



e-ISSN: 2149-3367

e-ISSN: 2149-3367 CİLT / VOLUME: XXIV SAYI / NUMBER: 1 ŞUBAT / FEBRUARY 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 1

e – ISSN: 2149-3367

ŞUBAT 2024

FEBRUARY 2024





## **Derginin Amacı ve İÇeriği**

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.

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.

Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi; Afyon Kocatepe Üniversitesi tarafından 1999'dan bu yana yılda 2 sayı (Haziran ve Aralık) Türkçe veya İngilizce olarak hazırlanan çalışmaları yayınlanan, bilimsel ve hakemli bir dergidir.

Dergimizde makale değerlendirme sürecinin daha şeffaflaştırılması ve hızlandırılması için Şubat 2013 itibarıyla online makale değerlendirme ve takip sistemi uygulamaya alınmıştır.

Ocak 2015 itibaren dergimiz; yayınlanma süreci ile yazarlara ve gerekse yapılan çalışmalara pratik ulaşma imkânları nedeniyle okuyuculara birçok avantajlar sağlayan; elektronik dergi (e-ISSN: 2149-3367) olarak yılda 3 sayı (Nisan, Ağustos ve Aralık) Türkçe ve İngilizce makaleleri kabul edecek ve çift taraflı kör hakemlik esasına göre en az iki hakemli olarak değerlendirilmektedir. Makale göndermek isteyen yazarlarımız, dergi sayfamızdan (<https://fenbildergi.aku.edu.tr/> ya da <https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid>) kayıt yaptırarak, özgün bilimsel makalelerini çevrimiçi olarak gönderebilir ve süreci takip edebilirler. Özellikle lisansüstü tezlerden hazırlanan yayınlar veya bu tezlerin bir alt çalışması olarak yapılan özgün bilimsel çalışmalar teşvik edilmektedir.

Ocak 2020 yılından itibaren dergimiz; yılda 6 sayı (Şubat, Nisan, Haziran, Ağustos, Ekim ve Aralık) olmak üzere özgün araştırma makalelerini kabul etmektedir.

Dergimizde yayımlanan makaleler izin alınmaksızın başka bir yerde yayımlanamaz veya bildiri olarak sunulamaz. Makalelerin bir kısmı veya tamamı dergimiz kaynak gösterilmeden kullanılamaz.

Dergimize hem hakem hem de yazar olarak katkılarınızı beklemekteyiz. Dergimize olan desteğiniz için şimdiden teşekkür eder, çalışmalarınızda başarılar dilerim.

**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*

**EDİTÖR / EDITOR-IN-CHIEF**

---

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

**YARDIMCI EDİTÖRLER/ ASSOCIATE EDITORS**

---

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

Ayça H. ATLI, Statistics, Afyon Kocatepe University, (Türkiye)  
*aturkan@aku.edu.tr*

Bekir ORUNCAK Physics, Afyon Kocatepe University, (Türkiye)  
*boruncak@aku.edu.tr*

Emre AKARSLAN Renewable Energy Systems, Afyon Kocatepe University, (Türkiye)  
*akarслан@aku.edu.tr*

Erhan ÜNAL, Internet and Info. Technol. Management, Afyon Kocatepe University, (Türkiye)  
*eunal@aku.edu.tr*

Fatih ÖZDİNÇ Management Information Systems, Afyon Kocatepe University, (Türkiye)  
*fozdinc@aku.edu.tr*

Fatma KAYNARCA Mathematics, Afyon Kocatepe University, (Türkiye)  
*fkaynarca@aku.edu.tr*

Hakan TERZİ Molecular Biology and Genetics, Afyon Kocatepe University, (Türkiye)  
*hterzi@aku.edu.tr*

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

Mehmet KILINÇ Food Engineering, Afyon Kocatepe University, (Türkiye)  
*mkilinc@aku.edu.tr*

Melih ÖZÇATAL Mechatronic Engineering, Afyon Kocatepe University, (Türkiye)  
*mozcatal@aku.edu.tr*

Oğuzhan ALAGÖZ Chemical Engineering, Afyon Kocatepe University, (Türkiye)  
*oalagoz@aku.edu.tr*

Oğuzhan DEMİREL Mathematics, Afyon Kocatepe University, (Türkiye)  
*odemirel@aku.edu.tr*

Ömer F. GÜLER Mechanical Engineering, Afyon Kocatepe University, (Türkiye)  
*ofguler@aku.edu.tr*

Ömer G. NARİN Geomatics Engineering, Afyon Kocatepe University, (Türkiye)  
*gokberknarin@aku.edu.tr*

Ramazan EROL Mathematics and Science Education, Afyon Kocatepe University, (Türkiye)  
*rerol@aku.edu.tr*

Recep KURTULUŞ Materials Science and Engineering, Afyon Kocatepe University, (Türkiye)  
*rkurtulus@aku.edu.tr*

Sami S. İŞOĞLU Geology Engineering, Afyon Kocatepe University, (Türkiye)  
*samiserkanisoğlu@aku.edu.tr*

Şükrü A. BAYDIR Automotive Engineering, Afyon Kocatepe University, (Türkiye)  
*abaydir@aku.edu.tr*

Uğur FİDAN Biomedical Engineering, Afyon Kocatepe University, (Türkiye)  
*ufidan@aku.edu.tr*

Veli BAŞARAN Civil Engineering, Afyon Kocatepe University, (Türkiye)  
*vbasaran@aku.edu.tr*

Z. Ebru SAYIN Mining Engineering, Afyon Kocatepe University, (Türkiye)  
*zerkan@aku.edu.tr*

---

---

## ALAN EDİTÖRLERİ / EDITORIAL BOARD

---

Afife Binnaz HAZAR, Metallurgy and Materials Engineering, Yıldız Teknik University, (Turkey)  
*e-mail: afife.hazar@gmail.com*

Ahmet ÇETKİN, Mechanical Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: acetkin@aku.edu.tr*

Ahmet SERTESER, Molecular Biology and Genetics, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: aserteser@aku.edu.tr*

Ahmet YILDIZ, Geological Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: ayildiz@aku.edu.tr*

Atilla EVCİN, Material Science and Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: evcin@aku.edu.tr*

Ahmet YÖNETKEN, Mechatronic Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: yonetken@aku.edu.tr*

Bojan Zlender, Civil Engineering, University of Maribor, (Slovenia)  
*e-mail: bojan.zlender@um.si*

Cevat İNAL, Survey Engineering, Konya Teknik University, (Turkey)  
*e-mail: cinal@ktun.edu.tr*

Engin TAŞ, Statistics, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: engintas@aku.edu.tr*

Ersin KIVRAK, Department of Science Education, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: ekivrak@aku.edu.tr*

Ertuğrul ERGÜN, Internet and Information Technologies Management, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: ertugrulergun@gmail.com, ertue@aku.edu.tr*

Fatih Onur HOCAOĞLU, Electrical Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: fohocaoglu@gmail.com*

Hüseyin Ali YALIM, Physics, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: hayalim@aku.edu.tr*

İbrahim MUTLU, Automotive Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: ibrahimmutlu@aku.edu.tr*

İbrahim Hakkı CİĞERCİ, Molecular Biology and Genetics, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: cigerci@aku.edu.tr*

İsmail DEMİR, Civil Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: idemir@aku.edu.tr*

İsmail Sedat BÜYÜKSAGIŞ, Mining Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: sbsagis@aku.edu.tr*

İsmail ZORLUER, Civil Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: izorluer@aku.edu.tr*

Levent ÖZCAN, Biomedical Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: leventozcan@aku.edu.tr*

Mehmet ÇAKMAKKAYA, Automotive Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: cakmakkaya@aku.edu.tr*

Mehmet KAHRAMAN, Computer, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: kahraman@aku.edu.tr*

Mehmet ÖZKAN, Physics, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: mozkan@aku.edu.tr*

Meltem DİLEK, Chemical Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: mdilek@aku.edu.tr*

Abdurrahman KARABULUT, Mechanical Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: akarabulut@aku.edu.tr*

Mustafa Kemal YILDIZ, Mathematics, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: myildiz@aku.edu.tr*

Mustafa Serhat BAŞPINAR, Metallurgy and Materials Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: sbaspinar@aku.edu.tr*

Mustafa YILMAZ, Survey Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: mustafayilmaz@aku.edu.tr*

Mustaque Hossain, Civil Engineering, Kansas State University, (USA)  
*e-mail: mustak@k-state.edu*

Ömer HAZMAN, Chemistry, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: ohazman@aku.edu.tr*

Harun DIRAMAN, Food Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: hdiraman@aku.edu.tr*

Regita Bendikiene, Department of Production Technologies, Kaunas University of Technology, (Lithuania)  
*e-mail: regita.bendikiene@ktu.lt*

Yüksel OĞUZ, Electrical Electronics Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: yukseloguz@aku.edu.tr*

## **DİL EDİTÖRLERİ / LANGUAGE EDITORS**

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

## **MİZANPAJ EDİTÖRÜ / LAYOUT EDITOR**

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

### **ADRES/ADDRESS:**

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,  
Ahmet Necdet Sezer Kampusu, 03200, AFYONKARAHİSAR  
Telefon: 444 03 03 / 1472-1473  
Belgegeçer: 0 272 218 14 62  
e-posta: fmbd@aku.edu.tr

## İÇİNDEKİLER / CONTENTS

### FEN BİLİMLERİ / SCIENCE

#### *BIYOLOJİ / BIOLOGY (10)*

<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Determination of Antimicrobial Effects of Secondary Metabolites of Different Bacteria Belonging to the Genus Bacillus BIYOLOJİ Bacillus Cinsine Ait Farklı Bakterilerin Sekonder Metabolitlerinin Antimikrobiyal Etkilerinin Belirlenmesi Aydın YEŞİLYURT, Seda BİRYOL, Ali SOYDİNÇ, Sevda İŞİK, Mehtap USTA	<b>011001 (01-07)</b>
<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Van Balığı (Alburnus tarichi) Solungaç, Böbrek ve sindirim kanalı Dokularında Üreme Göçü Esnasında Akuaporin 3 Proteinindeki Değişimin İncelenmesi BIYOLOJİ Investigation of Changes in Aquaporin 3 Protein in Van Fish (Alburnus tarichi) Gill, Kidney and Digestive Tract Tissues During Reproductive Migration Zehra ALKAN, Ahmet Regaib OĞUZ	<b>011002 (08-13)</b>

#### *KİMYA (12)*

<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Yanıt Yüzey Metodolojisi Kullanılarak Brassica oleracea var. capitata L. (Lahana) Bitki Ekstresinin Mikroenkapsülasyon ve Karakterizasyon Çalışmaları KİMYA Microencapsulation and Characterization Studies of Brassica oleracea var. capitata L. (Cabbage) Plant Extract Using Response Surface Methodology Elif KÖKSAL, Fethiye GÖDE	<b>011201 (14-22)</b>
---	-----------------------

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

<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> On Bishop Frames of Any Regular Curve in Euclidean 3-Space MATEMATİK 3-Boyutlu Öklid Uzayında Regüler Bir Eğrinin Bishop Çatıları Üzerine Sümeyye GÜR MAZLUM	<b>011301 (23-33)</b>
---	-----------------------

## MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ / ENGINEERING

### ELEKTRİK – ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ (52)

<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> İnsansız Hava Araçlarına Karşı Yeni Bir Silah Sistemi Geliştirilmesi ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ Development Of a New Weapon System Against Unmanned Aerial Vehicle Sinan KIVRAK, Gülüstan Tuğçe ALVALI, Burak YENİPİNAR, Emre TURAN	<b>015201 (34-39)</b>
<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Yüksek Güçlü Lazer Silah Sistemlerinin Türk Deniz Kuvvetleri Komutanlığı Envanterindeki Savaş Gemilerine Entegrasyonu ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ The Integration of High Power Laser Weapon Systems into The Turkish Naval Forces Warships Fehmi SANDIKÇI, Nigar Berna TEŞNELİ, Ahmet Yahya TEŞNELİ	<b>015202 (40-52)</b>
<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> İnsansız Kara Araçları İçin Çapraz Platform Destekli Telemetri Sistemi Tasarımı ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ The Integration of High Power Laser Weapon Systems into The Turkish Naval Forces Warships Cross-Platform Telemetry System Design For Unmanned Ground Vehicles Uğur KIRÇIL, Cengiz TEPE	<b>015203 (53-60)</b>

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

<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> UV ve Vakum Uygulamalarının Beyaz Peynirin Kalite Özellikleri ile Raf Ömrü Üzerine Etkileri GIDA MÜHENDİSLİĞİ Effects of UV and Vacuum Applications on Quality Properties and Shelf Life of White Cheese Ramazan ŞEVİK, Gökhan AKARCA, Mehmet KILINÇ, Senem GUNER, Teslime EKİZ ÜNSAL, Çiğdem AŞÇIOĞLU, Harun DIRAMAN	<b>015401 (61-70)</b>
---	-----------------------

*HARİTA MÜHENDİSLİĞİ (55)*

<p><b>Araştırma Makalesi / Research Article</b></p> <p>Mersin'in Farklı Kuraklık İndeksleri Aracılığıyla Kuraklık Tehdidinin Araştırılması HARİTA MÜHENDİSLİĞİ</p> <p>Investigation of Mersin's Drought-Threat through Different Drought Indexes</p> <p>Mehmet Özgür ÇELİK, Murat YAKAR</p>	<p><b>015501 (71-84)</b></p>
<p><b>Araştırma Makalesi / Research Article</b></p> <p>GEDI Uydu Tabanlı Lazer Altimetre Verisinin Arazi Yükseklik Tahmininin Araştırılması HARİTA MÜHENDİSLİĞİ</p> <p>Utilization of Response Surface Methodology for Predicting the Compressive Strength of PVA Fiber-Reinforced Cementitious Composites Containing Fly Ash and Andesite Powder as Waste Materials Investigation of Terrain Elevation Estimation of GEDI Spaceborne Laser Altimeter</p> <p>Ömer Gökberk NARİN, Mustafa YILMAZ</p>	<p><b>015502(85-89)</b></p>

*İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ (56)*

<p><b>Araştırma Makalesi / Research Article</b></p> <p>İslahiye-Hassa Trası Katkılı Çimento Harçlarının Dayanım ve Dayanıklılık Özelliklerinin Araştırılması İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ</p> <p>Investigation of the Strength and Durability Properties of Cement Mortars with İslahiye-Hassa Trace Additive</p> <p>Hadaan PEHLİVAN, Mahmut AYTEKİN</p>	<p><b>015601 (90-102)</b></p>
<p><b>Araştırma Makalesi / Research Article</b></p> <p>Atık Andezit Tozu İkameli Çimento Esaslı Kompozitlerin Basınç Dayanımının Tahmininde Yanıt Yüzey Metodolojisinin Kullanılması İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ</p> <p>Utilization of Response Surface Methodology for Predicting the Compressive Strength of PVA Fiber-Reinforced Cementitious Composites Containing Fly Ash and Andesite Powder as Waste Materials</p> <p>Şükrü ÖZKAN, Hakan CEYLAN</p>	<p><b>015602(103-116)</b></p>
<p><b>Araştırma Makalesi / Research Article</b></p> <p>Application of Monte Carlo Simulation Technique for Slopes Stabilized with Piles İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ</p> <p>Kazıklarla Güçlendirilmiş Şevlerde Monte Carlo Simülasyon Yöntemi Uygulaması</p> <p>Yeşim TUSKAN*, , Yusuf ERZİN</p>	<p><b>015603(117-125)</b></p>



<p><b>Araştırma Makalesi / Research Article</b></p> <p>7131 Çeliğinin Hassas Dökümünden Elde Edilen Döküm Atık Kumu Katılarak Şamot Refrakter Üretimi METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ</p> <p>The Production of Chamotte Refractories by Incorporation of Foundry Waste Sand Obtained From Investment Casting of 7131 Steel</p> <p>Tuba BAHTLI , Veysel Murat BOSTANCI</p>	<p><b>015701 (126-135)</b></p>
---	--------------------------------

<p><b>Araştırma Makalesi / Research Article</b></p> <p>Analyzing Bornova Plain's Basin Structure Using Density Parameter JEOLJİ MÜHENDİSLİĞİ</p> <p>Bornova Ovası'nın Havza Yapısının Yoğunluk Parametresi Kullanılarak Analizi</p> <p>Yaprak ÖZDAĞ, Oya ANKAYA PAMUKÇU</p>	<p><b>015801 (136-143)</b></p>
<p><b>Araştırma Makalesi / Research Article</b></p> <p>Şuhut (Afyonkarahisar) Batısındaki Alterasyon Zonlarının Mineralojik ve Jeokimyasal Özellikleri JEOLJİ MÜHENDİSLİĞİ</p> <p>Mineralogical and Geochemical Properties of Alteration Zones in the Western Şuhut (Afyonkarahisar)</p> <p>Ahmet YILDIZ, Raziye ÖZ</p>	<p><b>015802 (144-154)</b></p>
<p><b>Araştırma Makalesi / Research Article</b></p> <p>Bolvadin Asismik Yüzey Deformasyonlarının Yerleşim Alanlarına Etkilerinin İncelenmesi JEOLJİ MÜHENDİSLİĞİ</p> <p>Investigation of the Effects of Bolvadin Aseismic Surface Deformations on Residential Areas</p> <p>Çağlar ÖZKAYMAK, İbrahim TİRYAKİOĞLU, Veli BAŞARAN, Mehmet BULDAN</p>	<p><b>015803 (155-165)</b></p>

<p><b>Araştırma Makalesi / Research Article</b></p> <p>A Study on the Production of Riblet Patterns Providing Micro-scale Flow Control through FDM-type 3D Printers MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ</p> <p>FDM-tipi 3 Boyutlu Yazıcılar ile Mikro Ölçekte Akış Kontrolü Sağlayabilen Riblet Desenlerinin Üretimine Yönelik bir Çalışma</p> <p>Volkan KORKUT, Hürrem AKBIYIK</p>	<p><b>015901 (166-175)</b></p>
<p><b>Araştırma Makalesi / Research Article</b></p> <p>Farklı Kimyasal Yöntemlerle Kaplanmış Çelik Plakaların Farklı Yapıştırma Kalınlıklarında Tek Bindirmeli Birleştirme Yöntemiyle Birleştirilen Numunelerin Yorulma Analizleri Sonuçlarının Wöhler Eğrilerinde Karşılaştırılması MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ</p> <p>Comparison of Fatigue Analysis Results of Steel Plates Coated with Different Chemical Methods and Samples Joined by Single Lap Joining Method at Different Bonding Thicknesses in Wohler Curves</p> <p>Celalettin BAYKARA</p>	<p><b>015902 (176-188)</b></p>
<p><b>Araştırma Makalesi / Research Article</b></p> <p>Control of the Quarter Vehicle Model with an Innovative Delayed Resonator Optimized by Genetic Algorithm MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ</p> <p>Genetik Algoritma ile Optimize Edilmiş Yenilikçi bir Gecikmeli Rezonatör ile Çeyrek Taşıt Modelinin Kontrolü</p> <p>İbrahim ŞENASLAN, Boğaç BİLGİÇ</p>	<p><b>015903 (189-196)</b></p>
<p><b>Araştırma Makalesi / Research Article</b></p> <p>Tersine Mühendislik ve Eklemeli İmalat ile Kişiyeye Özel Nazal Dilatör Tasarımı ve Üretimi MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ</p> <p>Design and Fabrication of Custom Nasal Dilator with Reverse Engineering and Additive Manufacturing</p> <p>Hasan Kemal SÜRMEK, Tolga GÜVEN</p>	<p><b>015904(197-206)</b></p>
<p><b>Araştırma Makalesi / Research Article</b></p> <p>Robot Nokta Kaynaklarında Smartblock™ ile Elektrot Bileme Sıklığı, Kaynak Akımı ve Süresinin Taguchi Metodolojisi Kullanılarak Araştırılması MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ</p> <p>Investigation on Dressing Frequency, Welding Current and Time Using Taguchi Methodology in Robotic Spot Welding with Smartblock™</p> <p>Hilal KIR, Şükrü KARABULUT, Mustafa YAZAR, Şükrü TALAŞ3</p>	<p><b>015905 (207-216)</b></p>

