AHS destekli yaklaşımın, öncelikli değişkenlerin tespitinde doğru ve etkin bir biçimde kullanılabilirliği ortaya konmuştur. Bu yöntem yeni bir su kalitesi gözlem ağı tasarlanması ve mevcut gözlem ağına ölçümü yapılması gerekli değişkenlerin revizyonu süreçlerinde planlayıcılar ve karar vericiler için oldukça yararlı bir araç olacaktır. Değişken seçimi sürecinde yer alan tüm yaklaşımlar ve uygulama adımları, zaman içinde değişken ve oldukça dinamik olduğundan, gözlemi yapılacak değişken listelerinin zaman zaman yeniden değerlendirilmesi gerektiği unutulmamalıdır.

#### **Etik Standartlar Bildirgesi**

Yazar tüm etik standartlara uyduğunu beyan eder.

#### **Yazarlık Katkı Beyanı**

Çalışmadaki tüm literatür ve hesaplamalar ile taslak ve orijinal olarak tüm yazımlar Yazar tarafından yürütülmüştür.

#### Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarın bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edeceği herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

#### Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

#### Teşekkür / Acknowledgement

Yazar, bu çalışmanın temelini oluşturan ve EWRA 11. Dünya Kongresi'nde (11<sup>th</sup> World Congress on Water Resources and Environment (EWRA 2019), Madrid/İspanya, 25-29 Haziran 2019) sözlü olarak sunulan "Selection of variables to be sampled in water quality monitoring networks" adlı bildiriye katkılarında dolayı Prof. Dr. Nilgün Harmancıoğlu'na teşekkür etmekte, kendisini saygı ve rahmetle anmaktadır.

#### 5. Kaynaklar

Abed, S. A., Ewaid, S.H. ve Al-Ansari, N., 2019. Evaluation of Water quality in the Tigris River within Baghdad, Iraq using Multivariate Statistical Techniques, Journal of Physics: Conference Series. *J. Phys.: Conf. Ser.* **1294**, 072025.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1294/7/072025>

Barbaros, F. ve Harmancıoğlu, N., 2019. Selection of variables to be sampled in water quality monitoring networks, 11. Dünya Su Kaynakları ve Çevre Kongresi: Sürdürülebilir Bir Gelecek için Su Kaynaklarının Yönetimi-EWRA 2019, 25-29 Haziran 2019, Madrid, İspanya, 125-126.

Barış, N., Şimşek, C., Gündüz, O., Elçi, A., (2007). Cumaovası Yüzeysel Su Kalitesinin Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) ile Değerlendirilmesi, TMMOB Çevre Mühendisliği Odası, 7. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi, Yaşam Çevre Teknoloji, 229-237.

Bulut, M. ve Birben, Ü., 2019. AB Su Çerçeve Direktifinin Türkiye'de Su Kaynakları Yönetimine Etkisi. Turkish Journal of Forestry, **20(3)**: 221-233.  
<https://doi.org/10.18182/tjf.562550>

Canter, L. W., 1985. River Water Quality Monitoring, CRC Press, Taylor & Francis Group, 186.

Chapman, D., 1992. Water Quality Assessments —A Guide to the Use of Biota, Sediments and Water in Environment Engineering, Chapman & Hall Ltd., London, 585.

Çetinkaya, C.P., Yiğit, S.D., 2019. Su Kalitesi Gözlem Ağlarının Performansının Değerlendirilmesi için Bir Yöntem Önerisi ve Gediz Havzasında Uygulanması. DEUFMD, **21(62)**, 483-497.  
<https://doi.org/10.21205/deufmd.2019216214>

Çetinkaya, C. P., Engin, A., 2018. Su Kalitesi Gözlem Ağlarında Örnekleme için İzlenecek Yol Rotası Optimizasyonuna Bir Yaklaşım ve Gediz Havzasına

Uygulanması. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, **18 (1)**, 265-275.  
<https://doi.org/10.5578/fmbd.66459>

Debasitis, E. A., 2022. Estimating Natural Background Water Quality in California Rivers, California State Üniversitesi, Yüksek Lisans tezi, 53.

Do, H.T., Lo, S.L., Phan Thi, L.A., 2013. Calculating of river water quality sampling frequency by the analytic hierarchy process (AHP). Environ Monit Assess **185**, 909–916.  
<https://doi.org/10.1007/s10661-012-2600-6>

Doğanay, E., Soytürk, O., Parlar Güngör, E., Aybuğa, K., Kılınc, S. F., 2019. Su Kalitesi İzleme, (Editörler: Zeliha Selek, Yakup Karaaslan) Ekosistem Esaslı Su Kalitesi Yönetimi, Tarım ve Orman Bakanlığı, e-ISBN: 978-605-82367-0-7.

Erina, O., Tereshina, M., Shinkareva, G., Sokolov, D. ve Lychagin, M., 2021. Natural background and transformation of water quality in the Moskva River, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. **834**, 012055.  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/834/1/012055>

Gündüz, O., 2015. Su Kaynaklarının İzlenmesi: Zorluklar ve Fırsatlar, Ulusal Su ve Sağlık Kongresi, 26-30 Ekim 2015, Antalya.

Harmancıoğlu N.B. ve Yevjevich V., 1986. Transfer of Information Among Water Quality Variables of the Potomac River, Phase III: Transferable and Transferred Information, Report to the UDC Water Resour. Res. Cent, Washington, D.C., Int. Water Resour. Inst., Haziran 1986.

Harmancıoğlu, N., Özer, A., Alpaslan, N., 1987. Su kalitesi ölçümlerinin değerlendirilmesi. Ankara, TMMOB, İnşaat Mühendisleri Odası, Türkiye İnşaat Mühendisliği IX. Teknik Kongresi, Bildiriler, Kasım 16 20, 1987, C.II, 113-129.

Harmancıoğlu, N., Alpaslan, N., Alkan, A., Özkul, S., Mazlum, S., Fıstıkoğlu, O., 1993. Su Kaynaklarının Yönetimi ve Kirlilik Kontrolünde Su Kalitesinin İzlenmesi, Değerlendirilmesi ve Ölçüm Ağı Tasarımı, TÜBİTAK, Deniz Bilimleri ve Balıkçılık Araştırma Grubu-DEBAG için yapılan, DEBAG-23 no.lu araştırma projesi.

Harmancıoğlu, N. B., Alpaslan, N., Singh, V. P., 1994. Design of a basin-wide water quality monitoring network in Turkey, in: G. Tsakiris and M.A. Santos (eds.), Advances in Water Resources Technology and Management, A.A. Balkema, Rotterdam, 29–36.

Harmancıoğlu, N. B., Alpaslan, M. N., Whitfield, P., Singh, V.P., Literathy, P., Mikhailov, N., Fiorentino, M., 1998. NATO Scientific Affairs Division tarafından desteklenen ENVIR.LG950779 no.lu, ABD, Kanada, Macaristan, İtalya, Türkiye ve Rusya ortaklığı ile yürütülen NATO Linkage Grant projesi raporu.

Harmancıoğlu N. B., Fıstıkoğlu O., Özkul S. D., Singh V. P., Alpaslan N., 1999a. Water Quality Monitoring

- Network Design. Kluwer Academic Publishers, Water Science and Technology Library, Volume 33, 290 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-9155-3>
- Harmancıoğlu, N. B., Alpaslan, M. N., Özkul, S., İçağa, Y., Fıstıkoğlu, O., Onuşluel, G., Barbaros, F., 1999b. DSİ'nin Su Kalitesi İzleme Ağlarında Verimlilik Analizi ve Ölçüm Ağı İyileştirilmesi – I, TÜBİTAK-YDABÇAG tarafından desteklenen ve DSİ Genel Müdürlüğü İçmesuyu ve Kanalizasyon Dairesi ile ortaklaşa sürdürülen, YDABÇAG-489 no.lu uygulamalı araştırma projesi raporu.
- Harmancıoğlu, N. B., Özkul, S., Fıstıkoğlu, O., Onuşluel, G., Gül, A., Çetinkaya, C.P., Barbaros, F., 2003. DSİ'nin Su Kalitesi İzleme Ağlarında Verimlilik Analizi ve Ölçüm Ağı İyileştirilmesi – II, TÜBİTAK-YDABAG tarafından desteklenen ve DSİ Genel Müdürlüğü İçmesuyu ve Kanalizasyon Dairesi ile ortaklaşa sürdürülen, 100Y102 no.lu uygulamalı araştırma projesi nihai raporu.
- Huthmann, G., 1979. Modeling of water quality systems by multiple frequency response analysis, in: H.J. Morel-Seytoux (ed.), Surface and Subsurface Hydrology, Proceedings of the Fort Collins Third International Hydrology Symposium on Theoretical and Applied Hydrology, July 27-29, 1977, Water Resources Publications, 662-681.
- Karpuzcu, M., Senes, S., Akkoyunlu, A., 1987. Design of monitoring systems for water quality by principal component analysis and a case study, Proceedings of Int. Symp. on Environmental Management: Environment'87, 673-690.
- Literathy, P., 1997. Transboundary Water Pollution Monitoring: Data Validation and Interpretation. In: Harmancıoğlu N. B., Alpaslan M. N., Özkul S. D., Singh V. P. (eds) Integrated Approach to Environmental Data Management Systems. NATO ASI Series (Series: 2: Environment), vol 31. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-5616-5\\_17](https://doi.org/10.1007/978-94-011-5616-5_17)
- Mast, M. A., Verplanck, P. L., Wright, W. G. ve Bove D. J., 2007. Characterization of Background Water Quality, Chapter E7 of "Integrated Investigations of Environmental Effects of Historical Mining in the Animas River Watershed, San Juan County, Colorado", Edited by Stanley E. Church, Paul von Guerard, and Susan E. Finger, Professional Paper 1651, ABD İçişleri Bakanlığı, Birleşik Devletler Jeoloji Araştırmaları, 40.
- Mazlum, S., 2002. The selection of water quality variables for river-basin monitoring networks, Fresenius Environmental Bulletin, **11**, 3-9.
- Pang, Z.L., Chang, H.J., Li, Y.Y., Zhang, N.Q., Du, R.Q., Hu, L.Q., 2008. Analytical hierarchy process (AHP) evaluation of water quality in Danjiangkou reservoir-source of the middle line project to transfer water from south to north, China, Acta Ecologica Sinica, **28**: 1810-1819.
- Saaty, T.L., 1980. The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill, New York.
- Saaty, T.L., 2006. Rank from Comparisons and from Ratings in the Analytic Hierarchy/Network Process, European Journal of Operational Research, **68**: 557-570. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.032>
- Sanders, T. G., Ward, R. C., Loftis, J. C., Steele, T. D., Adrian, D. D., Yevjevich, V., 1983. Design of Networks for Monitoring Water Quality, Water Resources Publications, Littleton, Colorado, 336.
- T.C. Kalkınma Bakanlığı, 2018. On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023) Su Kaynakları Yönetimi ve Güvenliği, Su Kaynakları Yönetimi ve Güvenliği, Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Ankara.
- Uyanık, S. ve Cebe, A., 2017. AB Su Çerçeve Direktifi Kapsamında Biyolojik Kalite Unsurları ile Su Kalitesinin izlenmesi. Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi, **3**, 64-72.
- UNESCO-WMO, 1972. Hydrologic Information Systems: Studies and Reports in Hydrology, In: G. W. Whetstone, and J.J. Grigoriev (ed.), Panel on SAPHYDATA, **14**, 74.
- Yevjevich, V. ve Harmancıoğlu, N. B., 1985. Modeling Water Quality Variables of Potomac River at the Entrance to its Estuary, Phase II (Correlation of Water Quality Variables within the Framework of Structural Analysis), Report to D.C. Water Resources Research Center of the University of the District of Columbia, Washington, D.C., 59.
- Yılmaz, B. ve Özçelik, C., 2018. Evaluation of Water Quality Monitoring Networks Using Principal Component Analysis: A case of Gediz River Basin, Celal Bayar University Journal of Science, **14** (1), 65-75. <https://doi.org/10.18466/cbayarfbe.356774>

#### İnternet kaynakları

- 1- Farrell-Poe, K., 2005. Water Quality & Monitoring, Arizona Watershed Stewardship Guide: Water Quality & Monitoring, Ekim 2020. <https://extension.arizona.edu/sites/extension.arizona.edu/files/pubs/az1378c.pdf>
- 2- Resmî Gazete, 2015. Yüzeysel Su Kalitesi Yönetimi Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik, Kasım, 2020 <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2015/04/20150415-18.htm>
- 3- SÇD, 2000. Avrupa Parlamentosu ve Konseyinin 2000/60/EC Sayılı Su Çerçeve Direktifi, Kasım, 2020. [https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/ab%20mevzuat%C4%B1/2000-60-Water%20Framework%20Directive-TR%20\(1\)%20\(2\).pdf](https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/ab%20mevzuat%C4%B1/2000-60-Water%20Framework%20Directive-TR%20(1)%20(2).pdf)
- 4- WWF-Türkiye, 2012. Yaşayan Nehirler, Yaşayan Ege Projesi, Su Kalitesi ve İzleme Çalıştayı, Kasım 2020. <https://www.wwf.org.tr/?1244>



## ESD Yöntemiyle Zırh Çelikleriyle Kaplanmış Inconel 718 Alaşımının Aşınma Davranışlarının İncelenmesi

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 07.05.2024

Kabul/Accepted: 19.08.2024

Yayımlandı/Published: 02.12.2024

### Investigation of Wear Behavior of Inconel 718 Alloy Coated with Armor Steels Using ESD

Yusuf KAYALI<sup>1\*</sup>, Merve ERMAK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye

<sup>2</sup>Kameks Eksantrik Milleri, İstanbul, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

Inconel-718, en yaygın olarak kullanılan en önemli nikel esaslı süper alaşımlardan biridir. Inconel-718'in benzersiz özelliklerinden dolayı yaygın kullanıma rağmen, (ve diğer birçok süper alaşımın) aşınma özellikleri, özellikle yüksek sıcaklıklarda genellikle yetersiz kabul edilir. Bu yüzden günümüzde birçok yüzey işlemine tabii tutulmaktadır. Metalik yüzeylerde sert ve aşınmaya dayanıklı bir kaplama üretmek için gelecek vaat eden yöntemlerden biride Elektro Kıvılcım Biriktirme (ESD) yöntemidir. ESD metodu, diğer geleneksel yöntemlere kıyasla çok daha kuvvetli olarak bağlanan ve iyi bir yapışma sergileyen kaplamalar yapılmasını sağlayan ve kullanılan elektrotun darbeli (pulse) elektrik akımlarının oluşturduğu plazma formasyonu vasıtasıyla yüzeyde biriktirilmesi prensibine dayanan bir mikro-kaynak işlemidir. Bu çalışmada Inconel-718 alaşımı üzerine ESD tekniği kullanılarak farklı şartlarda Armoks-500T ve Ramor-500 zırh çelikleri ile yüzey kaplama işlemi yapılmıştır. Elde edilen kaplama tabakalarının özellikleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile karakterize edilmiştir. Tabaka kalınlıkları optik mikroskoba bağlı bir aparat yardımıyla ölçülmüştür. Elde edilen tabakaların yüzey sertlikleri Mikro sertlik yöntemiyle ölçülmüştür. Aşınma deneyleri ball-on-disk yöntemi ile 10 N yük altında 0.3 m/s de 500 metre mesafede gerçekleştirilmiştir. Aşınma mekanizmaları için Aşınma izi SEM analizleri yapılmıştır. ESD kaplama sonucunda Inconel-718 alaşımı üzerine her iki zırh kaplama malzemesi başarılı bir şekilde oluşturulmuştur. Kaplama tabakası kaplama şartlarına ve kaplama malzemesine bağlı olarak 5 µm' dan 26 µm kadar değişmektedir. Her iki zırh çeliği ile Inconel-718 alaşımının yüzey sertliği artırılarak, aşınma direnci yaklaşık olarak 1,5-11 kat iyileştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Elektro Kıvılcım Biriktirme, Inconel-718 Alaşımı, Armoks-500T, Ramor-500, Mikrosertlik, Aşınma Direnci.

#### Abstract

Inconel-718 is one of the most important nickel-based super alloys most widely used. Despite its unique combination of properties and widespread use, the wear properties of Inconel-718 (and many other super alloys) are generally considered inadequate, especially at elevated temperatures. Therefore, it is subjected to many surface treatments today. One of the promising methods to produce a hard and wear resistant coating on metallic surfaces is Electro Spark Deposition (ESD) method. The ESD method is a micro-welding process based on the principle of depositing the electrode used on the surface by means of the plasma formation created by pulsed electric currents, which provides much stronger bonding and good adhesion compared to other traditional methods. In this study, surface coating process was carried out with Armoks-500T and Ramor-500 armor steels under different conditions by using ESD technique on Inconel-718 alloy. The properties of the obtained coating layers were characterized by scanning electron microscopy (SEM). Layer thicknesses were measured with the aid of an apparatus connected to an optical microscope. The surface hardness of the obtained layers was measured by the Micro-hardness method. Wear tests were carried out with the ball-on-disk method under a load of 10 N at a distance of 500 meters at 0.3 m/s. Wear trace SEM analyzes were performed for wear mechanisms. As a result of ESD coating, both armor coating materials were successfully formed on Inconel-718 alloy. The coating layer varies from 5 µm to 26 µm depending on the coating conditions and coating material. By increasing the surface hardness of both armor steels and Inconel-718 alloy, the wear resistance has been improved approximately 1.5-11 times.

**Keywords:** Electro Spark Deposition, Inconel-718 Alloy, Armox-500T, Ramor-500, Micro-hardness, Wear Resistance.

#### 1. Giriş

Inconel-718 alaşımı özellikle havacılık ve uzay sanayinde olmakla birlikte çok özel yerlerde (Kimya, Denizcilik ve Nükleer sektörlerinde, roket motor parçalarında, çok özel amaçlar için üretilen depo tanklarında, vanalarda, bağlantı elemanlarında ve türbin pervane bıçaklarında) kullanılmak üzere üretilmiştir (Bhattacharya vd. 1983, İnt. Kyn.1). Inconel 718 alaşımının benzersiz özellikleri ve yaygın kullanıma rağmen (ve diğer birçok süper alaşımın)

aşınma özellikleri, özellikle yüksek sıcaklıklarda genellikle yetersiz kabul edilir (Kurzynowski vd. 2017, Günen vd. 2017). Bu yüzden bu alaşımlar günümüzde yüzey işlemlerine tabii tutularak kullanılmaktadır. Alaşım kaplamaları oluşturmak için lazer kaplama (Shepeleva vd. 2000), vakumlu plazma püskürtme (Zhu vd. 2001), magnetron püskürtme (Abad vd. 2010), kimyasal-fiziksel buhar biriktirme (Jindal vd. 1987), ve borlama vb. dahil olmak üzere çeşitli kaplama teknolojileri kullanılmaktadır.

ESD (Elektro Kıvılcım Biriktirme); Aşınma direncini artırmak ve boyutsal bozuklukları düzeltmek için kısa süreli akım darbeleriyle ilave elektrot malzemesinin yüzeyde biriktirilmesi işlemidir (American Welding Society 2007, Kayali ve Talaş 2021). ESD, metal malzemelerin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi için kullanılan basit bir işlem olarak günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek enerjili elektrik enerjisini depolamak için kondansatörlerin kullanılması ile metal altlık (Katot) ve elektrot (anot) arasında yüksek enerjili elektrik enerjisi yüksek frekanstan kaçınılması gibi süreçlerden oluşmaktadır (Rastkerdar vd. 2018). Meydana gelen deşarj, havanın iyonlaşmasını sağlar ve elektrot malzemesi ile iş parçası arasında bir kanal oluşturur ve iş parçasının yüzeyinde küçük, yüksek sıcaklık ve yüksek basınç alanlarının meydana gelmesi ile yüksek sıcaklık ve yüksek basınç iş parçasının yüzeyine nüfuz ederek malzeme yüzeylerinin gelişmesine olanak sağlar (Tang 2009). Inconel-718 süper alaşımının özellikle savunma sanayide kullanıldığını düşünürsek, zırh çelikleriyle kaplanmış olması, süper alaşımın dışarıdan gelebilecek etkilere karşı mekanik direncinin daha fazla olması anlamına gelir. Bu çalışmada Inconel-718 alaşımını Armoks-500T ve Ramor-500 Zırh çelikleri ile kaplayarak hem yüzey sertliğinde, hem de aşınma direncinde artış sağlanması amaçlanmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1 Kullanılan Malzemeler

Bu çalışma için Ø20 mm ebatlarındaki Inconel-718 alaşımı temin edilmiştir. Inconel-718 alaşımının kimyasal (spektral analizi) bileşimi Çizelge 1’de verilmiştir. Kesilen numuneler elektro kıvılcım biriktirme (ESD) işlemi ile Ramor-500 ve Armoks-500T zırh çelikleri ile kaplanmıştır. Kaplama elektrot olarak kullanılan zırh çeliklerin kimyasal bileşimleri Çizelge 2’de verilmiştir.

### 2.2 ESD Kaplama İşlemi

Kaplama işlemi için temel malzemeyi döndürme aparatı, akımın geçişi için hazırlanan deney düzeneği ve kaplama makinesinin görüntüleri Şekil 1’de verilmiştir. Inconel-718 alaşımının yüzeyine yapılan işlemlerin kodları Çizelge 3’de verildiği gibi farklı Voltaj, Kapasitans ve Frekanslar da gerçekleştirilmiştir. Yüzey düzgünlüğünü iyileştirmek ve oksit oluşumu riskini azaltmak için kaplama sırasında argon gazı kullanılmıştır. ESD kaplama 2 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir. ESD kaplama işlemi sırasında, kıvılcım oluşumu, titreşimli elektrot aplikatörü ile dönen Inconel-718 süper alaşımı üzerindeki Zırh çeliklerinden yapılan (Ramor-500 veya Armoks-500T) elektroda hafif bir dokunuşla sağlanmıştır.

Çizelge 1. Inconel-718 alaşımının kimyasal bileşimi.

Çelik Türü	Kimyasal Bileşim (% Ağırlıkça)					
	C	Cr	Ni	Ti	Mn	Mo
Inconel-718	0,04	18,11	53,09	0,95	0,09	3,03
	Co	Cu	Nb	Fe	Al	Co
	0,21	0,17	5,05	18,64	0,53	0,21

Çizelge 2. Kaplama Malzemesi olarak kullanılan çeliklerin kimyasal bileşimi.

Çelik Türü	Kimyasal Bileşim (% Ağırlıkça)					
	C	Cr	Ni	Si	Mn	Mo
Ramor-500	0,35	1	2	0,7	1,5	0,7
	P	S	B			
	0,015	0,01	0,005			
Armoks-500T	C	Cr	Ni	Si	Mn	Mo
	0,32	1,01	1,81	0,4	1,2	0,7
	P	S	B			
	0,015	0,01	0,005			



Şekil 1. ESD düzeneği.

### 2.3 Metalografik Çalışmalar

Inconel-718 alaşımı üzerine ESD yöntemi ile Armoks-500T ve Ramor-500 zırh çelikleri ile kaplanmış numuneler hassas kesme cihazı ile kesilen numuneler sırasıyla 120, 240, 320, 600, 1000 ve 1200 gritlik zımparalar ile zımparalandıktan sonra % 3 µm’luk elmas pasta ile parlatılmıştır. Numuneler SEM mikroskop yardımıyla karakterize edilmiştir. Tabaka kalınlıkları optik mikroskoba bağlı bir aparat yardımı ile ölçülmüştür. Inconel-718 alaşımı üzerine ESD yöntemi ile Armoks-500T ve Ramor-500 zırh çelikleri ile kaplanmış numunelerin sertlik değerleri mikrosertlik cihazı (Shimadzu HM-2) 100 gr. yük altında ve 15 sn bekleme süresi ile gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 3.** Inconel-718 alaşımına yapılan işlemler ve verilen kodlar.

Yapılan İşlemler	Kısaltmalar
40 Volt, 80 Kapasitans, 500 Frekans da ESD ile Armoks-500T elektrot ile kaplanmış numuneler	40V-80µF-500Hz Armoks-1
80 Volt, 40 Kapasitans, 500 Frekans da ESD ile Armoks-500T elektrot ile kaplanmış numuneler	80V-40µF-500Hz Armoks-2
80 Volt, 80 Kapasitans, 500 Frekans da ESD ile Armoks-500T elektrot ile kaplanmış numuneler	80V-80µF-500Hz Armoks-3
80 Volt, 120 Kapasitans, 500 Frekans da ESD ile Armoks-500T elektrot ile kaplanmış numuneler	80V-120µF-500Hz Armoks-4
40 Volt, 80 Kapasitans 500 Frekans da ESD ile Ramor-500 elektrot ile kaplanmış numuneler	40V-80µF-500Hz Ramor-1
80 Volt, 40 Kapasitans, 500 Frekans da ESD ile Ramor-500 elektrot ile kaplanmış numuneler	80V-40µF-500Hz Ramor-2
80 Volt, 80 Kapasitans, 500 Frekans da ESD ile Ramor-500 elektrot ile kaplanmış numuneler	80V-80µF-500Hz Ramor-3
80 Volt, 120 Kapasitans, 500 Frekans da ESD ile Ramor-500 elektrot ile kaplanmış numuneler	80V-120µF-500Hz Ramor-4

Yapılan sertlik ölçümleri, en az 20 farklı ölçümde en yüksek ve en düşük iki değer çıkartılıp geri kalan değerlerin ortalama değerleri ve standart sapmaları alınarak sertlik değerleri tespit edilmiştir.

#### 2.4 Aşınma Deneyleri

Inconel-718 alaşımı üzerine ESD yöntemi ile Armoks-500T ve Ramor-500 zırh çelikleri ile kaplanmış numunelerin

sürtünme ve aşınma özellikleri ASTM G-99 standardına göre yapılmıştır. Aşınma testinden yüzeyin bozulmasından kaynaklı hataları ortadan kaldırmak için her test için ayrı olmak koşuluyla 8 mm çapında WC-Co bilyeler kullanılmıştır. Aşınma testleri, 10 N yük altında 500 metre mesafede, 0,3 m/s kayma hızında 20 C de oda sıcaklığında ve kuru ortamda yapılmıştır. Aşınma testinden sonra numunelerin aşınma hacimleri, aşınmanın enine kesit alanları ile Tribotechnic Rugosimeter cihazından elde edilen aşınma izinin genişliği çarpılarak sayısallaştırılmış ve aşınma oranı eşitlik 1'deki formülle hesaplanmıştır:

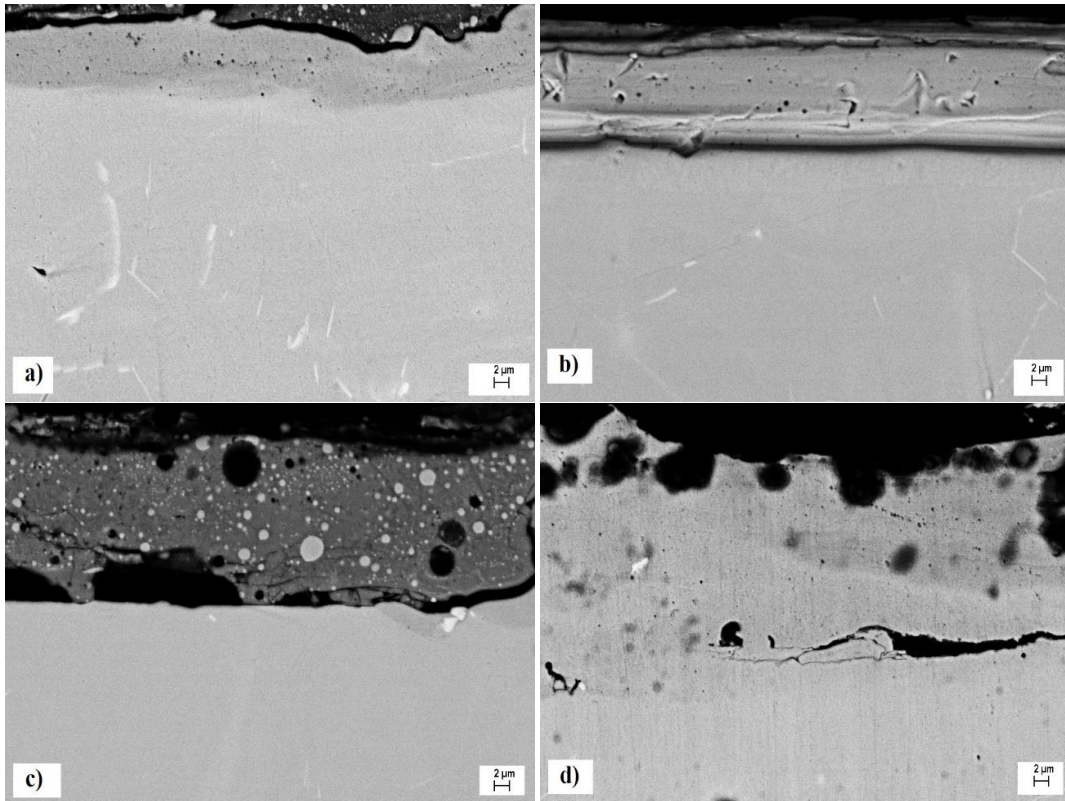
$$\text{Aşınma Hızı} = \frac{\text{Aşınma Hacmi}}{(\text{Uygulanan Yük} \times \text{Kayma Mesafesi})}, \text{mm}^3/\text{Nm} \quad (1)$$

### 3. Bulgular

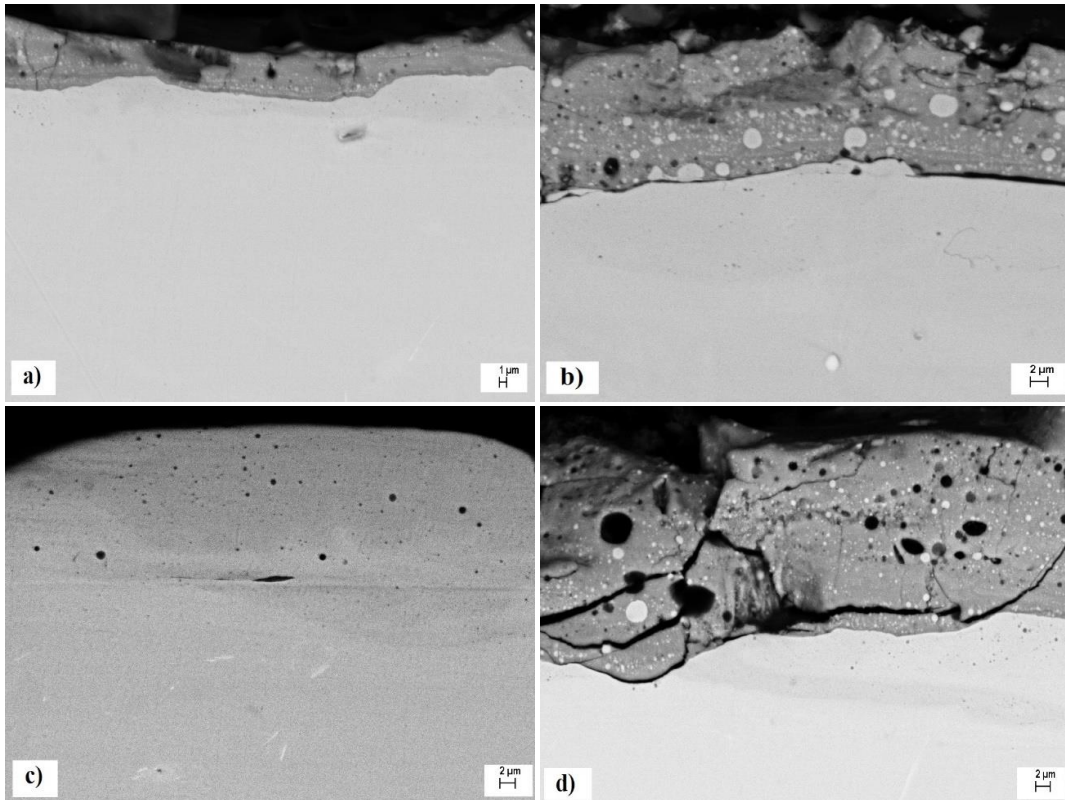
#### 3.1 Mikroyapı Özellikleri

Şekil 2 ve Şekil 3'de Inconel-718 alaşımı üzerine ESD yöntemi ile Armoks-500T ve Ramor-500 zırh çelikleri farklı volt ve kapasitans şartlarında kaplanmış numunelerin SEM mikro yapı görüntüleri verilmiştir. Şekil 2 incelendiğinde, Inconel-718 alaşımın üzerine 40V-80µF-500Hz şartlarda Armoks-500T zırh çeliği kaplanan yapılan numunelerde elde edilen kaplama daha az kalınlıkta homojendir. Ancak kaplama yüzeyi düz değildir. 80V-40µF-500Hz şartlarında yapılan kaplamada ise daha düz ve homojen kaplama elde edilmiştir. 80V-80µF-500Hz ve 80V-120µF-500Hz şartlarda Armoks-500T kaplanan Inconel-718 de ise kapasitans değerlerinin artmasıyla kaplama kalınlığı artmakta ancak homojen olmayan ve gözenekli bir kaplama elde edilmiştir. Ayrıca kaplama ile matris arasında tam olarak bir birleşmenin olmadığı görülmektedir. Bu ise pek istenen bir olay değildir (Kayali ve Talaş 2019). Kaplama ana malzeme ara yüzeyinde tabakalaşma ve porozite şeklinde hatalar görülmekle beraber bu tür hatalar özellikle hızlı bir şekilde mikro arkların oluştuğu sistemlerde ortaya çıkabilmektedir. Genel olarak bu tür hataların diğer bir sebebi ise ısı genleşme katsayılarındaki farklılıklar yanında alaşımlandırmanın etkisiyle kaplamanın elektriksel iletkenliğe olan negatif etkisi de düşünülmektedir (Kayali ve Talaş 2019, Kayali ve Talaş 2021).