<p><b>Araştırma Makalesi / Research Article</b></p> <p>Katı Hal Fermantasyonu Kullanılarak Streptomyces sp. M127-1'den Elde Edilen Termotolerant Selülazın Yanıt Yüzeyi Metodolojisi ile Optimizasyonu Biyomühendislik</p> <p>Optimization of Streptomyces sp. M127-1 Thermotolerant Cellulase with Response Surface Methodology using Solid-State Fermentation</p> <p>Muzaffer BİNEK, Elif Esin HAMEŞ</p>	<p><b>017201 (217-227)</b></p>
<p><b>Araştırma Makalesi / Research Article</b></p> <p>Investigating the relationship between vehicle speed and pothole detection by using mobile phone ULAŞTIRMA MÜHENDİSLİĞİ</p> <p>Cep Telefonu Kullanılarak Araç Hızı ile Çukur Tespiti Arasındaki İlişkinin Araştırılması</p> <p>Ömer KAYA, Muhammed Yasin ÇODUR</p>	<p><b>017202 (228-241)</b></p>
<p><b>Araştırma Makalesi / Research Article</b></p> <p>An Investigation for Soliton Solutions of the Extended (2+1)-Dimensional Kadomtsev–Petviashvili Equation MATEMATİK MÜHENDİSLİĞİ</p> <p>Genişletilmiş (2+1)-boyutlu Kadomtsev–Petviashvili Denkleminin Soliton Çözümlerinin Araştırılması</p> <p>Melih ÇINAR</p>	<p><b>017203 (242-247)</b></p>



## Determination of Antimicrobial Effects of Secondary Metabolites of Different Bacteria Belonging to the Genus *Bacillus*

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 24.08.2023

Kabul/Accepted: 11.01.2024

Yayımlandı/Published: 27.02.2024

### *Bacillus* Cinsine Ait Farklı Bakterilerin Sekonder Metabolitlerinin Antimikrobiyal Etkilerinin Belirlenmesi

Aydın YEŞİLYURT<sup>1</sup>, Seda BİRYOL<sup>1</sup>, Ali SOYDİNÇ<sup>2</sup>, Sevda İŞİK<sup>2</sup>, Mehtap USTA<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Trabzon University, Tonya Vocational School, Department of Medical Services and Techniques, Trabzon, Türkiye

<sup>2</sup>Regional Directorate of Trabzon Forestry, Trabzon, Türkiye

<sup>3</sup>Trabzon University, Tonya Vocational School, Department of Health Care Services, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Abstract

Secondary metabolites of bacteria can be used to control microorganisms. In this study, the antimicrobial activity properties of *Bacillus* isolates from *Apis mellifera* and *Varroa destructor* have been determined. The antimicrobial activities of *Bacillus* species against some bacteria and pathogenic yeast (*Candida albicans*) were investigated according to the disc diffusion method. As a result of the research, secondary metabolites of *Bacillus* isolates used in the study inhibited the development of the tested microorganisms at different rates (1.1-8.4 mm inhibition zone). Two isolates GAP2 (*Bacillus subtilis*) and GAP9 (*Bacillus thuringiensis*) showed high antibacterial activity. Most of the metabolites isolated from bacterial isolates were shown to be sensitive to *Escherichia coli* ATCC2471 and *Serratia marcescens* ATCC13880 ( $p < 0.05$ ). It was determined that the products obtained from GV6, GV7, GAP7, GAP8, GAP11, GAP13, and GAP15 isolates did not affect any of the bacteria used in the experiments ( $p < 0.05$ ). It is thought that *Bacillus* strains producing secondary metabolites, especially GAP2 and GAP9 isolates, may have the potential to be used in various applications for saprophytic and pathogenic microbes in medicine, veterinary medicine, agriculture, and the food industry.

**Anahtar Kelimeler:** Antimicrobial; Antifungal; *Bacillus*; Bacteria; Disc diffusion assay; Microbiology.

#### Öz

Bakteriyal sekonder metabolitler, mikroorganizmaları kontrol etmek için kullanılabilir. Bu çalışmada *Apis mellifera* ve *Varroa destructor*'dan elde edilmiş olan farklı *Bacillus* izolatlarının antimikrobiyal aktivite özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. *Bacillus* türlerinin bazı bakteri ve patojen mayalara (*Candida albicans*) karşı antimikrobiyal aktiviteleri disk difüzyon yöntemine göre araştırıldı. Araştırma sonucunda çalışmada kullanılan *Bacillus* izolatlarının sekonder metabolitleri, test edilen mikroorganizmaların gelişimini farklı oranlarda (1,1-8,4 mm inhibisyon bölgesi) inhibe etmiştir. GAP2 (*Bacillus subtilis*) ve GAP9 (*Bacillus thuringiensis*) yüksek antibakteriyel aktivite göstermiştir. Bakteriyele izolatlardan izole edilen metabolitlerin çoğunun *Escherichia coli* ATCC2471 ve *Serratia marcescens* ATCC13880'e duyarlı olduğu görüldü ( $p < 0,05$ ). GV6, GV7, GAP7, GAP8, GAP11, GAP13 ve GAP15 izolatlarından elde edilen ürünlerin deneylerde kullanılan bakterilerin hiçbirine etkisinin olmadığı belirlendi ( $p < 0,05$ ). GAP2 ve GAP9 izolatları başta olmak üzere sekonder metabolit üreten *Bacillus* suşlarının tıp, veterinerlik, tarım ve gıda endüstrisinde saprofitik ve patojenik mikroorganizmalara yönelik çeşitli uygulamalarda kullanıma potansiyeline sahip olabileceği düşünülmektedir.

**Keywords:** Antimikrobiyal; Antifungal; *Bacillus*; Bakteri; Disk difüzyon testi; Mikrobiyoloji

#### 1. Introduction

Microbial secondary metabolites are small molecules with unique structures produced by bacteria at late growth stages, which are generally not essential for the growth of microbial cultures but are essential for human health, nutrition, and economy (Ruiz *et al.* 2010). The use of antibiotics and the potential for the discovery of new antibiotics has become even more important with the discovery of secondary metabolites (Spellberg 2014). However, the widespread and incorrect use of

antibiotics brings the issue of antibiotic resistance to the forefront. Aside from preventing the development of resistance with increased usage of antibiotics, microorganisms have responded to this situation by developing many types of resistance, and as the use of antimicrobial drugs increases, so does the level and complexity of bacterial pathogen resistance mechanisms (Tenover 2006). Therefore, the discovery and development of novel antibiotics is critical. Despite their natural difficulty, new antimicrobial substances may be

identified by screening and isolating bacteria that generate them (Barsby *et al.* 2002, Ren *et al.* 2007). Like each organism, insects have their microbial flora. This flora is contaminated by other microorganisms from the environment or other organisms called 'entomopathogens', which are bacteria, fungi, nematodes, and protozoa. These pathogens cause the death of insects by synthesizing compounds that will cause various diseases. There are many studies on insect pathogens (Miller *et al.* 2021, Steele *et al.* 2021, Usta 2021b). However, more information is needed on whether the secondary metabolites produced by these pathogens have lethal or growth-inhibitory effects. Today, there is a need for more studies on the use of biological control agents to protect biological diversity and combat diseases naturally. Some compounds are naturally synthesized by bacteria and show antimicrobial activity on other bacteria. These compounds are generally short-chain proteins with low molecular weight (Akkoç *et al.* 2009). Unlike antimicrobial peptides, there are also secondary compounds with different structures synthesized by bacteria (Keswani *et al.* 2020, Sansinenea and Ortiz 2011).

As the use of antimicrobials increased, the resistance mechanisms introduced by pathogens increased and became more complex. The emergence of strains resistant to antimicrobials and the unconscious use of antibiotics has led to the search for natural substances (Bérdy 2005, Cowan 1999, Demain and Fang 2000, Keswani *et al.* 2020, Nabavi *et al.* 2014, Sansinenea and Ortiz 2011). *Bacillus*, *Lysinibacillus*, and *Brevibacillus* species are among the most studied organisms in terms of their ability to produce antimicrobial substances (Demirkan *et al.* 2021, Perez *et al.* 1993, Prashanthi *et al.* 2021).

*Bacillus* genus microorganisms of the Bacillaceae family are rod-shaped bacteria that create endospores, are normally gram-positive, have peritrichous flagella and motile flagella, and are aerobic or facultative anaerobes (Turnbull 1996). In addition to the convenience of isolation and production of *Bacillus*, and the use of many enzymes produced by *Bacillus* in various industrial areas, the secondary metabolites they produce are the most striking (Rosovitz *et al.* 1998, Johnvesly *et al.* 2002).

The primary goal of this study is to identify the antibacterial properties of secondary metabolites from various *Bacillus* species. The aim is to investigate and evaluate the potential antibacterial properties of secondary metabolites derived from these bacteria against a variety of harmful pathogens. The findings

suggest that antimicrobial chemicals derived from *Bacillus* might be used as alternative treatment and preventative measures in future medicinal or agricultural applications and for the discovery of antibiotics. Furthermore, this research can help to further the discovery of antimicrobial chemicals derived from natural sources and increase biological control.

## 2. Materials and Methods

### 2.1. Bacterial strains

The bacterial strains in this study have been previously isolated and determined (Usta 2021b, 2021a). Supernatant samples containing secondary metabolites were obtained from these previously described bacteria (Table 1).

**Table 1.** Bacteria whose secondary compounds are used in the disk diffusion susceptibility test.

Isolate codes	Bacterium Name	Host	References
GV1	<i>Pantoea dispersa</i>	<i>Varroa destructor</i>	Usta 2021a
GV3	<i>Lysinibacillus macroides</i>	<i>Varroa destructor</i>	Usta 2021a
GV4	<i>Bacillus mycoides</i>	<i>Varroa destructor</i>	Usta 2021a
GV5	<i>Lysinibacillus fusiformis</i>	<i>Varroa destructor</i>	Usta 2021a
GV6	<i>Pseudomonas lutea</i>	<i>Varroa destructor</i>	Usta 2021a
GV7	<i>Lysinibacillus varians</i>	<i>Varroa destructor</i>	Usta 2021a
GAP1	<i>Bacillus cereus</i>	<i>Apis mellifera</i>	Usta 2021b
GAP2	<i>Bacillus subtilis</i>	<i>Apis mellifera</i>	Usta 2021b
GAP4	<i>Bacillus megaterium</i>	<i>Apis mellifera</i>	Usta 2021b
GAP6	<i>Bacillus nakamura</i>	<i>Apis mellifera</i>	Usta 2021b
GAP7	<i>Bacillus mobilis</i>	<i>Apis mellifera</i>	Usta 2021b
GAP8	<i>Bacillus pacificus</i>	<i>Apis mellifera</i>	Usta 2021b
GAP9	<i>Bacillus thuringiensis</i>	<i>Apis mellifera</i>	Usta 2021b
GAP11	<i>Bacillus vallismontis</i>	<i>Apis mellifera</i>	Usta 2021b
GAP13	<i>Bacillus velezensis</i>	<i>Apis mellifera</i>	Usta 2021b
GAP14	<i>Bacillus flexus</i>	<i>Apis mellifera</i>	Usta 2021b
GAP15	<i>Bacillus paramycooides</i>	<i>Apis mellifera</i>	Usta 2021b

### 2.2. Antimicrobial activity

The disc diffusion assay method was used for the detection of the antimicrobial activity of strains (Table 1). Antimicrobial activity of the strains was evaluated against *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27853, *Enterobacter cloacae* ATCC2468, *Enterococcus faecalis*

ATCC51299, *Escherichia coli* ATCC2471, *Klebsiella pneumoniae* ATCC700603, *Bacillus thuringiensis* ATCC10792, *Salmonella typhimurium* ATCC13311, *Serratia marcescens* ATCC13880, *Staphylococcus epidermidis* ATCC14990, *Staphylococcus aureus* ATCC25923, *Streptococcus faecalis* ATCC 9790, *Yersinia pestis* ATCC 19428 and *Candida albicans* ATCC10351. These selected bacteria are also clinically important as they are human pathogens. Firstly, Mueller-Hinton Agar (MHA) (1038720500, Merck) and Mueller-Hinton Broth (MHB) (1102930500, Merck) mediums were prepared in accordance with the manufacturer's instructions for bacterial strains and the fungal strain were used Potato Dextrose Agar (PDA)(Merck 70139) and Potato Dextrose Broth (PDB)(Merck P6685). After the media were autoclaved, MHA/PDA was dispensed in sterile circular Petri dishes with a diameter of 90 mm and a thickness of  $4 \pm 0.5$  mm, while the liquid one (MHB/PDB) was directly stored in a 4 °C fridge after cooling. The pH was adjusted to 7.2-7.4 for bacterial media and 5.3 for fungal media. Bacteria from Table 1 were initially resurrected by getting them from -80 stock and inoculating a single colony into a Nutrient agar (NA) medium. Bacterial strains were inoculated in 3 ml Mueller Hinton broth (MHB) and incubated at 30 °C for 48 hours. The supernatants were collected by centrifugation at 13000 rpm for 15 min. Then, the supernatant was filtered by a membrane filter (0.22 µm) and stored at 4 °C. The test microorganisms were grown in Nutrient Broth (NB)/PDB and at 37 °C / 30 °C for 16-18 h.

The disc diffusion test was used for the detection of antibacterial activity. The experiments in the current study were performed based on Kirby-Bauer's method (Barry et al. 1970, Bauer et al. 1966). A hundred microliter of each test microorganism suspension adjusted at  $10^8$  cfu/ml was spread on MHA/PDA. The previously sterilized discs (5 mm diameter, Whatman no 1) were placed on the same plates. A 100 µl of filtered supernatant of each sample was absorbed into discs. The plates were incubated at 37 °C for 16-18 h and *Candida albicans* was incubated at 30 °C for 16-18 h. In the study, 10 mg/ml Kanamycin was utilized as a positive control for all bacterial groups, while 10 mg/ml Penicillin solutions were employed in *Candida albicans* studies. The inhibition zone diameters were recorded (Sharma et al. 2014) (Figure 1).

### 2.3. Statistical analysis

One-way analysis of variance (ANOVA) was run to determine any significant differences in the study groups by Duncan multiple range test was performed through

SPSS (Statistical Package for Social Sciences, version 28, Chicago, IL, USA), and the significance level was determined at  $p < 0.05$ .



**Figure 1.** Determination of the inhibition effect of *Bacillus* sp. secondary metabolites against some human pathogen bacteria and fungus by disc diffusion method.

### 3. Results

In this study, the total extracellular products with secondary compounds produced by 16 bacterial isolates were used to determine the effects on some other pathogenic bacteria. These bacterial isolates, which were identified in the previous studies, are given again in the material and method section. It was determined that the compounds produced by GAP2 and GAP9 isolates affected all applied bacterial strains except the GAP2 and GAP9 products on *Salmonella typhimurium* ATCC13311 ( $p < 0.05$ ,  $F(16,36) = 16.39$ ). It was determined that the products obtained from GV6, GV7, GAP7, GAP8, GAP11, GAP13, and GAP15 isolates did not affect any of the bacteria used in the experiments ( $p < 0.05$ ) (Table 2).

The results revealed that the pathogenic bacterium *Serratia marcescens* ATCC13880 formed the most zones from the total secondary metabolites obtained from GAP2, and there was a significant difference when compared to the control group ( $p < 0.05$ ,  $F(16,36) = 91.059$ ) (Table 2). Most of the metabolites isolated from bacterial isolates were shown to be sensitive to *Escherichia coli* ATCC2471 and *Serratia marcescens* ATCC13880 ( $p < 0.05$ ). Total secondary metabolites obtained from GV1 (*Pantoea dispersa*) were found to be effective against the test microorganisms *Escherichia coli* and *Serratia marcescens* ( $p < 0.05$ ) (Table 2). Of the metabolites isolated from GV3 (*Lysinibacillus macroides*), it was determined to be effective only on *Escherichia coli* and was determined as zone 2.2 mm ( $p < 0.05$ ,  $F(16,36) = 22.801$ ) (Table 2). When the results of GV4 (*Bacillus mycoides*) are evaluated, except for *Pseudomonas aeruginosa* ATCC27853 and *Enterobacter cloacae* ATCC2468, it was determined that it is effective on *Escherichia coli* ATCC2471, *Klebsiella pneumoniae*

ATCC700603, *Salmonella typhimurium* ATCC13311, *Serratia marcescens* ATCC13880, *Staphylococcus epidermidis* ATCC14990 and *Staphylococcus aureus* ATCC25923, and especially *Serratia marcescens* ATCC13880 in the most susceptible pathogen bacterium (inhibition zone 6.3 mm) ( $p < 0.05$ ,  $F(16.36) = 16.694$ ) (Table 2). The extracts from GV5 (*Lysinibacillus fusiformis*) were recorded to act on *Pseudomonas*

*aeruginosa* ATCC27853, *Escherichia coli* ATCC2471, *Serratia marcescens* ATCC13880 and *Staphylococcus aureus* ATCC25923 and create a 7.1 mm zone of inhibition, especially in *Serratia marcescens* ATCC13880 ( $p < 0.05$ , Table 2). GAP4 (*Bacillus megaterium*) isolates, *Pseudomonas aeruginosa* ATCC27853 and *Enterobacter cloacae* ATCC2468 were found to be effective, and their zones of inhibition were similar ( $p > 0.05$ , Table 2).

**Table 2.** Antibacterial activity of some bacterial isolates against human pathogen bacteria

Isolate Codes	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> ATCC27853	<i>Enterobacter cloacae</i> ATCC2468	<i>Escherichia coli</i> ATCC2471	<i>Klebsiella pneumoniae</i> ATCC700603	<i>Salmonella typhimurium</i> ATCC13311	<i>Serratia marcescens</i> ATCC13880	<i>Staphylococcus epidermidis</i> ATCC14990	<i>Staphylococcus aureus</i> ATCC25923
GV1	NZ	NZ	1.1±0.28a	NZ	NZ	6.1±0.97fg	NZ	NZ
GV3	NZ	NZ	2.2±0.57b	NZ	NZ	NZ	NZ	NZ
GV4	NZ	NZ	4.0±1.15d	4.2±1.15de	4.0±1.21d	6.3±0.17fg	5.2±0.34ef	3.2±1.21c
GV5	5.1±0.57ef	NZ	3.0±0.47c	NZ	NZ	7.1±1.62gh	NZ	4.0±0.07d
GV6	NZ	NZ	NZ	NZ	NZ	NZ	NZ	NZ
GV7	NZ	NZ	NZ	NZ	NZ	NZ	NZ	NZ
GAP1	NZ	NZ	3.0±0.57c	NZ	NZ	6.0±0.09f	NZ	5.1±0.76ef
GAP2	4.0±0.67d	4.1±1.15de	5.0±1.15e	5.0±0.61e	4.0±1.34d	8.4±0.54h	7.1±0.87g	4.3±0.27de
GAP4	3.1±0.41c	3.0±0.58c	NZ	NZ	NZ	NZ	NZ	NZ
GAP6	NZ	NZ	2.0±0.57b	NZ	4.0±1.46d	2.0±0.13b	NZ	NZ
GAP7	NZ	NZ	NZ	NZ	NZ	NZ	NZ	NZ
GAP8	NZ	NZ	NZ	NZ	NZ	NZ	NZ	NZ
GAP9	5.1±0.53ef	6.0±1.15f	5.0±0.51e	3.0±0.45c	NZ	8.0±0.85h	4.1±0.57de	5.1±0.67ef
GAP11	NZ	NZ	NZ	NZ	NZ	NZ	NZ	NZ
GAP13	NZ	NZ	NZ	NZ	NZ	NZ	NZ	NZ
GAP14	NZ	NZ	NZ	NZ	NZ	5.2±0.13ef	NZ	NZ
GAP15	NZ	NZ	NZ	NZ	NZ	NZ	NZ	NZ
Control	8.0±0.57h	7.0±0.33g	8.1±0.55h	10.0±0.45i	10.0±1.15i	12.0±0.16j	11.05.1±0.57i	8.1±1.15h

Values are mean±standard errors. Mean values within the column followed by the different letter are significantly different at the  $p < 0.05$  probability level using the Duncan test NZ: Non-Zone

In particular, metabolites derived from GAP2 (*Bacillus subtilis*) and GAP9 (*Bacillus thuringiensis*) were found to be effective on pathogenic bacteria and were close to the inhibition zones that occurred when compared with positive control ( $p < 0.05$ , Table 2). *S. marcescens* which is the kanamycin antibiotic is the most effective, which indicates that it is the most sensitive strain of the selected bacteria. Therefore, the secondary compounds of GAP2 showed the greatest zone as 8.4 mm on this bacterium, showing approximately 700 µg antibiotic effects. The smallest zone diameter of 1.1 mm was formed in *Escherichia coli* due to secondary compounds produced by GV1, which means that these bacterial compounds have about 100 µg antibiotic effect as an equal amount. The amounts of the secondary compound mixtures used in bacteria that have no zones can be examined again by concentrating.