Şekil 3 incelendiğinde, Inconel-718 alaşımın üzerine 80V-80µF-500Hz şartlarda Ramor-500 zırh çeliği kaplanan numunelerde elde edilen kaplama homojen, düz ve gözeneksizdir. 40V dan 80 V a artıca tabaka kalınlığı artarken 40 µF kapasitansdan 80 µF kapasitans arttıkça hem kaplama kalınlığı artmıştır hem de tabaka homojen ve boşluksuzdur. Ancak kapasitans değeri 120 µF çıkınca tabakada kırıkların ve boşlukların arttığı görülmektedir.

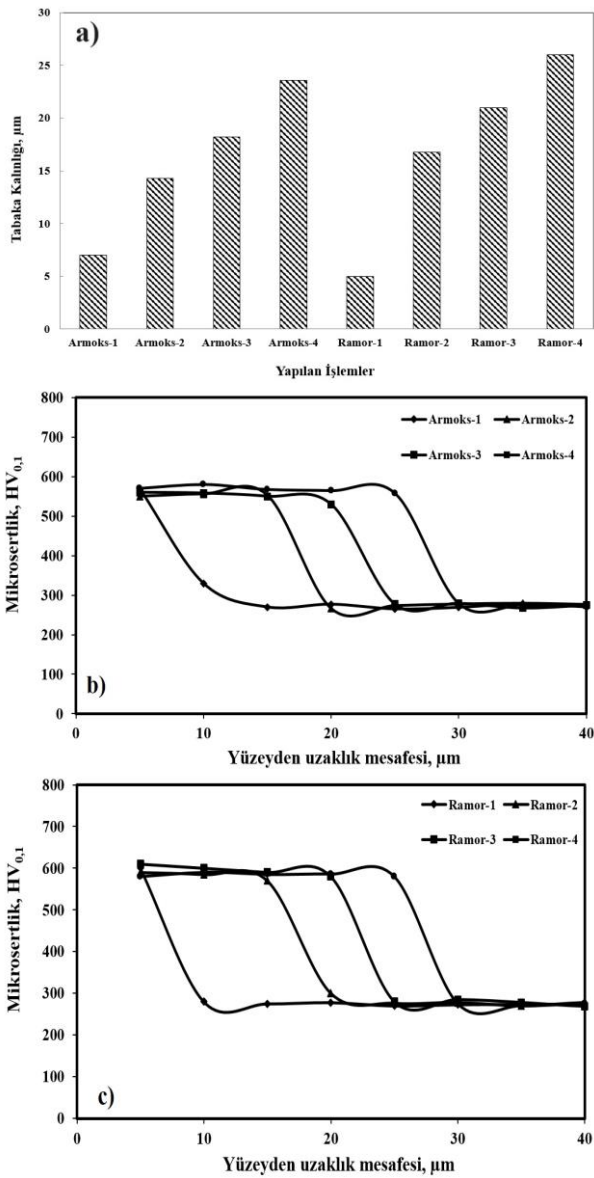


Şekil 2. Inconel-718 çeliğinin yüzeyine ESD yöntemiyle a) Armoks-1, b) Armoks-2, c) Armoks-3 ve d) Armoks-4 kaplanmış numunelerin SEM resimleri.



Şekil 3. Inconel-718 çeliğinin yüzeyine ESD yöntemiyle a) Ramor-1, b) Ramor-2, c) Ramor-3 ve d) Ramor-4 kaplanmış numunelerin SEM resimleri.





**Şekil 4. a)** Farklı Şartlarda farklı kaplama malzemeleri ile Inconel-718 alaşımı üzerine oluşturulan kaplamaların kalınlığı, b) Inconel-718 yüzeyinde, Armoks-500T kaplama malzemesi ile Farklı şartlarda yapılan kaplamaların sertlik değişimi, c) Inconel-718 yüzeyinde, Ramor-500 kaplama malzemesi ile Farklı şartlarda yapılan kaplamaların sertlik değişimi.

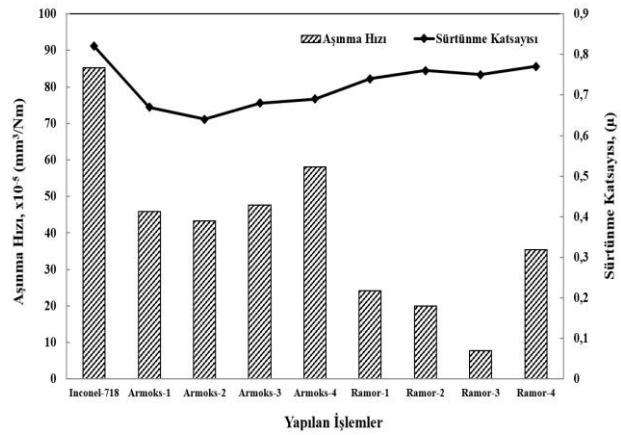
### 3.2 Tabaka Kalınlığı ve Sertlik Özellikleri

ESD ile üretilen kaplamaların kalınlıkları Şekil 4a'da verilmiştir. Inconel-718 alaşımının üzerine Armoks-500T zırh çelik kaplanan numunelerin kalınlıkları 7 µm - 24 µm arası değişmektedir. Ramor-500 Kaplanan zırh çelik kaplanan numuneler de ise elde edilen tabaka kalınlıkları 5 µm - 26 µm arasındadır. Kaplama sırasında Voltaj ve Kapasitans değerleri arttıkça kaplama kalınlığı artmaktadır. Ancak kapasitans değeri 80 µF den 120 µF ye çıkınca kaplama kırıklı olmaktadır. Hem homojen bir kaplama hem de daha az boşluksuz bir kaplama 80 Volt, 80 µF Kapasitans da yapılan Ramor-3 olan numunede elde edilmiştir. ESD ile üretilen kaplamaların ve matrislerin sertlikleri Şekil 4b ve Şekil 4c'de verilmiştir. Inconel-718

alaşımın üzerine yapılan kaplamalar ile birlikte yüzey sertliğini artmıştır. Farklı şartlarda ESD ile Ramor-500 zırh çeliği kaplanmış numunelerin sertliği 620 HV<sub>0.1</sub> kadar çıkarken Farklı şartlarda ESD ile Armoks-500T zırh çeliği kaplanmış numunelerin sertliği 580 HV<sub>0.1</sub>'dir (Kara ve Korkut 2012, Kaçar ve Emre 2018, Taşkaya ve Gür 2019, Gür vd. 2019). Kaplama tabakasında sertlikler yüksek iken matrise geçildiğinde sertlik değerleri birden düşmüştür. İşlemsiz Inconel-718 alaşımın sertliği 278 HV<sub>0.1</sub>'dir. Böylece zırh çelikleri ile kaplanmış Inconel-718 alaşımının sertlik değerleri yaklaşık olarak 2-3 kat artmıştır (Kayali ve Talaş 2021).

### 3.3 Aşınma Karakterizasyonu

ESD yöntemiyle Inconel-718 alaşım üzerine farklı şartlarda Armoks-500T ve Ramor-500 zırh çelikleri ile kaplanan ve herhangi bir işlem görmemiş Inconel-718 alaşımının aşınma deneyleri sonucunda elde edilen aşınma hızı, sürtünme katsayısı değerleri ve aşınma derinliği Şekil 5'de ve Çizelge 4'de verilmiştir.



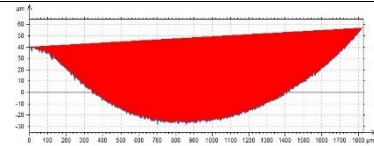
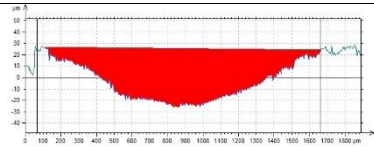
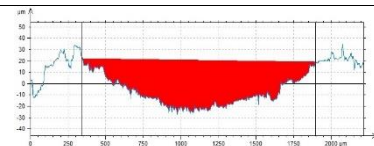
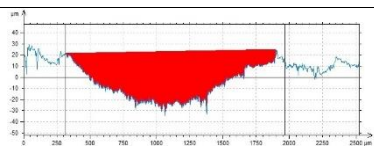
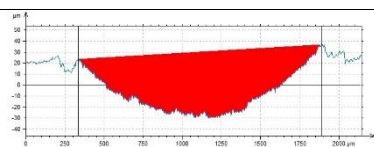
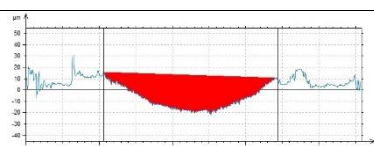
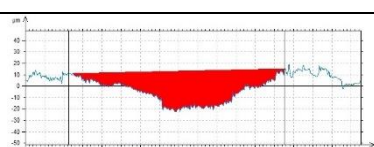
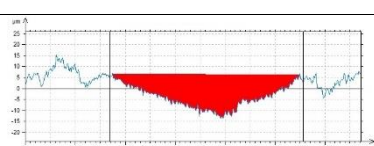
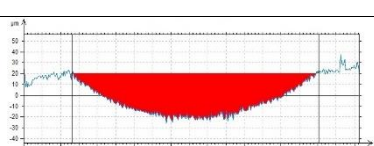
**Şekil 5.** Farklı Şartlarda ESD ile Armoks-500T ve Ramor-500 Zırh Çeliği Kaplanmış Inconel-718 Alaşımının Aşınma Hızı ve Sürtünme Katsayısı değerleri.

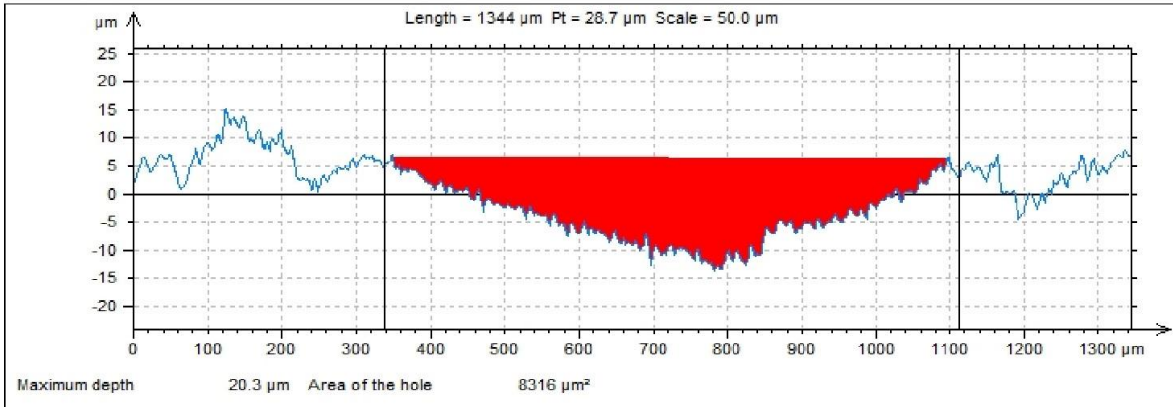
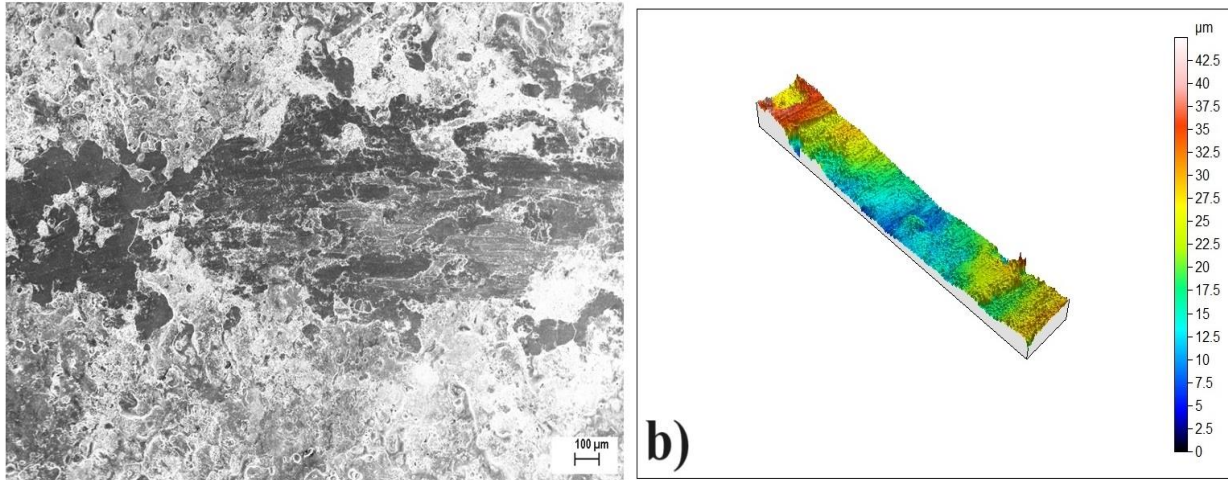
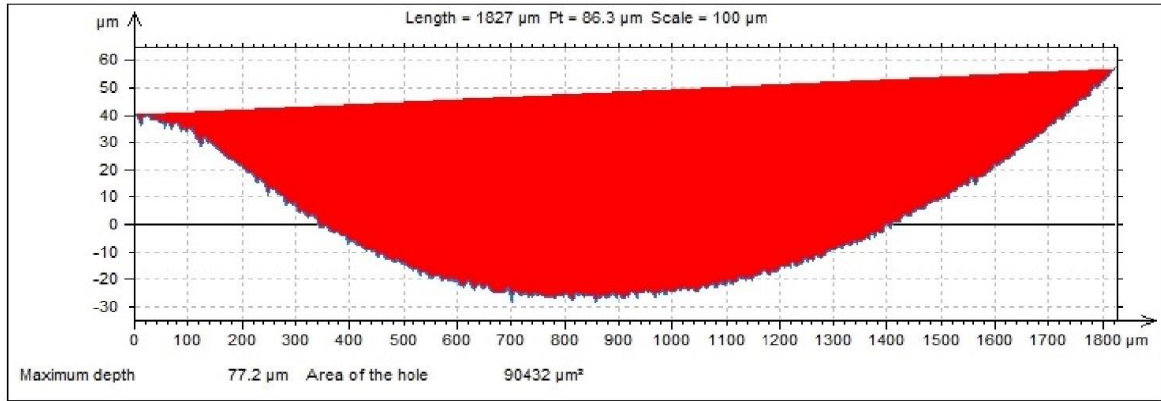
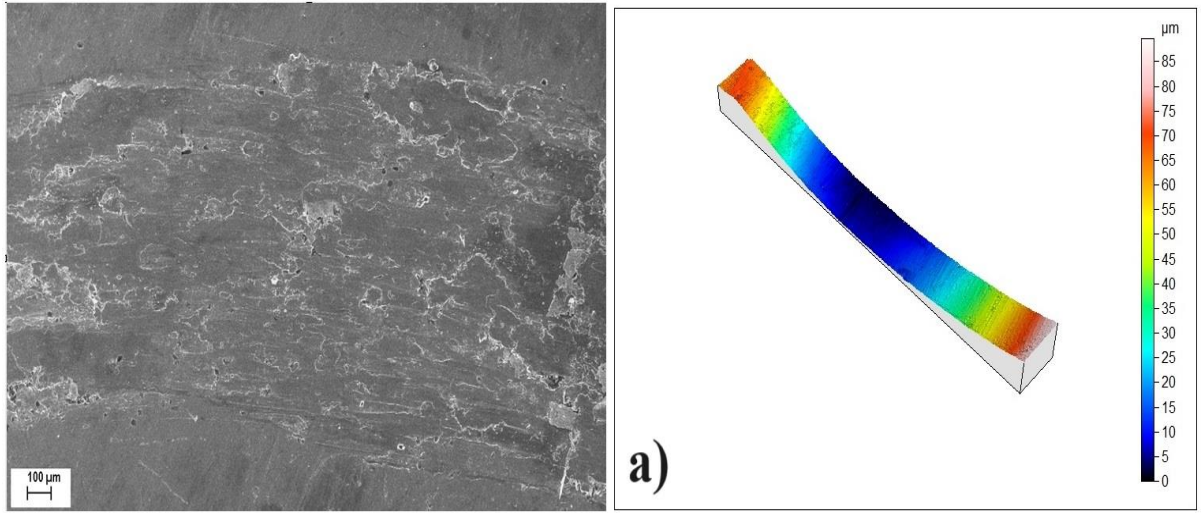
İşlemsiz Inconel-718 alaşımın sürtünme katsayısı 0,82 iken kaplama şartlarına ve kaplama malzemesine bağlı olarak 0,64-0,77 arasında değişmektedir. Sürtünme katsayısına etki eden ön önemli faktör kaplama tabakasının yüzeyinin homojenliğidir. İşlemsiz Inconel-718 alaşımın aşınma hızı  $85,187 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  iken ESD ile farklı şartlarda zırh çeliklerin kaplanması ile aşınma hızında yaklaşık olarak en az 1,5 ile 11 kat azalma görülmüştür. Kaplanmış malzemeler arasında sadece Armoks-4 numunede aşınma hızı 1,5 kat azalmıştır. Bu ise kaplama şartlarının 80V-120µF-500 Hz olmasıyla birlikte kaplamanın kırık olması ve homojen bir yapının olmamasından olabilir. En iyi aşınma direnci 80V-80µF-500 Hz ESD şartlarında yapılan Ramor-3 numunesinde  $7,834 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  elde edilmiştir. SEM resimlerine baktığımızda daha düz ve boşluksuz bir kaplama elde edilmesi sonucunda ile

Ramor-3 numunesinde aşınma hızı yaklaşık olarak 11 kat azalmıştır. Ramor-500 zırh çeliklerinin sertlik değeri yaklaşık olarak 590 HV<sub>0.1</sub> iken Armoks-500T zırh çeliklerinin sertlik değeri 560 HV<sub>0.1</sub> civarındadır. Ramor-500 zırh çeliklerinin sertlik değerleri daha fazla olduğu için

aşınma değerleri kaplamanın yapısına göre  $35,396 \times 10^{-5}$  mm<sup>3</sup>/Nm ile  $7,835 \times 10^{-5}$  mm<sup>3</sup>/Nm arasında değişmektedir. Armoks-500T zırh çeliğinin aşınma hızı ise kaplama yapısına göre  $58,006 \times 10^{-5}$  mm<sup>3</sup>/Nm ile  $45,81 \times 10^{-5}$  mm<sup>3</sup>/Nm arasında değişmektedir.

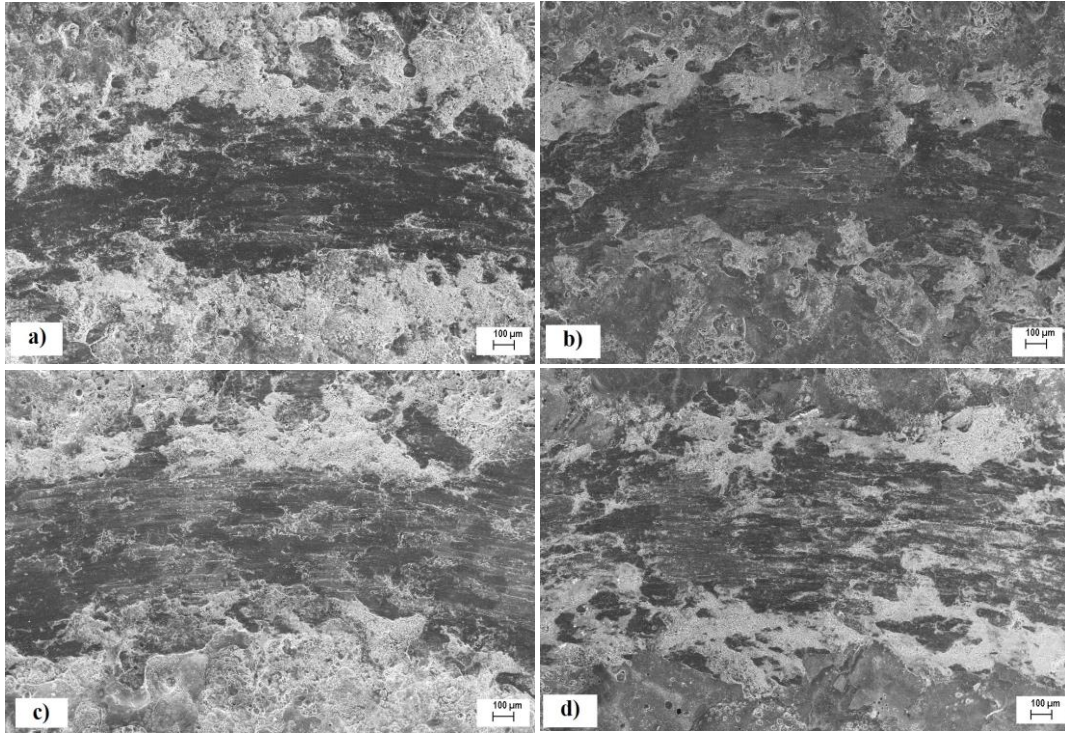
**Çizelge 4.** Farklı Şartlarda ESD ile Armoks-500T ve Ramor-500 Zırh Çeliği Kaplanmış Inconel-718 Alaşımının aşınma değerleri.

İşlemler	Aşınma Hızı $\times 10^{-5}$ (mm <sup>3</sup> /Nm)	Sürtünme Katsayısı ( $\mu$ )	Aşınma Alanı ( $\mu\text{m}^2$ )	Aşınma Derinliği ( $\mu\text{m}$ )
Inconel-718	85,187	0,82	90432	
Armoks-1	45,81	0,67	48631	
Armoks-2	43,314	0,64	45981	
Armoks-3	47,62	0,68	50551	
Armoks-4	58,006	0,69	61577	
Ramor-1	24,15	0,74	25637	
Ramor-2	19,982	0,76	21213	
Ramor-3	7,834	0,75	8316	
Ramor-4	35,396	0,77	37575	



Şekil 6. a) İşlemsiz b) Ramor-3 kaplanmış Inconel-718 alaşımının Aşınma İzi ve Yüzey Profilometre İzi.



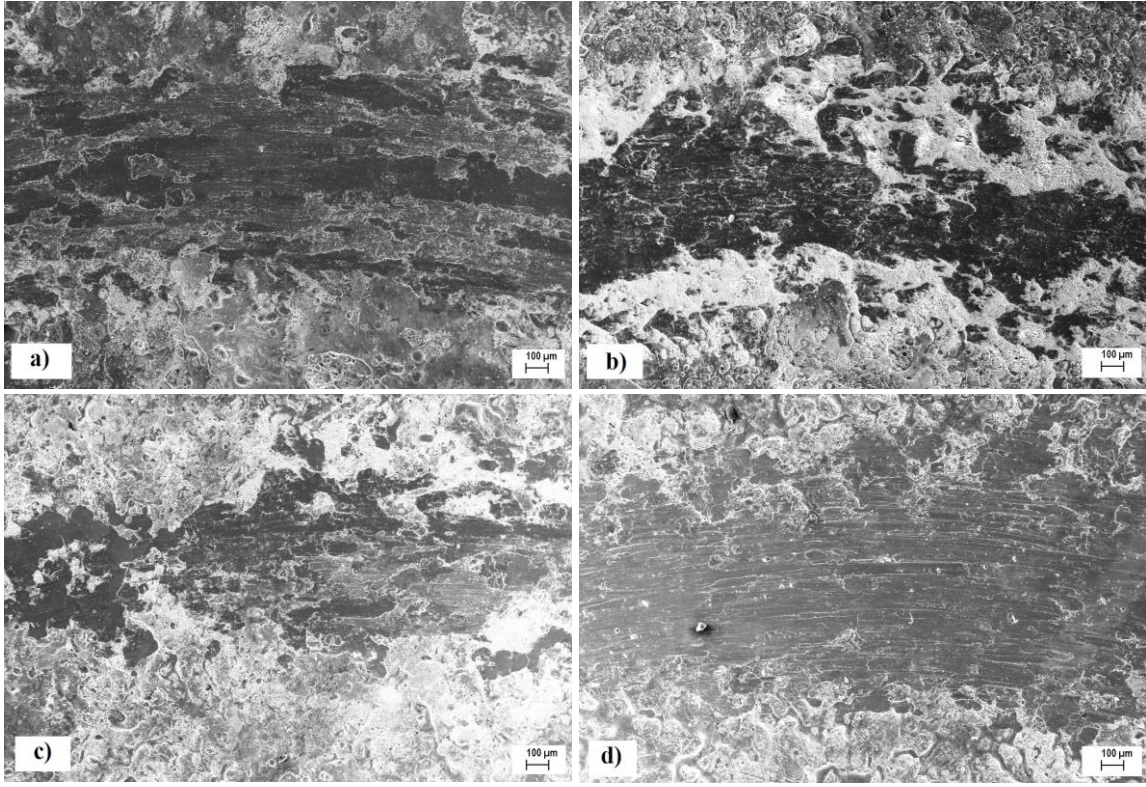


**Şekil 7.** Farklı şartlarda a) Armoks-1, b) Armoks-2, c) Armoks-3 ve d) Armoks-4 ile kaplanmış Inconel-718 alaşımın Aşınma İzi

Şekil 6'da En iyi ve En kötü aşınma hızı değerine sahip olan numunelerin, aşınma deneyleri sonrasında yapılan aşınma izi SEM fotoğrafları ile üç boyutlu yüzey profilometre ile aşınma izi topografyası verilmiştir. Buna göre işlemsiz Inconel-718 alaşımın aşınma izi derinliği 77,2 µm iken, Ramor-3 kaplanan numuneden aşınma derinliği 20,3 µm olarak tespit edilmiştir. Ramor-3'de elde edilen tabaka kalınlığı 21 µm olduğu için aşınmanın altlığa geçmediği ve tabakada kaldığı için aşınma hızının düşük olduğunu bize göstermektedir. Inconel-718 alaşımı üzerine yapılan Armoks-500T zırh çelik kaplamalar arasında ısıl genleşme katsayıları çok farklı olduğundan kaplama-matris ara yüzlerinde tam olarak yapışma olmadığı için mikro çatlaklar meydana gelir. Meydana gelen bu çatlaklar, mekanik zorlanma altında pul pul dökülmelere ve katmanların delaminasyonuna sebep olarak parçalanmış kaplamalar, aşındırıcı top ile alt tabaka arasına girerek aşınma hızını artırır (Allaoui vd. 2006, Edgar vd. 2016). Buna ek olarak, döngüsel yükler altında bulunan gerilimler tarafından üretilen yorulmanın bir sonucu olarak da mikro çatlaklar oluşur. Bu çatlakların zamanla ilerlemesiyle birlikte aşırı plastik deformasyonlar ve kırılma hasarları meydana gelir. Bu da delaminasyonların artmasına ve numunenin sürtünme katsayısının, aşınma hızının artışa neden olur (Aichholz vd. 2018, Krelling vd. 2017). Bu sebepten dolayı sürtünme katsayısı değerlerinin ve aşınma oranının arttığı düşünülmektedir. Şekil 7 ve Şekil 8'de, Inconel-718 alaşım üzerine ESD yöntemiyle farklı şartlarda Armoks-500T ve Ramor-500 zırh çeliği kaplanan numunelerin WC-Co

bilyeye karşı kayma aşınma testinden sonucunda elde edilen aşınma izlerinin SEM resimlerini göstermektedir. Şekil 6a'deki Aşınma izi görüntülerinde görüldüğü gibi aşınma oranı değeri en yüksek olan Inconel-718 alaşımında adhesiv aşınma mekanizmasının, delaminasyonların ve aşınma birikintilerinin etkisi nedeniyle aşınma izinde birkaç plastik deformasyon meydana geldiği görülmektedir (Kayalı ve Talaş 2019). Ayrıca Şekil 6a'da aşınma sırasında numuneden kopan aşınma kalıntıları da görülmektedir. Armoks-1 ve Armoks-2 kodlu numunelerde adhesiv aşınma mekanizması gerçekleşirken (Şekil 7a-b), Armoks-3 ve Armoks-4 kodlu numunelerde abrasif mekanizması olduğu abrasif çizikler mevcuttur. Bunun nedeni pürüzlü kaplama tabakasının aşınma sırasında basınç nedeniyle kopması ve bilye ile altlık arasına girerek abrasif çizikleri oluşturmuş olabilir (Şekil 7c-d). Armoks-500T kaplı numuneler de, aşınma süreci ve sürtünme yükünden dolayı aşınma izlerinde çatlaklar, delaminasyonlar, aşınma döküntüleri ve yüksek miktarda plastik deformasyonlar görülmüştür (Şekil 7).