#### 4. Discussion and Conclusion

Throughout history, there has been a constant war between humans and the microorganisms that cause diseases. As the use of antimicrobials has increased, the resistance mechanisms revealed by pathogens have increased and become more complex (Reygaert 2018).

Considering the emergence of strains resistant to antimicrobials, the unconscious use of antibiotics, and the economic dimension, studies have been directed to the search for natural substances (Davies and Davies 2010). Therefore, it is important to investigate from nature new microorganisms that produce large and powerful antibiotics. *Bacillus* species are among the most studied organisms in terms of their capacity to produce antibiotics (Perez et al. 1993).

Since in our preliminary studies, it was determined that there was no effect on bacterial groups from 24-hour secondary metabolite production of bacterial isolates, we determined the increase in the effects of metabolites, especially after 48 hours of growth. Generally, in *Bacillus*, the time of antibiotic activity is between 24-72 hours of incubation. The time at which the maximum antibiotic activity occurs changes, depending on the particular species of *Bacillus*. This phenomenon may be observed because different species have different metabolic pathways (Hosoya et al. 1998).

According to the results of this study, all the treated bacteria were affected by secondary compounds belonging to *Bacillus* species, especially *B. subtilis* (GAP2)

and *B. thuringiensis* (GAP9). *E. cloacae*, *K. pneumoniae*, *S. typhimurium*, and *S. epidermidis* are affected only by secondary compounds of *Bacillus* species. These results are not surprising because the genus *Bacillus* is already known to produce bioactive substances that have the potential to be used against agricultural pests, in the pharmaceutical industry, and in the production of biosurfactants (Kaspar et al. 2019, Stoica 2019, Wang et al. 2015).

Gram-positive and Gram-negative bacteria showing antibacterial activity by *Bacillus* strains have been reported to include *Yersinia enterocolitica*, *Micrococcus flavus*, *Staphylococcus aureus* (Chatterjee et al. 1992, Aslim and Yucel 2008), *Escherichia coli* (Perez et al. 1992, Aslim and Yucel 2008), *Pseudomonas aeruginosa* (Perez et al. 1992) and *Micrococcus luteus* (Perez et al. 1993). Especially in our study, it was shown to be effective on *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, and *Pseudomonas aeruginosa*.

*Serratia marcescens* is a harmful pathogen that causes mortality, particularly in preterm and low birth-weight infants, and it is known to develop antibiotic resistance (Atmaca et al. 2018). Furthermore, it can be fatal owing to infections in the eye and urinary system (Zivkovic et al. 2023). It was discovered to be especially susceptible to secondary metabolites produced by GAP2 (*Bacillus subtilis*). It may also be utilized as a probiotic for *B. subtilis* in humans (Hong et al. 2005, Hong et al. 2023). The results of the research support the literary theory. GAP2 metabolites have the potential to be employed both for *S. marcescens* infections and as probiotics.

The results of this study showed that many strains of the *Bacillus* community from natural isolates have antimicrobial activity against clinically important bacteria. *Bacillus* sp. is increasing bacteria resistance to conventional antibiotics. As a result, there is an increasing interest in using metabolites generated by bacteria as antimicrobials against human pathogenic microorganisms. *Bacillus* strains that produce secondary metabolites can be employed in a variety of applications for saprophytic and pathogenic microbes in medicine, veterinary medicine, agriculture, and the food industry.

#### Declaration of Ethical Standards

The authors declare that they comply with all ethical standards.

#### Credit Authorship Contribution Statement

Author 1: Investigation, Methodology / Study design, Writing – original draft, Conceptualization

Author 2: Investigation, Methodology / Study design, Formal analysis, Writing – original draft

Author 3: Investigation, Methodology / Study design

Author 4: Investigation, Methodology / Study design

Author 5: Investigation, Methodology / Study design, Formal analysis, 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 analysed during this study are included in this published paper.

#### Acknowledgement

We would like to thank Trabzon Regional Directorate of Forestry and Biological Control Laboratory against Forest Pests for making use of the infrastructure facilities.

#### 5. References

- Akkoç, N., Şanlıbaba, P. and Akçelik, M., 2009. Bakteriyosinler: Alternatif Gıda Koruyucuları. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **25**(1), 59–70.
- Aslim, B. and Yucel, N., 2008. In vitro antimicrobial activity of essential oil from endemic *Origanum minutiflorum* on ciprofloxacin-resistant *Campylobacter* spp. *Food chemistry*, **107**(2), 602–606. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.08.048>
- Atmaca, S., Özekinci, T., Yakut, S., Akpolat, N. and Gül, K., 2018. *Serratia* Türlerinin İdentifikasyonu, Klinik Dağılımı, Antibiyotik Duyarlılığı. *Ankem Dergisi*, **32**(2), 62–71. <https://doi.org/10.5222/ankem.2018.062>
- Barry, A. L., Garcia, F. and Thrupp, L. D., 1970. An Improved Single-disk Method for Testing the Antibiotic Susceptibility of Rapidly-growing Pathogens. *American Journal of Clinical Pathology*, **53**(2), 149–158. <https://doi.org/10.1093/ajcp/53.2.149>
- Barsby, T., Michael, T. and Kelly, M.T., 2002. *Tupuseleiamides* and *Basiliskamids*, new acyl dipeptides produced in culture by a *Bacillus laterosporus* isolate obtained from a tropical marine habitat. *Journal of Neuroscience Research*. **65**(10), 1447–1451. <https://doi.org/10.1021/np0201321>
- Bauer, A. W., Kirby, W. M., Sherris, J. C. and Turck, M., 1966. Antibiotic susceptibility testing by a standardized single disk method. *Technical Bulletin of the Registry of Medical Technologists*, **36**(3), 49–52.



- Bérdy, J., 2005. Bioactive microbial metabolites. *The Journal of Antibiotics*, **58**(1), 1–26. <https://doi.org/10.1038/ja.2005.1>
- Chatterjee, S., Chatterjee, S., Lad, S. J., Phansalkar, M. S., Rupp, R. H., Ganguli, B. N. and Kogler, H., 1992. Mersacidin, a new antibiotic from *Bacillus* fermentation, isolation, purification and chemical characterization. *The Journal of Antibiotics*, **45**(6), 832-838. <https://doi.org/10.7164/antibiotics.45.832>
- Cowan, M. M., 1999. Plant products as antimicrobial agents. *Clinical Microbiology Reviews*, **12**(4), 564–582. <https://doi.org/10.1128/CMR.12.4.564>
- Davies, J., Davies, D., 2010. Origins and evolution of antibiotic resistance. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, **74**(3):417-33. <https://doi.org/10.1128/MMBR.00016-10>
- Demain, A. L. and Fang, A., 2000. The natural functions of secondary metabolites. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, **69**, 1–39. [https://doi.org/10.1007/3-540-44964-7\\_1](https://doi.org/10.1007/3-540-44964-7_1)
- Demirkan, E., Aybey, A. and Ak, A. U., 2021. Optimization of culture conditions for antibacterial substance production from newly isolated *Brevibacillus laterosporus* EA62. *The European Research Journal*, **7**(2), 152–158. <https://doi.org/10.18621/eurj.603491>
- Hong, H.A., Duc, L.H. and Cutting, S.M., 2005. The use of bacterial spore formers as probiotics. *FEMS Microbiology Reviews*, **29**, 813–835. <https://doi.org/10.1016/j.femsre.2004.12.001>
- Hong, G., Li, Y., Yang, M., Li, G., Jin, Y., Xiong, H. and Hou, X., 2023. Baseline gut microbial profiles are associated with the efficacy of *Bacillus subtilis* and *Enterococcus faecium* in IBS-D. *Scandinavian Journal of Gastroenterology*, **58**(4), 339-348. <https://doi.org/10.1080/00365521.2022.2136013>
- Hosoya, Y., Okamoto, S., Muramatsu, H. and Ochik, K., 1998. Acquisition of certain streptomycin resistance (Str.). *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, **42**(8), 2041-2047. <https://doi.org/10.1128/AAC.42.8.2041>
- Johnvesly, B., Manjunath, B.R. and Naik, G.R., 2002. Pigeon pea waste as a novel, inexpensive, substrate for production of a thermostable alkaline protease from thermoalkalophilic *Bacillus* sp. JB-99. *Bioresource Technology*, **82**(1): 61-64. PMID 11848379. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00147-X](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00147-X)
- Kaspar, F., Neubauer, P. and Gimpel, M., 2019. Bioactive Secondary Metabolites from *Bacillus subtilis*: A Comprehensive Review. *Journal of Natural Products*, **82**(7), 2038–2053. <https://doi.org/10.1021/acs.jnatprod.9b00110>
- Keswani, C., Singh, H. B., García-Estrada, C., Caradus, J., He, Y. W., Mezaache-Aichour, S., Glare, T. R., Borriss, R. and Sansinenea, E., 2020. Antimicrobial secondary metabolites from agriculturally important bacteria as next-generation pesticides. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **104**(3), 1013–1034. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-10300-8>
- Miller, D. L., Smith, E. A. and Newton, I. L. G., 2021. A bacterial symbiont protects honey bees from fungal disease. *Host Microbial Interactions*, **12**(3). <https://doi.org/10.1128/mBio.00503-21>
- Nabavi, S. M., Marchese, A., Izadi, M., Curti, V., Daglia, M. and Fazel Nabavi, S., 2014. Plants belonging to the genus *Thymus* as antibacterial agents: From farm to pharmacy. *Food chemistry*, **173**, 339-347. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.10.042>
- Perez, J., Dela Rubia, T., Moreno, J. and Martinez, J., 1992. Phenolic content and antibacterial activity of olive oil waste waters. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, **11**(4), 489-495. <https://doi.org/10.1002/etc.5620110406>
- Perez, C., Suarez, C. and Castro, G. R., 1993. Antimicrobial activity determined in strains of *Bacillus circulans* cluster. *Folia Microbiologica*, **38**(1), 25–28. <https://doi.org/10.1007/BF02814544>
- Prashanthi, R., Shreevatsa, G. K., Krupalini, S. and Manoj, L., 2021. Isolation, characterization, and molecular identification of soil bacteria showing antibacterial activity against human pathogenic bacteria. *Journal, Genetic Engineering & Biotechnology*, **19**(1). <https://doi.org/10.1186/s43141-021-00219-x>
- Ren, Z.Z., Zheng, Y. and Sun, M., 2007. Purification and properties of an antimicrobial substance from marine *Brevibacillus laterosporus* LH-1. *Acta Microbiologica Slinica*, **47**(6):997-1001.
- Reygaert, W. C., 2018. An overview of the antimicrobial resistance mechanisms of bacteria. *AIMS*

- microbiology, **4**(3), 482. <https://doi.org/10.3934/microbiol.2018.3.482>
- Rosovitz, M.J., Voskuil, M.I. and Chambliss, G.H., 1998. Topley and Wilson's Microbiology and Microbial Infections, Systematic Bacteriology. In: Collier L, Balows A, and Susman editors. *Bacillus*. 9nd edn. Volume 2, New York, USA: *Oxford University Press*, pp. 709-730.
- Ruiz, B., Chávez, A., Forero, A., García-Huante, Y., Romero, A., Sánchez, M. and Langley, E., 2010. Production of microbial secondary metabolites: regulation by the carbon source. *Critical Reviews in Microbiology*, **36**(2):146-67. <https://doi.org/10.3109/10408410903489576>
- Sansinenea, E. and Ortiz, A., 2011. Secondary metabolites of soil *Bacillus* spp. *Biotechnology Letters*, **33**(8), 1523–1538. <https://doi.org/10.1007/s10529-011-0617-5>
- Sharma, S., Verma, H. N. and Sharma, N. K., 2014. Cationic bioactive peptide from the seeds of *Benincasa hispida*. *International Journal of Peptides*, **14**, 156-160. <https://doi.org/10.1155/2014/156060>
- Spellberg, B., 2014. The future of antibiotics. *Critical care*, **18**(3): 228. <https://doi.org/10.1186/cc13948>
- Steele, M. I., Motta, E. V. S., Gattu, T., Martinez, D. and Moran, N. A., 2021. The Gut Microbiota Protects Bees from Invasion by a Bacterial Pathogen. *Microbiology Spectrum*, **9**(2). <https://doi.org/10.1128/Spectrum.00394-21>
- Stoica, R.-M., 2019. Antimicrobial compounds of the genus *Bacillus*: A review. *Romanian Biotechnological Letters*, **24**(6), 1111–1119. <https://doi.org/10.25083/rbl/24.6/1111.1119>
- Tenover, C.F., 2006. Mechanisms of antimicrobial resistance in bacteria. *The American Journal of Medicine*. **119**, 3-10. <https://doi.org/10.1016/j.amjmed.2006.03.011>
- Turnbull, P.C.B., 1996. "*Bacillus*". In: Baron S (Ed.). *Barron's Medical Microbiology*. *Univ of Texas Medical Branch*. ISBN 978-0-9631172-1-2.
- Usta, M., 2021a. Determination of Honey Bee (*Apis mellifera*) Bacterial Flora, *cry* Gene Analysis and Honey Bee Health, (Bal Arısı (*Apis mellifera*) Bakteri Florasının Belirlenmesi. *cry* Geni Analizi ve Bal Arısı Sağlığı). *Uludağ Arıcılık Dergisi*, **21**(2), 157–167. <https://doi.org/10.31467/uluaricilik.954479>
- Usta, M., 2021b. Isolation and determination of bacterial microbiota of *Varroa destructor* and isolation of *Lysinibacillus* sp. from it. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, **31**(1), 1–8. <https://doi.org/10.1186/s41938-021-00482-7>
- Wang, T., Liang, Y., Wu, M., Chen, Z., Lin, J. and Yang, L., 2015. Natural products from *Bacillus subtilis* with antimicrobial properties. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **23**(4), 744–754. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2014.05.020>
- Zivkovic Zaric, R., Zaric, M., Sekulic, M., Zornic, N., Nestic, J., Rosic, V. and Canovic, P., 2023. Antimicrobial Treatment of *Serratia marcescens* Invasive Infections: Systematic Review. *Antibiotics*, **12**(2), 367. <https://doi.org/10.3390/antibiotics12020367>



## Van Balığı (Alburnus tarichi) Solungaç, Böbrek ve Sindirim Kanalı Dokularında Üreme Göçü Esnasında Akuaporin 3 Proteinindeki Değişimin İncelenmesi

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 26.07.2023

Kabul/Accepted: 30.12.2023

Yayımlandı/Published: 27.02.2024

### Investigation of Changes in Aquaporin 3 Protein in Van Fish (Alburnus tarichi) Gill, Kidney and Digestive Tract Tissues During Reproductive Migration

Zehra ALKAN<sup>\*</sup>, Ahmet Regaib OĞUZ

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Van, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

Van Gölü, Türkiye'nin en büyük gölü ve aynı zamanda dünyanın sayılı sodalı göllerinden biridir. Van balığı (Alburnus tarichi), Van Gölü'nün fiziko-kimyasal (tuzluluk oranı %22, pH 9.8) koşullarına uyum sağlayan tek omurgalı türüdür. Anadromik bir balık olup ve nisan-temmuz ayları arasında gölden tatlı sulara göç eder. Üremesini tamamlayan balıklar göl ortamına geri dönerler. Göç sırasında farklı su ortamlarına maruz kalan balıklarda adaptasyonu sağlamak için solungaç, böbrek, sindirim kanalı gibi dokularda bazı değişimler meydana gelir. Bu çalışmada Van Gölü ve Karasu Çayı'ndan örneklenen balıkların solungaç, böbrek ve sindirim sisteminde adaptasyonda önemli rol oynayan Akuaporin 3 transmembran proteini immünohistokimyasal olarak incelendi. Çalışma sonucunda solungaçlarda bulunan Akuaporin 3 transmembran proteininin Karasu Çayı'ndan örneklenen balıklarda işaretlenmediği görüldü. Böbrek dokusundaki Akuaporin 3 transmembran proteininin örnek alınan bölgeye ve dokudaki yerleşimine göre farklılık gösterdiği belirlendi. Bağırsağın ön ve arka kısımlarında bulunan Akuaporin 3 transmembran proteininin örneklenen lokaliteler arasında farklılık gösterdiği ve işaretlenmenin epitel hücrelerinde olduğu gözlemlendi. Su ve gliserol taşınmasında rol oynayan Akuaporin 3 transmembran proteinin Van balığı ozmoregülatör dokularında değişim göstererek adaptasyonda etkili olduğu söylenebilir.

#### Anahtar Kelimeler:

Akuaporin, Sindirim Kanalı, Solungaç, Böbrek, Van Balığı

#### Abstract

Lake Van is the largest lake in Turkey and also one of the few soda lakes in the world. Van fish (Alburnus tarichi) is the only vertebrate species that adapts to the physico-chemical (salinity ratio %22, pH 9.8) conditions of Lake Van. It is an anadromic fish and migrates from the lake to fresh waters between April and July. Fish that have completed their reproduction return to the lake environment. Some changes occur in tissues such as gills, kidneys and digestive tracts in order to adapt to fish that are exposed to different aquatic environments during migration. In this study, Aquaporin 3 transmembrane protein, which plays an important role in adaptation in the gill, kidney and digestive system of fish sampled from Lake Van and Karasu Stream, was examined immunohistochemically. As a result of the study, it was observed that the Aquaporin 3 transmembrane protein found in the gills was not marked in the fish sampled from the Karasu Stream. It was determined that Aquaporin 3 transmembrane protein in kidney tissue differed according to the sample area and its localization in the tissue. It was observed that Aquaporin 3 transmembrane protein found in the anterior and posterior parts of the intestine differed between the sampled localities and the labeling was in epithelial cells. It can be said that Aquaporin 3 transmembrane protein, which plays a role in water and glycerol transport, is effective in adaptation by showing changes in the osmoregulatory tissues of Van fish.

#### Keywords:

Akuaporin, Digestive tract, Gill, Kidney, Van Fish

#### 1. Giriş

Su, tüm insan hücrelerinin ve dokularının ana bileşenidir ve tüm omurgalı, omurgasız, tek hücreli organizmalar ve bitkiler için de geçerlidir. Tarihsel olarak, suyun hidrofobik membranlar boyunca taşınmasının, spesifik

olmayan su geçişi gerçekleştiği kabul edilmiştir. Agre vd. (2001)'nin yapmış olduğu çalışmada, insan eritrositleri ve kurbağaların idrar kesesi gibi belirli hücre veya dokularda artan su geçirgenliği gözlemlenmiş ve sonuç olarak belirli su kanallarının da var olduğu düşünülmüştür.

Akuaporinler, tüm yaşam formlarında bulunan, biyolojik membranlardan hücre içine ve dışına hızlı bir şekilde su ve küçük çözünen maddelerin geçişine izin veren, yaklaşık 30 kDa'lık küçük transmembran kanal proteinlerinin bir üst ailesidir (Chutia vd. 2022). Akuaporinler öncelikle, su hareketlerinin hipertonic veya hipotonik koşullar tarafından yönlendirildiği biyolojik zarlardan suyun taşınmasını kolaylaştırır. Teleost balıklar gibi suda yaşayan organizmalar, deniz suyu (hiperozmotik) veya tatlısu (hipoozmotik) tarafından ortaya çıkan ozmotik zorluklara uyum sağlamak ve hayatta kalmak için farklı mekanizmalara sahiptirler (Cuesta vd. 2019). Ozmotik dengeyi sağlamak için su kanallarına ihtiyaç vardır. Bu nedenle, akuaporinlerin balık su homeostazının korunmasında çok önemli bir rol oynadığı düşünülmektedir (Engelund ve Madsen 2011).

Akuaporinler, memelilerde olduğu gibi balıklarda da su taşınmasında hücresel, doku ve organizma düzeylerinde farklı roller üstlenirler. Akuaporinlerin çeşitliliği üzerine çok sayıda araştırma bulunmaktadır. Filogenetik analizler sonucunda bu proteinlerin üç alt aileye gruplandırılabilceği ifade edilmiştir (Cerdà ve Finn 2010). Akuaporin alt ailesi su geçişi için oldukça seçicidir ve AQP-0, 1, 2, 4, 5, 6 ve 8'den oluşur, buna karşılık "akuagliseroporinler" alt ailesi su, gliserol ve bu tür çözünen maddelerin geçişine izin verir ve 3, 7, 9 ve 10 Akuaporinlerden oluşur. Ayrıca AQP-3, 7, 9, 10 metaloidlerin yüklü ve yüklü olmayan moleküllerinin difüzyonunu kolaylaştırıp, arsenik, antimondur ve metalloid homeostazında çok önemli rol oynarlar (Ishibashi vd. 2009).

Van Gölü Türkiye'nin en büyük dünyanın ise sayılı tuzlu-sodali göllerindedir (Danulat ve Kempe 1992). Van Gölü'nün tuzlu-sodali özelliklerinden dolayı gölde sınırlı sayıda tür yaşamaktadır. Bu türler, omurgalı olan Van balığı (*Alburnus tarichi*) ile birkaç omurgasız türdür. Son yıllarda başka bir türün (*Erciş Çöpçü balığı*, *Oxynoemacheilus ercisianus*) varlığı da keşfedilse de bu tür sınırlı alanlar içerisinde yaşamaktadır ve tür hakkında fazla bilgiye rastlanılamamıştır (Akkuş vd. 2021). Van Balığı Cyprinidae familyasına ait omurgalı bir tür olup göl suyunda yaşayan anadrom özelliklere sahiptir (Oğuz 2015, Şen vd. 2015). Balıklar üremek için gölden larvalar için daha uygun olan tatlı sulara göç eder. Üremeyi tamamladıktan sonra göle geri dönerler. Van Balığı üreme dönemi boyunca göl ve akarsuyun farklı fiziko-kimyasal ortam şartlarında yaşarlar ve bu değişen ortam şartlarına uyum sağlayarak yaşamlarını sürdürürler. Van Gölü balıkları sodali-tuzlu sudan tatlısuya uyum sağlamak için histolojik ve moleküler değişikliklere ihtiyaç duyar (Oğuz 2018). Van Gölü %22 tuzluluk, 9.8 pH ve 153 mEqxl-1 alkaliniteye, Karasu Çayı %0.29 tuzluluk, 8.01 pH ve 49.8 mEqxl-1 alkaliniteye sahip fiziko-kimyasal

şartları birbirinden farklı iki akuatik ortamdır. Bu çalışmada iki farklı ortamdaki örneklenen balık solungaç, böbrek ve sindirim kanalı dokularından bazı Akuaporin 3 transmembran proteindeki değişimler incelendi.

## 2. Materyal ve Metot

Araştırmada kullanılan balıklar için gerekli olan izinler Gıda Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı (05/02/2021 tarih ve 13453 sayılı yazı) ve Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Hayvan Deneyleri Yerel Etik Kurulu'ndan (2021/02-14) alınmıştır.

Çalışmalarda kullanılan balıklar üreme göçünün başladığı 15 Nisan-15 Temmuz ayları arasında Van Gölü (n=20) ve Karasu Çayı'ndan (n=20) fanyalı ağlar ve serpe ağlar ile yakalandı.

### 2.1 Histoloji

Diseksiyonla balıklardan solungaç, böbrek ve sindirim kanalı (bağırsak) doku örnekleri 24 saat süreyle %4'lük Paraformaldehit solüsyonunda tespit edildi ve %70'lik alkol içerisine alındı. Dokular daha sonra dereceli alkol serilerinden (% 70-80-90-100) ve ksilolden geçirilerek parafine gömüldü (Bancroft ve Gamble 2008). Parafine gömülen dokulardan mikrotom (Micron HM 315, Almanya) yardımıyla 5 µm'lik kesitler adhesiv lamlara alındı.

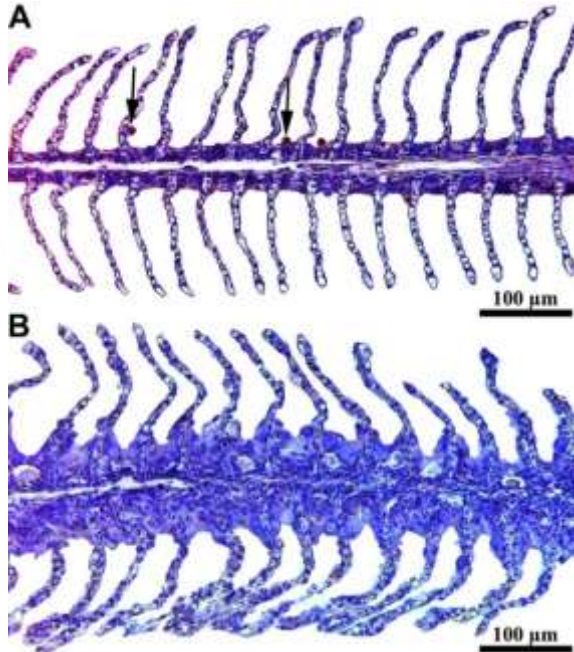
### 2.2 İmmünohistokimya

İmmünohistokimyasal boyamalar ticari kit ile (Thermo, Amerika) gerçekleştirildi. İmmünohistokimyasal boyamada kesitler endojen peroksidazın önlenmesi için peroksidaz solüsyon içerisinde 10 dakika bekletildi. Dokular 2'şer dakika olacak şekilde 3 kez PBS ile yıkanıldı. Serum blok solüsyonu dokunun üzerine 100 µL eklendi ve 10 dakika bekletildi. Nemli ortamda işaretlenecek proteinlere ait primer antikor (Akuaporin 3; Elabscience, E-AB-17294) sulandırılarak 100 µL eklenerek 60 dakika bekletildi. Dokular tekrar PBS ile 2'şer dakika 3 kez yıkanıldı. Dokulara 100 µL biyotinlenmiş sekonder antikor eklenerek 10 dakika bekletildi. PBS ile 3 kez 2'şer dakika yıkanıldı. Daha sonra kullanılacak kromojen (Thermo, USA) taze hazırlanarak dokular üzerine eklenildi ve renk reaksiyonunun oluşması gözlemlendi. Renk oluşumundan sonra preparatlar Ksilolden geçirildi. Dokular entellan ile kapatılarak, dijital kamera bağlı ışık mikroskobu (Leica DMI 6000B, Almanya) ile incelendi ve görüntüleri alındı.

## 3. Bulgular

Van Gölü ve Karasu Çayı'ndan örneklenen balık solungaç, böbrek ve sindirim kanalı dokularında Akuaporin 3 transmembran proteini immünohistokimyasal olarak işaretlendi. Solungaç doku epitelindeki Akuaporin 3

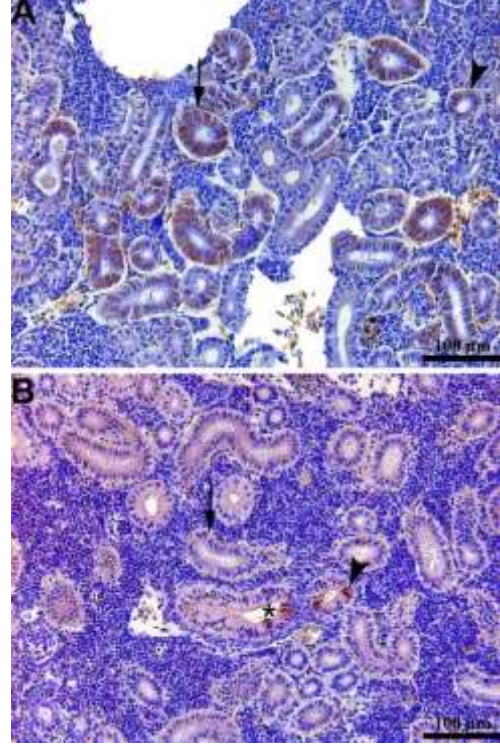
transmembran proteini mitokondrice zengin hücreler içerisinde pozitif olarak işaretlendi. İşaretlemenin solungaç dokusunun primer lamel ve sınırlıda olsa sekonder lamel epitelindeki mitokondrice zengin hücrelerde olduğu belirlendi. Solungaçlarda bulunan pavament hücre, mukus hücre ve diğer hücrelerde ise herhangi bir işaretleme gözlenmedi. Akarsudan örneklenen balık solungaç dokusunda ise işaretlenmenin olmadığı gözlendi (Şekil 3.1.) Böbrek dokusunda Akuaporin 3 proteininin böbrek tübül hücrelerinin apikal kısmında bulunduğu, ancak bu hücrelerin fırça sınırına lokalize olmadığı gözlendi. Göl ortamından örneklenen balık böbrek dokularında Akuaporin 3 transmembran proteininin proksimal tübüllerde distal tübüllere oranla apikal kutupta daha yoğun olduğu gözlendi. Ayrıca akarsu ortamından alınan balık böbrek dokusunda proksimal tübüllerde işaretleme olmadığı distal tübüllerde yer alan bazı epitel hücrelerde işaretlemenin olduğu belirlendi. Aynı zamanda her iki örnekleme ortamında da Akuaporin 3'ün az da olsa bazı eritrositlerde nonspesifik olarak işaretlendiği gözlendi (Şekil 3.2.).



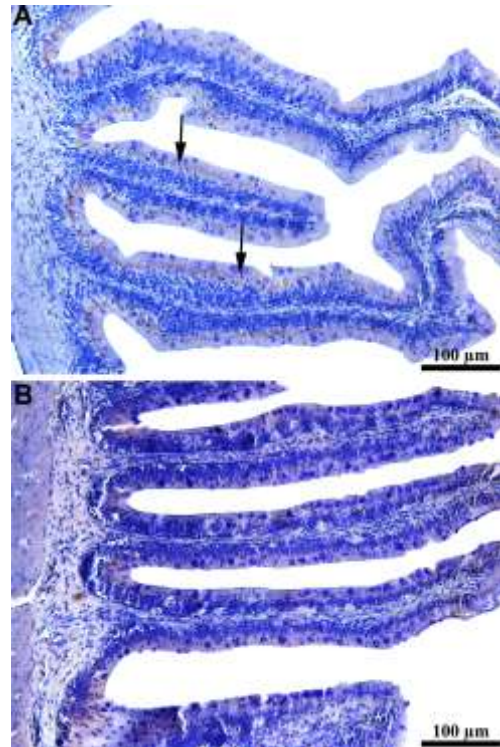
Şekil 3.1. Van Gölü'nden ve Karasu Çayı'ndan örneklenen Van balığı solungaç dokusunda Akuaporin 3 transmembran protein içeren hücrelerinin görünümü (A, Van Gölü; B, Karasu Çayı).

Sindirim kanalı dokusunda her ne kadar farklı hücre tipleri bulunsun da yüzey epitelde bulunan ve yüzey absorbtif hücreleri olarak tanımlanan enterosit hücrelerinde Akuaporin 3 transmembran proteininin bazolateral olarak işaretlendiği gözlendi (Şekil 3.3.). Aynı zamanda göl ve akarsu örnekleri kıyaslandığında sadece

göl örneklerinin pozitif olarak işaretlendiği belirlendi. Göl örnekleri de kendi içerisinde kıyaslandığında anterior bağırsak kısmının posterior bağırsak kısmından daha yoğun işaretlendiği gözlendi (Şekil 3.3.; Şekil 3.4.).

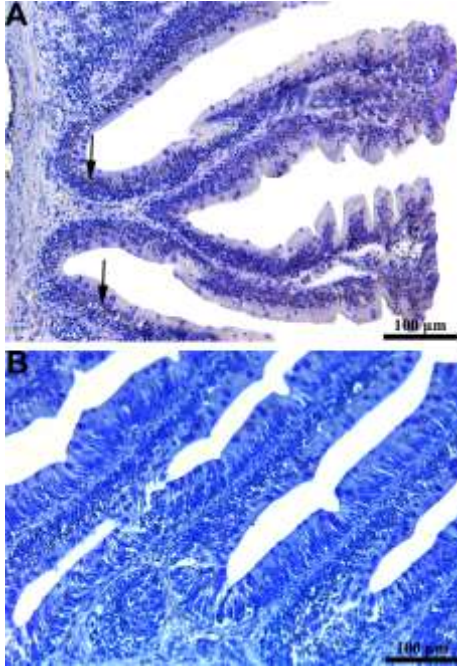


Şekil 3.2. Van Gölü'nden ve Karasu Çayı'ndan örneklenen Van balığı böbrek dokusunda Akuaporin 3 transmembran protein içeren hücrelerinin görünümü (A, Van Gölü; B, Karasu Çayı; ok, Proksimal tübül; ok başı, distal tübül; \*, toplama kanalı).





Şekil 3.3. Van Gölü'nden ve Karasu Çayı'ndan örneklenen Van balığı anterior dokusunda Akuaporin 3 transmembran protein içeren hücrelerinin görünümü (A, Van Gölü; B, Karasu Çayı).



Şekil 3.4. Van Gölü'nden ve Karasu Çayı'ndan örneklenen Van balığı posterior dokusunda Akuaporin 3 transmembran protein içeren hücrelerinin görünümü (A, Van Gölü; B, Karasu Çayı).

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Kemikli balık solungaçlarında gliserol, üre ve amonyak taşıyan Akuagliseroprotein olan Akuaporin 3 varlığı tespit edilmiştir (Lignot vd. 2002, Tjpsmark vd. 2010). Balıklarda Akuaporin 3 transmembran proteininin solungaç dokusundaki rolü tam olarak bilinmese de solungaç boyunca su ve amonyak taşımada rol oynayabileceği bildirilmiştir (Cutler vd. 2007). Teleost solungaç dokularında, Akuaporin 3 transmembran proteinleri mitokondrice zengin hücrelerde bulunduğu bildirilmiştir (Brunelli vd. 2010). Ayrıca Akuaporin 3 proteininin bazı türlerde dehidrasyonun önlenmesi de dahil olmak üzere bir dizi farklı işleve sahip olabileceği ve mitokondrice zengin hücre haricindeki diğer epitel hücre tiplerinde (pillar ve aksesuar hücreleri) de bulunabileceği ifade edilmiştir (Cutler vd. 2007). Bu sonuç, bu hücrelerin tuzlusu balıklarında su/gliserol taşınmasında aktif bir rol oynadığını göstermektedir. Japon Yılan balığı üzerinde yapılan bir çalışma, balıkların tatlısudan tuzlusuya transferini takiben branşiyal Akuaporin 3 mRNA seviyelerinde bir düşüş olduğu bildirilmiştir (William vd. 2006). Avrupa Yılan balığının (*Anguilla anguilla*) tatlısu ve deniz suyuna maruz bırakılması sonucu solungaç dokusundaki Akuaporin 3'ün tuzlu suya maruz bırakılan balık solungaç dokularında azaldığı bildirilmiştir. Bu değişimin solungaçların ozmoregülasyonunda önemli bir

rol oynadığı ifade edilmiştir (Lignot vd. 2002). Akuaporin 3'ün Tatlısu ve deniz suyuna adapte edilmiş Mozambik Tilapiası (*Oreochromis mossambicus*) solungaç mitokondrice zengin hücrelerinde bazolateral olarak lokalize olduğunu bildirmiştir.

Solungaç Akuaporin 3'ün, mitokondrice zengin hücrelerinin fonksiyonel farklılaşmasını tetikleyebileceği ve osmoresepsiyonda yer aldığını bildirilmiştir (Watanabe vd. 2005). Daha önceki çalışmaların aksine Jung vd. (2012) tuzlusuya adapte edilen Atlantik killifish (*Fundulus heteroclitus*)'in solungaçlarında Akuaporin 3'ün mRNA seviyesinin tatlısuya oranla arttığı bildirilmiştir. Benzer olarak Van balığı solungaç dokularında Akuaporin 3'ün gölden örneklenen solungaçlarda pozitif reaksiyon gösterirken akarsu ortamından yakalanan balıklarda herhangi bir işaretlenme olmadığı belirlendi. Bu durum farklı sucul habitatlarda solungaçlarda diğer akuaporinler veya farklı transmembran proteinler rol oynayabilir.

Akuaporin 3, vücuttaki çeşitli dokularda ve özellikle teleost böbreklerinde eksprese edilen bir kanal proteindir (Cutler vd. 2007). Memelilerde, Akuaporin 3, tübül hücrelerinin bazolateral zarlarında bulunur ve suyun yeniden emilmesinde bir rolünün olduğu bilinmektedir (Knepper vd. 1996). Akuaporin 3 tuzluluğa maruz bırakılan Aynalı Sazanın (*Cyprinus carpio*) böbrek dokusunda daha yoğun boyanmış ve bu boyama sadece tübül hücrelerinin apikal zarıyla sınırlı kalmıştır. Daha yüksek tuzluluklarda (9 ve 12 ppt), hem proksimal tübül hem de distal tübül hücrelerinde ise daha yoğun bir immün işaretlenme görülmüştür (Salati vd. 2014). Engelund ve Madsen (2015)'in yaptığı bir çalışmada deniz suyuna maruz bırakılan Atlantik somonunun böbreğinde akuaporin 3'ün proksimal böbrek tübüllerinde lokalize olduğunu ve akuaporin 3'ün tuzlulukla ve balığın gelişim dönemiyle bir ilgisinin olmadığını bildirmişlerdir. Renal tübülün distal kısımlarının tatlısu balıklarında düşük geçirgenliğe sahip olduğu, ancak suyun korunması gereken tuzlusu balıklarında daha yüksek geçirgenliğe sahip olduğu düşünülmektedir (Marshall ve Grosell 2005). Tuzlu suya adaptasyon sırasında Atlantik somonunun böbrek dokusundaki Akuaporin 3 yoğunluğu tatlısu dokularına oranla tuzludan alınan balık böbrek dokularında daha yoğun olduğu bildirilmiştir. Tuzlusuya adapte edilen somonlarda akuaporin 3 değişimlerinin böbreklerde sıvı dengesi ve suyun yeniden emilimi ile ilgili olduğu belirtilmiştir (Tjpsmark vd. 2010). Gölden örneklenen balıkların böbrek dokusunda bulunan proksimal tübüllerde Akuaporin 3 transmembran proteini pozitif işaretlenirken, akarsudan örneklenen balık böbrek dokusundaki proksimal tübüllerinde ise işaretlenmenin olmadığı gözlemlendi. Ayrıca akarsu ortamından alınan balık

böbrek dokusunda ise distal tübüllerde az oranda işaretlenmenin olduğu proksimal tübüllerde ise işaretlenmenin olmadığı belirlendi. Van Gölünden örneklenen balıkların böbreklerinde akuaporin 3 yoğunluğu balığın göl ortamındaki hipertonic ortamda vücuttaki suyun korunması ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Avrupa yılan balığının tatlisuya aktarıldığında Akuaporin 3'ü eksprese eden az sayıda uzun ince goblet hücresi bulunduğu, tuzlusuya adapte olan sindirim kanalında Akuaporin 3'ü eksprese eden goblet hücrelerinin arttığı ve bu hücrelerin şekil olarak daha geniş veya daha yuvarlak olduğu bildirilmiştir. Akuaporin 3'ün bu hücrelerden mukus sıvısı salgılanmasında görev aldığı ifade edilmiştir (Lignot vd. 2002). Cutler vd. (2007)'nin yaptığı çalışmada yine yılan balığında Akuaporin 3 proteini, bağırsakta epitelyal hücre tabakasında bulunan büyük makrofaj benzeri hücrelerde pozitif olarak işaretlenmişlerdir. Gökkuşluğu alabalığı sindirim kanalı dokusunda Akuaporin 3 yoğunluğunun tuzlu su ortamında daha yoğun olduğu belirtilmiştir (Kim vd. 2016). Anadrom olan Nehir Kirpi balığı (Takifugu obscurus) farklı tuzluluklara maruz bırakıldıktan sonra sindirim kanalında bulunan Akuaporin 3 proteinin tuzluluğa paralel olarak artış gösterdiği bildirilmiştir (Jeong vd. 2014). Bu sonuçlara paralel olarak yaptığımız bu çalışmada da sindirim kanalı dokusunda bulunan Akuaporin 3'ün göl ortamında daha yoğun olduğu ve literatür ile uyumlu olduğu belirlendi. Ayrıca Akuaporin 3 sadece mukoza tabakasındaki epitelyal hücrelerde işaretlenmiş diğer hücre tiplerinde herhangi bir işaretlenme gözlenmemiştir. Van Gölü acısu özelliği ile daha önce çalışılan alanlardaki akuatik ortamlardan oldukça farklıdır. Aynı zamanda göldeki tuzluluk bilinenin aksine sadece NaCl'den kaynaklanmaz (Çiftçi vd. 2008). Van balığı solungaç dokularındaki akuaporin 3'ün sadece mitokondrice zengin hücrelerinde ve göl örneklerinde işaretlenmesi artan tuzluluğa adaptasyonu için gerekli olduğu düşünülmektedir. Teleostlarda osmoregülasyon, solungaçlar, bağırsak ve böbreğin entegre olarak iyon ve su taşıma aktiviteleri ile sağlanır. Van balığı böbrek dokusunda göl ortamında yoğun görülen Akuaporin 3'ün dehidrasyonu önlemede rolü olduğu söylenebilir. Akuaporin 3 transmembran proteinin Van balığı bağırsağında göl ortamından örneklenen balıklarda yüksek olmasının osmoregülasyondan kaynaklı olabileceği düşünülmektedir.