En yüksek aşınma direncine sahip olan Ramor-3 kodlu numunenin aşınma izi incelendiğinde adhesiv aşınma izleri görülmektedir. Kaplama tabakasının homojen ve gözeneksiz olduğu için daha az delaminasyon ve plastik deformasyon olması nedeniyle daha az aşındığı görülmektedir (Şekil 8c). Ramor-4 kodlu numunenin kaplama tabakası kırık olduğu için (bkz. Şekil 3d) aşınma sırasında aşındırıcı bilye arasına girerek abrasif aşınma mekanizmasının en önemli ispatı olan abrasif çizikleri aşınma izinde görülmektedir (Şekil 8d).



Şekil 8. Farklı şartlarda a) Ramor-1, b) Ramor-2, c) Ramor-3 ve d) Ramor-4 ile kaplanmış Inconel-718 alaşımın aşınma izi

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Inconel-718 alaşımın yüzeyinde ESD yöntemiyle Armoks-500T ve Ramor-500 Zırh çelikleri başarılı bir şekilde kaplanmıştır.
- 40V dan 80 V a artıka tabaka kalınlığı artarken 40 µF kapasitansdan 80 µF kapasitans arttıka hem kaplama kalınlığı artmıştır hem de tabaka homojen ve gözeneksizdir. Ancak kapasitans değeri 120 µF çıkınca tabakada kırıkların ve boşlukların arttığı görülmektedir.
- 40V dan 80 V a artıka tabaka kalınlığı artarken 40 µF kapasitansdan 80 µF kapasitans arttıka hem kaplama kalınlığı artmıştır hem de tabaka homojen ve gözeneksizdir. Ancak kapasitans değeri 120 µF çıkınca tabakada kırıkların ve boşlukların arttığı görülmektedir.
- Inconel-718 alaşım yüzeyine farklı şartlarda Armoks-500T kaplanması sonucunda yüzeyde 7 µm' dan 24 µm kadar kaplama tabakası elde edilirken farklı şartlarda Ramor-500 kaplanması sonucunda yüzeyde 5 µm' dan 26 µm kadar kaplama tabakası elde edilmiştir.
- İşlemsiz Inconel-718 alaşımın sertliği 278 HV<sub>0,1</sub> iken Her iki zırh çelikleri ile kaplanmış Inconel-718 alaşımının yüzey sertlik değeri yaklaşık olarak 2-3 kat artmıştır.

- İşlemsiz Inconel-718 alaşımın aşınma izi derinliği 77,2 µm iken, Ramor-3 kaplanan numuneden aşınma derinliği 20,3 µm olarak tespit edilmiştir. Ramor-3 zırh çeliği kaplı numuneler de aşınma tabakada kalmıştır.
- Inconel-718 alaşımın aşınma dirençleri hem Armoks-500T hem de Ramor-500 zırh çelikleri kaplamalarında 1,5-11 kata kadar iyileştirilmiştir. En iyi aşınma direnci Ramor-3 kodlu numune  $7,834 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}'\text{dir}$ .

#### Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

#### Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar-1: Araştırma, Fikir Sahibi, Deney tasarımı, Proje Yöneticisi, Görselleştirme, Yazma-rijinal taslak

Yazar-2: Kaynaklar, Deney

#### Çıkar Çatışması Beyanı/Declaration of Competing Interest

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

#### Verilerin Kullanılabilirliği/ Data Availability

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

#### Teşekkür

Bu araştırma Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir (Proje No: AKU BAPK-21. FEN. BİL.14).

## 5. Kaynaklar

- Abad, M.D., Muñoz-Márquez, M.A., El Mrabet, S., Justo, A., Sánchez-López, J.C., 2010. Tailored synthesis of nanostructured WC/TaC coatings by dual magnetron sputtering. *Surface & Coatings Technology*, **204**, 3490-3500.  
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.04.019>
- Aichholz S.A.C., Meruvia M.S., Júnior P.C.S., Torres R.D., 2018. Tribocorrosion behavior of boronized AISI 4140 steel. *Surface & Coatings Technology*, **352**, 265-272.  
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.07.101>
- Allaoui O., Bouaouadja N., Saindennan G., 2006. Characterization of boronized layers on a XC38 steel. *Surface & Coatings Technology*, **201**, 3475-3482.  
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.07.238>
- American Welding Society, 2007. *Welding Handbook*, Vol. **3**, 9th Ed., Miami, FL, 598-602.
- Bhattacharya S.K., Javaid A., Lewis M.H., Walbank J., 1983. Wear Mechanisms of Syalon Ceramic Tools when Machining Nickel-Based Material. *Metals Technology*, **10**, 482-483.  
<https://doi.org/10.1179/030716983803291415>
- Edgar E.V.C., Roger L., Armando I.M.P., Jose L.B.P., Francisco J.P.P., Martin O.D., Eduardo D.R.A., 2016. Characterization and wear performance of boride phases over tool steel substrates. *Advances in Mechanical Engineering*, **8(2)**, 1-10.  
<https://doi.org/10.1177/1687814016630257>
- Günen, A., Kanca, E., Çakır, H., Karakaş, M. S., Gök, M.S., Küçük, Y., Demir, M., 2017. Effect of borotitanizing on microstructure and wear behavior of Inconel 625. *Surface & Coatings Technology*, **311**, 374-382.  
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.12.097>
- Gür, A.K., Taşkaya, S., Özay, Ç., 2019. Ramor-500 Çeliğinde Isıl İşlemin Mikroyapı, Mikrosertlik ve Abrasiv Aşınma Direncine Etkisinin Taguchi Metoduyla Değerlendirilmesi. *BEU Journal of Science*, **8(3)**, 1045-1056.  
<https://doi.org/10.17798/bitlisfen.532073>
- Jindal, P.C., Quinto, D.T., Wolfe, G.J., 1987. Adhesion measurements of chemically vapor deposited and physically vapor deposited hard coatings on WC/Co substrates. *Thin Solid Films*, **154**, 361-375.  
[https://doi.org/10.1016/0040-6090\(87\)90379-8](https://doi.org/10.1016/0040-6090(87)90379-8)
- Kaçar, R., Emre, Ertek H., 2018. Gaz Metal Kaynaklı Zırh Çeliklerinin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi. *AKU J.Eng.App.Sci.* **Vol.1**, 15-23.
- Kara, S., Korkut, M.H., 2012. Zırhlı Muharabe Araçlarında Kullanılan Zırh Plakalarında Kaynak Sonrası Isıl İşlemin Birleşim Mukavemetine Etkisinin Araştırılması. *The Journal of Defense Sciences*, **11(2)**, 159-171.  
<https://doi.org/10.17134/sbd.44699>
- Kayali, Y. and Talaş, Ş., 2019. Investigation of Wear and Corrosion Behaviour of AISI 316 L Stainless Steel Coated by ESD Surface Modification. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, **55**, 1148-1153.  
<https://doi.org/10.1134/S2070205119060170>
- Kayali, Y. and Talaş, Ş., 2021. Investigation on Wear Behavior of Steels Coated with WC by ESD Technique. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, **57**, 1065-112.  
<https://doi.org/10.1134/S2070205120060131>
- Krelling A.P., Da Costa C.E., Milan J.C.G., Almeida E.A.S., 2017. Micro-abrasive wear mechanisms of borided AISI 1020 steel. *Tribology International*, **111**, 234-242.  
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.03.017>
- Kurzynowski, T., Smolina, I., Kobiela, K., Kuz'nicka, B., Chlebus, E., 2017. Wear and corrosion behaviour of Inconel 718 laser surface alloyed with rhenium. *Materials and Design*, **132**, 349-359.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.07.024>
- Rastkerdar, E., Aghajani, H., Kianvash, A., Sorell, C.C., 2018. Microstructural characterization of AA5183 aluminum clad AISI 1018 steel prepared by electro spark deposition. *Mater. Res. Express*, **5 (4)**, 046507.  
<https://doi.org/10.1088/2053-1591/aab81f>
- Shepeleva, L., Medres, B., Kaplan, W.D., Bamberger, M., Weisheit, A., 2000. Laser cladding of turbine blades. *Surface & Coatings Technology*, **125**, 45-48.  
[https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00603-9](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00603-9)
- Tang, J., 2016. Mechanical and Tribological properties of the TiC-TiB<sub>2</sub> composite coating deposited on 40Cr-steel by electro spark deposition. *Applied Surface Science*, **365**, 202-208.  
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.12.198>
- Taşkaya, S., Gür, A.K., 2019. Ramor 500 Zırh Çeliğinin Tozaltı Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesinde Tel İlerleme Hızının Kaynak Metalindeki Nüfuziyet Dengesinin İncelenmesi. *GÜFBED*, **9(3)**, 444-453.  
<https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.426195>
- Zhu, Y.C., Yukimura, K., Ding, C.X., Zhang, P.Y., 2001. Tribological properties of nanostructured and conventional WC-Co coatings deposited by plasma spraying. *Thin Solid Films*, **388**, 277-282.  
[https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(01\)00805-7](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(01)00805-7)

## İnternet Kaynakları

- 1-Inconel 718 (Alloy 718, UNS N07718, 2.4668)  
<https://bircelik.com/tr/kategori/inconel-718>,  
(26.04.2024)



## Erenler (Afyonkarahisar) Bölgesinde Yer Alan Killerin Kıvam Özelliklerinin Jeoteknik Davranışlarına Etkisi

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 24.01.2024

Kabul/Accepted: 02.08.2024

Yayımlandı/Published:02.12.2024

### The Effect Of Consistency Properties Of Clays On Their Geotechnical Behavior In The Erenler (Afyonkarahisar)

Sami Serkan İŞOĞLU<sup>1\*</sup>, Ahmet YILDIZ<sup>1</sup>, Mahmut MUTLUTÜRK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye

<sup>2</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

Killi zeminlerin jeoteknik özelliklerini tespit etmek amacıyla kullanılan yöntemler genellikle kıvam limitleri, elek analizi, üç eksenli sıkışma dayanımı deneyleridir. Yapılan bu çalışmada killi zeminlerin jeoteknik özelliklerini belirlerken kil minerallerinin türünü ve bunların diğer parametrelerle ilişkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda arazi koşullarında alınan numunelerin fiziksel özellikleri tanımlandıktan sonra X-ışınları kırınımı (XRD) analizleri yapılmıştır. Mekanik özellikler üç eksenli sıkışma dayanımı deneyi yardımıyla belirlenmiştir. Üç eksenli sıkışma dayanımı deneylerinde benzer su içeriklerine sahip numuneler düşük plastisiteli ve yüksek plastisiteli olarak iki gruba ayrılmıştır. Her iki grubun da üç eksenli sıkışma dayanımı deneyi sonucunda gerilme-deformasyon grafikleri oluşturulmuştur. Deneyler sonucunda hâkim kil minerallerinin klorit ve illit-mika olduğu anlaşılmıştır. Klorit ve illit-mika minerallerini içeren numunelerin üç eksenli sıkışma dayanımı deneylerinde gerilme arttıkça deformasyon miktarlarının artmış ve sonrasında sabit kalmıştır. Elde edilen sonuçlar aktif tektonizma içinde yer alan yerleşim yerleri veya önemli mühendislik yapılarının yapılacağı yerlerde bulunması kil türü ile su içeriği arasındaki ilişkinin önemini net bir şekilde ortaya koymaktadır.

**Anahtar Kelimeler** Su İçeriği; Zemin Mekanik; Jeoteknik Özellikleri; Kil; Afyonkarahisar

#### Abstract

The methods used to determine the geotechnical properties of clayey soils are generally consistency limits, sieve analysis and triaxial compressive strength tests. In this study, it was aimed to investigate the type of clay minerals and their relationship with other parameters while determining the geotechnical properties of clayey soils. For this purpose, X-ray diffraction (XRD) analyses were performed after the physical properties of the samples taken under field conditions were defined. Mechanical properties were determined by triaxial compression strength tests. In triaxial compression strength tests, samples with similar water contents were divided into two groups as low plasticity and high plasticity. As a result of the triaxial compression strength tests of both groups, stress-deformation graphs were created. As a result of the tests, it was understood that the dominant clay minerals were chlorite and illite-mica. In the triaxial compression strength tests of the specimens containing chlorite and illite-mica minerals, the amount of deformation increased as the stress increased and then remained constant. The results obtained clearly reveal the importance of the relationship between clay type and water content in settlements located in active tectonism or in places where important engineering structures will be built.

**Keywords:** Water Content; Soil Mechanics; Geotechnical Properties; Clay; Afyonkarahisar

#### 1. Giriş

İnce taneli zeminlerin en önemli kısmını oluşturan kil mineralleri temelde 2 mikrondan daha küçük tane boyutundaki alüminyum silikatlardan oluşmaktadır (Mitchell ve Soga 2005; Hubert vd 2009; Holtz vd 2011). Kil minerallerinin oluşabilmesine olanak sağlayan en önemli parametrelerden birisi sahada yer alan jeolojik birimlerin ayrışma miktarlarıdır. Ayrışma miktarının artış ve azalışını kontrol eden parametrelere bakacak olursak; yağış miktarı, topoğrafya, suyun varlığı, sıcaklık, rüzgar, yağış, tektonizma, sıcak-soğuk farkının fazla olması, gibi nedenlerdir. Bölgenin fazla yağış alması su miktarının artmasına neden olacak ve buna bağlı olarak yıkanma miktarı fazla olacaktır. Buna ek olarak sıcaklık artışının da

eklenmesiyle birincil minerallerin bozulması sonucu ikincil minerallere dönüşümü sağlayan kimyasal reaksiyonun hızlanmasına neden olacaktır. Rüzgar ve sıcak-soğuk farkının fazla olması bölgede yer alan jeolojik birimlerin ayrışmasına arttırıcı etki yapmaktadır. Yeraltı ve/veya yerüstü suların sahada yer alması ile su taneleri ince taneli zeminlerin arasına girecek ve soğuk havalarda donacaktır. Havaaların ısınması ile sular çözülecek ve donma-çözünme olayı gerçekleşecektir. Bu sebeple sıcaklık farkının fazla olması ayrışma miktarının artmasına neden olan bir diğer önemli parametredir. Tüm bu parametreler yardımıyla ana kayadan fiziksel ve kimyasal yol ile ayrışan malzemelerin rüzgâr, akarsu gibi etkiler ile taşınması, uygun bir bölgede depolanması sonucunda killi zeminler

meydana gelmektedir. Ana kayanın mineralojik bileşimi yeni oluşacak olan minerallerin iskeletini oluşturmaktadır (Tripathy ve Raha 2019). Oluşan yeni kil türünün tane boyutu ve fiziksel şekilleri, kristal yapısı oluşan yeni kil mineralinin türünü, mineralojik yapısını, kristal yapısını etkilemektedir (Egli vd 2001).

Kil mineralojisi zeminlerin fiziksel ve jeoteknik özelliklerine etki eden önemli bir parametredir. Artan nüfusa bağlı olarak yeni yerleşim yerlerine duyulan ihtiyaca cevap verebilmek adına killi zeminler üzerine yapılar inşaa edilmektedir. Kil mineral türünün tespiti, mineralojik yapısı, yeraltı suyunun varlığı, sahanın jeolojik geçmişi gibi parametrelerin bilinmesi yapıların inşa edileceği bölgelerde meydana gelebilecek jeoteknik sorunları en aza indirgeyebilecektir.

Killi zeminlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin jeoteknik özelliklerine etkisi üzerine çalışmalar her ne kadar 1930'lu yıllarda başlasa da özellikle 1950'li yıllardan sonra büyük önem kazanmıştır. Kil minerallerinin nem miktarı, geçirimsizlik durumları, hassasiyet dereceleri, şişme miktarları aktivite dereceleri pek çok araştırmacı tarafından merak konusu edilerek çalışılmıştır (Peck vd 1951; Birrell 1952; Skempton 1953; White 1955; Mielenz ve King 1952). Kil mineral türlerinin zemine olan etkisi irdelendiğinde kil türlerini tek bir başlık altında değerlendirmek ilerleyen yıllarda yeterli olmamıştır. Bu kapsamda kil mineral türlerini araştırmacılar ayrı ayrı incelemeye başlamıştır. Çalışmalar özellikle ilk başlarda illit ve montmorillonit türü kil türleri üzerinde yoğunlaşmıştır (Hendrichs vd 1940; Samuels 1950; Goldberg ve Cline 1953).

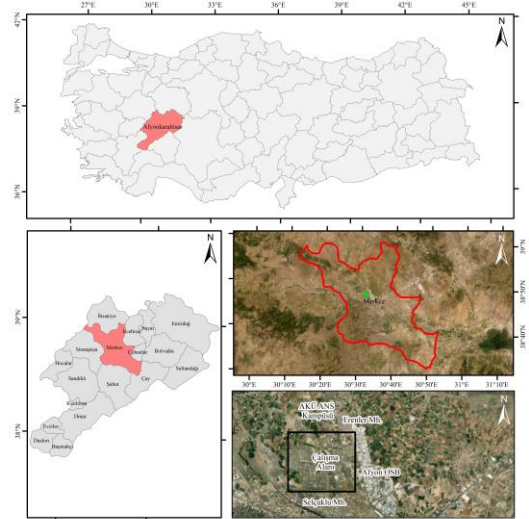
Afyonkarahisar ilinin gün geçtikçe artan nüfusu yerleşim yerlerine olan ihtiyacı da aynı oranda arttırmaktadır. Nüfusun özellikle 2000'li yılların başından günümüze kadar kuzeybatı yönünde genişlemesi bölgede yer alan jeolojik birimlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılmasını önemli kılmaktadır. Çalışma alanını da kapsayan bu alanda genellikle modern havza dolgusu ve alüvyon birimlerin hakim olduğu bilinmektedir. Buna ek olarak Çatkuuyu, Gecek ve Erkmen Faylarının bölgede yer alması yerleşim yerlerindeki sorunların bir kat daha arttırmasına neden olmaktadır (Gücek ve Zorluer 2019; Özkaymak ve 2020). Bugüne kadar yapılmış olan çalışmalar killi zeminlerin fiziksel, mekanik, mineralojik açıdan incelenmesi ile sınırlı kalmıştır. Ancak bütün bu çalışmalarda mineralojik analizler sonucu elde edilen kil mineral türlerinin zeminlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini ne şekilde etkilediğini net bir biçimde ortaya koyamamıştır. Yeni yerleşim yerlerine duyulan ihtiyaç sonucunda yapılan bu çalışma ile sahada yer alan

kuvaterner yaşlı modern havza dolgusunun incelenmesi büyük bir önem arz etmektedir. Yeni yerleşime açılacak olan bölgenin yakınlarında yapılan önceki çalışmalar ile bölgede yer alan litolojik birimlerin; jeolojik ve jeoteknik özellikleri tespit edilmeye çalışılmıştır. Ancak yapılan önceki çalışmalarda yalnızca fiziksel ve mekanik özelliklerin tespit edilmesi ile sahada yer alan jeolojik birimlerin özelliklerinin net şekilde anlaşılmasına neden olmuştur. Yani çalışma sahasında yer alan birimlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin birbirleriyle ilişkisi, kil türüne göre değişiklik gösterip göstermediği, kil türü-su içeriği ilişkisini incelemeye çalışılmamıştır. Yapılan çalışma ile bölgede yer alan ve geniş bir yayılım sunan Kuvaterner yaşlı modern havza dolgularının jeoteknik özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Fiziksel ve mekanik özelliklerin tespit edilmesine ek olarak yapılan X-ışınları kırınımı (XRD) incelemeleri ile kil mineral türleri tespit edilmiştir. Elde edilen tüm verilerden yola çıkarak Erenler (Afyonkarahisar) bölgesindeki killerin fiziksel ve üç eksenli sıkışma dayanım deneyleri yardımıyla jeoteknik davranışlarının incelenmesi amaçlanmaktadır.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1 Materyal

Arazi çalışmaları kapsamında Afyonkarahisar ilinin yaklaşık 10 km kuzeyinde, Erenler mahallesinin yakınında bulunan çalışma alanında toplam 57 adet noktada sondaj çalışması yapılmıştır (Şekil 1). Yapılan sondaj çalışmalarında en derin sondaj 2,5 m, en sığ sondaj ise 0,5 m derinlikte yapılmıştır.



Şekil 1. Çalışma alanı yer bulduru haritası.

Sondaj çalışmaları kapsamında her 0,5 m'de örnekleme yapılmış olup toplam 275 tane örselenmiş numune alınmıştır. Alınan 275 adet sondaj numunesinin ilk fiziksel özellikleri arazi ortamında tanımlanarak deney föyüne yazılmıştır. Alınan numunelerin doğal su içeriği ve ilksel

fiziksel özelliklerini korumasına özen gösterebilmek için çift kat poşetlenerek güneş ışını ve diğer fiziksel özelliklerini bozucu etmenlerden korunması sağlanmıştır. Çift kat poşetlenen numuneler en kısa sürede Afyon Kocatepe Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarına deneylerini yapmak üzere getirilmiştir.

Erkmen volkanitleri Afyonkarahisar ilinde de etkili olan volkanizmanın en son ürünü olarak uyumsuz olarak yer almaktadır. İnceleme alanında bulunan Kuvaterner yaşlı modern havza dolgusu birimi, en genç birim olarak yukarıdaki belirtilen birimleri örterek istifin tavanında yer almaktadır (Şekil 2).



#### AÇIKLAMALAR

#### Semboller

Yarım Yaşam	Simge	Adı
SENOZOYİK	Qal	Alüvyon
	Uyumsuzluk	Uyumsuzluk
MİYOSEN	m2	Ömer-Gecek Formasyonu
	Uyumsuzluk	Uyumsuzluk
MESOZOYİK	Pz3	Afyon Metamorfileri

	Yol
	Fay
	Tren Yolu
	Yerleşim Yeri
	Tepe Adı
	Çalışma Alanı

Şekil 2. İnceleme alanı 1/100.000 ölçekli jeolojik haritası (Öcal vd., 2011).

Çalışma alanının tabanında şist ve mermer birimlerinden meydana gelen Paleozoik yaşlı Afyon Metamorfileri yer almaktadır. Afyon Metamorfileri biriminin üzerine, konglomera ve volkanosedimanter istif ile temsil edilen Orta-Üst Miyosen yaşlı Ömer-Gecek Formasyonu uyumsuz olarak gelmektedir. Ömer-Gecek Formasyonunun üzerine bölgede yayılım alanı sunan

## 2.2 Metot

Numunelerin mineralojik, fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi için numunelere aşağıda detayları verilen deneyler yapılmıştır. Mineralojik özellikler X-ışını kırınımı (XRD) yöntemiyle belirlenmiştir. Fiziksel deneyleri yapılan numunelerin 0.5 m ve 1 m derinliklerinde Yüksek plastisiteli (CH) ve düşük plastisiteli (CL) zemin sınıfının her birinden 3 tane olmak üzere toplam 6 tane numune alınmıştır. Bunun için XRD analizleri tüm kaya ve kil boyutu analizler olarak 2 grupta yürütülmüştür.

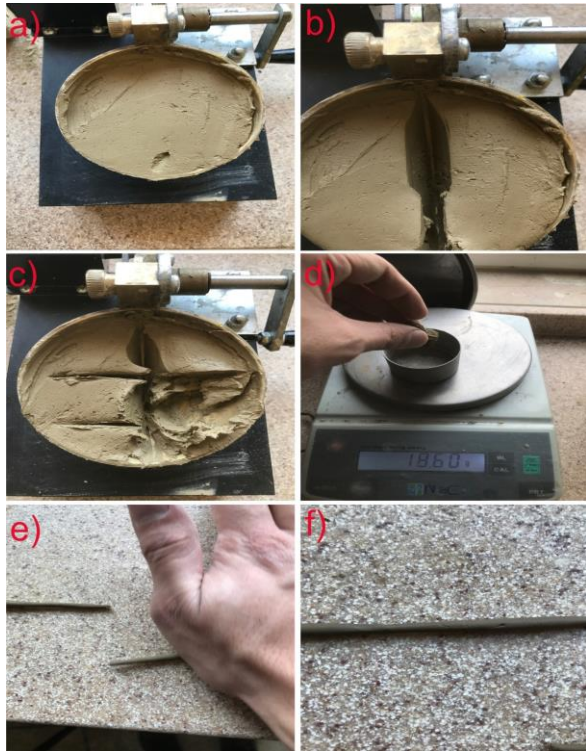
Tüm kaya XRD analizlerinin yapılabilmesi için numuneler,  $-250\mu\text{m}$  tane boyutuna kadar düşürülmüş ve numunelerin  $2\theta = 2-70^\circ$  aralığında XRD çekimi yapılmıştır. Tüm kaya XRD analizleri sonucunda kil mineralleri belirlenen numunelerde kil boyutu XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Kil koyutu XRD analizleri için yönlendirilmiş numuneler hazırlanmıştır (Brindley ve Brown 1980, Saka 1997, Yıldız 2000). Yönlendirilmiş numunelere bazı tali işlemler uygulanmış ve kil minerallerinin  $2\theta^\circ$  bölgesinde yer alan bazal kırınımlarda yapay değişimler oluşturulmaya çalışılmıştır. Bunlar; havada kurutulmuş (AD), etilen glikolle (EG) ve ısıtılmış ( $550^\circ\text{C}$ ) (550) muamele şeklindedir. Meydana gelen yapay değişimlerin incelenmesi sonucunda kırınım profilleri benzer kil minerallerinin birbirinden ayırt edilmesi sağlanmış ve buna bağlı olarak hangi tür kil minerali olduğu tanımlaması kesin bir biçimde yapılmıştır. X-ışınları kırınımı (XRD) analizleri A.K.Ü Teknoloji Uygulama Araştırma Merkezi (TUAM)'nde gerçekleştirilmiştir. Analizler Shimadzu XRD-6000 model X-ışını difraktometre cihazı kullanılarak yapılmış olup analizlerde 40 kV (voltaj) ve 30 mA (akım) difraksiyon değerleri seçilmiştir. Numunelerin  $2^\circ/\text{dk}$ 'da taranması ile tüm kayaç XRD analizi  $2^\circ-70^\circ$  ( $2\theta$ ) ve kil boyutu XRD analizi ise  $2^\circ-30^\circ$  ( $2\theta$ ) ganyometre kırınım açısı aralığında 2000 cps (intensity) pik yoğunluğunda yapılmıştır.

Likit limit deneyi için yine laboratuvar ortamında kurutulan numuneler toz haline getirilmiştir. Toz haline getirilen numune porselen kap içerisine konulmuştur. Kap içerisindeki numunenin su içeriği kademeli olarak artırılmış ve istenilen kıvama gelmesi beklenmiştir. İstenilen kıvama gelen numune Casagrande aletinin içerisine konulmuştur (Şekil 3a). Pirinç pota içerisinde yer



alan numunenin orta noktasında oyuk açma bıçağı ile yarık açılmıştır (Şekil 3b). Açılan yarık kapanana kadar Casagrande aleti üzerindeki krank kolu çevrilmiştir. Yarığın kapandığı kısımdan bir miktar numune alınmış ve etüvde 24 saat 105 °C'de kurutulmuştur (Şekil 3c). Kurutulan numunenin tekrardan tartı yardımıyla ağırlığı ölçülmüş ve deney föyüne yazılmıştır (Şekil 3d). Plastik limit deneyini yapabilmek için en az 20 g numune alınmıştır. Alınan numune cam plaka üzerine konulmuş ve el ayası yardımıyla cam plaka üzerinde çapı 3 mm oluncaya kadar çevrilmiştir (Şekil 3e). Numune üzerinde çatlak ve kopmalar gözlemlenene kadar deneye devam edilmiştir. Çatlak ve kopma meydana geldiğinde numune kap yardımıyla etüvde kurutulmuştur (Şekil 3f) (TSE 2006a, 2006b).

Özgül ağırlıklarını tespit edebilmek amacıyla 50 ml'lik piknometre kullanılmıştır. Piknometrelerin ham ağırlıkları tartılmış ve deney föyüne işlenmiştir. Ardından piknometrenin tamamı su ile doldurularak ağırlığı belirlenmiştir. Daha sonra içi boşaltılıp kurutulduktan sonra en az 20 gr olacak şekilde numune doldurulmuş ve geri kalan kısmı su ile doldurularak ağırlığı tartılmıştır (TSE 2006a, 2006b).



**Şekil 3.** Likit limit deney aşamaları; a) Numunenin potaya konulması, b) Oyuk açma bıçağı kullanılarak merkezden oyuk açılması c) Düşüş yapıldıktan sonra numune alınması, d) Numunenin tartımının yapılması, e) Plastik limit deneyi, f) Numune üzerindeki çatlakların gözlemlenmesi.

Zemin Mekaniği laboratuvarına getirilen 275 adet numunenin fiziksel ve mekanik analizleri yapılmıştır.

Fiziksel analizlerinden ilk olarak ıslak elek analizi yapılmış ve daha sonra doğal su içeriklerini tespit etmek için deneye tabii tutulmuşlardır. Daha sonra ince tane boyutunun belirlenebilmesi için hidrometre, numunelerin davranışlarını belirlemede önemli bir rol oynayan kıvam limitleri (plastik limit, likit limit, büzülme limiti) deneyleri yapılmıştır (TSE 2006b; ASTM 2004). Fiziksel özelliklerinin belirlenmesinden sonra numunenin gerilme-deformasyon ilişkisini tespit etmek amacıyla üç eksenli sıkışma deneyi yapılmıştır (TSE 2006a).

### 3. Bulgular

#### 3.1 X-Işını Kırınımı (XRD)

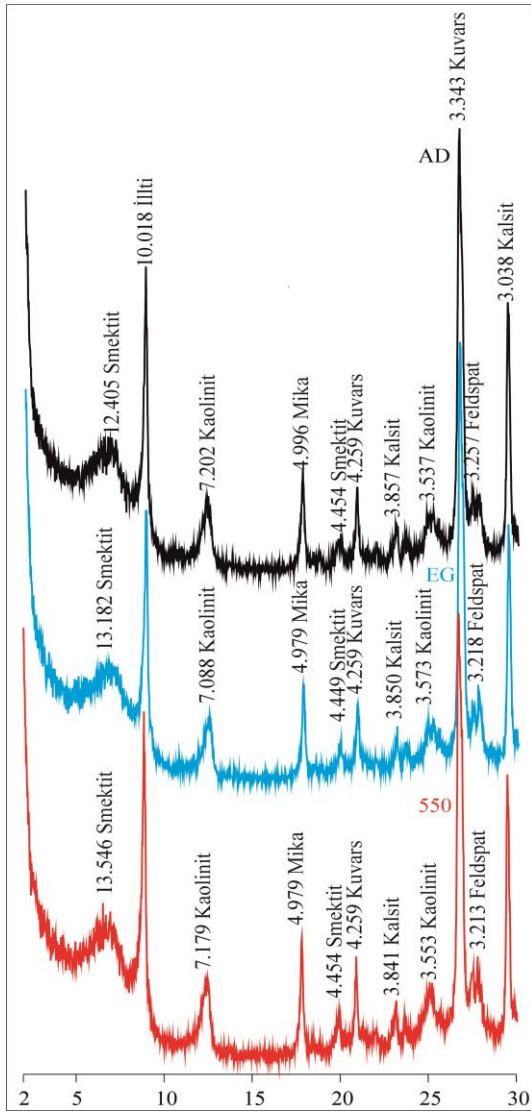
XRD analizi sonucunda numunelerin kalitatif mineralojik analiz sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir. Analizi yapılan numunelerde hâkim kil minerali olarak klorit ve illit-mika tespit edilmiştir. Kil dışında tespit edilen bileşenler sırasıyla kuvars, kalsit, dolomit ve hematittir (Şekil 5). Kil boyutu XRD analizlerinde üç farklı yöntem kullanılarak illit-mika minerallerinin piklerinde gözlemlenen değişimler incelenmiştir. Bu üç yöntem sırasıyla hava kurutulan numune (AD), etilen glikollü numune (ED) ve 550°C'de fırınlanmış numunedir (Şekil 4). Klorit minerallerinin tespit edilmesinde  $2\theta=2-30^\circ$  arasındaki  $14.20\text{Å}$  (001),  $7.10\text{Å}$  (002),  $4.75\text{Å}$  (003) ve  $3.53\text{Å}$  (004) yansımalarına bakılmıştır. Fırınlama ( $\approx 550^\circ\text{C}$ ) ve etilen glikol işlemi sonucunda herhangi bir değişim meydana gelmemiştir. Illit minerallerinin  $10.00\text{Å}$  (001) ve  $5.00\text{Å}$  (001)'da en karakteristik pikleri gözlenmiştir (Brindley ve Brown 1980; Saka 1997).

**Çizelge 1.** Kalitatif X-ışınları kırınımı (XRD) sonuçları.

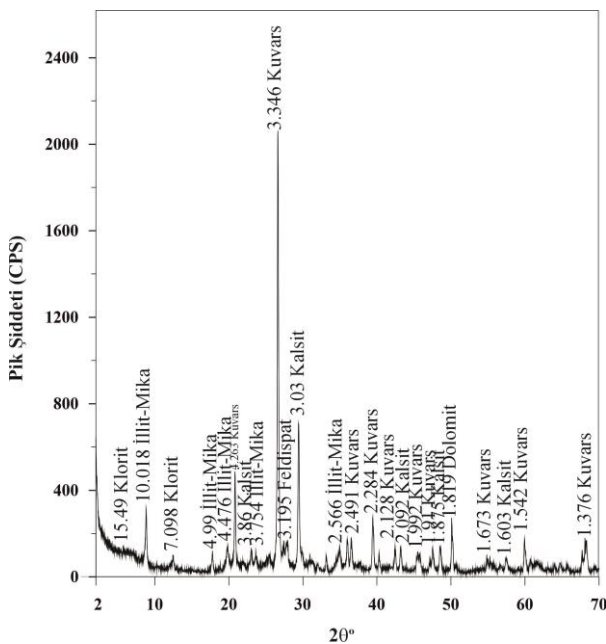
Numune Adı	Klorit	İllit-Mika	Kuvars	Kalsit	Dolomit	Hematit
AÇ-3,2a1	+	+	+	+	+	+
AÇ-5,1a7	+	+	+	+	+	+
AÇ-2,3a1	+	+	+	+	+	+
AÇ-3,3a7	+	+	+	+	+	+
AÇ-1,5a7	+	+	+	+	+	+
AÇ-5,2a7	+	+	+	+	+	+
AÇ-6,3a1	+	+	+	+	+	+
AÇ-7,1a1	+	+	+	+	+	+
AÇ-7,5a1	+	+	+	+	+	+
AÇ-7,5a1	+	+	+	+	+	+
AÇ-13,5a7	+	+	+	+	+	+
AÇ-14,1a1	+	+	+	+	+	+

#### 3.2 Kıvam Limiti Testleri

Likit limit, plastik limit ve plastisite indeksi değerleri CH zemin sınıfı için sırasıyla %50, %65 ve %69'dur. Plastik limit değerleri %27, %25 ve %29, plastisite indisi değerleri ise %23, %40 ve %40 olarak tespit edilmiştir. CL zemin sınıfında ise likit limit değerlerinin sırasıyla %33, %48 ve %49, plastik limit değerlerinin %24, %25, %24 ve plastisite indisi değerlerinin ise %9, %23 ve %25 olduğu belirlenmiştir (Çizelge 2).



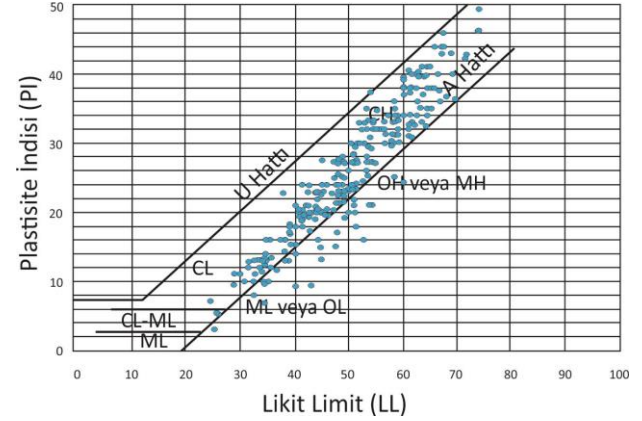
Şekil 4. AÇ-2, 3a1 numaralı örneğin detay kil grafiği.



Şekil 5. AÇ-2, 3a1 numaralı örneğin tüm kayaç grafiği.

Çizelge 2. Kıvam limit test sonuçları.

Zemin Sınıfı	Numune Numarası	Likit Limit (%)	Plastik Limit (%)	Plastisite İndisi (%)
Yüksek	17,2a3	50	27	23
Plastisiteli Kil (CH)	20,1a6	65	25	40
	20, 1a3	69	29	40
Düşük	17,2a6	33	24	9
Plastisiteli Kil (CL)	15,3a3	48	25	23
	15,3a6	49	24	25



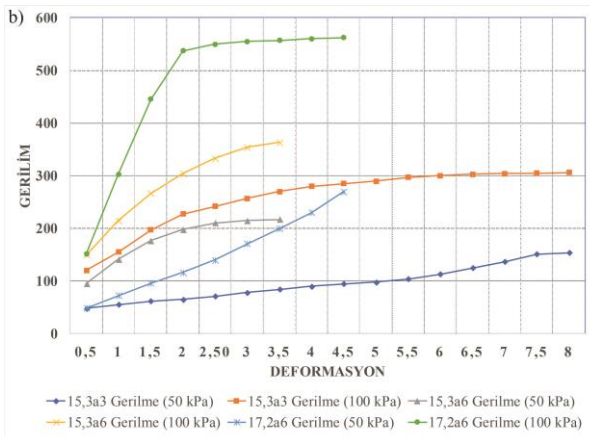
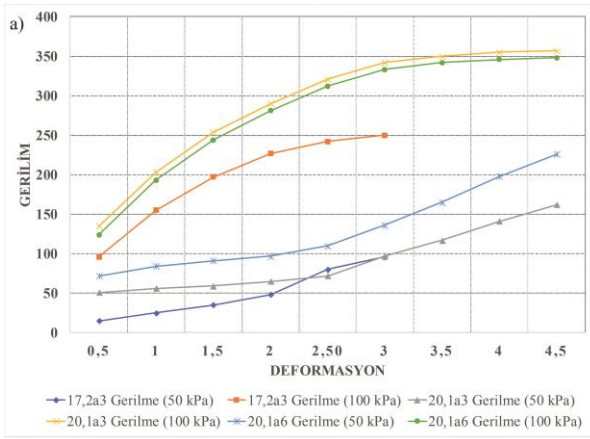
Şekil 6. Casagrande kartı

Kıvam limitleri belirlenen numunelerin Casagrande plastisite kartında yerleri tespit edilerek zemin sınıfları belirlenmiştir (Şekil 6).

### 3.3 Üç Eksenli Sıkışma Dayanımı Testi

Su içeriği değerlerine göre hazırlanmış olan örselenmiş zemin numuneleri için düşük ve yüksek plastisiteli killerin serbest sıkışma dayanımları sırasıyla 80 kPa ile 525 kPa arasında değişiklik göstermektedir (Şekil 7). Gerilme deformasyon grafikleri incelendiğinde; yüksek plastisiteli (CH) killerde 50 kPa hücre basıncında gerilmeler 20-120 kPa arasında yer alırken, 100 kPa hücre basıncında 100-355 kPa arasında yer almaktadır (Şekil 7a). Düşük plastisiteye (CL) sahip killerin dayanım değerleri 50 kPa hücre basıncında 50 ile 220 kPa arasında, 100 kPa hücre basıncında 120-360 kPa arasında değişmektedir (Şekil 7b). Düşük plastisiteli ve yüksek plastisiteli killerde 50 kPa hücre basıncında deformasyon çizgisi nispeten doğrusal bir çizgi sunarken 100 kPa hücre basıncında lineer olmayan bir doğru gözlemlenmektedir. Bu durum kalıcı kayma direnci ile açıklanabilmektedir.

Bazı durumlarda ise artan deformasyon değeri ile birlikte kayma gerilmesi değişmeyen sabit bir değer almaktadır (Genç 2011). Özellikle 50 kPa değerinde her iki grafikte de kilin pik değerine ulaşmadan deneyin sonlandığı tespit edilmiştir. Bu durumun en önemli sebebinin deney esnasında kil numunesinin ani göçmeye maruz kalarak yenilmesi ile açıklanabilir (Xu vd 2018) (Şekil 7).



**Şekil 7.** Düşük plastisiteli (CL) ve yüksek plastisiteli (CH) zemin sınıfına ait numunelerin gerilme deformasyon grafikleri a-) CH zemin sınıfı b-) CL zemin sınıfı.

### 3.4 Farklı Plastisiteye Sahip Kil Minerallerinin Dayanım Özellikleri

Farklı plastisiteli killerin su içeriğinin kayma dayanımı üzerine etkisini araştırmak amacıyla araziden alınan örselenmiş numunelerin XRD analizleri yardımıyla mineralojik analizleri yapılmış, ayrıca numunelerin üç eksenli sıkışma dayanım testleri yapılmıştır. Farklı plastisiteli hakim numunelerde başlıca kil mineralleri klorit ve illit-mika olduğu tespit edilmiştir. Düşük plastisiteli killerin su içerikleri %10, %13 ve %19 olarak belirlenmiştir. Yüksek plastisiteli killerin su içerikleri ise %13, %17 ve %14 olarak tespit edilmiştir (Çizelge 3). Su içeriklerine bağlı olarak oluşan numune yüksekliğinde azalma ve meydana gelen şişkinliğin yüksek su içeriğine sahip numunelerde meydana geldiği görülmektedir. Bu durumun temel sebebi numune üzerindeki plastik deformasyonun bariz bir şekilde görülebilmesidir. (Malizia ve Shakoor, 2018). Üç eksenli sıkışma altındaki numunede, gerilme artışına bağlı olarak yükseklik azalması ve hacim genişlemesi gözlemlenmektedir. Gerilme-deformasyon grafiklerine göre yüksek plastisiteli kilerde su içeriğine bağlı olarak deformasyon miktarının arttığı gözlemlenmektedir. Düşük plastisiteli kilerde ise genel olarak su içeriğine bağlı olarak deformasyon

miktarlarında gözle görülür bir artış meydana gelmemektedir. Deformasyon miktarları üç eksenli sıkışma dayanımı ile tespit edilen numunelerin deney sonrası şekilleri incelendiğinde; düşük plastisiteli kilerde (15,3a6, 17,2a6, 15,3a3) ince çatlaklar meydana geldiği ve yenilmenin çatlaklar sonrası hemen oluştuğu görülmektedir (Xu et al., 2018) (Şekil 8).



**Şekil 8.** Üç eksenli deney sonrası numunelerde görülen şekil değişiklikleri.

Yüksek plastisiteli kilerde (17,2a3, 20,1a6, 20,1a3) ise çatlakların daha az geliştiği, numunelerde boy kısalması ve sonrası yenilme meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu durum yüksek plastisiteli killerin plastik davranış sergileyebilmesi için daha fazla suya ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymaktadır.

**Çizelge 3.** Kil türü ve su içeriklerini gösteren çizelge.

Kil Türü	Numune numarası	Su içeriği
Düşük Plastisiteli Kil (CL)	15,3a3	19
	15,3a6	13
	17,2a6	10
Yüksek Plastisiteli Kil (CH)	20,1a6	17
	20,1a3	14
	17,2a3	13

### 4. Tartışma

Akgün vd (2018), yapmış oldukları çalışma ile Çankırı'da yer alan Orta ilçesinde 22 noktadan bozulmuş ve bozulmamış numuneler almışlardır. Alınan numuneler üzerinde XRD, özgül ağırlık, SEM, hidrometre, elek analizi, ödometre ve şişme testleri uygulamışlardır. Yapılan çalışma ile hakim kil minerallerinin smektit, kaolinit ve illit olduğunu tespit etmişlerdir. Özellikle smektit mineralinin bolluğunun şişme yüzdesinin arttırdığını ortaya koymuştur.

Al-Zoubi (2008) yapmış olduğu çalışma ile yüksek plastisiteli kilin doğal durumunda şişme özelliğini araştırmıştır. Ayrıca bu durumda içerdiği potasyum ve kalsiyum klorür miktarının kilin şişme özelliği ne derecede etkilediğini araştırmıştır. Yapılan çalışma ile zeminlerin kıvam limitleri ile şişme arasında doğrusal bir ilişki olduğunu ortaya koymuş ve zeminin davranışının bu

etkiler altında farklı davranışlar sergilediğini tespit etmiştir.

Bo vd (2015), Singapur Changi'de yer alan denizel ortamda oluşmuş deniz kilinin jeoteknik özellikleri ve mineralojisini belirlemek için XRD, taramalı elektron mikroskop (SEM), su içeriği, kıvam limitleri, konsolidasyon, birim hacim ağırlık deneyleri yapmışlardır. Yapılan deney sonuçları ile kil mineralinin zemin davranışı üzerine etkisini araştırmışlardır. Yapılan çalışma ile ana kil mineralinin kaolinit, smektit ve mika olduğunu tespit etmişlerdir. Yapılan deney sonuçlarına göre kil mineralinin zemin davranışı üzerinde aktif bir rol oynadığı, özellikle kaolinit mineralinin varlığının kıvam limitlerini etkilediğini ortaya koymuşlardır.

Gylland vd (2013), Tiller bölgesinde heyelan tehlikesi bulunan bölgede yer alan kil minerallerinin jeoteknik ve fiziksel özelliklerini belirlemişlerdir. Yapılan çalışma ile kil minerallerinin klorit ve illit olduğunu tespit etmişlerdir. Yapılan mekanik deneyler sonucunda drenajsız kesme mukavemetlerini 30 kPa ve 50 kPa arasında tespit etmişlerdir. Sonuç olarak yapılan çalışma ile bölgede yer alan killerin hafif aşırı konsolide kil olduğunu tespit etmişlerdir. Schmitz vd (2004), Atterberg limitlerinin kil mineralleri ile ilişkisini koymak için yapmış oldukları çalışmada hakim kil minerali olarak kaolinit ve smektit varlığını tespit etmişlerdir. Yitagesu vd (2012), şişme özelliği gösteren killer ile zeminlerin mühendislik davranışlarıyla ilişkisinin tespit edilmiştir. Bu çalışmada hakim kil minerallerinin montmorillonit ve illit olduğu tespit edilmiştir. Artan kil içeriğine oranla şişme değerleri arasında korelasyon olduğunu tespit etmişlerdir.

Yukarıda verilen bilgiler ışığında kil minerallerinin bileşiminin ve yüzdesel dağılımının zemin davranışı üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar ile kil minerallerinin oluşum ortamı, fiziksel özellikleri, mekanik özelliklerinin doğru tespit edilmesi mühendislik jeolojisi açısından büyük öneme sahiptir. Yapılan bu çalışma ile Akgün vd (2018), Gylland vd (2013) yapmış oldukları çalışmada benzer kil minerallerinin varlığı tespit edilmiştir. Literatürde yer alan çalışma ile gerçekleştirilen bu çalışmada kil mineralinin zeminin şişme, konsolidasyon, oturma gibi davranışları üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymuştur.

## 5. Sonuçlar

Nüfusun hızlı artış gösterdiği büyük kentlerde yerleşim yerlerine duyulan ihtiyaca bağlı olarak killi zeminlerin deformasyon davranışlarının incelenmesi büyük öneme sahiptir. Bu kapsamda zemin kıvamının, killi zeminlerin

deformasyon ve dayanım özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak jeoteknik sorunları açısından önemli bir konu teşkil etmektedir. Bu çalışmanın temel amacı benzer su içeriklerine sahip olan ve iki grup altında incelenen düşük ve yüksek plastisiteli killerin zeminlerin artan su içeriğine bağlı olarak göstermiş oldukları davranışları belirlemektir.

Özellikle killi zeminlerin aynı bölge içerisinde farklı fiziksel ve mekanik davranış sergilemesi üzerinde yer alacak mühendislik yapılarında ani göçme, oturma gibi olumsuz etkilerin oluşmasına neden olabilmektedir. Bu sorunların araştırılması kapsamında arazi koşullarında alınan ve laboratuvar ortamında deneyleri yapılarak yüksek ve düşük plastisiteli zemin sınıfları (CL ve CH) üzerinde üç eksenli sıkışma dayanımı deneyi yapılmıştır. Düşük ve yüksek plastisiteli killer, killerin mineralojisi, zeminin su içeriğine bağlı olarak farklı jeoteknik davranış sergilemektedir. Yapılan XRD analizi sonucunda kil mineralleri olarak klorit ve illit-mika belirlenmiştir. Klorit ve illit-mika minerallerinin varlığı zemin için olumsuz etki oluşturmaktadır. Özellikle klorit ve illit-mika minerallerinin dayanımlarının zayıf olması mühendislik yapılarında meydana gelebilecek olumsuzlukların ana nedenini oluşturmaktadır. Üç eksenli deney sonucunda 50 ve 100 kPa sabit hücre basıncında deney tabii tutulmuştur. Bunun sonucunda CL zemin sınıfındaki numunelerin 50 kPa hücre basıncında, 50-220 kPa basınç altında; 100 kPa hücre basıncında ise 120-360 kPa arasında; CH zemin sınıfındaki numunelerin ise 50 kPa hücre basıncı altında 20-120 kPa, 100 kPa hücre basıncında da 100-355 kPa arasında yenildiği görülmektedir. Bazı numunelerin hemen yüklemeye başlar başlamaz yenilmesinin en önemli nedeni ani göçmeye maruz kalmasıdır. Bu durumunun özellikle düşük plastisiteye sahip kil grubunda görülmesi bu durumu destekler niteliktedir. Yüksek plastisiteye sahip kil grubunda nispeten yüksek dayanım göstermesi numune içerisindeki suyun boşluk suyu basıncı oluşturarak dayanım gösterdiğine bağlanmaktadır. Bu durumun bir diğer önemli nedeni ise düşük plastisiteli killerin plastik davranış göstererek hemen kırılması, yüksek plastisiteli killerin ise daha elastik davranış göstererek nispeten daha uzun süre dayanabilmesidir. Çalışmadan elde edilen tüm bulguların birlikte değerlendirilmesiyle; hakim kil mineralinin klorit, illit-mika olduğu numunelerde farklı su içeriklerine ve plastisite durumuna bağlı olarak jeoteknik davranışları farklılık göstermektedir. Özellikle yüksek plastisiteye sahip ve su içeriklerinin yüksek olduğu numunelerin üç eksenli sıkışma dayanımına tabii tutulduğunda numunenin kırılmadığı, yalnızca şekil değiştirdiği görülmektedir. Tam tersi durumunda düşük plastisiteli ve düşük su içeriğine sahip numunelerin çok



çabuk kırıldığı tespit edilmektedir. Bu durumun kil minerallerinin ve kil dışı minerallerinin yüzdesel dağılımına ve su içerikleriyle olan ilişkisine bağlı olduğu düşünülmektedir. Buradan çıkartılacak sonuç klorit ve illit-mika minerali içeren bölgelerde su içeriklerine bağlı olarak yapılacak jeoteknik çalışmalarında bu durum dikkate alınmalıdır. Aksi takdirde mühendislik yapıları ciddi zararlar görebilecek olup çok ciddi can ve mal kaybına yol açabilecektir.

#### **Etik Standartlar Bildirgesi**

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Bu çalışma Prof. Dr. Ahmet YILDIZ ve Prof. Dr. Mahmut MUTLUTÜRK danışmanlığında Sami Serkan İŞOĞLU tarafından 26/07/2021 tarihinde tamamlanan "Erenler (Afyonkarahisar) Bölgesi Killerin Jeomühendislik Özelliklerinin İncelenmesi" başlıklı yüksek lisans (Tez no: 677654) tezinden türetilmiştir.

#### **Yazarlık Katkı Beyanı**

Yazar 1: Kaynakların Oluşturulması, Deneylerin Yapılması, Makalenin Yazımı, Şekillerin Çizilmesi

Yazar 2: Proje Yöneticisi, Makalenin Düzenlenmesi, Metodolojinin Oluşturulması, Okuma

Yazar 3: Proje Araştırmacısı, Deney Tasarımının Yapılması, Metodolojinin Oluşturulması, Son Okumanın Gerçekleştirilmesi

#### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

#### **Verilerin Kullanılabilirliği**

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm verilerin yazar ile iletişime geçilmesi sonucunda kullanım onayı alınabilecektir.

#### **Teşekkür**

Bu araştırma Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir (Proje No: AKU BAPK-20.FEN.BİL.08)

#### **6. Kaynaklar**

Akgün, H., Türkmenoğlu, G. A., Kelam, A. A., Yousefi-Bavil, K., Öner, G., Koçkar, K. M., 2018. Assessment of the effect of mineralogy in the geotechnical parameters of clayey soils: A case study for the Orta County, Çankırı, Turkey. *Applied Clay Science*, **164**, 44-53. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.08.029>

Al-Zoubi, M. S., 2008. Swell characteristics of natural and treated compacted clays. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, **13**, 18.

American Society for Testing and Materials D427-04, 2004. Standard Test Method for Shrinkage Factors of Soils by the Mercury Method. ASTM International.

Birrell, K. S., 1952. Physical Properties of New Zealand Volcanic Ash Soils. Conference on Shear Testing of Soils, Melbourne, Australia, 30-34.

Bo, W. M., Arulrajah, A., Sukmak, P., Horpibulsuk, S., 2015. Mineralogy and geotechnical properties of Singapore marine clay at Changi. *Soils and Foundation*, **55**, 600-613.

<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.04.011>

Brindley, C. M., Brown, G., 1980. Crystal Structure of Clay Minerals and Their X-Ray Identification. *Mineralogical Society of Great Britain and Ireland*, **5**, 518. <https://doi.org/10.1180/mono-5>

Casagrande, A., 1948. Classification and identification of soils: transactions. *American Society of Civil Engineering*, **113**, 901-930. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0006109>

Egli, M., Mirabella, A., Fitze, P., 2001. Clay Mineral Formation In Soils Of Two Different Chronosequences In The Swiss Alps. *Geoderma*, **104**, 145-175. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00079-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00079-9)

Genç, D., 2011. Zemin Mekaniği ve Temeller. TMMOB Mühendisleri Odası, Yayın No: 100.

Goldberg, I., and Klein, A., 1953. Some Effects of Treating Expansive Clays with Calcium Hydroxide. *American Society of the Testing Materials Special Publications* **142**, 53-67. <https://doi.org/10.1520/STP46254S>

Gücek, S., Zorluer, İ., 2019, Afyonkarahisar Uydulent Bölgesinin Zemin Mühendislik Özellikleri Haritalarının Üretilmesi ve Bölgenin Zemin Büyütmesinin Belirlenmesi. International Symposium on Innovations in Civil Engineering and Technology, Afyonkarahisar, 614-622.

Gylland, A., Long, M., Emdal, A., Sandven, R., 2013. Characterisation and engineering properties of Tiller Clay. *Engineering Geology*, **164**, 86-100. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.06.008>

Hendrichs, S. B., Nelson, R. A., and Alexander, L. T., 1940. Hydration Mechanism of the Clay Mineral Montmorillonite Saturated with Various Ions. *Journal of the American Chemical Society*, **62**, 1457-1464. <https://doi.org/10.1021/ja01863a037>

Holtz, R. D., Kovacs, W. D., Sheahan, T. C., 2011. An Introduction to Geotechnical Engineering, 2nd edition. Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 853.

Hubert, F., Caner, L., Meunier, A., Lanson, B., 2009. Advances in characterization of soil clay mineralogy using X-ray diffraction: from decomposition to profile fitting. *European Journal of Soil Science*, **60 (6)**, 1093-1105. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01194.x>

Malizia, P. J., Shakoor, A., 2018. Effect of water content and density on strength and deformation behavior of clay soils. *Engineering Geology*, **244**, 125-131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.07.028>

Mielenz, R. C., King, M. E., 1952. Physical-Chemical Properties and Engineering Performance of Clays. *Clay and Clay Minerals*, **1**, 196-254. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1952.0010122>

- Mitchell J K, Soga K, 2005. Fundamentals of Soil Behavior, 3rd edition. John Wiley and Sons, 577.
- Öcal, H., Turhan, N. ve Göktaş, F. 2011, 1:100.000 ölçekli Türkiye jeoloji haritaları Afyon K-25 paftası ve raporu. Maden Tetkik Arama (MTA) Genel Müdürlüğü Jeoloji Etütleri Dairesi Yayını, **159**, 33, Ankara.
- Özkaymak Ç, Sözbilir H, 2020, Structural Evidence For Extensional Domain-Type Geothermal Play in Western Anatolia: A Case Study From Afyon-Akşehir Graben. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Journal of Science and Engineering*, **20(4)**, 693-702.  
<https://doi.org/10.35414/akufemubid.704433>
- Peck, R. B., Ireland, H. O., Fry, T. S., 1951. Studies of Soil Characteristics: The Earth Flows of St. Thuribe. Quebec University of Illinois Department of Civil Engineering, Soil Mechanics, **1**, 1-9.
- Saka A H, 1997. Mineralojik Analizler X-Işınları Toz Kırınım Yöntemlerinin Temel Prensipleri ve Laboratuvar Şartlarının Standardizasyonu.
- Samuels S G, 1950. The Effect of Base Exchange on the Engineering Properties of Soils. Building Research Station, Britain, Note C176.
- Schmitz M R, Schroeder C, Charlier R, 2004. Chemo-mechanical interactions in clay: a correlation between clay mineralogy and Atterberg limits. *Applied Clay Science*, **26**, 351-358.  
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2003.12.015>
- Skempton A W, 1953. Soil Mechanics in Relation to Geology, Yorkshire Geological Society of A. Brown & Sons. Proceedings of the Yorkshire Geological Society, **29**, 33-62.  
<https://doi.org/10.1144/pygs.29.1.33>
- Tripathy B, Raha S, 2019. Formation of Soil. *Thematics Journal of Geography*. **8**.  
<https://doi.org/10.26643/tjg.v8i8.8140>
- Türk Standartları Enstitüsü, 1900-1, 2006a. İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri Bölüm 2: Mekanik Özelliklerin Tayini. Türk Standartları Enstitüsü.
- Türk Standartları Enstitüsü, 1900-2, 2006b. İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini. Türk Standartları Enstitüsü.
- Yitagesu, A. F., Werff, V. D. H., Meer, V. D. F., Hecker, C., 2012. On the relationship between plasticity and spectral characteristics of swelling soils: The 3-5 µm wavelength region. *Applied Clay Science*, **69**, 67-78.  
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.08.007>
- Xu, Y., Wu, S., Williams, J. D., Serati, M., 2018. Determination of peak and ultimate shear strength parameters of compacted clay. *Engineering Geology*, **243**, 160-167.  
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.07.001>
- Yıldız, A., 2000. Bentonitlerin Teknolojik Özelliklerini Belirleme Yöntemiyle Kullanım Alanlarının Tespiti, 61.
- White, W. A., 1955. 'Water Sorption Properties of Homoionic Clay Minerals, *Clays and Clay Minerals*, **3**, 186-204.  
<https://doi.org/10.1346/CCMN.1954.0030116>
- Winterkorn, H. F., 1950. Engineering Properties of Clay Soils. Winterkorn Road Research Institute. **71 (4)**, 326.  
<https://doi.org/10.1097/00010694-195104000-00014>



# Traktör Lastiklerinin Taban İzlerinin Görüntü İşleme Teknikleriyle Otomatik Ölçümü: Geleneksel Yöntemlere Yenilikçi Bir Alternatif

\*Makale Bilgisi / Article Info  
Alındı/Received: 26.03.2024  
Kabul/Accepted: 01.08.2024  
Yayımlandı/Published:02.12.2024

## Automated Measurement of Tractor Tire Tread Patterns Using Image Processing Techniques: An Innovative Alternative to Traditional Methods

Süleyman KILIÇ<sup>1\*</sup> , Onur KARAÇAY<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kırşehir, Türkiye

<sup>2</sup> Petlas Lastik Sanayi A.Ş., Kırşehir, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

### Öz

Bu çalışma, traktör lastiklerinin taban izlerinin ölçümü için geleneksel yöntemlerin yerine geçebilecek görüntü işleme tekniklerine dayalı bir otomatikleştirme yöntemi önermektedir. Geleneksel ölçüm yöntemlerinin zaman alıcı ve insan hatasına açık olması, otomatik sistemlerin geliştirilmesi ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Bu bağlamda geliştirilen bir görüntü işleme sistemi ile lastik taban izlerinin daha hızlı ve doğru bir şekilde ölçülmesi sağlanmıştır. Sistem, radyal traktör lastikleri üzerinde yapılan deneylerle test edilmiş ve geleneksel ölçüm yöntemiyle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen sistemin lastik taban izlerinin ölçümünde yüksek doğruluk oranlarına ulaştığını ve geleneksel yöntemlere göre önemli ölçüde zaman tasarrufu sağladığını göstermektedir. Bu çalışma, görüntü işleme tekniklerinin endüstriyel uygulamalarda katkı sağlayabileceğinin somut bir örneğini sunmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Görüntü işleme; Lastik taban izi ölçümü; Otomatik ölçüm; Kalite kontrol; Endüstriyel uygulamalar

### Abstract

This study proposes an automated method based on image processing techniques that can replace traditional methods for measuring the tread patterns of tractor tires. The fact that traditional measurement methods are time-consuming and prone to human error has led to the need for developing automated systems. In this context, a faster and more accurate measurement of tire tread patterns has been achieved with an image processing system developed. The system has been tested with experiments on radial tractor tires and compared with the traditional measurement method. The results obtained show that the proposed system achieves high accuracy rates in measuring tire tread patterns and provides significant time savings compared to traditional methods. This study provides a concrete example of how image processing techniques can contribute to industrial applications.