Sonuç olarak; Van balığında osmoregülasyonda rol oynayan farklı dokularda incelenen Akuaporin 3 transmembran protein yoğunluğunun ve lokalizasyonun farklı sucul alanlarda değişim gösterdiği gözlenmiştir. Bu nedenle incelenen Akuaporin 3 proteinin balığın farklı sucul alanlardaki adaptasyonunda önemli bir role sahip olduğu söylenebilir.

## Teşekkür

Bu çalışma Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından FDK-2021-9672 no'lu proje ile desteklenmiştir.

## Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

## Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Kaynaklar, Araştırma, Analiz, Yazma

Yazar 2: Proje yöneticisi, Fikir sahibi, 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.

## 5. Kaynaklar

- Agre, P., Borgnia, M. J., Yasui, M., Neely, J. D., Carbrey, J., Kozono, D. and King, L.S., 2001. Discovery of the aquaporins and their impact on basic and clinical physiology. *Academic Press*, 51(1),1-38.  
[https://doi.org/10.1016/S1063-5823\(01\)51003-0](https://doi.org/10.1016/S1063-5823(01)51003-0)
- Akkuş, M., Sarı, M., Ekmekçi, F.G. and Yoğurtçuoğlu, B., 2021. The discovery of a microbialite-associated freshwater fish in the world's largest saline soda lake, Lake Van (Turkey). *Zoosystematics and Evolution*, 97(1), 181-189.  
<https://doi.org/10.3897/zse.97.62120>
- Bancroft, J.D. and Gamble, M., 2008. *Theory and practice of histological techniques*. Elsevier health sciences: Beijing, China, 131-140.
- Brunelli, E., Mauceri, A., Salvatore, F., Giannetto, A., Maisano, M. and Tripepi, S., 2010. Localization of aquaporin 1 and 3 in the gills of the rainbow wrasse *Coris julis*. *Acta Histochemica*, 112(3), 251-258.  
<https://doi.org/10.1016/j.acthis.2008.11.030>
- Cerdà, J. and Finn, R.N., 2010. Piscine aquaporins: an overview of recent advances. *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological Genetics and Physiology*, 313(10), 623-650.  
<https://doi.org/10.1002/jez.634>
- Chutia, P., Das, M., Goswami, N., Choudhury, M., Saha, N. and Sarma, K., 2022. Deciphering the role of aquaporin 1 in the adaptation of the stinging catfish *Heteropneustes fossilis* to environmental hypertonicity by molecular dynamics simulation studies. *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*, 41, 1-15.  
<https://doi.org/10.1080/07391102.2022.2027272>
- Cuesta, A., Meseguer, J. and Esteban, M.Á., 2019. Fish Osmoregulation. In Cuesta, A., Meseguer, J., Esteban,

- M. A (Ed.). Chapter 1. Immune and Osmoregulatory System Interaction. (1-34.). CRC Press: Boca Raton, USA.
- Cutler, C.P., Martinez, A.S. and Cramb, G., 2007. The role of aquaporin 3 in teleost fish. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 148(1), 82-91. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2006.09.022>
- Çiftçi, Y., Işık, M.A., Alkeveli, T. and Yeşilova, Ç., 2008. Van Gölü havzasının çevre jeolojisi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 32(2), 45-77.
- Danulat, E. and Kempe, S., 1992. Nitrogenous waste excretion and accumulation of urea and ammonia in *Chalcalburnus tarichi* (Cyprinidae) endemic to Lake Van (Eastern Turkey). *Fish Physiology and Biochemistry*, 9(5), 377-386. <https://doi.org/10.1007/BF02274218>
- Engelund, M.B. and Madsen, S., 2011. The role of aquaporins in the kidney of euryhaline teleosts. *Frontiers in Physiology*, 2, 51-56. <https://doi.org/10.3389/fphys.2011.00051>
- Engelund, M.B. and Madsen, S., 2015. Tubular localization and expressional dynamics of aquaporins in the kidney of seawater-challenged Atlantic salmon. *Journal of Comparative Physiology B*, 185, 207-223. <https://doi.org/10.1007/s00360-014-0878-0>
- Ishibashi, K., Hara, S. and Kondo, S., 2009. Aquaporin water channels in mammals. *Clinical and Experimental Nephrology*, 13(2), 107-117. <https://doi.org/10.1007/s10157-008-0118-6>
- Jeong, S.Y., Kim, J.H., Lee, W.O., Dahms, H.U. and Han, K.N., 2014. Salinity changes in the anadromous river pufferfish, *Takifugu obscurus*, mediate gene regulation. *Fish Physiology and Biochemistry*, 40, 205-219. <https://doi.org/10.1007/s10695-013-9837-z>
- Kim, N.N., Choi, Y.J., Lim, S.G., Kim, B.S. and Choi, C.Y., 2016. Effects of recombinant aquaporin 3 and seawater acclimation on the expression of aquaporin 3 and 8 mRNAs in the parr and smolt stages of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Ocean and Polar Research*, 38(2), 103-113. <http://dx.doi.org/10.4217/OPR.2016.38.2.103>
- Knepper, M. A., Wade, J. B., Terris, J., Ecelbarger, C. A., Marples, D., Mandon, B. and Nielsen, S., 1996. Renal aquaporins. *Kidney International*, 49(6), 1712-1717. <https://doi.org/10.1038/ki.1996.253>
- Lignot, J.H., Cutler, C.P., Hazon, N. and Cramb, G., 2002. Immunolocalisation of aquaporin 3 in the gill and the gastrointestinal tract of the European eel *Anguilla anguilla* (L.). *Journal of Experimental Biology*, 205(17), 2653-2663. <https://doi.org/10.1242/jeb.205.17.2653>
- Marshall W.S. and Grosell M., 2005. Ion transport, osmoregulation, and acid-base balance. *The Physiology of Fishes* (3rd ed.), edited by, Evans D, Claiborne JB. Boca Raton, FL: CRC, 2006.
- Oğuz, A.R., 2015. Histological changes in the gill epithelium of endemic Lake Van Fish (*Chalcalburnus tarichi*) during migration from alkaline water to freshwater. *North-Western Journal of Zoology*, 11(1), 51-57.
- Oğuz, A.R., 2018. Development of osmoregulatory tissues in the Lake van fish (*Alburnus tarichi*) during larval development. *Fish Physiology and Biochemistry*, 44(1), 227-233. <https://doi.org/10.1007/s10695-017-0427-3>
- Salati, A.P., Ferrando, S., Movahedinia, A., Gambardella, C. and Gallus, L., 2014. Effect of different levels of salinity on immunolocalization of Na<sup>+</sup>-K<sup>+</sup> ATPase and Aquaporin 3 in kidney of common carp *Cyprinus carpio*. *Iranian Journal of Veterinary Research, Shiraz University*, 15(1), 45-49.
- Şen, F., Paruğ, Ş.Ş. and Elp. M., 2015. İnci Kefali'nin (*Alburnus tarichi*, Güldenstädt, 1814) dünü, bugünü ve geleceği üzerine projeksiyonlar. *Yuzuncu Yıl University Journal of Agricultural Sciences*, 25(3), 347-356. <https://doi.org/10.29133/yyutbd.236420>
- Tipsmark, C.K., Sørensen, K. J. and Madsen, S.S., 2010. Aquaporin expression dynamics in osmoregulatory tissues of Atlantic salmon during smoltification and seawater acclimation. *Journal of Experimental Biology*, 213(3), 368-379. <https://doi.org/10.1242/jeb.034785>
- Watanabe, S., Kaneko, T. and Aida, K., 2005. Aquaporin-3 expressed in the basolateral membrane of gill chloride cells in Mozambique tilapia *Oreochromis mossambicus* adapted to freshwater and seawater. *Journal of Experimental Biology*, 208(14), 2673-2682. <https://doi.org/10.1242/jeb.01684>
- William, K.F., Au, D.W. and Wong, C. K., 2006. Characterization of ion channel and transporter mRNA expressions in isolated gill chloride and pavement cells of seawater acclimating eels. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 346(4), 1181-1190. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2006.06.028>





## Yanıt Yüzey Metodolojisi Kullanılarak Brassica oleracea var. capitata L. (Lahana) Bitki Ekstresinin Mikroenkapsülasyon ve Karakterizasyon Çalışmaları

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 20.02.2023

Kabul/Accepted: 26.01.2024

Yayımlandı/Published: 27.02.2024

### Microencapsulation and Characterization Studies of Brassica oleracea var. capitata L. (Cabbage) Plant Extract Using Response Surface Methodology

Elif KÖKSAL<sup>1\*</sup>, Fethiye GÖDE<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Bölümü, 32000, Isparta, Türkiye

<sup>2</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, 32000, Isparta, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

Çalışmamızda S-metilmetyonin (vitamin U) etken maddesini içeren lahana bitki ekstraktının, Jelatin-Arap zamkı (GE-GA) ve Jelatin-Sodyum aljinattan(GE-SA) oluşan iki farklı doğal polimerik duvar materyali kullanılarak kompleks koaservasyon yöntemiyle başarılı bir şekilde mikroenkapsüle edilmiştir. Kapsülleme verimliliği koşulları optimize etmek için bir yanıt yüzeyi metodolojisi (RSM) kullanılmıştır. Mikroenkapsülenmiş lahana ekstraktının kapsülleme verimliliği farklı polimerler kullanılarak iki değişken açısından araştırılmıştır: çekirdek madde miktarı(g) ve çapraz bağlayıcı miktarı (mL). Deneysel sonuçta elde edilen en yüksek verimler jelatin- arap zamkı için %67,72 ve jelatin-sodyum aljinat için de %54,68 olarak bulunmuştur. En yüksek verimlilik elde edilen mikrokapsüllerin morfolojik yapıları optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Etken maddenin ve mikrokapsülasyonda kullanılan bileşiklerin sistemdeki varlığının belirlenmesi ve elde edilen mikrokapsüllerde etken maddenin spektrum değişiminin gözlenmesi için Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) kullanılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** S-metilmetyonin (vitamin U); Mikroenkapsülasyon; Yanıt Yüzey Metodolojisi; Enkapsülasyon Verimliliği.

#### Abstract

In our study, cabbage plant extract containing the active ingredient S-methylmethionine (vitamin U) was successfully microencapsulated by complex coacervation method using two different natural polymeric wall materials consisting of Gelatin-Gum Arabic (GE-GA) and Gelatin-Sodium alginate (GE-SA). A response surface methodology (RSM) was used to optimize the encapsulation efficiency conditions. The encapsulation efficiency of the microencapsulated cabbage extract was investigated using different polymers in terms of two variables: the amount of core material (g) and the amount of crosslinker (mL). The highest yields obtained as a result of the experiments were 67.72% for gelatin-gum arabic and 54.68% for gelatin-sodium alginate. The morphological structures of the microcapsules with the highest efficiency were examined by optical microscope and scanning electron microscope (SEM). The Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) was used to determine the presence of the active substance and the compounds used in microencapsulation in the system and to observe the spectrum change of the active substance in microcapsules.

**Keywords:** S-Methylmethionine (Vitamin U); Microencapsulation; Response Surface Methodology; Encapsulation Efficiency

#### 1. Giriş

Son yıllarda vücutta fizyolojik etkiler sağlayan, bazı hastalıkların oluşma riskini azaltan, koruyucu, önleyici ve tedavi edici özellikleri olan fonksiyonel gıdalara kullanma eğilimi artmıştır. Besleyici bileşikler açısından yüksek değere sahip olan lahana bitkisi bu fonksiyonel gıda besinleri içerisinde yer almaktadır. Brassicaceae familyasının en çeşitli türlerinden birisi olan lahana (Brassica oleracea var. capitata L.) bitkisi, geniş adaptasyon kabiliyeti, maliyet açısından uygun olmasının yanında içerdiği fitokimyasallar, polifenoller,

glukosinolatlar, karotenoidler, vitaminler sayesinde insan diyetinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Warwick et al. 2006, Jahangir et al. 2009, Cvetković et al. 2019). Lahana bitkisi, yüksek antioksidan ve antibakteriyel, anti-inflamatuar ve anti-oksidatif biyoaktiviteleri ve sağlık açısından faydaları nedeniyle geleneksel tıpta da ciddi bir yere sahiptir (Şamec et al. 2011, Williams et al. 2013, Siddiqui 2019). Bununla birlikte yapılan tıbbi araştırmalarda, peptik ülser tedavisinde lahana bitkisinin olumlu etkileri olduğunu bildirmiştir. Peptik ülser, gastrointestinal hastalıklar arasında ciddi bir hastalık olarak bilinmektedir. Bu hastalıkların tedavisinde birçok

tıbbi ilaç kullanılmaktadır. Alternatif tedaviler olarak tıbbi değeri olan bitkilerin bu tür hastalıkların önlenmesi ve iyileştirici özelliklerine yönelik araştırmalar yapılmaktadır. U vitamini (S-metilmetyonin), gastrointestinal mukoza üzerindeki faydalı etkileri ile iyileştirici özelliğine sahip ve doğal fizyolojik olarak aktif bileşikler grubuna ait maddedir. Özellikle Brassicaceae familyası bitkilerinde (beyaz lahana, karalahana, brokoli vb.) bulunan bu madde, iyi bir anti-ülser faktörü kaynağı olarak bilinmektedir (Kim et al. 2010). Yapılan çalışmalarda bitkiye özgü aktif bileşen S-metilmetyonin varlığının yanı sıra lahana bitkisinde L-metyonin, L-glutamin, L-histidin, L-lisin, aspartik asit gibi çeşitli aminoasitlerin de olduğu belirtilmiştir (Song vd. 2017; Köksal vd., 2023).

Fonksiyonel özelliklere sahip bitkilerde yer alan bu biyoaktif bileşenler çoğunlukla kararsız bir yapıya sahiptir ve dış çevresel faktörlerde (ısı, nem, sıcaklık, oksijen gibi) kolayca bozulma reaksiyonları gösterebilmektedir. Bu nedenle bu önemli aktif bileşenlerin dış ortam koşullarından korunması ve uzun süreli, etkili ve amaca yönelik kullanımlarını sağlamak önemlidir. Mikroenkapsülasyon tekniği bu bileşenlerin korunması için yararlanılan en önemli tekniklerden birisidir. Mikroenkapsülasyon, mikron boyutundaki katı partikülleri veya sıvı veya gaz damlacıklarını polimerik, inert bir kabuk içine yerleştirmek, onları dış ortamdan koruyan, izole eden ve aktif bileşiğin istenilen koşullar altında kontrollü salınımını sağlayan bir işlem olarak tanımlanır (Dubey et al. 2009, Jyothi et al. 2010, Devi et al. 2012, Pérez-Limiñana et al. 2014, Tözüm 2019, Köksal et al. 2022). Mikrokapsüller çekirdek (aktif) bileşen ve kabuk veya duvar (kaplama) malzemesi olarak iki kısımdan oluşur (Nesterenko et al. 2014, Moral vd. 2021). Çekirdek malzeme mikrokapsüllenecek aktif bileşeni içerirken, kabuk malzemesi ise çekirdek malzemeyi çevreleyen ve aktif bileşeni koruyan malzemedir. Çekirdek malzemenin kapsülleme için farklı teknikler vardır.

Mikrokapsüle edilecek çekirdek malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak kullanılan teknikler de değişmektedir (Kwak, 2014, Siddiqui, 2019). Bu çalışmada faz ayrımı olarak tanımlanan bir fiziko-kimyasal yöntem olarak bilinen kompleks koaservasyon yöntemi kullanılarak mikroenkapsülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kompleks koaservasyon metodu esas olarak iki veya daha fazla zıt yüklü polimer çözeltisi arasındaki elektrostatik etkileşimler yoluyla meydana gelen faz ayrımına dayanan bir yöntem olarak bilinmektedir (Wang et al. 2014, Bayram vd. 2020; Köksal

vd. 2022). Kompleks koaservasyon yönteminde pH, karıştırma hızı, sıcaklık ve konsantrasyon kapsüllemeyi etkileyen önemli faktörlerdir (Eghbal and Choudhary 2018, Timilsena et al. 2019, Moral vd. 2021).

Yanıt yüzeyi metodolojisi (RSM), süreç değişkenlerinin sonuç ve deneysel optimizasyon üzerindeki etkilerini belirlemek için kullanılır. Bu yöntem, deney tasarlamayı, deneysel verilerin yanıtlar (bağımlı değişkenler) üzerindeki etkilerinin belirlenmesini ve bu etkilerin matematiksel modellerle ifade edilmesini ve parametrelerin optimizasyonunu içerir (Pilkington et al. 2014, Li et al. 2017, Köksal et al. 2022). Çalışmamızda öncelikli olarak fonksiyonel özelliklere sahip olduğu bilinen lahana bitki ekstresinin mikroenkapsülasyon prosesini etkileyen iki bağımsız değişkenin (çekirdek miktarı ve çapraz bağlayıcı miktarı) yanıt yüzey metodolojisi (RSM) kullanılarak ile oluşturulan deney setinden yararlanarak mikroenkapsülasyon, enkapsülasyon verimliliği ve karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Deneysel proseste kullanılan kimyasallar

Çalışmada mikrokapsül çekirdek (etken) maddesi olarak kullanılan *Brassica* sebzeleri, lahana (*Brassica oleracea* var. *capitata* L.) yerel bir marketten satın alındı. Çalışmada aktif bileşen (etken madde) olan DL- Metionin Metilsülfonyum Klorür (S-metilmetyonin, vitamin -U) TCI'den (Tokyo Chemical Industry, Japonya) temin edilmiştir. Mikroenkapsülasyon prosesinde kullanılan kimyasal maddeler Çizelge 1'de ve kullanılan kimyasal maddelerin kimyasal formülleri Çizelge 2'de gösterilmiştir.

Lahana bitki ekstraktının enkapsülasyonundaki deneysel tasarım, yanıt yüzey metodolojisi ile Miniatab16 yazılımı (Geçerlilik tarihi: Süresiz) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel tasarım oluşturulurken kompleks koaservasyon sürecini etkileyebilecek iki bağımsız değişken seçilmiştir. Bunlar; çekirdek (etken madde) miktarı (5.000-7.000 g) ve çapraz bağlayıcı miktarıdır (3 mL-5mL).

### 2.3. Mikroenkapsülasyon prosesi

Çekirdek malzemesi olarak lahana bitki ekstresinin ekstraksiyon prosesi bir önceki çalışmamızdan yararlanılarak sokslet ekstraksiyon metodu uygulanarak hazırlanmıştır (Köksal et al. 2023). Lahana bitki ekstraktı içeren mikrokapsüller küçük değişikliklerle literatürden yararlanarak kompleks koaservasyon yöntemine göre hazırlandı (Köksal ve Göde 2017, Kim et al. 2019). Duvar


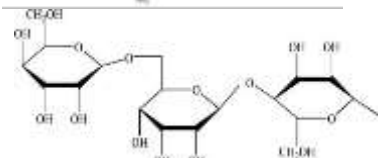
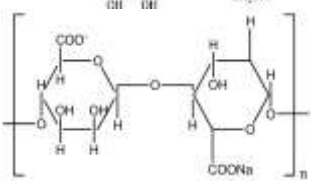
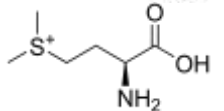
malzemesi olarak iki farklı polimer karışımı hazırlanmıştır.