**Keywords:** Image processing; Tire tread pattern measurement; Automatic measurement; Quality control; Industrial applications

### 1. Giriş

Lastik endüstrisi, araçların güvenliği ve performansı üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olduğundan, sürekli gelişim ve yenilik gerektiren bir sektördür. Lastiklerin geliştirilmesi sürecinde, lastiklerin zemin üzerinde bıraktığı izin tespit edilebilmesi performans lastiklerinde (otomobil lastikleri) düşük yuvarlanma direnci, yol tutuşu, traktör lastiklerinde ise geniş taban izi beklentisi nedeniyle kritik bir süreçtir. Bu nedenle, süreç kritik bir kalite kontrol adımı olarak ön plana çıkmaktadır. Geleneksel olarak bu ölçüm, lastiklerin zeminle temas eden veya zeminle temas edebilecek bölgesinin kırmızıya boyanıp beyaz bir kâğıt üzerine basılmasıyla yapılmaktadır. Elde edilen izin alanı ise özel formüllerle hesaplanmaktadır. Ancak bu yöntem, zaman alıcı olması ve subjektif hatalara açık olması nedeniyle sınırlamalara

sahiptir. Araştırmalar daha doğru, verimli ve güvenli lastik taban izi ölçüm yöntemleri için teknolojinin kullanımına yönelik bir eğilimi göstermektedir. Literatür incelemesinde, lastik taban izinin sürüş güvenliği açısından kritik önemini, geleneksel ölçüm yöntemlerinin karşılaştığı zorlukları ve görüntü işleme/sensör tekniklerinin bu alandaki potansiyel avantajları görülmüştür (Wigan 1992, Pomoni 2022, Lee ve Taheri 2017). Görüntü işleme teknikleri, lastik ölçüm ve inceleme süreçlerinde verimlilik, doğruluk ve otomasyon sağlama potansiyeline sahiptir. Geleneksel yöntemler genellikle doğrudan temas gerektirir ve zaman alıcıdır, bu da ölçüm sürecini zorlaştırmakta ve insan hatası riskini artırmaktadır (Huang vd. 2016). Görüntü işleme tekniklerinin kullanımı, bu alanda önemli avantajlar sunarak, temas gerektirmeyen, hızlı ve doğru ölçümler yapılmasını sağlayacaktır.

Lastik taban izlerinin önemi üzerine yapılan araştırmalar incelendiğinde özellikle lastiklerin yol tutuşu/asfalt ilişkisi, lastik sıcaklığı, yakıt tüketimi ve aşınma direnci üzerine etkilerinin bulunduğu görülmektedir (Liu vd. 2024, Sun vd. 2024). Ayrıca, zirai lastiklerde taban izi üzerine yapılan araştırmalar, tarım makinelerinin toprak üzerindeki etkilerini azaltmak ve verimliliği artırmak amacıyla lastik tasarımının (taban izi desenlerinin) ve uygun parametrelerin belirlenmesinin önemini vurgulamaktadır (Phakdee vd. 2024, Jie vd. 2023). Bu çalışmalar, tarım lastiklerinin taban izi tasarımının, toprak sıkışıklığını azaltma, çekiş gücünü artırma ve genel olarak tarım makinelerinin verimliliğini iyileştirme açısından kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir.

Literatürde görüntü işleme teknikleri kullanılarak, lastik taban izi inceleme, ölçüm ve otomasyon/sensör üzerine yapılan çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Pohl ve arkadaşları (Pohl vd. 1999), "akıllı lastik" terimini kullanarak, sürüş sırasında termal ve mekanik parametreleri izlemek için sensör sistemleriyle donatılmış lastikleri incelemişlerdir. Çalışma, lastik ve yol yüzeyi arasındaki temasın kilit bir parametre olduğunu ve modern araç kontrol sistemleri için izlenmesinin önemini vurgulamaktadır. Taghavifar ve Mardani (2013), bir toprak test tesisinde radyal lastiğin temas alanı ve temas basıncının ölçümleri için görüntü işleme tekniğinin potansiyelini araştırmışlardır. Çalışmada, lastik basıncı ve tekerlek yükü üzerine yapılan deneylerle, temas alanı ve basıncı arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Temas basıncının yük ve şişirme basıncı ile doğrusal bir ilişkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Pyo ve Lyoo (2013), lastik sırtının çekildiği ekstrüder hattı için iki kamera ile lazer çizgi aydınlatması kullanarak doğru şekilde taban genişliklerini ölçen bir görüntü tabanlı otomasyon algoritması geliştirmişlerdir. Geleneksel lastik sırtının çekildiği ekstrüder hattı üzerinde değişiklikler yapılarak sistem otomatik hale dönüştürülmüştür. Bu sayede, üretim verimliliği artırılarak iş kazaları azaltılmıştır. Huang ve arkadaşları (Huang vd. 2016), görüntü üçgenlemesi yöntemini uygulayarak temas olmayan bir ölçüm prototipi sistemi oluşturmuşlar ve taban dış derinliğini ölçmüşlerdir. Bu sistemin, ölçüm kolaylığını artırarak iş gücü maliyetlerini düşürdüğü belirtilmiştir. Wang ve arkadaşları (Wang vd. 2019), lastik dış derinliğini doğru ve otomatik olarak belirlemek için makine öğrenmesine dayalı bir yöntem geliştirmişlerdir. Sundukları yöntemin, lastik desen oluklarını tanımlayabildiği ve her bir oluğun derinliğini 0,2 mm'den az bir mutlak hata ile ölçebildiği gösterilmiştir. Xiong ve Tuononen (2014), lastik dış yüzeyi deformasyonunu ölçmek için lazer tabanlı bir sensör sistemi önermişlerdir. Bu sistemin, lastik-yol etkileşimleri

hakkında detaylı bilgiler sunduğu vurgulanmıştır. Andrews ve arkadaşları (Andrews vd. 2019), lastik dış aşınmasının geleneksel ölçüm yöntemleri yerine elektriksel olarak ölçülebilen baskılı, elektrot dizisi tabanlı bir sensör önermişlerdir. Bu sensör, düşük maliyetli bileşenleri kullanarak lastik dış profillerini elektriksel olarak izleme konusunda yeni bir yöntem olduğunu söylemişlerdir. Wang ve arkadaşları (Wang vd. 2017), otomobil lastiği üretim sürecinde lastik dış genişliği ve kalınlığının hızlı bir şekilde çevrimiçi ölçümü için bir sistem geliştirmişlerdir. Bu sistemin, üretim sürecinin verimliliğini artırdığı söylenmiştir. Aguilar ve arkadaşları (Castillo Aguilar vd. 2017), lastik özelliklerinin ve dış kusurlarının karakterizasyonu için bir optik test tezgahının optimizasyonunu yapmışlardır. Bu sistemin, lastik dinamiğindeki kritik faktörlerin belirlenmesine yardımcı olduğu vurgulanmıştır. Huber ve arkadaşları (Huber vd. 2022), "TireEye" isimli temassız ölçüm cihazı geliştirmişlerdir. Adaptif Canny kenar algılama görüntü işleme yöntemiyle oluşturulan cihazın, lastik aşınmasını 1 mm'den daha az bir doğrulukla ölçülebilen bir cihaz olduğu söylenmiştir. Bhamare ve Khachane (Bhamare ve Khachane 2019), lastik dış derinliğini görüntü işleme sensörleri kullanılarak otomatik olarak ölçülmesi için bir sistem tasarlamışlardır. Bu sistemin, işçilik maliyetini azaltan ve verimliliği artıran bir çözüm olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, lastik taban derinliğinin ölçümünde geleneksel yöntemlerin yerini alabilecek bir yöntem olduğunu vurgulamışlardır. Chen ve arkadaşları (Chen vd. 1993), lastik dış kusurlarının tespiti için görüntü işleme ve desen tanıma tekniklerini kullanarak geliştirilmiş bir görüntü alma ve işleme algoritması geliştirmişlerdir. Çalışma, görüntü işleme tekniklerinin lastik üretim kalitesi ve tutarlılığı üzerindeki etkisini incelemektedir. Chen ve arkadaşları (Chen vd. 2011), görüntü işleme tabanlı ölçüm yöntemi kullanarak lastik basıncı, aşırı yük ve aşınma seviyesini tespit etmeyi önermişlerdir. Araştırmalarında, lastik aşınma seviyesini algılayamayan mevcut sistemlere kıyasla belirli avantajlar ve yenilikler sunmuşlardır.

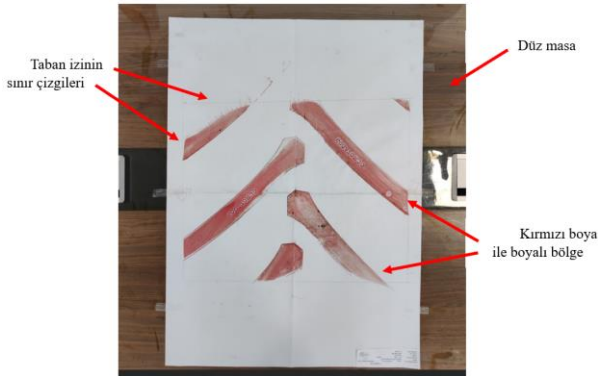
Günümüzde teknolojinin ilerlemesiyle görüntü işleme teknikleri çeşitli endüstriyel uygulamalarda etkinlik ve doğruluk sağlama potansiyeline sahiptir. Bu çalışma, lastik taban izlerinin otomatik olarak ölçülmesi için geliştirilmiş yenilikçi bir görüntü işleme algoritmasını sunmaktadır. Algoritma, lastik izlerinin fotoğraflarını analiz ederek, kırmızı boyalı izleri ve arka planı etkin bir şekilde ayırtmaktadır. Bu yaklaşım, lastik üretim süreçlerinde zaman ve maliyet tasarrufu sağlarken, ölçüm sonuçlarının doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmaktadır. Görüntü işleme tekniklerinin bu uygulaması, endüstriyel kalite kontrol mekanizmalarının nasıl iyileştirilebileceğine dair

bir örnek teşkil etmektedir. Araştırma, taban izi ölçümünde görüntü işlemeyi kullanarak süreci basitleştirmekte ve doğruluğu daha da artırabilecek yeni bir yöntem sunmaktadır.

## 2. Materyal ve Metot

Günümüzde, lastik endüstrisinde lastiklerin geliştirme süreçleri içerisinde taban izlerinin ölçümü, kalite kontrolünün vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Geleneksel metotlarda, lastik taban izleri kırmızı boya ile işaretlenip beyaz kâğıt üzerine basılarak, elde edilen izin alanı belirli formüller aracılığıyla hesaplanmaktadır (Şekil 1). Ancak bu yöntem, zaman alıcı olmasının yanı sıra subjektif hatalara da açık bir yapıdadır. Lastik taban izi ölçümleri, basınç, yük, jant gibi testin özelliklerine göre belirli test cihazları kullanılarak sınıflandırılmaktadır.

DeneySEL taban izi ölçüm süreci altı temel adımdan oluşmaktadır. İlk adımda, lastik janta monte edilerek basınç ayarlanır; bu işlem, lastiğin düzgün yuvarlanmasını ve taban izinin doğru şekilde oluşturulmasını sağlamaktadır. İkinci adımda, taban izlerinin net bir şekilde görülebilmesi için lastik tabanları kırmızıya boyanır, böylece ölçüm süreci kolaylaşmaktadır. Üçüncü adımda, lastik beyaz bir kâğıt üzerine yerleştirilir ve belirli bir süre test cihazında hareket ettirilerek kırmızı boya, beyaz kâğıt üzerine bir iz bırakır. Elde edilen kırmızı taban izli beyaz kâğıt, inceleme ve ölçüm için düz bir masa üzerinde sabitlenmiştir. Dördüncü adımda, oluşturulan taban izi detaylı bir şekilde incelenir; izin düzeni, genişliği, deseni ve diğer kritik detaylar gözden geçirilir. Beşinci adımda, özel bir cetvel veya ölçüm aracı ile taban izinin genişliği ve diğer özellikleri hassas bir biçimde ölçülmektedir. Son adımda ise, elde edilen ölçümler, her lastiğin taban izinin kıyaslanması yapılarak kalite kontrol kayıtlarına veya üretim veri tabanlarına işlenmektedir.



Şekil 1. Lastik taban izinin sabitlenmesi ve sınır çizgilerinin çizimi.

Taban izi alınan kâğıt üzerinde görülen kırmızı renk ile boyalı olan bölgelerin en uç kısımları (sınır çizgileri) referans alınarak kalemle çizilir. Çizilen bölgenin alanı en ve boy olarak dikdörtgen şeklinin alanını temsil

etmektedir. İki adet metre yardımıyla Şekil 2’de görüldüğü gibi taban izi sınır çizgilerinin ölçümü yapılır. Ölçümlerde  $b_0$  (en),  $l_0$  (boy) parametre değerleri kullanılarak Eşitlik 1 yardımıyla taban izi alanı değeri hesaplanmaktadır (Grecenko 1995).

$$A_0 = k \frac{l_0}{2} \frac{b_0}{2} \quad (1)$$

Eşitlikte  $A_0$ : lastik taban izi alanı ( $\text{cm}^2$ ),  $l_0$ : taban izi boy (cm),  $b_0$ : taban izi en (cm),  $k$ : taban izi alanı katsayısı dikdörtgen  $k=4$ ) ifade etmektedir.



Şekil 2. Lastik taban izi ölçümü.

Bu yöntem, lastik tasarım sürecinde taban izlerinin boyutlarının değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, elde edilen sonuçların doğruluğu ve güvenilirliği, ölçümün dikkatli ve hassas bir şekilde yapılmasına bağlıdır.

Bu çalışmada, lastik taban izlerinin boyutlarını otomatik olarak ölçen bir görüntü işleme algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritma, lastik izi fotoğraflarını analiz ederek, kırmızı boyalı izlerin alanlarını otomatik olarak hesaplamaktadır. Hesaplama işlemi sonrasında, görüntülerde kullanılan ölçeklendirme faktörü aracılığıyla, elde edilen değerler gerçek dünya ölçülerine dönüştürülmektedir.

Algoritmanın kullanımı, kullanıcıya grafiksel bir arayüz üzerinden bir görüntü dosyası seçme olanağı sunan bir diyalog penceresi ile başlamaktadır. Kullanıcı bir dosya seçmediği takdirde, ölçüm işlemi başlamadan sonlandırılmakta ve program bir uyarı mesajı göstermektedir. Kullanıcının seçtiği fotoğraf, belirtilen dosya yolu ve adı ile algoritmaya yüklenmektedir. Daha sonra, kullanıcıya, görüntü üzerinde referans bir mesafe belirlemesi için iki nokta seçmesi talep edilmektedir. Bu iki nokta arasındaki piksel mesafesi hesaplanmakta ve elde edilen ölçeklendirme faktörü ile görüntüdeki mesafeler

gerçek dünya ölçülerine çevrilmektedir. Referans noktaları arasındaki piksel mesafesi, Eşitlik 2.'de verilen Öklid mesafe formülü ile hesaplanmaktadır. Öklid mesafe formülü, iki nokta arasındaki düz çizgi mesafesini bulmak için kullanılmakta ve genellikle iki boyutlu koordinat sisteminde uygulanmaktadır. Matematiksel olarak verilen bu formül, görüntü işleme ve bilgisayarla görme alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Jain vd. 1995).

$$Piksel\ Mesafesi = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (2)$$

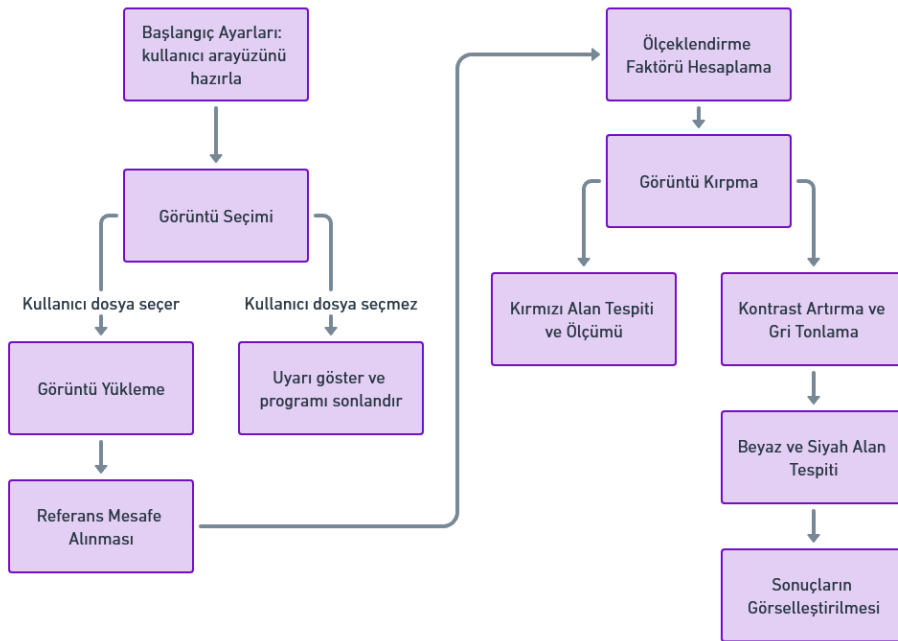
Burada,  $(x_1, y_1)$  ve  $(x_2, y_2)$  referans noktalarının koordinatlarıdır. Ölçeklendirme faktörü (ÖF), gerçek dünya mesafesinin (GDM) piksel mesafesine (PM) bölünmesiyle elde edilmiştir (Eşitlik 3). Bu konudaki detaylı matematiksel bilgiler ilgili referanslarda (Russ 2006, Gonzalez 2009) bulunabilir.

$$\text{ÖF} = \frac{GDM}{PM} \quad (3)$$

Elde edilen piksel büyüklükleri, ölçeklendirme faktörü yardımıyla gerçek dünya ölçü birimlerine ( $\text{cm}^2$ ) dönüştürülmektedir. Görüntüdeki herhangi bir bölgenin gerçek dünya ölçüleri, piksel alanının (PA) ölçeklendirme faktörü ile çarpılmasıyla elde edilebilmektedir (Russ 2006). Burada, Piksel Alanı (PA) belirli bir bölgedeki piksel sayısını temsil etmektedir. Görüntü işleme teknikleri ile belirlenen bu değer, ilgili bölgedeki her bir pikselin sayısını içermektedir.

Algoritma, kullanıcıya görüntüdeki gürültüyü azaltmak amacıyla bir alan kırpma yapmasını önermektedir. Bu kırpma işlemi sonrası, belirli bir renk eşiği kullanılarak kırmızı alanlar belirlenmekte ve bu alanların piksel cinsinden büyüklükleri hesaplanmaktadır. Kırmızı alanların tespiti için RGB (Red, Green, Blue) renk uzayında eşik değerleri kullanılmaktadır (Gonzalez 2009). Kırmızı pikselleri tanımlamak için  $R > 150$ ,  $G < 100$ ,  $B < 100$  eşik değerleri deneme yanılma yoluyla seçilmiştir. Bu eşik değerleri, kırmızı rengin baskın olduğu pikselleri daha iyi tanımlamaktadır.

İşlemin son adımında, görüntünün kontrastı artırılarak bir renk dönüşümü ile gri tonlama sağlanmaktadır. Görüntü kontrastı, histogram eşitleme yöntemi kullanılarak artırılmıştır. Gri tonlama işlemi, renkli bir görüntüyü gri tonlamalı bir görüntüye dönüştürmek için kullanılan standart formüllere dayanmaktadır (Russ 2006). Bu aşamada, beyaz ve siyah alanlar ayrıştırılmakta ve her birinin alanı,  $\text{cm}^2$  cinsinden hesaplanarak kullanıcıya görsel olarak sunulmaktadır. Gri tonlamalı görüntüde siyah (SA) ve beyaz alanların (BA) hesaplanması için bir eşik değeri kullanılmaktadır. Eşik değerinin altında kalan pikseller siyah, üzerindeki beyaz olarak kabul edilmektedir (Gonzalez 2009). Çalışmalar, Intel Core i7-10875H işlemci, 64 GB RAM ve NVIDIA GeForce RTX 2060 ekran kartına sahip bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen algoritmanın akış diyagramı Şekil 3'te sunulmuştur.



Şekil 3. Geliştirilen algoritmanın akış diyagramı.

### 3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışma kapsamında geliştirilen algoritma, lastik taban izlerinin boyutlarını değerlendirmek amacıyla iki farklı

yöntem kullanarak alan ölçümü gerçekleştirmektedir. Her bir yöntem, özgün özellikleri ile kodlanmış olup, bu sayede hassas alan ölçümleri yapılabilmektedir. Program,

kullanıcılara her iki yöntemle elde edilen alan ölçüm fotoğraflarını sunmakta ve aynı zamanda, bu ölçümlerin ortalamasını göstererek, kullanıcıya kapsamlı bir analiz imkânı sunmaktadır. Eğer kullanıcı, fotoğraf üzerindeki alan ölçümünü yetersiz bulursa, tercihine bağlı olarak istediği ölçüm sonucunu seçebilmektedir.

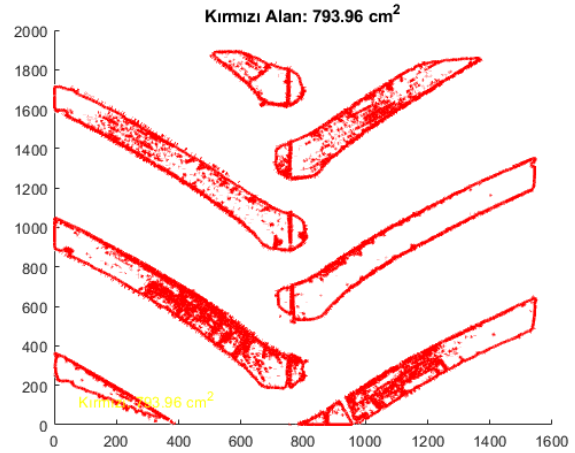
Programın kullanım süreci, ilk olarak kullanıcıdan fotoğraftaki gereksiz alanların kırılması talep etmekle başlamaktadır. Bu adım, resim üzerindeki gürültü oluşumunu minimize ederken, aynı zamanda gereksiz hesaplamaların önüne geçmektedir. Bu önlemlerle, algoritmanın verimliliği artırılmakta ve kullanıcının önüne net, anlamlı veriler çıkarılmaktadır.



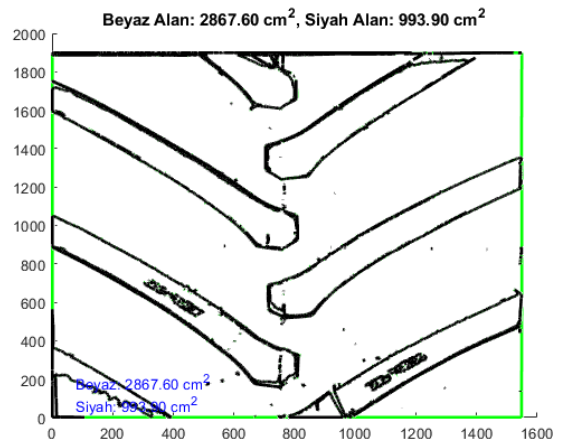
Şekil 4. a-) Kırma bölgesi seçimi, b-) Kırılmış resim.

Şekil 5, örnek bir ölçüm sonucunu göstermektedir. Kırmızı ile siyah-beyaz alanların ölçüm sonuçları arasındaki farklılıklar, uygulanan renk filtreleme ve maskeleme metodlarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Kırmızı alanları tespit etmek için belirlenen özel bir renk eşiği bulunmaktadır. Bu eşik değerlerinin ayarlanma biçimi, tespit edilen kırmızı alanın büyüklüğünü büyük ölçüde etkilemektedir. Dar bir aralıkta belirlenen eşik değerleri,

bazı kırmızı piksellerin göz ardı edilmesine yol açarken; geniş bir aralık, kırmızı olmayan piksellerin de kırmızı olarak algılanmasına neden olabilmektedir. Diğer yandan, siyah-beyaz alanların ölçümünde, görüntü ilk olarak gri tonlamaya çevrilmekte ve sonrasında beyaz alanlar saptanmaktadır. Bu süreçte kullanılan renk tonları ve eşik değerleri, ölçülen alanın boyutları üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Griye çevirme işlemi sonrası yapılan beyaz piksel tespiti ise, görüntünün parlaklık seviyesine bağlı olarak, beyaz alanların yanlış hesaplanmasına sebep olabilmektedir.



a-)



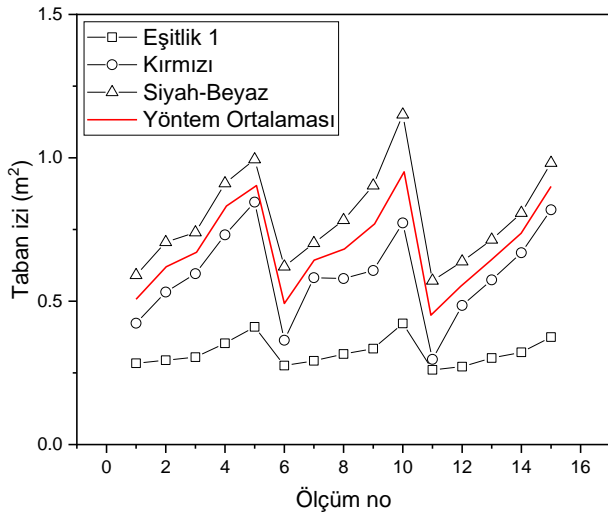
b-)

Şekil 5. a-) Kırmızı alan ölçümü, b-) siyah-beyaz alan ölçümü.

Eşik değeri, bir görüntüdeki piksellerin belirli bir renk aralığına göre sınıflandırılmasını sağlayan bir değerdir. Örneğin, kırmızı pikseller belirli bir kırmızılık derecesi üzerindeyse, bu pikseller kırmızı olarak kabul edilmektedir. Bu süreç, spesifik renk aralıklarını tespit etmek ve ilgili pikselleri ayırtmak için hayati öneme sahiptir. Ancak, eşik değerlerinin doğru ayarlanması, yüksek doğrulukta sonuçlar elde etmek için kritiktir (Poothari vd. 2023). Eşik değerleri çok geniş veya dar belirlendiğinde, ölçüm hataları artmakta ve bu da ölçüm sonuçlarının güvenilirliğini azaltmaktadır. Bu sebeplerden ötürü, geliştirilen algoritma iki farklı ölçüm yöntemini



kullanıcıya sunmakta ve hataları en aza indirmek amacıyla, bu iki yöntemden elde edilen sonuçların ortalamasını almaktadır (Şekil 6).



Şekil 6. Farklı yöntemlerle hesaplanan taban izi ölçüm sonuçları.

Eşitlik 1 ile elde edilen alan ölçümlerinin oldukça hatalı olduğu görülmektedir. Çünkü, Eşitlik 1 incelendiğinde kırmızı ile işaretlenen alanın gerçek sınırlarını tam olarak yansıtmadığı ve böylece elde edilen ölçümün, gerçek taban izi alanından sapmalar gösterdiği görülecektir. Görüntü işleme teknikleri kullanılarak yapılan ölçümler ise, taban izinin tam sınırlarını dijital bir görüntü üzerinden hassas bir şekilde algılayabilmektedir. Bu yöntem, taban izinin gerçek sınırlarını doğru bir şekilde belirlemede ve böylece daha doğru alan hesaplamaları yapılmasını sağlamaktadır. Görüntü işleme algoritması, kırmızı ile boyalı bölgelerin tam sınırlarını piksel olarak analiz etmekte ve böylece taban izinin gerçek alanını, herhangi bir geometrik varsayımdan bağımsız olarak, doğru bir şekilde hesaplamaktadır. Görüntü işleme tekniklerinin, düzensiz iki boyutlu hassas şekillerin dijital ortamda alanlarının ölçülmesinde uygun bir yöntem olduğu bilinmektedir (Hassabo 2012). Aynı şekilde yüzey alanı ölçmek için kullanılan bu yöntemin, clark formülü, leng formülü, düzleştirme taraması ve yarı silindir yan alan yöntemleri gibi yöntemlerden daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür (Li vd. 2023).

Bu çalışmada geliştirilen otomatik görüntü işleme algoritması, lastik taban izlerinin ölçümünde geleneksel yöntemlere göre önemli avantajlar sağlamaktadır. Otomatik görüntü işleme yöntemiyle her bir lastik izi için ölçüm ortalama olarak 1 dakika sürmektedir (fotoğraf çekimi dahil). Geleneksel yöntemle yapılan ölçümler ise ortalama olarak 30 dakika sürmektedir. Otomatik yöntem ile yapılan ölçümlerin çok daha hızlı tamamlandığı gözlemlenmiştir. Otomatik görüntü işleme yönteminin bu denli hızlı olması, sürecin büyük ölçüde yazılım tabanlı

olmasından ve manuel müdahaleye ihtiyaç duyulmamasından kaynaklanmaktadır. Geleneksel yöntemler ise, manuel ölçüm ve değerlendirme süreçlerini içerdiği için daha uzun zaman almaktadır. Bu durum, otomatik yöntemin özellikle seri üretim ve hızlı kalite kontrol süreçlerinde büyük avantaj sağlayacağını göstermektedir.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışma, zirai lastiklerin taban izlerinin alan ölçümleri üzerine odaklanmıştır. Geleneksel yöntemlerle yapılan ölçümlerin yanı sıra, geliştirilen görüntü işleme algoritmasının etkinliği ve doğruluğu değerlendirilmiştir. Çalışmamız, kırmızı ile işaretlenmiş taban izlerinin sınırlarının elle çizilerek ve basit geometrik şekillere dayalı matematiksel denklemler kullanılarak hesaplanan alan ölçümlerinin, lastiğin gerçek yüzey sınırlarını tam olarak yakalamadığını göstermektedir. Matematiksel denklemlerle yapılan hesaplamalar, özellikle düzensiz şekiller ve değişken kenar uzunlukları göz önünde bulundurulduğunda, belirgin bir hata marjı içermektedir. Bu, taban izlerinin sadece en geniş ve en dar yerlerinden alınan ölçümlerle bir dikdörtgen veya yamuk şeklinde yaklaşık olarak modellendiği geleneksel yöntemlerin doğasında var olan bir kısıtlılıktır.

Görüntü işleme algoritması ile yapılan ölçümler, taban izinin tam sınırlarını piksel olarak takip ederek ve her bir renkli alanın tam piksel sayısını ölçerek daha hassas sonuçlar vermektedir. Bu yöntem, ölçeklendirme faktörü ile piksel sayısını gerçek dünya alan ölçülerine çevirerek çalışmaktadır. Ölçüm sırasında kullanıcının girdisi veya ölçümün subjektif yönlerinden etkilenmemektedir.

Görüntü işleme algoritması, daha doğru ve tekrarlanabilir ölçümler sağlamak ve lastik tasarım ve test süreçlerindeki subjektif hataları minimize etmektedir. Ek olarak, algoritmanın kullanımı, operatörün deneyimine bağlı olmadan standart ve tutarlı sonuçlar üretmektedir. Bu, lastik endüstrisindeki kalite kontrol süreçlerinde önemli avantajlar sunmaktadır. Geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında, otomatik yöntemle yapılan ölçümler daha hızlıdır; her bir lastik izi için ortalama ölçüm süresi 1 dakika olup, geleneksel yöntemle yapılan ölçümler ise ortalama 30 dakika sürmektedir. Bu süre farkı, otomatik yöntemin hız ve verimlilik açısından üstün olduğunu açıkça göstermektedir.

Geliştirilen algoritma ayrıca, lastik taban izlerinin ölçümünde yüksek doğruluk oranlarına ulaşmıştır. Bu doğruluk, algoritmanın taban izinin sınırlarını tam olarak belirleyebilme yeteneğinden kaynaklanmaktadır.



Böylece, lastik tasarımında ve kalite kontrol süreçlerinde daha güvenilir veriler elde edilmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışmanın lastik endüstrisindeki kalite kontrol prosedürleri için önemli etkilere sahip olacağı düşünülmektedir. Geliştirilen algoritma, lastik üretim süreçlerinde zaman ve maliyet tasarrufu sağlarken, ölçüm sonuçlarının doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmaktadır. Bu nedenle, otomatik görüntü işleme tekniklerinin endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmasının, lastik endüstrisinin verimliliğini ve kalite standartlarını önemli ölçüde artıracığı öngörülmektedir.

Gelecekteki çalışmalarımızda, geliştirilen algoritmayı farklı lastik türleri ve zemin koşulları üzerinde test ederek algoritmanın genelleştirilebilirliğini artırmayı hedefliyoruz. Ayrıca, algoritmanın gerçek zamanlı uygulamalarını geliştirmek ve entegrasyonunu sağlamak için daha ileri yazılım ve donanım optimizasyonları planlıyoruz.

#### **Etik Standartlar Bildirgesi**

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Bu çalışma Doç. Dr. Süleyman KILIÇ danışmanlığında Onur KARAÇAY tarafından yapılan "Zirai lastiklerde IF (improved flexion), VF (very high flexion) teknolojisi" başlıklı yüksek lisans tezinden türetilmiştir.

#### **Yazarlık Katkı Beyanı**

Yazar 1: Kaynaklar, Araştırma, Yazma,

Yazar 2: Kaynaklar, Deneyleme, Doğrulama, Yazma,

#### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

#### **Verilerin Kullanılabilirliği**

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

## **5. Kaynaklar**

Andrews, J. B., Ballentine, P., Cardenas, J. A., Lim, C. J., Williams, N. X., Summers, J. B., Stangler, M. A., Koester, D. A., Cummer, S. A. and Franklin, A. D. 2019. Printed electronic sensor array for mapping tire tread thickness profiles. *IEEE Sensors Journal*, 19, 19, 8913-8919.

<https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2918061>

Bhamare, M. H. and Khachane, A. 2019. Quality Inspection of tyre using Deep Learning based Computer Vision. *Learning*, 6, 11, 3555-3558.

Castillo Aguilar, J. J., Cabrera Carrillo, J. A., Guerra Fernández, A. J. and Postigo Pozo, S. 2017. Optimization of an optical test bench for tire properties measurement and tread defects characterization. *Sensors*, 17, 4, 707.

<https://doi.org/10.3390/s17040707>

Chen, P., Shubinsky, G. D., Jan, K.-H., Chen, C.-A., Sidla, O. and Poelzleitner, W. (Year). Published. Inspection of tire tread defects using image processing and pattern recognition techniques. *Vision, Sensors, and Control for Automated Manufacturing Systems*, 1993. SPIE, 14-21.

Chen, R. B., Tao, J., Fan, W. T. and Zhang, J. J. 2011. Research on Methods of Tire Sensory Measurement Based on Image Processing. *Advanced Materials Research*, 230, 900-904.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.230-232.900>

Gonzalez, R. C. (2009). *Digital image processing*, Pearson education india.

Grecenko, A. 1995. Tyre footprint area on hard ground computed from catalogue values. *Journal of Terramechanics*, 32, 6, 325-333.

Hassabo, A. I. 2012. Semi-Automatic Area Measurement of Irregular Two Dimensional Shapes in Digital Images. *Applied Mechanics and Materials*, 170-173, 2953-2961.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.170-173.2953>

Huang, S.-Y., Chen, Y.-C. and Wang, J.-K. (Year). Published. Measurement of tire tread depth with image triangulation. 2016 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C), 2016. IEEE, 303-306.

Huber, S., Preindl, P. and Betz, J. (Year). Published. TireEye: Optical On-board Tire Wear Detection. Annual Conference of the PHM Society, 2022.

Jain, R., Kasturi, R. and Schunck, B. G. (1995). *Machine vision*, McGraw-hill New York.

Jie, W., SHANG, L., Liangyuan, X. and Qiansheng, T. 2023. Evaluation of traction characteristics of tractor tires on loose soils: simulation and experimental research. *INMATEH-Agricultural Engineering*, 71, 3, 379-390.

Lee, H. and Taheri, S. 2017. Intelligent tires? A review of tire characterization literature. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 9, 2, 114-135.

<https://doi.org/10.1109/MITS.2017.2666584>

Li, F., Li, X., Huang, H., Xiang, H., Guan, C. and Guan, M. 2023. An Image Processing Method for Measuring the Surface Area of Rapeseed Pods. *Applied Sciences*, 13, 8, 5129.

<https://doi.org/10.3390/app13085129>

Liu, J., Wang, M. and Yin, H. 2024. A Study of the Friction Characteristics of Rubber Thermo-Mechanical Coupling. *Polymers*, 16, 5, 596.

<https://doi.org/10.3390/polym16050596>

Phakdee, S., Phromjan, J., Rugsaj, R. and Suvanjumrat, C. 2024. Experimental verification of mathematical

- models for tire-soil interactio. *GEOMATE Journal*, 26, **113**, 58-65.  
<https://doi.org/10.21660/2024.113.g13180>
- Pohl, A., Steindl, R. and Reindl, L. 1999. The " intelligent tire" utilizing passive SAW sensors measurement of tire friction. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 48, **6**, 1041-1046.  
<https://doi.org/10.1109/19.816111>
- Pomoni, M. 2022. Exploring Smart Tires as a Tool to Assist Safe Driving and Monitor Tire–Road Friction. *Vehicles*, 4, **3**, 744-765.  
<https://doi.org/10.3390/vehicles4030042>
- Pootheri, S., Ellam, D., Grübl, T. and Liu, Y. 2023. A Two-Stage Automatic Color Thresholding Technique. *Sensors*, 23, **6**, 3361.  
<https://doi.org/10.3390/s23063361>
- Pyo, C.-S. and Lyou, J. 2013. Automation of Tire Tread Extruder Line Using Cameras. *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 19, **3**, 262-267.  
<https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2013.12.1791>
- Russ, J. C. (2006). *The image processing handbook*, CRC press.
- Smith, A. R. 1978. Color gamut transform pairs. *ACM Siggraph Computer Graphics*, 12, **3**, 12-19.
- Sun, Z., Premarathna, W. A. A. S., Anupam, K., Kasbergen, C. and M.J.G. Erkens, S. 2024. A state-of-the-art review on rolling resistance of asphalt pavements and its environmental impact. *Construction and Building Materials*, 411, 133589.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133589>
- Taghavifar, H. and Mardani, A. 2013. Potential of functional image processing technique for the measurements of contact area and contact pressure of a radial ply tire in a soil bin testing facility. *Measurement*, 46, **10**, 4038-4044.  
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.07.019>
- Wang, P., Chen, X., Yang, K. and Liu, X. (Year). Published. Research and application of online measurement system of tire tread profile in automobile tire production. Seventh international conference on electronics and information engineering, 2017. SPIE, 326-332.
- Wang, X.-B., Li, A.-J., Ci, Q.-P., Shi, M., Jing, T.-L. and Zhao, W.-Z. 2019. The study on tire tread depth measurement method based on machine vision. *Advances in Mechanical Engineering*, 11, **4**, 1687814019837828.  
<https://doi.org/10.1177/1687814019837828>
- Wigan, M. 1992. Image-processing techniques applied to road problems. *Journal of transportation engineering*, 118, **1**, 62-83.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1992\)118:1\(62\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1992)118:1(62))
- Xiong, Y. and Tuononen, A. 2014. A laser-based sensor system for tire tread deformation measurement.

## Miyokard Enfarktüsü Hastalarının Tespitinde Doğrusal Olmayan Özniteliklerin Performans Analizi

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 29.01.2024

Kabul/Accepted: 07.08.2024

Yayımlandı/Published:02.12.2024

### Performance Analysis of Nonlinear Features in Detection of Myocardial Infarction Patients

Ali NARİN<sup>\*</sup> , Merve KESER 

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

© Ayfon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

Kalp rahatsızlıklarından biri olan miyokard enfarktüsü (ME), kalbin bölgelerine kısmen veya tamamen kan akışının kesilmesi sonucunda kalp kaslarına zarar vermesi durumudur. Bu durum kalbe kalıcı hasar vermekte ve hayati risk oluşturmaktadır. ME tespiti için kolay ve ucuz elde edilebilen elektrokardiyogram (EKG) sinyalleri uzmanlar tarafından kullanılmaktadır. Fakat bazı EKG sinyalleri üzerinde ME ile ilişkili anormallikler gözden kaçırılmakta hatta farklı yorumlanabilmektedir. Karşılaşılan problemlere çözüm olması amacıyla yapay zekâ tabanlı karar destek sistemleri ile otomatik ME tespiti üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmada 52 sağlıklı ve 148 ME bireye ait 12 derivasyonlu EKG sinyallerinden lead-II derivasyonu analiz edilmiştir. Shannon entropi, Renyi entropi, Dalgacık entropi, Kolmogorov-Sinai entropi ve Bulanık entropi olmak üzere beş farklı yöntem ile elde edilen öznitelikler kullanılarak sağlıklı ve ME tespitindeki başarımlar araştırılmıştır. Her bir entropi ölçümünün gürültülü ve gürültüsüz EKG sinyalleri üzerinde performansları karşılaştırılmıştır. K-en yakın komşu (kNN), Naive Bayes ve topluluk sınıflandırıcı algoritmaları kullanılarak ME tespiti üzerinde performansları analiz edilmiştir. Beş farklı yöntemden elde edilen özniteliklerin sınıflandırılması sonucu en yüksek doğruluk değeri %87,72 ile Bulanık entropi kullanılarak elde edilmiştir. Bu değer, gürültülü sinyallerin üzerinde kNN sınıflandırıcısının kullanılması sonucunda elde edilmiştir. Tüm özniteliklerin birlikte kullanılarak sınıflandırılması ile %90,99 genel doğruluk, %95,58 hassasiyet, %71,55 özgünlük değerleri elde edilmiştir. En yüksek olan bu değere, gürültülü sinyal ve Topluluk sınıflandırıcısı kullanılarak ulaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Miyokard enfarktüsü; Elektrokardiyogram; Öznitelik çıkarma; Topluluk sınıflandırıcı.

#### Abstract

Myocardial infarction (MI), one of the heart diseases, is a condition in which the heart muscle is damaged as a result of partial or complete interruption of blood flow to the regions of the heart. This condition causes permanent damage to the heart and poses a life-threatening risk. Electrocardiogram (ECG) signals, which can be obtained easily and cheaply, are used by experts for the detection of MI. However, MI-related abnormalities on some ECG signals may be overlooked or even interpreted differently. Work continues on automatic MI detection with artificial intelligence-based decision support systems in order to solve the problems encountered. In this study, lead-II derivation from 12-lead ECG signals of 52 normal and 148 MI individuals was analyzed. By using the features obtained by five different methods, namely Shannon entropy, Renyi entropy, Wavelet entropy, Kolmogorov-Sinai entropy and Fuzzy entropy, the performances in detecting healthy and MI were investigated. The performances of each entropy measure on noisy and noiseless ECG signals are compared. Performances on MI detection were analyzed using k-nearest neighbor (kNN), Naive Bayes and ensemble classifier algorithms. As a result of the classification of the features obtained from five different methods, the highest accuracy value belongs to Fuzzy entropy with 87.72%. This value is obtained as a result of using kNN classifier on noisy signals. By classifying all features together, 90.99% overall accuracy, 95.58% sensitivity and 71.55% specificity values were obtained. This highest value was achieved using the noisy signal and ensemble classifier.

**Keywords:** Myocardial Infarction; Electrocardiogram; Feature extraction; Ensemble classifier.

#### 1. Giriş

2019 yılında Dünya Sağlık Örgütü'nün yayınladığı istatistiklere göre kalp hastalıkları, dünya genelindeki ölümlerin %16'sını oluşturarak dünya çapında en büyük ölüm nedeni olarak ifade edilmiştir. Son yıllarda toplam ölüm sayısı 2 milyondan 8,9 milyona çıktığı belirtilmiştir (İnt. Kyn. 1). Kardiyovasküler hastalıklar arasında miyokard enfarktüsü (ME), ölümlerin en büyük yüzdesini meydana getirmektedir (Benjamin et al. 2019). Koroner

kan akışının büyük ölçüde azaldığı veya sağlanmadığı durumlarda miyokard hücrelerin uzun süreli iskemisine neden olduğu ve miyokard hücre hasarına yol açtığı hastalık, miyokard enfarktüsü ya da kalp krizi olarak ifade edilmektedir (Hasbullah et al. 2023, Miranda et al. 2018). Bu nedenle, olası bir ME'nin erken tespiti ve önlenmesi, bireylerin hayati risklerini en aza indirmek için büyük önem taşımaktadır. ME'nin erken uyarı ve teşhisi için önemli bir gösterge olan elektrokardiyogram (EKG)

sinyalleri, hem hızlı sonuç alınması hem de düşük maliyetle uygulanması sayesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. EKG sinyalleri üzerinde okumalar, deneyime dayalı tanımlamalar klinisyenler ve EKG uzmanları tarafından gerçekleştirilmektedir. Bilişim teknolojisinin gelişimi ile EKG'nin otomatik analizi yaygınlaştırılmıştır. Bilgisayar destekli analiz sistemlerinin gerçekleşmesi ile sağlık ekiplerinin bireysel teşhis farklılığı en aza indirilmektedir. Bu durum aynı zamanda, uzun süreli iş yüklerinin azaltılmasına da yardımcı olmaktadır.

ME'nin otomatik teşhisi ve lokalizasyonu için literatürde çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar; zaman alanı tabanlı yaklaşımlar (Arif et al. 2012), dalgacık dönüşümü tabanlı yöntemler (Acharya et al. 2016), ST-segment tabanlı yöntemler (Gong et al. 2024), gizli Markov model tabanlı yaklaşımlar (Chang et al. 2012), polinom uydurma tabanlı yöntemler (Liu et al. 2015), doğrusal olmayan ölçümler (Kumar et al. 2017, Han et al. 2019), sinir ağı tabanlı yöntemler (Papaloukas et al. 2002) ve derin öğrenme tabanlı yaklaşımlardır (Chen et al. 2022, Attallah and Ragab 2023, Degerli et al. 2024).

Bu çalışmada doğrusal olmayan ölçümlerin ME tespitindeki performansları araştırılmaktadır. Çalışmada sunulan ME'nin otomatik tespiti Şekil 1'de gösterilmiştir. Öncelikle EKG sinyallerinin gürültüsü ayırık dalgacık dönüşümü ile yok edilmiştir. Ardından Shannon entropi, Renyi entropi, Dalgacık entropi, Kolmogorov-Sinai entropi ve Bulanık entropi olmak üzere beş farklı doğrusal olmayan yöntem ile sinyallerin düzensizlikleri ölçülerek öznitelikler elde edilmiştir. Aynı durum ham (gürültülü) EKG sinyalleri üzerinde de tekrarlanmış ve ME tespiti üzerindeki performansları karşılaştırılmıştır. Böylelikle doğrusal olmayan yöntemlerin gürültülü ve gürültüsüz EKG işaretleri üzerindeki ME tespit başarımları detaylı bir şekilde incelenmiştir.

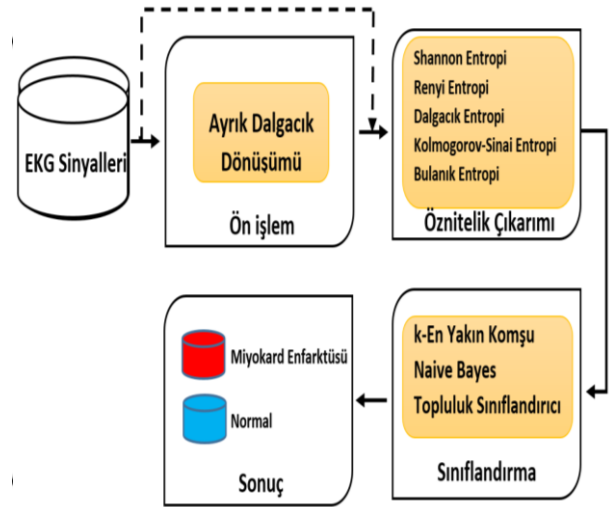
Çalışmanın devamında; veri seti, ayırık dalgacık dönüşümü ile gürültü eliminasyonu, entropi tabanlı öznitelik çıkarma, sınıflandırma algoritmaları, performans ölçütleri, bulgular, son olarak tartışma ve sonuç bölümlerine yer verilmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1 Veri Seti

Bu çalışmada, PhysioNet.org internet sitesinde halka açık olarak sunulan Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) veri tabanı kullanılmıştır (Bousseljot et al. 2004). Veri tabanında 209'u erkek, 81'i kadın olmak üzere 290 bireye ait 549 EKG kaydı bulunmaktadır. Bu kayıtlarda 22 bireye ait kaydın klinik bilgileri yer almamaktadır.

Çalışmanın konusu olan sağlıklı ve ME bireylere ait sırasıyla 52 ve 148 kayıt mevcuttur. Her sinyal 16-bit çözünürlüğünde ve 1000 Hz örnekleme hızında örneklenmiştir.



Şekil 1. Çalışmanın akış şeması.

EKG veri tabanında bulunan sağlıklı ve ME bireylere ait kayıtların tamamı çalışmaya dahil edilmiştir. Her bir kaydın lead-II sinyalleri üzerinde çalışılmıştır. Her bir kayıt 10000 uzunluğunda parçalara ayrılarak 928 sağlıklı ve 3934 ME kayıt elde edilmiştir.

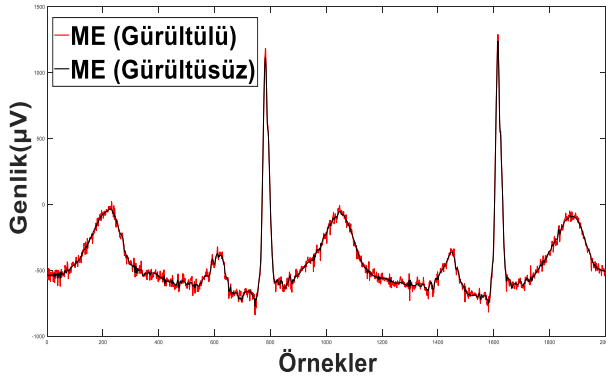
### 2.2 Ayırık Dalgacık Dönüşümü ile Gürültü Eliminasyonu

Ayrık dalgacık dönüşümü (ADD), zaman alanı ve frekans alanı dönüşümü analiz yöntemlerinden biridir. Bu yöntem ile sinyaller yüksek geçiş ve düşük geçiş filtreleme yoluyla farklı frekans bileşenlerine ayrıştırılmaktadır (Subha et al. 2010). Alçak geçiren filtrenin çıktısı sinyalin düşük frekans bilgisini ifade eden yaklaşık katsayıdır. Yüksek geçiren filtrenin çıktısı ise sinyalin yüksek frekans bilgisini ifade eden detay katsayıdır. Bu çalışmada EKG sinyallerindeki gürültünün giderilmesi için 6 seviyeli ayrışım, Daubechies 6 (dB6) dalgacık fonksiyonu kullanılmıştır. Bu dönüşüm sonucunda katsayılar daha düzgün ve sinyal orijinal forma daha yakın olmaktadır. ADD'nin matematiksel ifadesi:

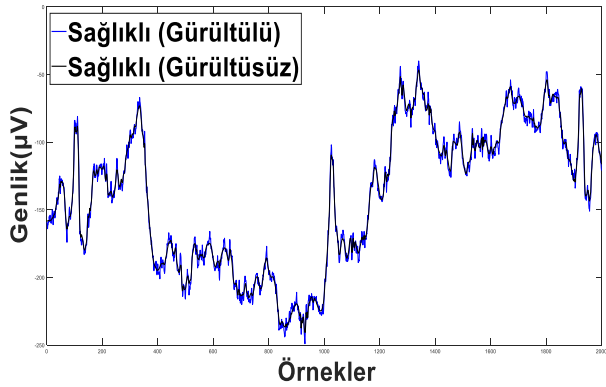
$$DWT(m, n) = 2^{-\frac{m}{2}} \int y(t) \cdot \psi(2^{-m} \cdot t - n) dt \quad (1)$$

şekindedir. Burada m parametresi ile frekans ölçeklendirme, n parametresi ile zamanda kaydırma ifade edilmektedir.

ME ve sağlıklı bireylere ait orijinal sinyal ile gürültüsü giderilmiş sinyallerin görselleri Şekil 2 ve Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 2. ME bireye ait gürültülü (kırmızı) ve gürültüsüz (siyah) EKG sinyallerinin örtüşme durumu.



Şekil 3. Sağlıklı bireye ait gürültülü (mavi) ve gürültüsüz (siyah) EKG sinyallerinin örtüşme durumu.

### 2.3 Entropi Tabanlı Öznitelik Çıkarma

Entropi, genel olarak zaman serilerinin karmaşıklığının ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. Fizyolojik sinyallerin yapısal bileşenleri hastalık ve yaşlanma ile bozulmaktadır. EKG sinyallerinin karmaşıklığı da bu bozuklukların eşleşmesi ile oluşmaktadır. Entropi yöntemleri kullanılarak hesaplanan sağlıklı bireylerin karmaşıklığı, hastalıklı bireylerden daha yüksektir. Bu karşılaştırmanın nedeni; sağlıklı bireylerdeki tüm yapısal bileşenler ve aralarındaki bağlantı işlevlerinin düzgün çalışmasıdır. Aynı zamanda iletişim için birbirlerine bağlı olması da bu fikri desteklemektedir. Bu bağlılık entropi değerlerini ve karmaşıklığı artırmaktadır.

#### i. Shannon Entropi (Shannon Entropy-ShEn)

Shannon Entropisi, bir bilgi kaynağından alınan bir verinin düzensizliğini veya belirsizliğini gösteren bir belirteçtir (Shannon 1948). Yüksek çıkan entropi değeri, belirsizlik oranının daha fazla olduğu anlamına gelmektedir. Bu çalışmada, Shannon Entropisi EKG sinyalinin spektral karmaşıklığını ölçmek için kullanılmıştır. Shannon Entropisi genel matematiksel formülü şu şekildedir:

$$H(x) = \sum_{i=1}^n P(x_i) \log_2 P(x_i) \quad (2)$$

Burada,  $P(x_i)$   $x_i$  sembolünün olasılığını,  $n$  değeri toplam sembol sayısını göstermektedir.

#### ii. Renyi Entropi (RnEn)

Renyi entropisi (Rényi 1961), Shannon entropinin farklı değişkenler üzerinde genellemesi olarak kabul edilmektedir. Renyi entropinin gücü, Shannon entropi gücünün devamı olarak ifade edilmektedir (Savaré and Giuseppe 2014). Renyi Entropisi genel matematiksel formülü şu şekildedir:

$$H_a(x) = \frac{1}{1-a} \log_2 \sum_{i=1}^n P(x_i)^a \quad (3)$$

Burada,  $P(x_i)$   $x_i$  sembolünün olasılığını,  $n$  değeri toplam sembol sayısını,  $a$  Rényi parametresini ( $a \neq 1$ ), göstermektedir.

#### iii. Dalgacık Entropi (Wavelet Entropy -WaEn)

Dalgacık entropisi, durağan olmayan sinyallerin kısa zamanlı özelliklerini detaylandırma yeteneğine sahiptir. Dalgacık entropisi, genellikle bir sinyalin dalgacık dönüşümünde elde edilen dalgacık katsayıları arasındaki düzensizliği ölçer. Bu entropi, sinyalin zaman ve frekans düzlemlerindeki özelliklerini yakalamak için kullanılır. EKG ve elektroensefalogram gibi fizyolojik sinyalleri detaylandırılması ve önemli klinik bilgilerin elde edilmesi için dalgacık entropi yaygın olarak kullanılmaktadır.

#### iv. Kolmogorov-Sinai Entropi (KsEn)

Kolmogorov-Sinai Entropisi, dinamik sistemlerin karmaşıklığını ifade etmeye yarayan bir matematiksel kavramdır. Bu entropi, bir dinamik sistemdeki kaotik davranışın bir ölçüsü olarak kabul edilir. Bir faz uzayında yörünge üzerinde birbirine daha yakın olan ve zamanla ilişkilendirilmeyen noktaların bulunmasıyla hesaplanmaktadır. Kolmogorov-Sinai Entropisi matematiksel gösterimi şu şekildedir:

$$h_{KS} = \log_{t \rightarrow \infty} \log_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{1}{t} H(\epsilon, t) \quad (4)$$

Burada;  $t$  zamanı,  $\epsilon$  sistemdeki hassasiyet parametresini,  $H(\epsilon, t)$  sistemdeki hassasiyet  $\epsilon$  ve zamanda  $t$  boyunca ölçülen entropi değerini ifade etmektedir.

#### v. Bulanık Entropi (Fuzzy Entropy -FzEn)

Bulanık Entropi, bulanık bir küme veya sistemden elde edilen verinin ölçüsü olarak bilinmektedir (Ramer 1990). Bilinmezlik miktarının da bir bilgi ölçüsü olduğu varsayılmaktadır. Karışıklıkları ve belirsizlikleri içermekle

birlikte üyelik fonksiyonu fikri kullanılarak tanımlanmaktadır.

#### 2.4 K-En Yakın Komşu

K-en yakın komşu (kNN) algoritması sınıflandırma ve regresyon için kullanılan parametrik olmayan bir yöntemdir. Bir verinin bulunduğu sınıf, en yakın komşu verilerin sınıfları ile aynı olduğu ifade edilmektedir. Burada k parametresi, algoritmanın adından anlaşılacağı üzere komşu sayısını ifade etmektedir. Belirlenen komşu sayısı ile hesaplama adımlarının sayısı doğru orantılıdır. Bu nedenle hesaplama adımlarının artması eğitim seti üzerindeki gürültüye karşı hassasiyeti azaltmaya neden olacak ve test verilerine olan uyumu artıracaktır. Veri setinde bulunan veriler, geçmiş gözlemlere dayalı eğitim setine ait durumların sonucuna bağlı olarak belirlenir. Geleceğe yönelik tahminler ise eğitim verilerindeki en yakın öğelerin sonuçlarının ortalamasına eşit olacaktır. En yakın gözlemeleme, iki boyutlu çözüm kümesine göre Öklid uzaklığı:

$$d(x_i, y_i) = \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i, y_i)^2} \quad (5)$$

#### 2.5 Naive Bayes

Naive Bayes (NB) sınıflandırıcısı, Bayes teoremine dayanan olasılıksal sınıflandırma algoritmasıdır. Sınıfları belirli olan mevcut örnek verileri kullanarak yeni bir verinin var olan sınıflardan birine ait olma olasılığını hesaplayan bir yaklaşımdır. NB sınıflandırıcısında özellikler birbirinden bağımsız ve aynı dereceye sahip kabul edilir. Ayrıca bu özellikler birbirleri hakkında bilgi içermez. NB sınıflandırıcısı formülü:

$$P(C_1, C_2, \dots, C_n | E_i) = \prod_{k=1}^n P(C_k | E_i) \quad (6)$$

Burada; C değeri giriş örnek sayısı, n özellik sayısı,  $P(C_k | E_i)$  C'nin koşullu olasılık yoğunluk fonksiyonu,  $E_i$  i. olası çıkış durumudur.