**Çizelge1.** Mikroenkapsülasyon prosesinde kullanılan kimyasal maddeler ve kullanım özellikleri

Kimyasal Madde	Marka	Kullanım amacı
Jelatin	Sigma-Aldrich Co. ( St. Louis, MO, ABD)	Mikroenkapsülasyon prosesinde duvar materyali olarak kullanılmıştır.
Arap Zamkı	Sigma-Aldrich Co. ( St. Louis, MO, ABD)	Mikroenkapsülasyon prosesinde duvar materyali olarak kullanılmıştır.
Sodyum Aljinat	Sigma-Aldrich Co. ( St. Louis, MO, ABD)	Mikroenkapsülasyon prosesinde duvar materyali olarak kullanılmıştır.
Gluteraldehit	Sigma-Aldrich Co. ( St. Louis, MO, ABD)	Mikroenkapsül duvarının sertlik özelliği kazanması için çapraz bağlayıcı olarak kullanılmıştır.
Asetik Asit	Sigma-Aldrich Co. ( St. Louis, MO, ABD)	pH ayarlaması için kullanılmıştır.

## 2.2. Deneysel tasarım

**Çizelge2.** Mikroenkapsülasyon prosesinde kullanılan kimyasal maddelerin kimyasal yapıları

Kimyasal Maddeler	Kimyasal yapısı
Jelatin	
Arap Zamkı	
Sodyum Aljinat	
S-Metilmetyonin	

Birinci polimer karışımı Jelatin-Sodyum aljinat (3.5:1) kullanılarak hazırlandı ve ikinci polimer karışımı Jelatin-Arap zamkı (1:1) kullanılarak hazırlandı. Bu oranlar benzer çalışmalardan yararlanarak oluşturulmuştur ve koaservat oluşumu için tüm deneyler için polimerlerin optimize ağırlık oranları korunmuştur. Çekirdek malzeme (lahana bitkisi özü), Jelatin-Arap zamkı ve Jelatin-Sodyum

aljinat polimer karışım çözeltilerine ayrı ayrı damla damla ilave edildi. Karışımlar 50°C, 1500 rpm'de 15 dakika homojenize edildi. Emülsiyonların pH'ı, %10 (%v/v) asetik asit ilave edilerek Jelatin-Arap zamkı solüsyonu için 4-4,5'e ve Jelatin/Sodyum aljinat solüsyonu için 3,5-3,75'e düşürüldü. Bu pH değerleri, polimerler ile kompleks koaservasyon oluşumunu sağlayan izoelektronik noktalar arasındaki elektrostatik etkileşime göre belirlendi (Devi et al. 2012, Gomez-Estacaab et al. 2016, Köksal ve Göde 2017, Köksal vd. 2022). Sistemlerin sıcaklığı buzlu su banyosu yardımıyla 5-10 °C'ye düşürüldü ve çözeltiler manyetik karıştırıcı ile 500 rpm'de 1 saat karıştırıldı. Daha sonra her sisteme çapraz bağlayıcı olarak 3 mL glutaraldehit ilave edildi ve aynı koşullarda bir saat daha karıştırıldı. Elde edilen mikrokapsüller daha sonra deiyonize su ile yıkandı ve 48 saat dondurularak (freeze dryer) kurutuldu. Nihai mikrokapsüller daha sonra analiz için buzdolabında saklandı.

## 2.4. Mikrokapsüllerin karakterizasyonu

Yanıt yüzey metodolojisi yardımıyla oluşturulan deney setinden en yüksek verimlilik elde edilen her iki polimer kompleksinde hazırlanan mikrokapsüllerin optik mikroskop (Bueco, BM-2000) ve SEM cihaz (FEI-Quanta FEG250) görüntüleri alınarak mikrokapsüllerin kabuk, yüzey morfolojileri hakkında gözlemler yapılmıştır. JASCO FT/IR 4700 spektrofotometre cihazı ile FTIR spektroskopisi, üretilen mikrokapsüllerde duvar ve çekirdek malzemelerinin varlığını belirlemek, kimyasal yapıları ve etkileşimlerini incelemek için kullanıldı.

## 2.5. Enkapsülasyon verimliliği

Deney tasarımındaki parametrelere göre deneyler sonucunda elde edilen mikrokapsüllerin verimi Denklem 1 yardımıyla gravimetrik olarak hesaplanmıştır. Enkapsülasyon verimliliği (EV) benzer çalışmalardan yararlanılarak belirlenmiştir (Ocak 2012, Sittipummonkol et al. 2019). Denklemde toplam ekstrakt miktarı deney setine göre kullanıldığı bilinen ekstrakt miktarını (Ocak 2012), yüzey ekstrakt miktarı ise kapsül ile yüzey arasında kalan kapsüllenmemiş ekstrakt miktarını temsil etmektedir.

$$EV\% = \frac{T_{EM} - Y_{EM}}{T_{EM}} \quad (1)$$

$T_{EM}$ : Toplam ekstrakt miktarı

$Y_{EM}$ : Yüzey ekstrakt miktarı

Yüzey ekstraktı miktarı hesaplanırken kapsül numunesi 50 mL n-hekzan içeren bir erlenmeyer şişesine

yerleştirildi ve karışım kapsül tahribatı ve yapısı bozulmadan 3 dk hafifçe çalkalandı. Bu prosedür üç kez tekrarlandı. Daha sonra çözelti filtre kağıdı ile süzülme ve n-hekzan döner buharlaştırıcı kullanılarak uzaklaştırıldı. Bu işlem deney tasarımındaki tüm mikrokapsül numuneleri için ayrı ayrı uygulanmıştır.

### 3. Bulgular

#### 3.1. Deneysel tasarımın oluşturulması

Lahana bitki ekstraktının iki farklı polimer kompleksinde mikrokapsülleme etkinliği yanıt yüzey metodolojisi ile iki bağımsız değişken kullanılarak oluşturulan deney seti Çizelge 3’de verilmiştir.

Yanıt yüzey metodolojisi ile iki faktörlü ve on üç adet deney seti elde edilmiştir. On üç adet deney için belirtilen koşullar altında Jelatin- Sodyum aljinat ve Jelatin-Arap zamkı kompleksinde sırasıyla denklem 2 ve denklem 3 yardımıyla hesaplanan deneysel verimler (%EV) Çizelge 3’de verilmiştir.

Deneysel %EV değerleri yanıt yüzey metodolojisi ve varyans analizi (ANOVA) ile analiz edildi. ANOVA test sonuçları Çizelge 4 ve Çizelge 5’de gösterilmiştir. Belirlenen iki değişkenin deneysel verimlilik üzerindeki etkileri 3D yüzey grafikleri ile Şekil 1 ve Şekil 2’de gösterilmiştir.

$$\%EV = 68,4 - 18,44 * A + 19,23 * B + 0,742 * A * A - 4,099 * B * B + 2,305 * A * B \quad (2)$$

$$\%EV = -115,0 + 37,8 * A + 12,78 * B - 2,399 * A * A - 1,004 * B * B - 0,167 * A * B \quad (3)$$

iki farklı polimer kompleksinde hazırlanan mikrokapsül numunelerinin ANOVA sonuçlarına bakıldığında incelendiğinde, her iki mikrokapsül numuneleri için doğrusal çekirdek miktarı (p<0,050) ve çapraz bağlayıcı (p<0,050) anlamlılık önemlilik göstermektedir. Modelde Jelatin-Sodyum aljinat mikrokapsül numunesinde çekirdek miktarı ve çapraz bağlayıcı miktarı kareleri anlamlılık önemlilik göstermektedir (p<0,050). Bununla birlikte Jelatin/Arap zamkı mikrokapsül numunesinde çekirdek miktarı kareleri önemli iken (p<0,050), çapraz bağlayıcı karesi anlamlı değildir (p>0,050).

Model uyumsuzluğu uyumsuzluk değeri p değerleri Jelatin-Sodyum aljinat mikrokapsül numunesi için 0,145, Jelatin-Arap zamkı mikrokapsül numunesi için ise 0,078 gösterdi bulunmuştur. Bu durum model ile verilerin uyduğuna göstermektedir (Bayram vd. 2020, Moral vd.

2021). R<sup>2</sup> değerleri sırasıyla %99,42 ve %91,86 bulunmuştur.

**Çizelge 3.** RSM deney tasarımı ile iki bağımsız değişkenli ve deneysel olarak elde edilen %EV değerleri

Deney No	Çekirdek Miktarı (g)	Çapraz Bağlayıcı (mL)	Enkapsülasyon verimliliği (% EV) Jelatin- Sodyum Aljinat	Enkapsülasyon verimliliği (%EV) Jelatin- Arap Zamkı
1	7,00000	4,00000	51,31	60,28
2	6,00000	3,00000	46,35	51,78
3	8,41421	4,00000	54,68	63,58
4	7,00000	2,58579	40,28	54,58
5	5,58579	4,00000	51,64	53,14
6	7,00000	4,00000	51,65	62,78
7	8,00000	5,00000	54,64	63,47
8	8,00000	3,00000	44,25	58,78
9	6,00000	5,00000	47,52	57,14
10	7,00000	4,00000	51,82	62,49
11	7,00000	4,00000	51,30	62,48
12	7,00000	4,00000	51,98	62,85
13	7,00000	5,41421	46,68	67,72

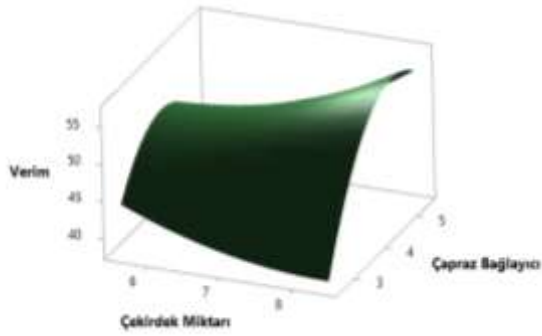
**Çizelge 4.** Lahana ekstraktının kapsülleme verimliliği Jelatin-Sodyum aljinat için ANOVA sonuçları

	DF	Ardışık kareler toplamı	Kareler toplamı	F-Değeri	P-Değeri
<b>Model</b>	5	213,587	42,717	238,39	0,000
<b>Doğrusal</b>	2	63,957	31,979	178,46	0,000
Çekirdek Miktarı	1	10,856	10,856	60,58	0,000
Çapraz Bağlayıcı	1	53,101	53,101	296,34	0,000
<b>Kare</b>	2	128,378	64,189	358,22	0,000
Çekirdek Miktarı*Çekirdek Miktarı	1	3,825	3,825	21,35	0,002
Çapraz Bağlayıcı*Çapraz Bağlayıcı	1	116,854	116,854	652,12	0,000
<b>2-Yönlü Etkileşim</b>	1	21,252	21,252	118,60	0,000
Çekirdek Miktarı*Çapraz Bağlayıcı	1	21,252	21,252	118,60	0,000
Hata	7	1,254	0,179		
Uyum Eksikliği	3	0,886	0,295	3,20	<b>0,145</b>
Saf Hata	4	0,369	0,092		
Toplam	12	214,842			
<b>S</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup>(düzeltilmiş)</b>	<b>R<sup>2</sup>(tahmini)</b>		
0,423308	99,42%	99,00%	96,80%		

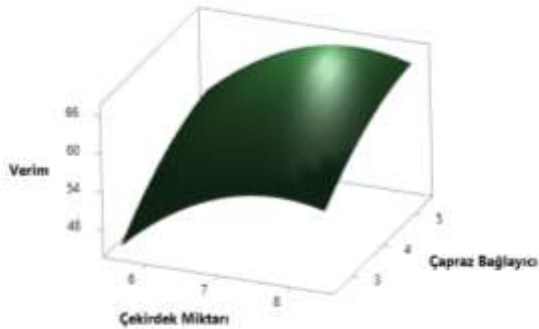
**Çizelge 5.** Lahana ekstraktının kapsülleme verimliliği Jelatin-Arap zamkı için ANOVA sonuçları

	DF	Ardışık kareler toplamı	Kareler toplamı	F-Değeri	P-Değeri
<b>Model</b>	5	244,654	48,931	15,81	0,001
<b>Doğrusal</b>	2	201,141	100,571	32,49	0,000
Çekirdek Miktarı	1	98,662	98,662	31,88	0,001
Çapraz Bağlayıcı	1	102,479	102,479	33,11	0,001
<b>Kare</b>	2	43,400	21,700	7,01	0,021
Çekirdek Miktarı*Çekirdek Miktarı	1	40,024	40,024	12,93	0,009
Çapraz Bağlayıcı*Çapraz Bağlayıcı	1	7,007	7,007	2,26	0,176
<b>2-Yönlü Etkileşim</b>	1	0,112	0,112	0,04	0,854
Çekirdek Miktarı*Çapraz Bağlayıcı	1	0,112	0,112	0,04	0,854
Hata	7	21,666	3,095		
Uyum Eksikliği	3	17,061	5,687	4,94	<b>0,078</b>
Saf Hata	4	4,605	1,151		
Toplam	12	266,320			
<b>S</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup>(düzeltilmiş)</b>	<b>R<sup>2</sup>(tahmini)</b>		
1,75930	91,86%	86,05%	51,74%		

Belirlenen iki değişkenin deneysel verimlilik üzerindeki etkileri 3D yüzey grafikleri ile Şekil 1 ve Şekil 2'de gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde her iki mikrokapsül numuneleri için çapraz bağlayıcı miktarının deneysel verimi arttırdığı görülmüştür. Öte yandan çekirdek miktarının artmasıyla Jelatin-Sodyum aljinat mikrokapsül verimliliğinde azalma (Şekil 1), Jelatin-Arap zamkı mikrokapsül verimliliğinde artma gözlenmiştir (Şekil 2).



Şekil 1. Üç boyutlu tepki yüzey çizimleri (jelatin- sodyum aljinat için): % EV (Z eksen) ile çekirdek madde (g, X eksen) ve çapraz bağlayıcı miktarı (mL, Y eksen) grafiği



Şekil 2. Üç boyutlu tepki yüzey çizimleri (jelatin- arap zamkı için): % EV (Z eksen) ile çekirdek madde (g, X eksen) ve çapraz bağlayıcı miktarı (mL, Y eksen) grafiği

### 3.2. Mikrokapsüllerin morfolojik analizleri

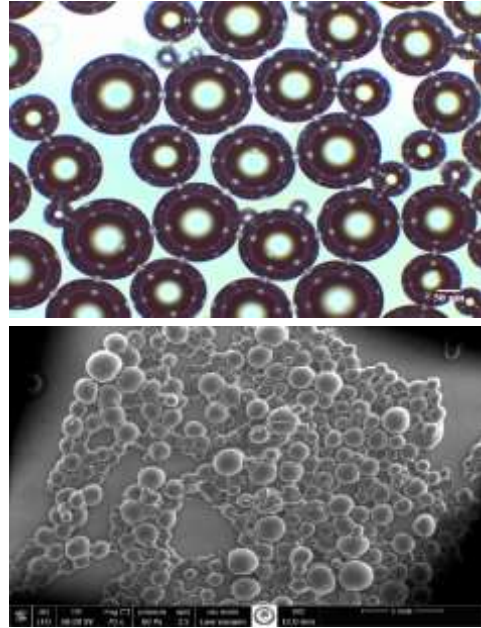
Yanıt yüzey metodolojisinden oluşturulan deney setinden elde edilen değerler kullanılarak en yüksek verimliliğe sahip mikrokapsüllerin morfolojik analizi optik mikroskop ve SEM ile yapılmıştır. Şekil 3'te Jelatin-Arap zamkı mikrokapsüllerine ait, Şekil 4'te ise Jelatin-Sodyum aljinat mikrokapsül numunelerine ait optik mikroskop ve SEM görüntüleri verilmiştir.

Mikrokapsül numunelerinin morfolojik görüntüleri incelendiğinde (Şekil 3 ve Şekil 4), mikrokapsüllerin genellikle küresel şeklinde olduğu gözlenmiştir. Mikrokapsüllerin yüzey morfolojilerinin homojen ve çeşitli boyutlarda genel olarak 20-100 µm arasında

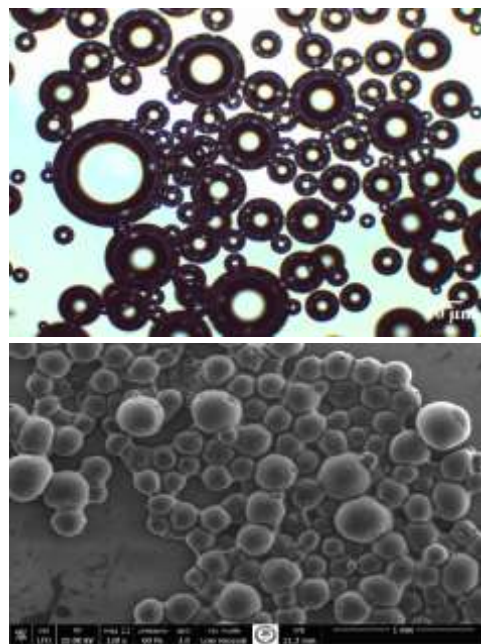
olduğu görülmüştür. Mikrokapsüllerin SEM görüntülerindeki farklı boyutlarda mikrokapsüllerin oluşumu ve kapsüllerin kümelenmiş görünümü kurutma ve ayırma işlemlerinden kaynaklanmıştır.

### 3.3. FTIR analizleri

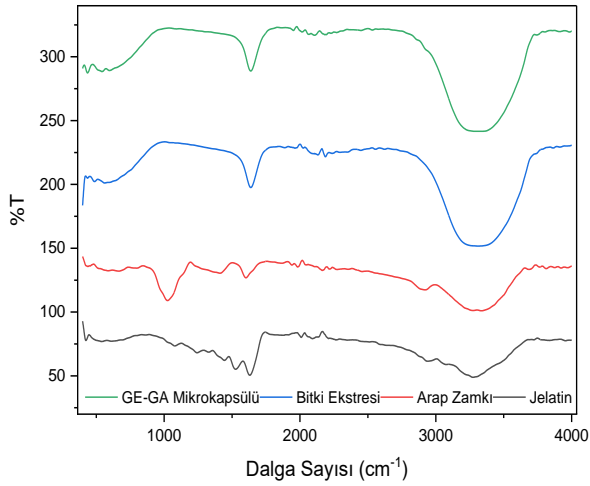
Jelatin-Sodyum aljinat ve Jelatin-Arap zamkı mikrokapsüllerin, lahana bitkisi ekstresinin, jelatin, sodyum aljinat ve arap zamkı duvar malzemelerinin FTIR spektrumları Şekil 5-7'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Jelatin-Arap zamkı mikrokapsüllerine ait (a) optik mikroskop; (b) SEM görüntüleri



Şekil 4. Jelatin-Sodyum aljinat mikrokapsüllerine ait (a) optik mikroskop; (b) SEM görüntüleri

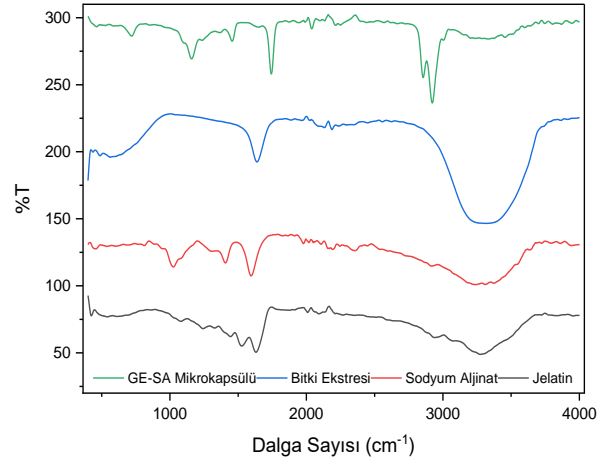


**Şekil 5.** Jelatin-Arap zamkı (GE-GA) mikrokapsül, lahana bitki ekstresi, Jelatin ve Arap zamkı duvar polimerlerine ait IR spektrum grafiği

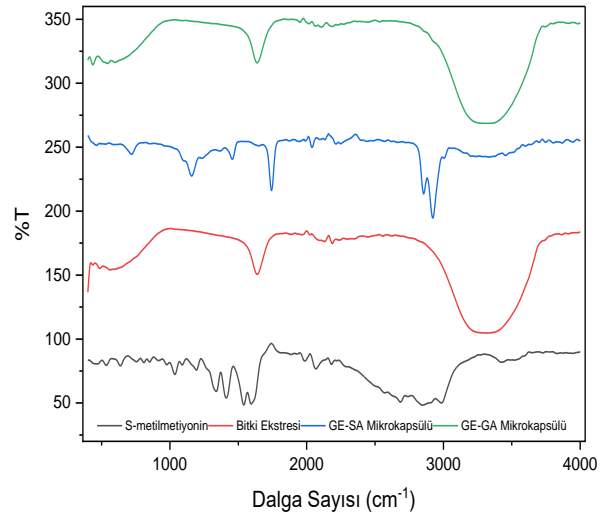
Şekil 5'teki IR spektrumları incelendiğinde Jelatin ve Arap zamkında  $3000-3500\text{ cm}^{-1}$  aralığında geniş bir bant gözlenmiştir. Bu bantlar, yapıdaki amino ve hidroksil gruplarının gerilme titreşimine karşılık gelmektedir. Jelatin- Arap zamkı mikrokapsülün IR spektrumunda, mikrokapsülde jelatin ve arap zamkı varlığını destekleyen yaklaşık  $3250\text{ cm}^{-1}$  civarında geniş bir bant gözlemlendi. Lahana ekstraktının  $2900\text{ cm}^{-1}$  civarında C-H gerilme titreşimine karşılık gelen bantlar, her iki mikrokapsül yapısında da benzer bantlarda gözlemlendi. Ekstraktın yaklaşık  $1600\text{ cm}^{-1}$  bandı, Zhang vd. (2011) tarafından da gözlemlendiği gibi, yapıdaki amid grubuna atanabilir. Arap zamkı spektrumunda  $2900\text{ cm}^{-1}$ 'de görülen zayıf bant, negatif yüklü karboksilik grupların karakteristik zirvesidir. Jelatinin pozitif yüklü amino gruplarının ve Arap zamkının negatif yüklü karboksil gruplarının koaservasyonunda, Jelatin- Arap zamkı bazlı mikrokapsül spektrumunda yaklaşık  $1600\text{ cm}^{-1}$ 'de amid oluşumu gözlemlendi. Mikrokapsüllerin IR spektrumunda  $1600\text{ cm}^{-1}$  civarında görülen bu bant, yapıya duvar polimerlerinin ve lahana ekstraktının varlığını desteklemiştir.