#### 2.6 Topluluk Sınıflandırıcısı

Topluluk sınıflandırıcısı (ENS) farklı öğrenme modellerini birlikte kullanarak yeni örneklerin tahminlerini birleştiren ayrı ayrı eğitilmiş bir dizi sınıflandırıcıdan oluşmaktadır. Böylelikle biriktirme rastgele veri kümelerinden oluşur. Sınıflandırmada modeller paralel olarak eğitilir, oylama ile birleştirilir. Yapılan bir çalışmada bireysel sınıflandırma sonucunda farklı hatalar üretilebileceğinden bahsedilmiştir. Bundan dolayı sınıflandırıcıların birleştirilmesi, bir sınıflandırıcı tarafından üretilen hatanın

başka bir sınıflandırıcı tarafından telafi edilebilmesi açısından bireysel sınıflandırıcıya göre daha yüksek doğruluk oranı sağlamaktadır.

#### 2.7 Performans Ölçütleri

Yapay zekâ algoritmalarının performanslarının tespit edilmesi için Şekil 4'te verilen hata matrisinden yararlanılmıştır. Hata matrisi, gerçek değerler ile algoritma tespitinin sunulduğu bir tablodur.

		Tahmin	
		0	1
Gerçek	0	TN	FP
	1	FN	TP

Şekil 4. Hata matris gösterimi.

Burada True Positive-TP, gerçek değeri pozitif olan ve algoritma tarafından da pozitif olarak tespit edilen değerleri ifade etmektedir. False Negative-FN, gerçek değeri negatif olan ancak algoritma tarafından pozitif olarak tahmin edilen değerleri ifade etmektedir. False Positive-FP, Gerçek değeri pozitif olan ancak algoritma tarafından negatif olarak tespit edilen değerleri ifade etmektedir. True Negative-TN ise gerçek değeri negatif olan ve algoritma tarafından da negatif olarak tespit edilen değerleri ifade etmektedir. Bu değerleri kullanarak doğruluk (Accuracy-Acc), kesinlik (Precision-Pre), duyarlılık (Recall-Rec) performans değerleri hesaplanmıştır. Doğruluk değeri sadece doğru tahmin edilen örneklerin toplam örnek sayısına oranını gösterir. Kesinlik değeri, doğru tahmin edilen pozitif örneklerin toplam tespit edilen pozitif örneklere oranını gösterir. Duyarlılık değeri, doğru tahmin edilen pozitif örneklerin gerçek sınıftaki tüm örneklere oranını ifade eder. Tüm elde edilen metriklerin matematiksel gösterimi şu şekildedir (Narin 2020):

$$Acc = (TP+TN)/(TP+TN+FP+FN) \quad (7)$$

$$Rec = (TP)/(TP+FN) \quad (8)$$

$$Spe = (TN)/(TN+FP) \quad (9)$$

### 3. Bulgular

Bu çalışmada, PTB veri tabanında bulunan 52 sağlıklı ve 148 ME bireyin EKG kayıtları (lead-II) kullanılmıştır. Tüm



işlemler 2.5 Ghz i5-8265U işlemcili 8 GB RAM özelliklerine sahip bilgisayar üzerinden gerçekleştirilmiştir.

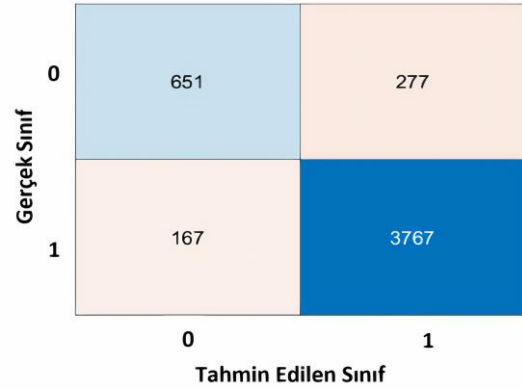
Ön işlem adımında ayırık dalgacık dönüşümü ile EKG işaretlerinin gürültüleri giderilmiştir. Shannon entropi, Renyi entropi, Dalgacık entropi, Kolmogorov-Sinai entropi ve Bulanık entropi yöntemleri kullanılarak beş farklı öznitelik elde edilmiştir. Her bir özneliğin orijinal (gürültülü) ve gürültüsüz EKG sinyalleri üzerinde sağlıklı ve ME birey tespitinin başarımları; kNN, NB ve ENS sınıflandırıcıları kullanılarak tespit edilmiştir. 10-katlı çapraz doğrulama (Cross validation-CV) yöntemi kullanılmış olup tüm yöntemlere ait sonuçlar Çizelge 1’de detaylı bir şekilde sunulmuştur. Üç farklı algoritmanın her bir entropi kullanımıyla ortalama eğitim süresi sırasıyla kNN algoritması için 35sn, NB algoritması için 31sn ve ENS algoritması için 83sn olarak tespit edilmiştir.

Doğrusal olmayan öznitelikler içerisinde en yüksek performans, gürültülü sinyaller üzerinden alınan Bulanık entropi ölçüm sonuçlarından elde edilmiştir. Bu sonucun kNN sınıflandırıcı ile %87,72 olduğu Çizelge 1’de açıkça görülmektedir. Çizelge 1’de bazı sonuçların oluşmadığı görülmektedir. Bu durumda; sınıflandırıcı, sonucu sadece bir sınıfa ait olarak tespit ettiği görülmektedir. Bu nedenle sağlıklı bir sonuç alınamamaktadır.

**Çizelge 1.** Her bir entropinin sınıflandırıcı başarımları.

Entropi	Model	Orijinal (Gürültülü) Sinyal (%)			Gürültüsüz Sinyal (%)		
		Acc	Rec	Spe	Acc	Rec	Spe
ShEn	kNN	79,43	96,14	8,62	-	-	-
	NB	81,04	99,95	0,86	-	-	-
	ENS	81,02	99,95	0,75	-	-	-
RnEn	kNN	78,73	96,24	4,53	79,04	96,49	5,06
	NB	80,58	99,47	0,54	-	-	-
	ENS	80,93	99,92	0,43	80,83	99,87	0,11
WaEn	kNN	-	-	-	78,30	96,34	1,83
	NB	-	-	-	80,56	99,47	0,43
	ENS	-	-	-	80,97	99,92	0,65
KsEn	kNN	86,88	94,56	54,31	69,74	81,49	19,94
	NB	86,90	94,56	54,42	-	-	-
	ENS	86,84	94,53	54,20	69,99	81,88	19,61
FzEn	kNN	87,72	93,70	62,39	81,84	96,95	17,78
	NB	87,68	93,26	64,01	81,72	99,06	8,19
	ENS	87,33	93,24	62,28	81,74	99,34	7,11

Beş farklı doğrusal olmayan yöntem birlikte kullanıldığında en yüksek sonuç; %90,99 genel doğruluk, %95,58 hassasiyet, %71,55 özgünlük değerleridir. Bu değerler gürültülü sinyaller üzerinde Topluluk sınıflandırıcısı kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuca ait hata matrisi ise Şekil 5’te verilmiştir. Burada, entropi ölçümlerinin hepsinin kullanımıyla ortalama eğitim süresi doğal olarak artış göstermiştir. Eğitim süreleri sırasıyla kNN algoritması için 48sn, NB algoritması için 46sn ve ENS algoritması için 121sn olarak kaydedilmiştir.



**Şekil 5.** Doğrusal olmayan özniteliklerin Topluluk sınıflandırıcı hata matrisi değerleri.

#### 4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, karşılaştırılabilirlik ve güvenilirlik açısından halka açık internet sitesinden ME hastalarına ait veriler ile sağlıklı kişilere ait EKG verileri kullanılmıştır. Beş farklı doğrusal olmayan Entropi ölçümlerinin ME hastalarını ayırt etmesindeki performansları araştırılmıştır.

Literatürde ME hastalarının tespitine yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Bunlardan bazıları Çizelge 2’de verilmiştir.

**Çizelge 2.** PTB veri tabanı ile gerçekleştirilmiş literatür çalışmaları.

Literatür	Yöntem	Başarımlar (%)
(Sharma et al. 2015)	ADD, 12 adet öznitelik (t-test) kNN	Acc: 98,80; Rec: 99,45; Spe: 96,27
(Sharma et al. 2018)	ADD- 10 adet öznitelik SVM	Acc: 98,84; Rec: 99,35; Spe: 98,29
(Padhy and Samarendra 2017)	Tekil değer ayrıştırması ve dalgacık enerjisi-35 adet öznitelik-SVM	Acc: 95,30; Rec: 94,60; Spe: 96,00
(Sopic 2018)	Zaman/Frekans Alanı 72 adet öznitelik Rastgele Orman Sınıflandırıcı	Acc: 82,36; Rec: 87,95; Spe: 78,82
(Diker 2018)	Morfolojik, zaman alanı ve ADD 9 adet öznitelik-SVM	Acc: 87,80; Rec: 86,97; Spe: 88,67
<b>Bu çalışma</b>	<b>5 adet öznitelik Topluluk Sınıflandırıcısı</b>	<b>Acc: 90,99; Rec: 95,58; Spe: 71,55</b>

Yapılan çalışmalara bakıldığında, farklı yöntem ve farklı sınıflandırıcılar ile genel doğruluk oranları %82-%98 arasında değişmektedir. Bu çalışmalarda sıklıkla zaman alanı ölçümleri ve frekans alanı ölçümleri kullanılmıştır. Bazı çalışmalarda doğrusal olmayan ölçümler de kullanılmıştır (Sharma et al. 2018). Bu çalışmalarda (Padhy and Samarendra 2017, Sopic 2018) öznitelik sayılarının fazlaca elde edildiği görülmektedir. Bazı çalışmalarda (Sharma et al. 2015) öznitelik sayısını azaltmak için öznitelik seçimi yapılmış ve öznitelik sayıları düşürülüp sonuçlar verilmiştir.

Bu çalışmada, hem gürültülü hem gürültüsüz EKG sinyalleri üzerinden beş farklı doğrusal olmayan ölçüm sonuçlarının sağlıklı ve ME tespiti üzerindeki başarımlarını ayrı ayrı ifade edilmiştir. Böylece gürültü faktörünün de her bir Entropi üzerindeki başarımlarına etkileri analiz edilmiştir. Buna ek olarak tüm özniteliklerin performansları da elde edilmiştir. Ayrıca çalışmamız, literatürde yapılmış diğer çalışmaların çok fazla öznitelikle gerçekleştirdikleri yoğun işlemler sonucunda elde edilen doğruluk oranı ile karşılaştırıldığında öznitelik sayısının az olması ile işlem süresinin kısa olması, herhangi bir veri seçimi yapılmadan verilerin tamamının çalışmada kullanılması ve yüksek doğruluk oranına sahip olması gibi avantajlara sahiptir.

Gelecek çalışmalarda, sınıflar arası ayrımı daha yüksek başarımla yapılabilmesi için lineer olmayan yaklaşımlar arttırılacaktır. Öznitelik sayısının çok fazla olması durumunda sezgisel algoritmalar ile öznitelik seçimi yapılması düşünülmektedir. Böylece daha az öznitelik ile daha yüksek performans elde edileceği öngörülmektedir. Bunlara ek olarak farklı merkezlerden ME ve Sağlıklı veriler araştırılarak daha fazla veri ile çalışma gerçekleştirilecektir. Bu sayede çalışma sonuçlarının daha kararlı olacağı beklenmektedir.

#### Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

#### Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Kaynaklar, Araştırma, Fikir Sahibi, Deney tasarımı, Görselleştirme, Yazma –orijinal taslak, Düzenleme

Yazar 2: Kaynaklar, Araştırma, Deneyleme, Yazma – orijinal taslak, Doğrulama

#### Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

#### Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

## 5. Kaynaklar

- Acharya, U. R., Fujita, H., Sudarshan, V. K., Oh, S. L., Adam, M., Koh, J. E. and San Tan, R., 2016. Automated detection and localization of myocardial infarction using electrocardiogram: a comparative study of different leads. *Knowledge-Based Systems*, **99**, 146-156.  
<https://doi.org/10.1016/j.knsys.2016.01.040>
- Arif, M., Malagore, I. A., and Afsar, F. A. 2012. Detection and localization of myocardial infarction using k-nearest neighbor classifier. *Journal of Medical Systems*, **36**, 279-289.  
<https://doi.org/10.1007/s10916-010-9474-3>
- Attallah, O., and Ragab, D. A. 2023. Auto-MyIn: Automatic diagnosis of myocardial infarction via multiple GLCMs, CNNs, and SVMs. *Biomedical Signal Processing and Control*, **80**, 104273.  
<https://doi.org/10.1016/j.bspc.2022.104273>
- Benjamin, E. J., Muntner, P., Alonso, A., Bittencourt, M. S., Callaway, C. W., Carson, A. P., and American Heart Association Council on Epidemiology and Prevention Statistics Committee and Stroke Statistics Subcommittee., 2019. Heart disease and stroke statistics—2019 update: a report from the American Heart Association. *Circulation*, **139**(10), e56-e528.  
<https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000000659>
- Bousseljot, R., Kreiseler, D. and Schnabel, A., 2004. The PTB diagnostic ECG database. [physionet.org](http://physionet.org).
- Chang, P. C., Lin, J. J., Hsieh, J. C. and Weng, J. 2012. Myocardial infarction classification with multi-lead ECG using hidden Markov models and Gaussian mixture models. *Applied Soft Computing*, **12**(10), 3165-3175.  
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2012.06.004>
- Chen, Z., Lalande, A., Salomon, M., Decourselle, T., Pommier, T., Qayyum, A. and Couturier, R. 2022. Automatic deep learning-based myocardial infarction segmentation from delayed enhancement MRI. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, **95**, 102014.  
<https://doi.org/10.1016/j.compmedimag.2021.10204>
- Degerli, A., Kiranyaz, S., Hamid, T., Mazhar, R., & Gabbouj, M. (2024). Early myocardial infarction detection over multi-view echocardiography. *Biomedical Signal Processing and Control*, **87**, 105448.  
<https://doi.org/10.1016/j.bspc.2023.105448>
- Diker, A., Cömert, Z., Avcı, E. and Velappan, S., 2018. Intelligent system based on Genetic Algorithm and support vector machine for detection of myocardial infarction from ECG signals. In *2018 26th Signal processing and communications applications conference (SIU)* (pp. 1-4). IEEE.  
<https://doi.org/10.1109/SIU.2018.8404299>

- Gong, M., Liang, D., Xu, D., Jin, Y., Wang, G. and Shan, P., 2024. Analyzing predictors of in-hospital mortality in patients with acute ST-segment elevation myocardial infarction using an evolved machine learning approach. *Computers in Biology and Medicine*, 107950. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2024.107950>
- Han, C., and Shi, L., 2019. Automated interpretable detection of myocardial infarction fusing energy entropy and morphological features. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, **175**, 9-23. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2019.03.012>
- Hasbullah, S., Mohd Zahid, M. S., and Mandala, S., 2023. Detection of Myocardial Infarction Using Hybrid Models of Convolutional Neural Network and Recurrent Neural Network. *BioMedInformatics*, **3(2)**, 478-492. <https://doi.org/10.3390/biomedinformatics3020033>
- Kumar, M., Pachori, R. B., & Acharya, U. R., 2017. Automated diagnosis of myocardial infarction ECG signals using sample entropy in flexible analytic wavelet transform framework. *Entropy*, **19(9)**, 488. <https://doi.org/10.3390/e19090488>
- Liu, B., Liu, J., Wang, G., Huang, K., Li, F., Zheng, Y. and Zhou, F., 2015. A novel electrocardiogram parameterization algorithm and its application in myocardial infarction detection. *Computers in Biology and Medicine*, **61**, 178-184. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2014.08.010>
- Miranda, D. F., Lobo, A. S., Walsh, B., Sandoval, Y., and Smith, S. W., 2018. New insights into the use of the 12-lead electrocardiogram for diagnosing acute myocardial infarction in the emergency department. *Canadian Journal of Cardiology*, **34(2)**, 132-145. <https://doi.org/10.1016/j.cjca.2017.11.011>
- Narin, A., 2022. Detection of focal and non-focal epileptic seizure using continuous wavelet transform-based scalogram images and pre-trained deep neural networks. *IRBM*, **43(1)**, 22-31. <https://doi.org/10.1016/j.irbm.2020.11.002>
- Padhy, S., and Dandapat, S., 2017. Third-order tensor based analysis of multilead ECG for classification of myocardial infarction. *Biomedical Signal Processing and Control*, **31**, 71-78. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2016.07.007>
- Papaloukas, C., Fotiadis, D. I., Likas, A., & Michalis, L. K., 2002. An ischemia detection method based on artificial neural networks. *Artificial Intelligence in Medicine*, **24(2)**, 167-178. [https://doi.org/10.1016/S0933-3657\(01\)00100-2](https://doi.org/10.1016/S0933-3657(01)00100-2)
- Ramer, A., 1990. Concepts of fuzzy information measures on continuous domains. *International Journal Of General System*, **17(3)**, 241-248. <https://doi.org/10.1080/03081079008935109>
- Rényi, A., 1961. On measures of entropy and information. In *Proceedings of the Fourth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Volume 1: Contributions to the Theory of Statistics. University of California Press*, **4**, 547-562.
- Shannon, C. E. 1948. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, **27(3)**, 379-423. <https://doi.org/10.1002/j.15387305.1948.tb0138.x>
- Sharma, L. N., Tripathy, R. K. and Dandapat, S., 2015. Multiscale energy and eigenspace approach to detection and localization of myocardial infarction. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **62(7)**, 1827-1837. <https://doi.org/10.1109/TBME.2015.2405134>
- Subha, D. P., Joseph, P. K., Acharya U, R. And Lim, C. M., 2010. EEG signal analysis: a survey. *Journal of Medical Systems*, **34**, 195-212. <https://doi.org/10.1007/s10916-008-9231-z>
- Savaré, G., & Toscani, G., 2014. The concavity of Rényi entropy power. *IEEE Transactions on Information Theory*, **60(5)**, 2687-2693. <https://doi.org/10.1109/TIT.2014.2309341>
- Sharma, L. D. and Sunkaria, R. K., 2018. Inferior myocardial infarction detection using stationary wavelet transform and machine learning approach. *Signal, Image and Video Processing*, **12(2)**, 199-206. <https://doi.org/10.1007/s11760-017-1146-z>
- Sopic, D., Aminifar, A., Aminifar, A., and Atienza, D., 2018. Real-time event-driven classification technique for early detection and prevention of myocardial infarction on wearable systems. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, **12(5)**, 982-992. <https://doi.org/10.1109/TBCAS.2018.2848477>

#### İnternet Kaynakları

- 1-<https://www.who.int/data/gho/data/themes/mortality-and-global-health-estimates> (27.12 2023)

## The Evaluation of Mechanical Properties of Commercial Composite Bones and 3D-Printed Bones Produced Using the CJP Technology

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 09.04.2024

Kabul/Accepted: 05.08.2024

Yayımlandı/Published:02.12.2024

### Ticari Kompozit Kemiklerin ve CJP Teknolojisi Kullanılarak Üretilen 3B Baskılı Kemiklerin Mekanik Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Samet ÇIKLAÇANDIR\* , Yalçın İŞLER 

*Izmir Katip Çelebi University, Engineering and Architecture Faculty, Department of Biomedical Engineering, İzmir, Türkiye*

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Abstract

Cadaver bones and artificial bones are utilized to perform preoperative studies and education purposes. Cadaver bones are hard to find, require ethical permissions, and have infection hazards. Therefore, commercial artificial bones are preferred in practice. Nonetheless, since these commercial alternatives are standardly produced in an average size and geometry, it is almost impossible to adapt them to a specific surgical simulation. In addition, these artificial bones have relatively high costs, which limits their accessibility. On the other hand, ColorJet printing (CJP), one of the three-dimensional printing technologies, offers a rapid and cost-effective alternative. However, whether the printed 3D-printed models can mechanically comply with artificial bones is unclear. In this study, 3D-printed bones and artificial commercial composite bones were compared in terms of mechanical properties. Compression tests were applied over 14 printed and 14 composite bones using the ISO 5833 standard. Mechanical properties including stress-strain, load to failure, and elastic modulus were calculated, and these results were compared using the two-sample independent t-test, which is one of the statistical analysis methods. Consequently, there was no significant difference between the bone models in terms of stress and failure load values ( $p < 0.52$  and  $p < 0.17$ , respectively), however, the elastic modulus was statistically significant ( $p < 0.01$ ). These test findings demonstrated that this technology, which has a faster production capacity than other methods, can show similar strength to artificial bones. Thus, 3D-printed bones can be utilized instead of artificial bones in preoperative planning, which needs patient-specific bone models, and experimental biomechanical studies.

**Keywords:** Additive manufacturing; Commercial composite bones; Preoperative applications; CJP technology; Three-dimensional printing.

#### Öz

Kadavra kemikleri ve yapay kemikler, ameliyat öncesi çalışmalar gerçekleştirmek için ve eğitim amacıyla faydalanılmaktadır. Kadavra kemiklerini bulmak zordur, etik izinler gerektirir ve enfeksiyon tehlikesi barındırırlar. Bu yüzden uygulamada ticari yapay kemikler tercih edilmektedir. Bununla birlikte, bu ticari alternatif standart olarak ortalama bir boyut ve geometride üretildiğinden onları belirli bir cerrahi simülasyona uyarlamak neredeyse imkansızdır. Ayrıca, bu yapay kemikler, erişilebilirliklerini sınırlayan nispeten yüksek maliyetlere sahiptir. Diğer yandan, üç boyutlu (3B) baskı teknolojilerinden birisi olan ColorJet baskı (CJP) hızlı ve uygun maliyetli bir alternatif sunmaktadır. Fakat 3B'lu baskılı modellerin mekanik olarak yapay kemiklere uyum sağlayıp sağlayamayacağı belirsizdir. Bu çalışmada, 3B'lu baskılı kemikler ile yapay ticari kompozit kemiklerin mekanik özellikler açısından karşılaştırması gerçekleştirilmiştir. ISO5833 standardı temel alınarak basma testleri 14 baskılı ve 14 kompozit kemiklere uygulanmıştır. Gerilme-şekil değiştirme, kırılma yükü ve elastik modülü gibi mekanik özellikler hesaplanmış ve bu sonuçlar istatistik analiz yöntemlerinden birisi olan iki örneklili bağımsız t-testi kullanılarak karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, kemik modelleri arasında gerilme ve kırılma yük değerleri açısından anlamlı bir fark bulunmamıştır (sırasıyla  $p < 0.52$  ve  $p < 0.17$ ), ancak elastik modülü istatistiksel olarak anlamlıdır ( $p < 0.01$ ). Bu test sonuçları, diğer yöntemlere göre daha hızlı üretim kapasitesi bulunan bu teknolojinin yapay kemiklerle benzer dayanıklılık gösterebileceği ortaya çıkarılmıştır. Böylece hastaya özel kemik modelleri gerektiren ameliyat öncesi planlamada ve deneysel biyomekanik çalışmalarda yapay kemikler yerine 3B baskılı kemikler kullanılabilir.

**Anahtar Kelimeler:** Katmanlı üretim; Ticari kompozit kemikler; Ameliyat öncesi uygulamalar; CJP teknolojisi; Üç boyutlu baskı.

#### 1. Introduction

Artificial bones are frequently used in health science education, preoperative planning, biomechanical studies, and finite element analysis-based validation process (Nag1 2021). They are produced from Polyurethane (PU) foams consisting of bone-mimicking material (Navarro *et al.* 2008). There are four generations in the production

technology. The first-generation artificial bones consisted of basic materials such as plastic and simple metal, which were easily shaped and had low cost. The second generation consisted of synthetic materials such as epoxy resin and PU foam, enabling more realistic surgical practices than the previous one. The bones from the first and second generations have very low strength values compared to real bones and not being able to imitate

natural bone well (Victor and Muthu 2014). The third generation includes composite materials made up of varied polymers that outperform the previous ones in mimicking bone's cortical and cancellous structures. The fourth generation contains composite materials that are more reinforced compared to the third and provided results that were mechanically close to natural bone. Bones from the third and fourth generations have closer strength and stiffness values to the real bones (Elfar *et al.* 2014). These new-generation bones are good alternatives to real bones to use in academic studies and education. These models have similar mechanical, thermal, and drilling properties to the real bone (Gardner *et al.* 2010). On the other hand, thanks to advanced technology, artificial bones not only provide mechanical properties but also the future generation artificial bones, called bioinspired materials, which play a biologically active role and can be customized such as the three-dimensional printing (3DP), are beginning to take their place today.

Artificial bones are preferred in many studies since their use does not require ethical permission (Hausmann 2006). In addition, they have a standardized shape, which increases the reproducibility, so that the achieved results can easily be compared to the literature. The use of artificial bones also prevents possible infection risks and does not require special storage techniques. In addition to all of these advantages, artificial bones also allow performing a bone-based study in a limited time. On the other hand, there are some drawbacks in using artificial bones. Artificial bones cannot mimic real bones from cadavers perfectly. In addition, new-generation bones are quite expensive, and it becomes a challenge in low-budget academic and educational studies, especially. Since their product is standard in shape, to conduct an academic study that requires different bone sizes is impossible by using artificial bones only. To overcome these drawbacks, three-dimensional printing technology may be a low-cost alternative since it represents promising rapid developments in its mimic ability (Lim *et al.* 2016), recently.

3DP technologies can be categorized as Fused Deposition Modeling (FDM), Selective Laser Sintering (SLS), Stereolithography (SLA), powder-based or ink-jet, Direct Metal Laser Sintering (DMLS), Selective Laser Melting (SLM), and Digital Light Processing (DLP) (Cheng *et al.* 2021). The first four technologies, however, are the most widespread and considered fundamental. In the FDM method, thermoplastic materials are melted using a hot nozzle, and a product is formed via nozzle movements. This technology has found common use due to its easy-to-use structure, its affordable material prices, and its low

initial cost (Dudek 2013). Also, produced parts exhibit remarkable resistance to different physical abrasives throughout time. However, the use of supports in this technique limits the mimic ability and surface finishing (Kudelski *et al.* 2017). In addition, properly controlling the melting temperatures of thermoplastic materials can be highly challenging to achieve the required fluidity and adhesion. The SLS technology produces parts through sinter-powered materials such as plastic, metal, or ceramic powders using a laser (Fina *et al.* 2017). Printers manufactured as SLS are very costly and have problems occupying large areas, and complex printing processes (Wu *et al.* 2008). The SLA technology produces models by solidifying the resin liquid using UV light. It allows printing parts with very fast, low-cost, and high-resolution (Shahrubudin *et al.* 2019). However, it is not very common in biomechanical studies due to the need for support, the fragility of parts, and the inability to mimic bone tissue (Miedzinska *et al.* 2020). In addition to these technologies, the Binder Jetting (BJ) method prints parts by combining powders with a binder and it can manufacture artificial bones of similar size and porosity to real bones (Zhang *et al.* 2021). ColorJet Printing (CJP) uses the BJ technology and it can print parts in colour without needing support (Kim *et al.* 2016). Due to these properties, it can produce useful bone models in biomechanical and anatomical studies (Bakhtiar *et al.* 2018). A brief comparison of these technologies is given in Table 1.

**Table 1.** Comparison of the most common 3D printer Technologies

3D Printer Tech.	Pros	Cons
<b>FDM</b>	Simple prototyping Lowest price Time-resistant parts	Low details Limited designs Difficulty in temperature control
<b>SLS</b>	High resolution No support structures Multiple productions	Rough surface Long drying time Expensive 3D machines
<b>SLA</b>	Highest resolution Low material consumption Fast prototyping	Fragile resin parts Sensitive to sunlight Need for support structures
<b>CJP</b>	High resolution No support structures Fast prototyping	Long drying time Difficulty of use Binder requirement

CJP technology coagulates calcium sulfate-based powders, which cover the printer bed, using a binder (Brunello *et al.* 2016). The binder is sent from the feeder to the movable print-head. After the binder is injected into the powder parts, the build piston moves down one layer and is filled from the powder supply through a

leveling roller (Awari *et al.* 2021). When the printing is complete, a particular period is waited for the printout to dry, and the unbound powder particles on it are removed with the help of a blower to be recycled. The part can be immersed in a binder-filled container to increase strength (Ziaee and Crane 2019). Color printouts can be performed with the CJP method, and vessels, ligaments, and muscles can be distinguished in different colors (Lee *et al.* 2017). Therefore, anatomical models can be produced using CJP technologies in accordance with biofidelity and can be utilized in training, preoperative planning, and biomechanical tests (Al-Dulimi *et al.* 2020).

3D printing has proven its advantages over medical education, and preoperative planning (Mihcin and Ciklacandir 2022). Among them, preoperative planning aims to investigate all possible situations before the operation starts, which increases the success ratio of operations drastically (O'Toole III *et al.* 1995).

On the other hand, bones are composed of porous structures, this requires intricate 3D technologies (Du *et al.* 2020). The validation studies showed that the printed bones have similar mechanical and material properties to the real bones (Lv *et al.* 2019). For example, Tai *et al.* compared 3D-printed bone models with synthetic bones in thermal and mechanical properties (Tai *et al.* 2018). They showed that the thermal and drilling properties of 3D models were similar to those of cortical bones. Xu *et al.* used a 3D-printed artificial bone, which is printed with an FDM printer using a processed CT scan image, to repair a goat femur (Xu *et al.* 2014). In another study, Hochman *et al.* showed that real sheep bones and 3D printed artificial bones, which are produced with BJ technologies, have similar mechanical properties (Hochman *et al.* 2014).

In a general preoperative study, the core idea is to manufacture a prototype of the body part using a 3D printer, and then the operator simulates the surgery. For this purpose, the Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM) file of the patient is obtained from computer tomography (CT) or magnetic resonance imaging (MRI) methods first. These images are segmented and processed by dedicated computer programs and exported as STL files (Cimerman and Kristan 2007). Next, these files are converted to G-Code, which is the language of 3D printers, and transferred to the 3D printer (Blaszczyk *et al.* 2021). Figure 1 shows the right and left femoral heads, which were reconstructed to adhere strictly to the DICOM file obtained from a patient and printed with CJP technology in our laboratory (Mihcin and Ciklacandir 2022).



**Figure 1.** Right and left femoral head specimens printed with ColorJet Printing (CJP) technology

Since CJP technology has numerous advantages including low-cost solution, high resolution, and rapid prototyping, it can be considered to use in preoperative biomechanical studies. Although this technology is proven in animal studies, there is no comparison to real human bones or commercially manufactured bone models. In this study, we aimed to compare the mechanical properties of 3D-printed tibial sawbones to those of artificially produced commercial composite bones.

## 2. Materials and Methods

### 2.1 Material preparation

A total of 14 composite tibial Sawbones® manufactured from glass-reinforced epoxy material (Third-Generation, Pacific Research Laboratories, Vashon, WA) was prepared for mechanical tests. Because of how closely their mechanical characteristics and geometry resembled those of natural bones, these artificial bones were chosen. In accordance with ISO 5833 guidelines, the specimens were sliced into cylindrical shapes with a 25 mm radius and a 10 mm height. Specimens were detached at the middle of the bone shaft so that experiments provided consistent results. This point was preferred because the material properties of the specimen were more homogeneously distributed, easy to sample and standardize, and reproducibility of experiments. In some specimens, a perfect cylindrical geometry could not be achieved as in 3D printing specimens. To prevent this from affecting the results, the surface area was calculated by taking images of each specimen via the surface area calculator.

Cylindrical specimens were created with the same dimensions in SolidWorks (v.2016, SolidWorks Corp., MA, USA) and transferred to 3DPrint™ (v1.0, 3D Systems, Rock Hill, South Carolina) software in the STL file format (Figure 2). Using ColorJet Printing (CJP) technology, they were manufactured using the ProJet 160 3D printer (3D Systems, Rock Hill, SC, USA). In the CJP technique, the



layer thickness was adjusted at 0.1 mm, which is regarded as a relatively high value of 0.17 mm in the FDM method. Following the completion of the printing process, the powder particles (VisiJet® PXL™ Core) were bonded with a binder (PXL™ Binder) and dried for about two hours.

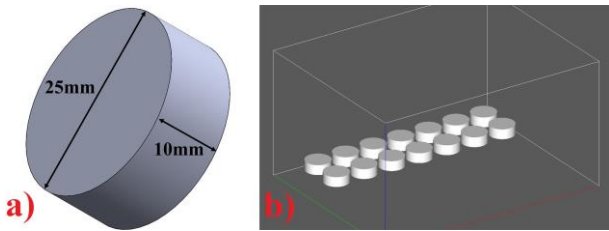


Figure 2. a) Specimen dimensions for ISO 5833 standards, b) Placement of specimens in the building area

## 2.2 Mechanical test

The compression test is a method based on the principle of shortening or pressing the length of a specimen by applying a compressive load to the material (Beaupied *et al.* 2007). Using the Shimadzu AG-IC tester (Shimadzu Corp., Kyoto, Japan), the specimens were subjected to the compression test. The load cell has a 10kN capacity, which is more than sufficient, and throughout the experiment, the test speed is set at 1mm/m. A compressive test was applied with a maximum displacement of 3 mm for each specimen. Since this is considered to be the greatest displacement at which the specimens could fail. Figure 3a illustrates the implementation of a compression test on composite bones. Similarly, a printed bone specimen in the experiment and its failure status after the test are shown in Figure 3b-c. The results of the analysis recorded by Trapezium X software during tests were used to derive the values of compressive stress, strain, and elastic modulus. The following section provides a brief explanation of the formulae used to compute all of this.

Stress is the amount of force acting on a unit area. In compression or axial loading, a force is applied perpendicular to the surface area to deform the material. After escalating force magnitude gradually on a specimen, the failure point, which occurs at any time, is the place at which deformation starts and becomes an irreversible process for the material. Stress is calculated with

$$\sigma \text{ (MPa)} = \frac{F \text{ (N)}}{A \text{ (mm}^2\text{)}} \quad (1)$$

where  $F$  represents the applied force,  $A$  is the cross-section area, and  $\sigma$  is the stress.

Strain refers to how much material under load changes its shape compared to the state before the load is applied. The calculation of strain is represented by the following formula

$$\varepsilon = \frac{\Delta L \text{ (mm)}}{L_0 \text{ (mm)}} \quad (2)$$

where  $\varepsilon$  denotes the strain,  $\Delta L$  is the total elongation,  $L_0$  is the original length. A stress-strain diagram is the most common way to analyze the material's relationship between stress and strain. By computing the slope in the elastic region of this graph, characteristic information unique to each material can be gathered. Among these, the elastic modulus is the most frequently encountered expression. It states the deformation property of a material to return to its original shape under low stresses after this stress is removed. The stress and strain are directly proportional in the elastic region (Hooke's law) as

$$E \text{ (MPa)} = \frac{\sigma \text{ (MPa)}}{\varepsilon} \quad (3)$$

where  $E$  is elastic modulus.

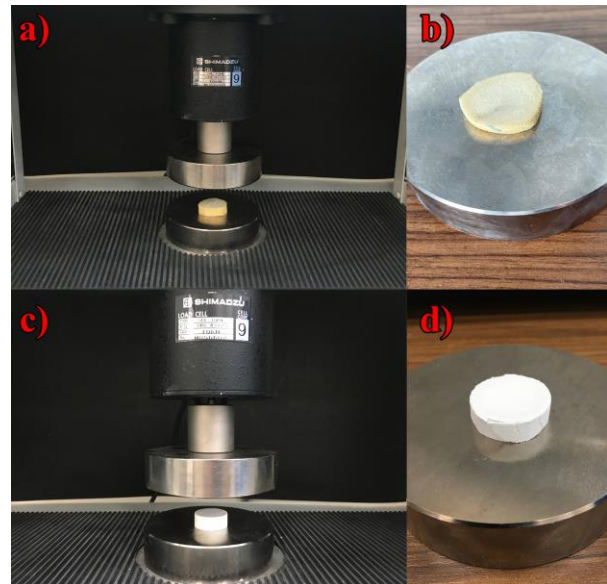


Figure 3. Before and after compression test of specimens (a-b) Composite tibial Sawbones (c-d) Printed specimens, respectively

## 2.3 Statistical analysis

Statistical analysis was performed to determine the difference between the groups whose calculations were completed as mentioned in the previous section. To ascertain whether or not there was a statistically significant difference between the two groups, the independent t-test (sometimes called a two-sample t-test) was employed. The computation of this test involves dividing the difference between the two sample means by the estimated standard error, which can be either pooled or unpoled. All analysis of specimens was computed on the SPSS (v.25, IBM, NY, USA) software. If a test result is less than 0.05 level, then it can be concluded that there is a significant difference between these two groups for the corresponding parameter.

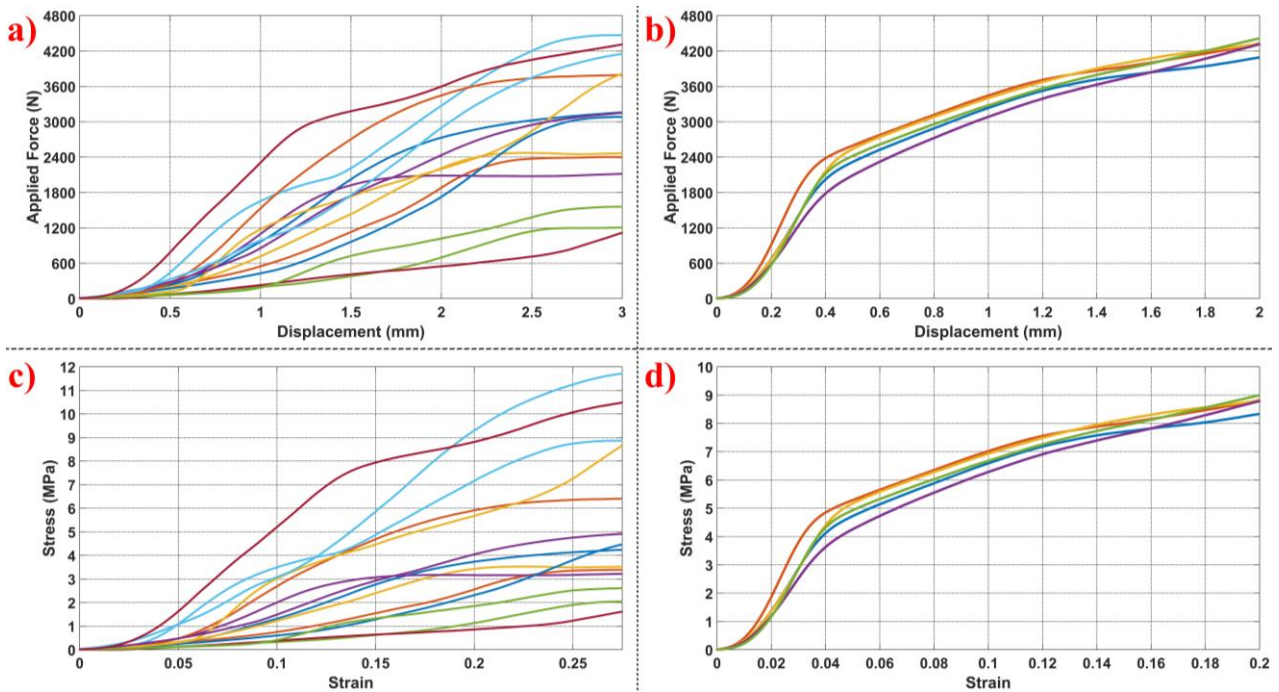
**3. Results**

The total printing time of the parts produced with 3DP took 32 minutes. It was used a 21.2 ml binder for cylinders printed in monochrome. The total volume of parts was obtained at 68.6 cm<sup>3</sup>, and the total surface area was calculated at 247.1 cm<sup>2</sup>. The printing information estimated by printer software about a specimen is necessary to calculate the cost of the material. Consequently, the estimated cost of printing needed to produce 3DP bone that resembles composite bone is \$15 per bone.

Results of composite bone and printed bone specimens are graphed in Figures 4a–b in the force versus displacement. In the first figure, composite bone specimens had slightly different results, the reason is that they were collected at different times and the effect of waiting periods. With composite bone specimens, a force-driven horizontal movement appeared at a displacement of approximately 3 mm and maximum force values were obtained for all. Accordingly, the maximum failure loads were observed at 4707.5 N for composite bones and 4565.6 N for 3DP cylinders. In addition, it emerged that

while results differed amongst themselves for composite bone, 3D-printed specimens showed very consistent results. Stress and strain results derived from the force/displacement graphs are given in Figures 4c-d. These graphs, which are required to determine the elastic modulus, resemble the force/displacement graph quite a bit. In 3DP specimens, the highest stress was recorded at 8.97 MPa, whereas it was obtained at 11.71 MPa in composite bones. The visualization of only five specimen results is shown in Figure 4b-d due to the high degree of similarity among the 3D-printed specimens.

For both groups, the elastic modulus values computed using equation (3) are given in Table 2. The maximum elastic modulus value of composite bones was 71.51 MPa, while the lowest value was 15.60 MPa. On the other hand, the maximum elastic modulus of the 3DP models was 191.59 MPa, and the minimum elastic modulus was 120.77 MPa. Comparing 3D-printed specimens to composite bone, higher means were observed for stress, strain, and elastic modulus. During the experiment, failure points were also observed and the results for both groups are given in the same table.



**Figure 4.** Compression test results (a) Force-Displacement graphs of composite bones (b) Force-Displacement graphs of 3DP cylinders (c) Stress-Strain graphs of composite bones (d) Stress-Strain graphs of 3DP cylinders.

**Table 2.** Mechanical comparison of 3DP cylinders with composite bones

	Units	Number of Samples (N)	Composite Bones (Mean ± SD)	3D-Printed Cylinders (Mean ± SD)	p
Compressive Stress	MPa	14	3.97 ± 2.39	4.69 ± 0.41	0.52
Elastic Modulus	MPa	14	38.06 ± 21.12	155.76 ± 26.59	0.01*
Failure Load	N	14	2196.19 ± 854.85	2261 ± 85.07	0.17

\* indicates statistically significant differences and the significant value was 0.05

The independent two-sample t-test was chosen because the results of both experiments contained continuous and non-categorical data. The results of the t-test for stresses, elastic modulus, and failure load are, in that order, 0.52, 0.01, and 0.17. The statistical significance level was determined as 0.05. As a result, there are no statistically significant differences between compressive stresses and failure load capacities of commercial bone models and those of 3D-printed bones. On the other hand, the elastic modulus shows a significant statistical difference between composite bone models and 3D-printed bones.

#### 4. Discussions

3DP technology still has a lot of challenges that need to be handled even if it can produce merchandise more rapidly than conventional methods. These concerns can be tackled with the help of the CJP method (Abdullah *et al.* 2019). Its capacity to spray binder and uniformly manufacture new layers over the printing area allows it to produce material faster than other printer technologies. This technique outperforms FDM technology in terms of effort and time because it doesn't need support in that the printer bed is covered in powder particles. In the study by Fatma *et al.* comparing FDM and CJP, it was determined that CJP required 1/3 less time than FDM on the same model (Fatma *et al.* 2021). However, this time goes up exponentially if there are more parts in the printing area. As a matter of fact, printing using CJP took 32 minutes in our study; nevertheless, if the identical samples had been printed using FDM, the printing duration may have reached as high as 380 minutes. This duration should not be underestimated in applications where rapid prototypes are at the forefront, such as preoperative planning.

Even though CJP has an edge in terms of time, its strength performance is not as desirable. Fatma *et al.* revealed that CJP has lower strength compared to other technologies. Similarly, Wu *et al.* measured an elastic modulus of 2.3 GPa according to their tests on materials produced with FDM (Wu *et al.* 2020). On the other hand, in this study, this value was calculated as 0.155 GPa, indicating that much lower strength was obtained compared to FDM. Regarding synthetic bones, on the other hand, the range of compressive strength that they achieved was 1.4 to 5.4 MPa. The mean compressive stress of artificial bone, 3.97 MPa, was pinpointed to be quite near to the Wu *et al.* (2020) study. Albeit not as impressive as FDM, CJP samples exhibit a mean 4.69 MPa strength advantage over artificial bones.

The elastic modulus of powder material was reported to be as high as 125 MPa in a study (Dini *et al.* 2022).

According to our study, the binder dipping that was performed after the printing process was finished caused this value to escalate to a mean of 155 MPa. Furthermore, the fact that the 3DP results are much superior to artificial bones—which have an average elasticity of 38 MPa—is demonstrated. The elastic modulus of PU foam, which is formed in accordance with ISO standards, has been significantly lowered because to its comparatively greater cellular ratio as compared to solid structure. In another study, an elastic modulus of 58 MPa was obtained for Sawbone bones with a cancellous structure, which coheres the maximum value of 59 MPa we obtained in artificial bones (Zdero *et al.* 2023). In addition, elastic modulus of 3D-printed bones showed a significant difference when compared statistically with artificial bones. This is most likely because its cellular structure contains substantial quantities of artificial bone.

When it comes to cost, artificial bones are about \$56, whereas 3D-printed bones cost about \$15 per bone. Additionally, by using less binder in anatomical models intended for instructional uses—where strength is not a priority—cost savings can be realized. Artificial bones are being swapped with 3DP technology to diminish expenses, particularly in experiments where a large number of samples are biomechanically analyzed (Nagl *et al.* 2022). In addition, the printer device prices that this technology brings with it are another crucial factor regarding expenses. The most affordable technologies among them are SLA and FDM, whereas the most expensive machines are SLS with a laser system. CJP is somewhat more expensive than FDM even though it is less expensive than SLS. On the other hand, models with complicated geometries need to be printed with a high accuracy and resolution for these technologies to be indispensable in the healthcare industry. Although it varies across manufacturers, FDM offers axis resolutions of 0.5mm, SLA 0.2mm, and SLS 0.075mm; nevertheless, because of the tiny powder particles in CJP, this ratio can drop to 0.05mm (George *et al.* 2017). In addition, a detailed comparison of composite bones and 3DP bones is shown in Table 3.

**Table 3.** Comparison of composite bones and 3DP bones properties

	Composite Bones	3DP Bones
Comp. Stress (MPa)	1.4-5.4 (Wu <i>et al.</i> 2020) 3.97 (Our Study)	4.69 (Our Study)
Elastic Modulus (MPa)	58 (Zdero <i>et al.</i> 2023) 59 (Our Study)	125 (Dini <i>et al.</i> 2022) 155.76 (Our Study)
Cost (Per Bone, \$)	56	15

3DP technology has become widespread with its affordable cost; however, it has not yet achieved the expected development in healthcare (Choonara *et al.* 2016). By eliminating a number of drawbacks between 3DP technologies, the CJP approach could be advantageous. On the other hand, artificial bones, which are widely utilized in the healthcare industry and have restricted accessibility owing to their high cost, do not provide custom-made possibilities because they follow a standardised production methodology. Thus, this technology has been initiated recently in preoperative planning because commercial composite bones are hard-to-adapt to the patient (Kadokia *et al.* 2020). In this mechanical comparison, 3D-printed and composite bones show extremely similar stress results and even a higher elastic modulus, suggesting that they might be a viable substitute for artificial bones. As a result, CJP technology does not require printing extra support. In addition, color printing may facilitate to differentiate anatomical structures easily, which may be very useful in simulation studies and medical education (Ruiz and Dhaher 2021). The CJP approach may be used in the healthcare industry to benefit greatly from the numerous advantages that this evolving and diverse technology offers. Notwithstanding the fact that 3D-printed bones indicated advantageous in this study with regard to cost, time, and durability, several limitations still need to be addressed.

Firstly, the printing area and the resolution are limited. Projet 160, used in this study, for example, has a printing volume of up to 185 x 236 x 132 mm with a printing resolution of 300 x 450 dpi. The entire femur bone of an average adult human cannot be printed using this printer. The partially printed bone parts may be a solution in this case. Thanks to rapidly developing technology, new CJP devices will have a larger build volume in the near future (Rafiee *et al.* 2020). The second drawback of this technology is the drying process following the printing. This takes about two hours or more depending on the size of the printed parts. However, since the production time is shorter than other printing methods, it compensates for this extra wait period. Finally, natural bone has anisotropic properties composed trabecular and cortical structures, though 3DP technologies can generate bone models with uniform material. This issue may be resolved by adjusting the infill ratio, one of the printing parameters, to ensure that the interior structure represents the trabecular structure. As a result of reducing this ratio, the strength of the structure can be reduced because it means less binding of powder particles that will keep up inside during printing. However, unlike other printing technologies like FDM,

there must be escape holes so that powder can discharge from the enclosed area.

## 5. Conclusions

Rapid prototyping and high-quality models that are similar to the morphological bone structure of a patient in applications such as biomechanics-based studies and pre-operative planning have now been facilitated thanks to the innovations brought by CJP technology. However, comparing 3DP bone samples to natural bone, the mechanical properties still need to achieve the necessary standard. Therefore, this study has demonstrated that generating 3DP bone specimens instead of expensive and non-customizable composite artificial bones, which are commonly utilized, is appropriate for mechanical properties. In addition, a significant difference in elastic modulus was observed between both bone types. Nevertheless, the interior and exterior structures of natural bone cannot yet be precisely replicated by this method and 3DP models are a bit fragile. Further research is required to boost the strength using a more durable binder and to mimic the properties of natural bone's cortical and cancellous components.

### Declaration of Ethical Standards

The authors declare that they comply with all ethical standards.

### Credit Authorship Contribution Statement

Author-1: Conceptualization, investigation, methodology and software, validation, visualization and writing – original draft.

Author-2: Conceptualization, supervision and writing – review and editing.

### Declaration of Competing Interest

The authors have no conflicts of interest to declare regarding the content of this article.

### Data Availability Statement

All data generated or analyzed during this study are included in this published article.

## Acknowledgement

This study was supported by Izmir Katip Celebi University Scientific Research Council Agency as project number 2023-TDR-FEBE-0005 for Samet Ciklacandir's doctoral thesis studies.

## 6. References

- Abdullah, A. M., Mohamad, D., Din, T. N. D. T, Yahya, S., Akil, H. M., Rajion, Z. A. 2019. Fabrication of nasal prosthesis utilising an affordable 3D printer. *Int J Adv Manuf Technol*, **100**: 1907-1912. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2831-y>.

- Al-Dulimi, Z., Wallis, M., Tan, D. K., Maniruzzaman, M., Nokhodchi, A. 2020. 3D printing technology as innovative solutions for biomedical applications. *Drug Discov Today*, **26**: 360-383.  
<https://doi.org/10.1016/j.drudis.2020.11.013>.
- Awari, G., Thorat, C., Ambade, V., Kothari, D. P. 2021. Additive manufacturing and 3D printing technology: principles and applications. 1st ed., CRC Press, USA.
- Bakhtiar, S. M., Butt, H. A., Zeb, S., Quddusi, D., M., Gul, S., Dilshad, E. 2018. 3D printing technologies and their applications in biomedical science. In: D. Barh, V. Azevedo [eds.], *Omics Technologies and Bio-Engineering*. Elsevier, pp. 167-189.
- Beaupied, H., Lespessailles, E., Benhamou, C. L. 2007. Evaluation of macrostructural bone biomechanics. *Joint Bone Spine*, **74**: 233-239.  
<https://doi.org/10.1016/j.jbspin.2007.01.019>.
- Blaszczuk, M., Jabbar, R., Szymd, B., Radek, M. 2021. 3D printing of rapid, low-cost and patient-specific models of brain vasculature for use in preoperative planning in clipping of intracranial aneurysms. *Journal of Clinical Medicine*, **10**: 1201.  
<https://doi.org/10.3390/jcm10061201>.
- Brunello, G., Sivoletta, S., Meneghello, R., Ferroni, L., Gardin, C., Piattelli, A. 2016. Powder-based 3D printing for bone tissue engineering. *Biotechnol Adv*, **34**: 740-753.  
<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.03.009>.
- Cheng, L., Shoma Suresh, K., He, H., Rajput, R. S., Feng, Q., Ramesh, S., Ramalingam, M. 2021. 3D printing of micro-and nanoscale bone substitutes: a review on technical and translational perspectives. *Int J Nanomedicine*, **16**: 4289.  
<https://doi.org/10.2147/IJN.S311001>.
- Choonara, Y. E., du Toit, L. C., Kumar, P., Kondiah, P. P., Pillay, V. 2016. 3D-printing and the effect on medical costs: a new era? *Expert Rev Pharmacoecon Outcomes Res*, **16**: 23-32.  
<https://doi.org/10.1586/14737167.2016.1138860>.
- Cimerman, M., Kristan, A. 2007. Preoperative planning in pelvic and acetabular surgery: the value of advanced computerised planning modules. *Injury*, **38**: 442-449.  
<https://doi.org/10.1016/j.injury.2007.01.033>.
- Dini, F., Ghaffari, S. A., Javadpour, J., & Rezaie, H. R. 2022. Binder jetting of hydroxyapatite/carboxymethyl chitosan/polyvinylpyrrolidone/dextrin composite: the role of polymeric adhesive and particle size distribution on printability of powders. *J Mater Eng Perform*, **31(7)**, 5801-5811.  
<https://doi.org/10.1007/s11665-022-06671-1>.
- Du, W., Ren, X., Pei, Z., Ma, C. 2020. Ceramic binder jetting additive manufacturing: a literature review on density. *J Manuf Sci Eng*, **142**: 040801.  
<https://doi.org/10.1115/1.4046248>.
- Dudek, P. 2013. Fdm 3D printing technology in manufacturing composite elements. *Archives of metallurgy and materials*, **58**: 1415-1418.  
<https://doi.org/10.2478/amm-2013-0186>.
- Elfar, J., Stanbury, S., Menorca, R. M. G., Reed, J. D. 2014. Composite bone models in orthopaedic surgery research and education. *J Am Acad Orthop Surg*, **22**: 111.  
<https://doi.org/10.5435/JAAOS-22-02-111>.
- Fatma, N., Haleem, A., Javaid, M., & Khan, S. 2021. Comparison of fused deposition modeling and color jet 3D printing technologies for the printing of mathematical geometries. *Journal of Industrial Integration and Management*, **6**: 93-105.  
<https://doi.org/10.1142/S2424862220500104>.
- Fina, F., Goyanes, A., Gaisford, S., Basit, A. W. 2017. Selective laser sintering (SLS) 3D printing of medicines. *Int J Pharm*, **529**: 285-293.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2017.06.082>.
- Gardner, M. P., Chong, A. C., Pollock, A. G., Wooley, P. H. 2010. Mechanical evaluation of large-size fourth-generation composite femur and tibia models. *Annals of biomedical engineering*, **38**: 613-620.  
<https://doi.org/10.1007/s10439-009-9887-7>.
- George, E., Liacouras, P., Rybicki, F. J., & Mitsouras, D. 2017. Measuring and establishing the accuracy and reproducibility of 3D printed medical models. *Radiographics*, **37(5)**: 1424-1450.  
<https://doi.org/10.1148/rg.2017160165>.
- Hausmann, J. T. 2006. Sawbones in biomechanical settings-a review. *Osteosynthesis and Trauma Care*, **14**: 259-264.  
<https://doi.org/10.1055/s-2006-942333>.
- Hochman, J. B., Kraut, J., Kazmerik, K., Unger, B. J. 2014. Generation of a 3D printed temporal bone model with internal fidelity and validation of the mechanical construct. *Otolaryngol Head Neck Surg* (1979), **150**: 448-454.  
<https://doi.org/10.1177/0194599813518008>.
- Kadokia, R. J., Wixted, C. M., Allen, N. B., Hanselman, A. E., Adams, S. B. 2020. Clinical applications of custom 3D printed implants in complex lower extremity reconstruction. *3D Print Med*, **6**: 1-6.  
<https://doi.org/10.1186/s41205-020-00083-4>.

- Kim, G. B., Lee, S., Kim, H., Yang, D. H., Kim, Y. H., Kyung, Y. S., Kim, N. 2016. Three-dimensional printing: basic principles and applications in medicine and radiology. *Korean J Radiol*, **17**: 182-197.  
<https://doi.org/10.3348/kjr.2016.17.2.182>.
- Kudelski, R., Cieslik, J., Kulpa, M., Dudek, P., Zagorski, K., Rumin, R. 2017. Comparison of cost, material and time usage in FDM and SLS 3D printing methods. 13th International conference on perspective technologies and methods in MEMS design (MEMSTECH), p. 12-14, Lviv, Ukraine.
- Lee, J. Y., An, J., Chua, C. K. 2017. Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. *Appl Mater Today*, **7**: 120-133.  
<https://doi.org/10.1016/j.apmt.2017.02.004>.
- Lim, K. H. A., Loo, Z. Y., Goldie, S. J., Adams, J. W., McMenamin, P. G. 2016. Use of 3D printed models in medical education: A randomized control trial comparing 3D prints versus cadaveric materials for learning external cardiac anatomy. *Anat Sci Educ*, **9**: 213-221.  
<https://doi.org/10.1002/ase.1573>.
- Lv, X., Ye, F., Cheng, L., Fan, S., Liu, Y. 2019. Binder jetting of ceramics: Powders, binders, printing parameters, equipment, and post-treatment. *Ceramics International*, **45**: 12609-12624.  
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.04.012>.
- Miedzinska, D., Gieleta, R., Malek, E. 2020. Experimental study of strength properties of SLA resins under low and high strain rates. *Mechanics of Materials*, **141**, 103245.  
<https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2019.103245>.
- Mihcin, S., Ciklacandir, S. 2022. Towards integration of the finite element modeling technique into biomedical engineering education. *Biomed Eng (Singapore)*, **34**: 2150054.  
<https://doi.org/10.4015/S101623722150054X>.
- Nagl, K. 2021. A comparison of the biomechanical behaviour of simple artificial, composite, and 3D FDM printed human femoral bones. PhD Thesis, TU Wien, Vienna, Austria.
- Nagl, K., Reisinger, A., & Pahr, D. H. 2022. The biomechanical behavior of 3D printed human femoral bones based on generic and patient-specific geometries. *3D Print Med*, **8(1)**: 35.  
<https://doi.org/10.1186/s41205-022-00162-8>.
- Navarro, M., Michiardi, A., Castano, O., Planell, J. A. 2008. Biomaterials in orthopaedics. *J R Soc Interface*, **5**: 1137-1158.  
<https://doi.org/10.1098/rsif.2008.0151>.
- O'Toole III, R. V., Jaramaz, B., DiGioia III, A. M., Visnic, C. D., Reid, R. H. 1995. Biomechanics for preoperative planning and surgical simulations in orthopaedics. *Comput Biol Med*, **25**: 183-191.  
[https://doi.org/10.1016/0010-4825\(94\)00043-P](https://doi.org/10.1016/0010-4825(94)00043-P).
- Rafiee, M., Farahani, R. D., Therriault, D. 2020. Multi-material 3D and 4D printing: a survey. *Advanced Science*, **7**: 1902307.  
<https://doi.org/10.1002/advs.201902307>.
- Ruiz, O. G., Dhaher, Y. 2021. Multi-color and multi-material 3D printing of knee joint models. *3D Printing in Medicine*, **7**: 1-16.  
<https://doi.org/10.1186/s41205-021-00100-0>.
- Shahrubudin, N., Lee, T. C., Ramlan, R. 2019. An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. *Procedia Manuf*, **35**: 1286-1296.  
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>.
- Tai, B. L., Kao, Y. T., Payne, N., Zheng, Y., Chen, L., Shih, A. J. 2018. 3D printed composite for simulating thermal and mechanical responses of the cortical bone in orthopaedic surgery. *Med Eng Phys*, **61**: 61-68.  
<https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2018.08.004>.
- Victor, S. P., Muthu, J. 2014. Polymer ceramic composite materials for orthopedic applications—relevance and need for mechanical match and bone regeneration. *Journal of Mechatronics*, **2**: 1-10.  
<https://doi.org/10.1166/jom.2014.1030>.
- Wu, D., Spanou, A., Diez-Escudero, A., & Persson, C. 2020. 3D-printed PLA/HA composite structures as synthetic trabecular bone: A feasibility study using fused deposition modeling. *J Mech Behav Biomed Mater*, **103**: 103608.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.103608>.
- Wu, G., Zhou, B., Bi, Y., Zhao, Y. 2008. Selective laser sintering technology for customized fabrication of facial prostheses. *The Journal of prosthetic dentistry*, **100**: 56-60.  
[https://doi.org/10.1016/S0022-3913\(08\)60138-9](https://doi.org/10.1016/S0022-3913(08)60138-9).
- Xu, N., Ye, X., Wei, D., Zhong, J., Chen, Y., Xu, G., He, D. 2014. 3D artificial bones for bone repair prepared by computed tomography-guided fused deposition modeling for bone repair. *ACS Appl Mater Interfaces*, **6**: 14952-14963.  
<https://doi.org/10.1021/am502716t>.
- Zdero, R., Brzozowski, P., & Schemitsch, E. H. 2023. Biomechanical properties of artificial bones made by Sawbones: A review. *Med Eng Phys*, **104**: 104017.  
<https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2023.104017>.



Zhang, J., Allardyce, B. J., Rajkhowa, R., Wang, X., Liu, X. 2021. 3D printing of silk powder by binder jetting technique. *Addit Manuf*, **38**, 101820. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101820>.

Ziaee, M., Crane, N. B. 2019. Binder jetting: A review of process, materials, and methods. *Addit Manuf*, **28**: 781–801. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.031>.