Jelatin-Sodyum aljinat koaservasyonunda gözlemlenen amid zirvesi, Jelatin-Sodyum aljinat bazlı mikrokapsül spektrumunda hafif bir kayma gösterdi (Şekil 6). Bu durum, negatif yüklü Sodyum aljinat gruplarının, pozitif yüklü Jelatin gruplarıyla etkileşime girdiğini gösterdi. Jelatin ve lahana bitki ekstresinin spektrumunda  $1740\text{ cm}^{-1}$  civarında görülen ve yapıdaki C=O bağına ait gerilme titreşimleri GE-SA mikrokapsülün spektrumunda da aynı bölgede gözlenmiş olup bu sonuç mikrokapsülün istenilen kompozisyonda oluştuğunu ifade etmektedir.  $1100\text{ cm}^{-1}$  civarında görülen ve Sodyum aljinatın IR spektrumlarında daha yoğun ve şiddetli ortaya çıkan C-O gerilme titreşimleri GE-SA mikrokapsülün IR

spektrumunda da  $1100\text{ cm}^{-1}$  civarında gözlenmektedir. Bu durum da mikrokapsülün yapısını doğrulamaktadır. IR spektrumları incelendiğinde GE-SA mikrokapsülüne kıyasla GE-GA mikrokapsülün yüzeyinde bitki ekstresinin daha iyi tutunduğu gözlenmiştir. Bu durum Arap zamkının yapısından kaynaklı olabileceği, arap zamkının yapısındaki -OH bağının sıvı bitki ekstresiyle etkileşimini ve artış göstermesi şeklinde açıklanabileceği düşünülmektedir (Singh vd. 2010; Goh vd. 2012; Köksal vd. 2023).



**Şekil 6.** Jelatin-Sodyum aljinat (GE-SA) mikrokapsül, lahana bitki ekstresi, Jelatin ve Sodyum aljinat duvar polimerlerine ait IR spektrum grafiği



**Şekil 7.** S-Metilmetyonin (Vitamin U), lahana bitki ekstresi, Jelatin-Arap zamkı (GE-GA) mikrokapsül, Jelatin-Sodyum aljinat (GE-SA) mikrokapsülüne ait IR spektrum grafiği

Şekil 7'de S-metilmetyonine ait spektrumlar incelendiğinde,  $3100\text{ cm}^{-1}$  civarında görülen pik  $-\text{NH}_2$  bandına, yaklaşık  $3300\text{ cm}^{-1}$  görülen zayıf yayvan pik ise karboksil grubuna ait  $-\text{OH}$  grubuna karşılık gelmektedir. Bu bantlar lahana bitki ekstresinin spektrumunda ise yaklaşık  $3100-3500\text{ cm}^{-1}$  aralığında görülen geniş yayvan bant içerisinde kalmaktadır. S-metilmetyonin yaklaşık



1120 cm<sup>-1</sup>'de görülen -C-S-C- bandı zayıf bir bant olduğu için aynı bant aralığında bitki ekstresi ve mikrokapsül numunlerinin bantlarının altında kalmıştır. Bu nedenle metiyonine ait C-S bantı bitki ekstresi ve mikrokapsül numunelerinde net bir şekilde gözlemlenememiştir. Öte yandan, S-metilmetiyonin IR spektrumunda 1700 cm<sup>-1</sup> civarında görülen bantın metiyonin yapısında bulunan karbonil (-C=O) grubuna atfedilebilir. Bitki ekstresinin IR spektrumunda da 1700 cm<sup>-1</sup> civarında görülen bu bant, yapıda etken maddeye ait karbonil grubunun varlığını desteklemiştir. S-metilmetiyonin ve bitki ekstresinde karbonil grubuna karşılık gelen bu bantlar her iki mikrokapsül numunlerinin IR spektrumlarında da hafif bir kayma göstererek yaklaşık 1720 cm<sup>-1</sup> civarında gözlenmiştir. Bu durumda bitki ekstresinin (çekirdek malzemesinin) mikrokapsül numuneleriyle etkileşime girdiğini, kapsül içerisinde çekirdek malzemesinin ve etken maddenin girdiğini göstermektedir.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Çalışmamızda S-metilmetiyonin (Vitamin U) etken maddesi içeren lahana bitki ekstresi, iki farklı doğal polimerik duvar malzemeleri kullanılarak kompleks koaservasyon metodu ile iki farklı bağımsız değişken ile yanıt yüzey metodolojisinde oluşturulmuş on üç adet deney seti ile mikroenkapsüle edilmiştir. Deneysel sonuçlar incelendiğinde en yüksek enkapsülasyon verimliliği Jelatin-Sodyum aljinat bazlı mikrokapsüller için 8,414 g çekirdek malzeme miktarı ve 4,000 mL çapraz bağlayıcı miktarında %54,68; Jelatin-Arap zıncı bazlı mikrokapsüller için ise 7,000 g çekirdek malzeme miktarı ve 5,414 mL çapraz bağlayıcı miktarında %67,72 olarak elde edilmiştir. Deneysel tasarımında en yüksek verimliliğe sahip mikrokapsüllerin optik mikroskop ve SEM karakterizasyon görüntüleri literatürdeki çalışmalarla benzerlik göstermiştir (Ahn et al. 2008, Mancer et al. 2018, Bayram vd. 2020). Yüzey morfolojilerinin genel olarak 20 ile 100µm arasında homojen ve çeşitli boyutlarda olduğu gözlemlendi. Yüksek verimlilikli mikrokapsüllerin FTIR spektrumları mikrokapsül yapılarının hem çekirdek malzemesi hem de duvar malzemeleri arasındaki etkileşimi doğrulamıştır ve bitki ekstresi ve ekstrenin etken maddesi ile mikrokapsüllerin bantlarındaki benzerlikler ekstrenin kapsüllendiğini göstermiştir. İstatistiksel sonuçlar incelendiğinde her iki polimer kompleksinde hazırlanan mikrokapsüllerde çapraz bağlayıcı miktarındaki artış ile birlikte enkapsülasyon verimliliğinde de artış gözlenmiştir. Öte yandan çekirdek miktarındaki artışın Jelatin-Arap zıncı bazlı mikrokapsüllerin verimliliğinde artmaya, Jelatin-Sodyum aljinat bazlı mikrokapsüllerin

verimliliğinde ise azalmaya neden olduğu gözlenmiştir. ANOVA sonuçları incelendiğinde modeller anlamlıdır (p<0,05). Uyum eksikliği ve R<sup>2</sup> değerleri model ile verilerin uyumlu olduğunu göstermiştir. Yanıt yüzey metodolojisinin deneysel süreç tasarımı açıklandığında etkili olduğunu göstermiştir.

#### Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

#### Yazarlık Katkı Beyanı

Elif Köksal: Kaynaklar, Araştırma, Deney, Yazma-rijinal taslak  
Görselleştirme, Yazma-rijinal taslak  
Fethiye Göde: Biçimsel analiz, Doğrulama, 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.

#### Teşekkür

Bu araştırma Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir (Proje No: FDK-2019-7330).

#### 5. Kaynaklar

- Ahn, J. H., Kim, Y. P., Lee, Y. M., Seo, E. M., Lee, K. W., and Kim, H. S., 2008. Optimization of microencapsulation of seed oil by response surface methodology. *Food Chemistry*, **107**(1), 98-105. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.07.067>.
- Aksoylu Özbek, Z., and Günç Ergönül, P., 2020. Optimisation of wall material composition of freeze-dried pumpkin seed oil microcapsules: Interaction effects of whey protein, maltodextrin, and gum Arabic by D-optimal mixture design approach. *Food Hydrocolloids*, **107**, 105909. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105909>.
- Bayram, O., Köksal, E., ve Göde, F., 2020. Yanıt Yüzey Metodolojisi Şartlarında Karabaş Otu Yağının Kompleks Koaservasyon Yöntemi ile Enkapsülasyonu. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **24**(2), 508-515. <https://doi.org/10.19113/sdufenbed.687943>.
- Devi, N., Hazarika, D., Deka, C., and Kakati, D. K., 2012. Study of complex coacervation of gelatin A and sodium alginate for microencapsulation of olive oil. *Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry*, **49**, 936-945.

- <https://doi.org/10.1080/10601325.2012.722854>.
- Dubey, R., Shami, T.C., and Rao, K.U.B., 2009. Microencapsulation technology and applications. *Defence Science Journal*, **59**, 82–95. <http://dx.doi.org/10.14429/dsj.59.1489>.
- Goh, C.H., Heng, P.W.S., and Chan, L.W. 2012. Alginates as a useful natural polymer for microencapsulation and therapeutic applications. *Carbohydrate Polymers*, **88(1)**, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.11.012>.
- Gomez-Estacaab, J., Comuniana, T.A., Monterob, P., Ferro-Furtadoc, R., and Favaro-Trindade, C.S., 2016. Encapsulation of an astaxanthin-containing lipid extract from shrimp waste by complex coacervation using a novel gelatin–cashew gum complex. *Food Hydrocolloids*, **61**, 155-162. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.05.005>.
- Jyothi, N. V. N., Prasanna, P. M., Sakarkar, S. N., Prabha, K. S., Ramaiah, P. S., and Srawan, G. Y., 2010. Microencapsulation techniques, factors influencing encapsulation efficiency. *Journal of Microencapsulation*, **27(3)**, 187-197. <https://doi.org/10.3109/02652040903131301>.
- Kim, W.-S., Yang, Y. J., Min, H. G., Song, M. G., Lee, J. S., Park, K.-Y., Kim, J.-J., Sung, J.-H., Choi, J.-S., and Cha, H.-J., 2010. Accelerated Wound Healing by S - Methylmethionine Sulfonium: Evidence of Dermal Fibroblast Activation via the ERK1/2 Pathway. *Pharmacology*, **85**, 68–76. <https://doi.org/10.1159/000276495>.
- Köksal, E., Bayram, O., Moral, E., and Gode, F., 2023. Microencapsulation of quinoa extract (*Chenopodium quinoa* Willd.) in response surface methodology conditions: Preparation and Characterization. *Particulate Science and Technology*, **41(2)**, 231-240. <https://doi.org/10.1080/02726351.2022.2072429>.
- Köksal, E., Gode, F., Ozaltın, K., Karakurt, I., Suly, P., and Saha, P., 2023. Controlled Release of Vitamin U from Microencapsulated *Brassica oleracea* L. var. *capitata* Extract for Peptic Ulcer Treatment. *Food and Bioprocess Technology*, **16**, 677-689. <http://doi.org/10.1007/s11947-022-02965-3>.
- Köksal, E., and Gode, F., 2017. Production of microcapsules containing vitamin E with complex coacervation method. *Süleyman Demirel University Faculty of Arts and Sciences Journal of Science*, **12(1)**, 1-14.
- Kwak, H.-S. 2014. Nano-and Microencapsulation for Foods. John Wiley&Sons Incorporated, New York. 20-28.
- Liu, H., Wang, L., Yang, T., Zhang, G., Huang, J., Sun, J., and Huo, J., 2016. Optimization and evaluation of fish oil microcapsules. *Particology*, **29**, 162–168. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2016.04.001>.
- Mancer, D., Allemann, E., and Daoud, K., 2018. Metformin hydrochloride microencapsulation by complex coacervation: Study of size distribution and encapsulation yield using response surface methodology. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, **45**, 184-195. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2018.03.015>.
- Moral, E., Bayram, O., Köksal, E., Danaş, F., ve Göde, F., 2021. Kabak Çekirdeği Yağının Kompleks Koaservasyon Yöntemi ile Mikroenkapsülasyonu. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, **11(2)**, 91-97.
- Muhoza, B., Xia, S., Wang, X., Zhang, X., Li, Y., and Zhang, S., 2020. Microencapsulation of essential oils by complex coacervation method: preparation, thermal stability, release properties and applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **62(5)**, 1363-1382. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1843132>
- Nesterenko, A., Alric, I., Silvestre, F., and Durrieu, V., 2014. Comparative study of encapsulation of vitamins with native and modified soy protein. *Food Hydrocolloids*, **38**, 172-179. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.12.011>.
- Obradović, N., Volić, M., Nedović, V., Rakin, M., and Bugarski, B., 2022. Microencapsulation of probiotic starter culture in protein–carbohydrate carriers using spray and freeze-drying processes: Implementation in whey-based beverages. *Journal of Food Engineering*, **321**, 110948. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.110948>.
- Ocak, B. 2012. Complex coacervation of collagen hydrolysate extracted from leather solid wastes and chitosan for controlled release of lavender oil. *Journal of environmental management*, **100**, 22-28. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.01.026>.
- Pérez-Limiñana, M. Á., Payá-Nohales, F. J., Francisca Arán-Ais, F., and Orgilés-Barceló, C., 2014. Effect of the shell-forming polymer ratio on the encapsulation of tea tree oil by complex coacervation as a natural biocide. *Journal of Microencapsulation*, **31(2)**, 176–183. <https://doi.org/10.3109/02652048.2013.824512>.



- Pilkington, J. L., C. Preston, and R. L. Gomes. 2014. Comparison of response surface methodology (RSM) and artificial neural networks (ANN) towards efficient extraction of artemisinin from *Artemisia annua*. *Industrial Crops and Products*, **58**, 15–24. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.03.016>.
- Podsedek, A., Sosnowska, D., Redzynia, M., and Anders, B., 2006. Antioxidant capacity and content of *Brassica oleracea* dietary antioxidants. *International Journal of Food Science and Technology*, **41**, 49–58. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01260.x>.
- Šamec, D., Piljac-Zegarac, J., Bogović, M., Halojanić, K., and Gruz, J., 2011. Antioxidant potency of White (*Brassica oleracea* L. var. *capitata*) and Chinese (*Brassica rapa* L. var. *pekinensis* (Lour.)) cabbage: The influence of development stage, cultivar choice and seed selection. *Scientia Horticulturae*, **128(2)**, 78–83. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.01.009>.
- Siddiqui, A. O. 2019. Determination of chemical and physical parameters of different cabbage varieties under good agricultural practices (GAPs). Masters Thesis, Niğde Ömer Halis Demir University, Niğde, 64.
- Singh, M.N., Hemant, K.S.Y., Ram, M., and Shivakumar, H.G. 2010. Microencapsulation: A promising technique for controlled drug delivery. *Research in Pharmaceutical Sciences*, **5(2)**, 65–77. PMID: 21589795; PMCID: PMC3093624
- Sittipummongkol, K., Chuysinuan, P., Techasakul, S., Pisitsak, P., and Pechyen, C., 2019. Core shell microcapsules of neem seed oil extract containing azadirachtin and biodegradable polymers and their release characteristics. *Polymer Bulletin*, **76**, 3803–3817. <https://doi.org/10.1007/s00289-018-2456-1>.
- Song, J.-H., Lee, H. -R., and Shim, S.-M. 2017. Determination of S-methyl-L-methionine (SMM) from Brassicaceae family vegetables and characterization of the intestinal transport of SMM by Caco-2 cells. *Journal of Food Science*, **82(1)**, 36–43. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13556>.
- Tözüm, M., S. 2019. Renk Değiştiren Boyarmaddelerin Mikrokapsülasyonu Ve Tekstil Materyallerine Uygulanması. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 279.
- Umer, H., Nigam, H., Tamboli, A.M., and Nainar, M.S., 2011. Microencapsulation: Process, Techniques and Applications. *International Journal of Research in Pharmaceutical and Biomedical Sciences*, **2(2)**, 474–481.
- Williams, A. J., Henley, W. E., Williams, C. A., Hurst, A. J., Logan, S., and Wyatt, K. M., 2013. Systematic review and meta-analysis of the association between childhood overweight and obesity and primary school diet and physical activity policies. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, **10(1)**, 1–22. <http://dx.doi.org/10.1186/1479-5868-10-101>.
- Zhang, Z.-Q., Pan, C.-H., and Chung, D., 2011. Tannic acid cross-linked gelatin– gum arabic coacervate microspheres for sustained release of allyl isothiocyanate: Characterization and in vitro release study. *Food Research International*, **44**, 1000–1007. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.02.044>.



## On Bishop Frames of Any Regular Curve in Euclidean 3-Space

### 3-Boyutlu Öklid Uzayında Regüler Bir Eğrinin Bishop Çatıları Üzerine

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 14.08.2023

Kabul/Accepted: 16.01.2024

Yayımlandı/Published: 27.02.2024

Sümeyye GÜR MAZLUM\* 

Gümüşhane University, Kelkit Aydın Doğan Vocational School, Department of Computer Technology, Gümüşhane. Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Abstract

Relationships between type-1 Bishop and Frenet, type-2 Bishop and Frenet, alternative and Frenet, N-Bishop and alternative frames of any regular curve in Euclidean 3-space are known. In this study, relationships between N-Bishop and Frenet frames and relationships between type-1 Bishop, type-2 Bishop and N-Bishop frames of any regular curve in Euclidean 3-space are given. In addition, pole vectors (unit vectors in the direction of Darboux vectors) belonging to these frames are computed. Last, pole and Darboux vectors belonging to these frames are compared with each other.

**Anahtar Kelimeler** Type-1 Bishop Frame; Type-2 Bishop Frame; Alternative Frame; N-Bishop Frame; Frenet Frame; Darboux Vector

#### Öz

3-boyutlu Öklid uzayında herhangi bir regüler eğrinin tip-1 Bishop ve Frenet, tip-2 Bishop ve Frenet, alternatif ve Frenet, N-Bishop ve alternatif çatıları arasındaki ilişkiler bilinmektedir. Bu çalışmada, 3-boyutlu Öklid uzayında herhangi bir regüler eğrinin N-Bishop ve Frenet çatıları arasındaki ilişkiler ve tip-1 Bishop, tip-2 Bishop ve N-Bishop çatıları arasındaki ilişkiler verilmiştir. Ayrıca bu çatılara ait pol vektörleri (Darboux vektörü yönündeki birim vektörler) hesaplanmıştır. Son olarak pol ve Darboux vektörleri birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

**Keywords** Tip-1 Bishop Çatısı; Tip-2 Bishop Çatısı; Alternatif Çatı; N-Bishop Çatısı; Frenet Çatısı; Darboux Vektörü

#### 1. Introduction

Frenet frame, a tool used to determine the characteristic features of a curve, was defined by J. F. Frenet in 1847. This frame is also known as Serret-Frenet frame, as J. A. Serret also defined the same frame in his thesis independently of Frenet in 1851. Frenet frame consists of tangent  $T$ , principal normal  $N$  and binormal  $B$  vectors of a curve, (Hacısalıhoğlu 1983). Different frames can be defined on the curve, depending on the character, geometrical properties or location of any curve. One of them is Bishop frame (or parallel transport frame) defined by Bishop (1975). This frame is a relatively parallel frame obtained by rotating around  $T$ , of Frenet frame by a certain angle. The Bishop frame is more advantageous than the Frenet frame, which works even when the second derivative of the curve is zero. Subsequently, numerous studies related to curves and surfaces have been conducted using this frame, and new variants of this frame (type-2 Bishop and N-Bishop) have even been defined, (Bükcü and Karacan 2009, Kelleci et al. 2019, Kılıçoğlu and Hacısalıhoğlu 2013, Masal and Azak

2019). Therefore, Bishop frame is also referred to as type-1 Bishop frame in some studies. The type-2 Bishop frame was advertised by Yılmaz and Turgut (2010) with the same logic as type-1 Bishop, that is, by rotating around  $B$  of Frenet frame by a certain angle. In addition, an alternative frame to Frenet frame was defined by Scofield (1995). This frame, which consists of  $N$  and unit Darboux vector  $W$  of a curve, and a third vector  $C$  attained by vector product of two vectors, is called alternative frame. Keskin and Yaylı (2017) obtained a new frame by rotating around  $N$  of alternative frame by a certain angle and called it N-Bishop frame. As can be understood from their definitions, tangential vector fields of type-1 Bishop and Frenet frames, binormal vector fields of type-2 Bishop and Frenet frames, and principal normal vector fields of N-Bishop and Frenet frames are common. There are many studies on this new types of Bishop and alternative frame (Aliç and Yılmaz 2021, Çakmak and Şahin 2022, Damar et al. 2017, Kızıltuğ et al. 2013, Masal and Azak 2015, Ourab et al. 2018, Samancı and Sevinç 2022, Şenyurt 2018, Şenyurt et al. 2023, Yılmaz

and Has 2022, Şenyurt and Kaya 2018.). In these studies, the relationships between Frenet and various Bishop frames of a curve are given. In addition, just as the Darboux vector belonging to the Frenet frame a curve were defined, the Darboux vectors belonging to the Bishop frames were also defined in the studies (Bükcü and Karacan 2008, Yılmaz and Savcı 2017, Uzunoğlu et al. 2016, Samancı and İncesu 2020).

## 2. Preliminaries

### 2.1. Frenet Frame of Any Regular Curve in $E^3$

Frenet frame  $\{T, N, B\}$  of any regular curve  $\gamma$  in  $E^3$  is

$$T = \frac{\gamma'}{\|\gamma'\|}, \quad N = B \wedge T, \quad B = \frac{\gamma' \wedge \gamma''}{\|\gamma' \wedge \gamma''\|},$$

curvature  $\kappa$  and torsion  $\tau$  are

$$\kappa = \frac{\|\gamma' \wedge \gamma''\|}{\|\gamma'\|^3}, \quad \tau = \frac{\langle \gamma', \gamma'' \wedge \gamma''' \rangle}{\|\gamma' \wedge \gamma''\|^2}.$$

The matrix representation of Frenet derivative formulas of  $\gamma$  is

$$\begin{bmatrix} T' \\ N' \\ B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \|\gamma'\|\kappa & 0 \\ -\|\gamma'\|\kappa & 0 & \|\gamma'\|\tau \\ 0 & -\|\gamma'\|\tau & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ N \\ B \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Darboux and pole vector (unit vector in the direction of Darboux vector) belonging to Frenet frame are

$$\begin{cases} F = \|\gamma'\|(\tau T + \kappa B), \\ W = \frac{\tau}{\sqrt{\kappa^2 + \tau^2}}T + \frac{\kappa}{\sqrt{\kappa^2 + \tau^2}}B. \end{cases} \quad (2)$$

### 2.2 Type-1 Bishop Frame of Any Regular Curve in $E^3$

Type-1 Bishop Frame (or Bishop frame) is attained by rotating Frenet frame  $\{T, N, B\}$  around tangent vector  $T$ , by an angle  $\theta$  and so it is a relatively parallel adapted frame in with Frenet frame. Let  $\{T, N_1, B_1\}$  be the Bishop frame of any regular curve  $\gamma$ . Here  $T$ , is tangent vector of Frenet frame of  $\gamma$ ,  $N_1$  is any unit vector perpendicular to  $T$ , by obtained rotating  $N$  by angle  $\theta$  and  $B_1 = T \wedge N_1$  is a unit

vector perpendicular to both  $T$  and  $N_1$ , Figure 1, (Bishop 1975).

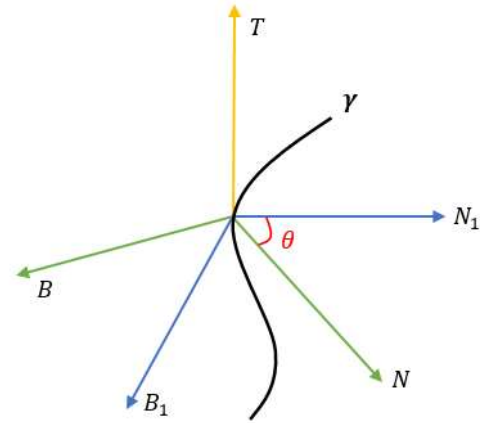


Figure 1. Frenet and Bishop frames

There are the following matrix relationships between Frenet and Bishop frames:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} T \\ N \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ N_1 \\ B_1 \end{bmatrix} \\ \text{or} \\ \begin{bmatrix} T \\ N_1 \\ B_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ N \\ B \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

where

$$\theta = \int \|\gamma'\|\tau. \quad (4)$$

From (1), (3) and (4),

$$\begin{aligned} T' &= \|\gamma'\|\kappa(\cos \theta N_1 + \sin \theta B_1) \\ &= \|\gamma'\|\kappa_1 N_1 + \|\gamma'\|\tau_1 B_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_1' &= -\theta' \sin \theta N + \cos \theta N' - \theta' \cos \theta B - \sin \theta B' \\ &= -\|\gamma'\|\kappa \cos \theta T \\ &= -\|\gamma'\|\kappa_1 T \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_1' &= \theta' \cos \theta N + \sin \theta N' - \theta' \sin \theta B + \cos \theta B' \\ &= -\|\gamma'\|\kappa \sin \theta T \\ &= -\|\gamma'\|\tau_1 T \end{aligned}$$

are obtained, where

$$\kappa_1 = \kappa \cos \theta, \quad \tau_1 = \kappa \sin \theta \quad (5)$$

are curvatures of type-1 Bishop frame. Thus, the matrix representation of Bishop derivative formulas is

$$\begin{bmatrix} T' \\ N_1' \\ B_1' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \|\gamma'\|\kappa_1 & \|\gamma'\|\tau_1 \\ -\|\gamma'\|\kappa_1 & 0 & 0 \\ -\|\gamma'\|\tau_1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ N_1 \\ B_1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Darboux vector belonging to Bishop frame is (Bükcü and Karacan, 2008)

$$F_1 = T \wedge T' = \|\gamma'\|(-\tau_1 N_1 + \kappa_1 B_1), \quad (7)$$

where

$$T' = F_1 \wedge T, \quad N_1' = F_1 \wedge N_1, \quad B_1' = F_1 \wedge B_1.$$

### 2.3. Type-2 Bishop Frame of Any Regular Curve in $E^3$

Type-2 Bishop frame, similar to type-1 Bishop frame, is obtained by rotating Frenet frame  $\{T, N, B\}$  around binormal vector  $B$  by an angle  $\phi$ . Let  $\{N_2, B_2, B\}$  be type-2 Bishop frame of any regular curve  $\gamma$ . Here  $B$  is binormal vector of Frenet frame of  $\gamma$ ,  $N_2$  is any unit vector perpendicular to  $B$  by obtained rotating  $N$  by angle  $\phi$  and  $B_2 = B \wedge N_2$  is a unit vector perpendicular to both  $B$  and  $N_2$ , Figure 2, (Yılmaz and Turgut 2010).

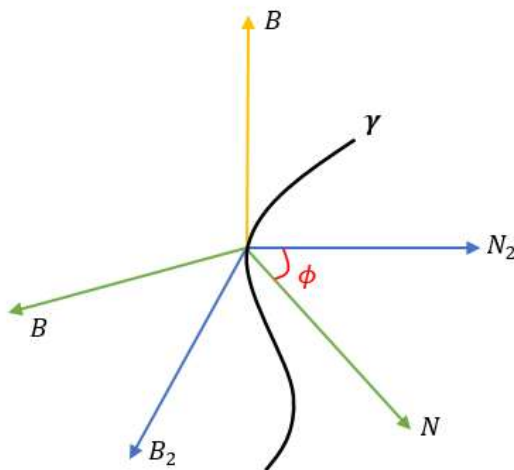


Figure 2. Frenet and type-2 Bishop frames

There are the following matrix relations between Frenet and type-2 Bishop frames:

$$\begin{bmatrix} T \\ N \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \phi & -\cos \phi & 0 \\ \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_2 \\ B_2 \\ B \end{bmatrix} \quad \text{or} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} N_2 \\ B_2 \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ -\cos \phi & \sin \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ N \\ B \end{bmatrix}$$

where

$$\phi = \int \|\gamma'\|\kappa. \quad (9)$$

From (1), (8) and (9),

$$\begin{aligned} N_2' &= \phi' \cos \phi T + \sin \phi T' - \phi' \sin \phi N + \cos \phi N' \\ &= \|\gamma'\|\tau \cos \phi B \\ &= -\|\gamma'\|\kappa_2 B \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_2' &= \phi' \sin \phi T - \cos \phi T' + \phi' \cos \phi N + \sin \phi N' \\ &= \|\gamma'\|\tau \sin \phi B \\ &= -\|\gamma'\|\tau_2 B \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B' &= -\|\gamma'\|\tau (\cos \phi N_2 + \sin \phi B_2) \\ &= \|\gamma'\|\kappa_2 N_2 + \|\gamma'\|\tau_2 B_2 \end{aligned}$$

are obtained, where

$$\kappa_2 = -\tau \cos \phi, \quad \tau_2 = -\tau \sin \phi \quad (10)$$

are curvatures of type-2 Bishop. Thus, the matrix representation of type-2 Bishop derivative formulas is

$$\begin{bmatrix} N_2' \\ B_2' \\ B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\|\gamma'\|\kappa_2 \\ 0 & 0 & -\|\gamma'\|\tau_2 \\ \|\gamma'\|\kappa_2 & \|\gamma'\|\tau_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_2 \\ B_2 \\ B \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Darboux vector belonging to type-2 Bishop frame is (Yılmaz and Savcı 2017)

$$F_2 = B \wedge B' = \|\gamma'\|(-\tau_2 N_2 + \kappa_2 B_2), \quad (12)$$

where

$$N_2' = F_2 \wedge N_2, \quad B_2' = F_2 \wedge B_2, \quad B' = F_2 \wedge B.$$

### 2.4. Alternative Frame of Any Regular Curve in $E^3$

Alternative frame is a new frame obtained from Frenet vectors of any regular curve. Let  $\{N, C, W\}$  be alternative frame of any regular curve  $\gamma$ . Here  $N$  is principal normal vector of Frenet frame of  $\gamma$ ,

$$C = \frac{N'}{\|N'\|} = \frac{-\kappa T + \tau B}{\sqrt{\kappa^2 + \tau^2}}$$

the first derivative of principal normal vector  $N$  and

$$W = N \wedge C = \frac{\tau T + \kappa B}{\sqrt{\kappa^2 + \tau^2}}$$

is a unit vector (unit Darboux vector belonging to Frenet frame) perpendicular to both  $N$  and  $W$ , Figure 3, (Scofield, 1995).

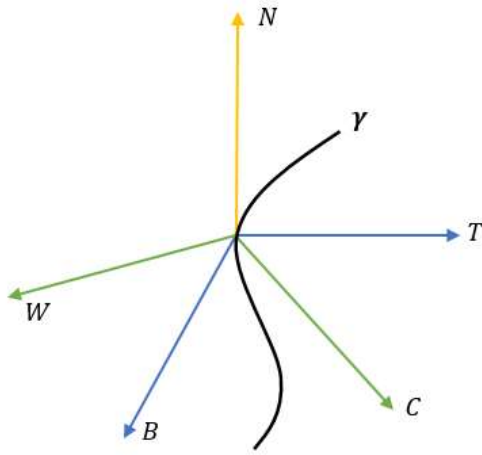


Figure 3. Frenet and alternative frames

From (1), there are the following matrix relationships between Frenet and alternative frames:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} T \\ N \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\bar{\kappa} & \bar{\tau} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{\tau} & \bar{\kappa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N \\ C \\ W \end{bmatrix} \\ \text{or} \\ \begin{bmatrix} N \\ C \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\bar{\kappa} & 0 & \bar{\tau} \\ \bar{\tau} & 0 & \bar{\kappa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ N \\ B \end{bmatrix} \end{cases} \quad (13)$$

where

$$\bar{\kappa} = \frac{\kappa}{\sqrt{\kappa^2 + \tau^2}}, \quad \bar{\tau} = \frac{\tau}{\sqrt{\kappa^2 + \tau^2}} \quad (14)$$

From (1), (13) and (14),

$$\begin{aligned} N' &= \|\gamma'\| f C \\ C' &= -\frac{\kappa' f - \kappa f'}{f^2} T - \frac{\kappa}{f} T' + \frac{\tau' f - \tau f'}{f^2} B + \frac{\tau}{f} B' \\ &= \frac{\tau(\kappa\tau' - \kappa'\tau)}{f^3} T - \|\gamma'\| f N + \frac{\kappa(\kappa\tau' - \kappa'\tau)}{f^3} B \\ &= g W - \|\gamma'\| f N \\ W' &= \frac{\tau' f - \tau f'}{f^2} T + \frac{\tau}{f} T' + \frac{\kappa' f - \kappa f'}{f^2} B + \frac{\kappa}{f} B' \\ &= \frac{(\kappa'\tau - \kappa\tau')}{f^2} C \\ &= -g C \end{aligned}$$

are obtained, where

$$f = \sqrt{\kappa^2 + \tau^2}, \quad g = \frac{\kappa\tau' - \kappa'\tau}{f^2} \quad (15)$$

are curvatures of alternative frame. Thus, the matrix representation of derivative formulas of alternative frame is

$$\begin{bmatrix} N' \\ C' \\ W' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \|\gamma'\| f & 0 \\ -\|\gamma'\| f & 0 & g \\ 0 & -g & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N \\ C \\ W \end{bmatrix} \quad (16)$$

Darboux vector belonging to alternative frame is (Uzunoğlu et al. 2016)

$$\bar{F} = C \wedge C' = g N + \|\gamma'\| f W, \quad (17)$$

where

$$N' = \bar{F} \wedge N, \quad C' = \bar{F} \wedge C, \quad W' = \bar{F} \wedge W.$$

### 2.5. N-Bishop Frame of Any Regular Curve in $E^3$

N-Bishop frame, similar to type-1 Bishop frame, is obtained by rotating alternative frame  $\{N, C, W\}$  around principal normal vector  $N$  by an angle  $\varphi$ . Let  $\{N, N_3, B_3\}$  be N-Bishop frame of any regular curve  $\gamma$ . Here  $N$  is principal normal vector of Frenet frame of  $\gamma$ ,  $N_3$  is a unit vector perpendicular to  $N$  by obtained rotating  $C$  by angle  $\varphi$  and  $B_3 = N \wedge N_3$  is

a unit vector perpendicular to both  $N$  and  $N_3$ , Figure 4, (Keskin and Yaylı 2017).

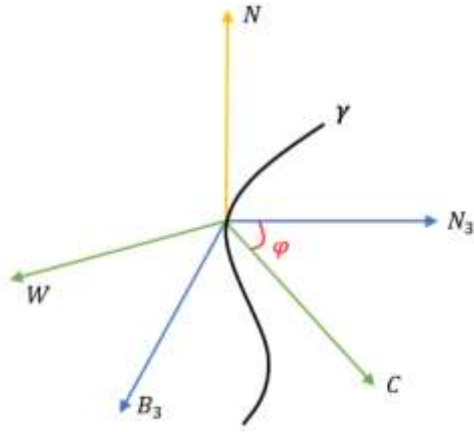


Figure 4. Frenet and N-Bishop frames

There are the following matrix relationships between the Frenet and N-Bishop frames:

$$\begin{bmatrix} N \\ C \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N \\ N_3 \\ B_3 \end{bmatrix} \quad (18)$$

or

$$\begin{bmatrix} N \\ N_3 \\ B_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N \\ C \\ W \end{bmatrix}$$

where

$$\varphi = \int g. \quad (19)$$

From (1), (18) and (19),

$$N' = \|\gamma'\| f C$$

$$\begin{aligned} N_3' &= -\varphi' \sin \varphi C + \cos \varphi C' - \varphi' \cos \varphi W - \sin \varphi W' \\ &= -\|\gamma'\| f \cos \varphi N \\ &= -\|\gamma'\| \kappa_3 N \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_3' &= \varphi' \cos \varphi C + \sin \varphi C' - \varphi' \sin \varphi W + \cos \varphi W' \\ &= -\|\gamma'\| f \sin \varphi N \\ &= -\|\gamma'\| \tau_3 N \end{aligned}$$

are obtained, where

$$\kappa_3 = f \cos \varphi, \quad \tau_3 = f \sin \varphi \quad (20)$$

are curvatures of N-Bishop. Thus, the matrix representation of N-Bishop derivative formulas is

$$\begin{bmatrix} N' \\ N_3' \\ B_3' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \|\gamma'\| \kappa_3 & \|\gamma'\| \tau_3 \\ -\|\gamma'\| \kappa_3 & 0 & 0 \\ -\|\gamma'\| \tau_3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N \\ N_3 \\ B_3 \end{bmatrix}.$$

(21)

Darboux vector belonging to N-Bishop frame is (Samancı and İncesu 2020)

$$F_3 = N \wedge N' = \|\gamma'\| (-\tau_3 N_3 + \kappa_3 B_3), \quad (22)$$

where

$$N' = F_3 \wedge N, \quad N_3' = F_3 \wedge N_3, \quad B_3' = F_3 \wedge B_3.$$

### 3. On Bishop Frames of Any Regular Curve in $E^3$

#### 3.1. Relationships Between Bishop Frames of Any Regular Curve in $E^3$

First, let's get the matrix relation between Frenet and N-Bishop frames.

**Theorem 3.1.** There are the following matrix relationships between Frenet frame  $\{T, N, B\}$  and N-Bishop frame  $\{N, N_3, B_3\}$  of any curve  $\gamma$  in  $E^3$ :

$$\begin{bmatrix} N \\ N_3 \\ B_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -X & 0 & Y \\ Y & 0 & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ N \\ B \end{bmatrix} \quad (23)$$

or

$$\begin{bmatrix} T \\ N \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -X & Y \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & Y & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N \\ N_3 \\ B_3 \end{bmatrix}$$

where

$$X = \frac{\kappa}{f} \cos \varphi + \frac{\tau}{f} \sin \varphi, \quad Y = -\frac{\kappa}{f} \sin \varphi + \frac{\tau}{f} \cos \varphi,$$

$$\varphi = \int g.$$

**Proof:**  $N_3$  is written as a linear combination of  $T, N, B$  as follows:

$$N_3 = a_0 T + b_0 N + c_0 B, \quad (24)$$

where  $a_0, b_0, c_0$  are coefficients. If the inner product with  $T, N, B$  is applied to both sides of (24),

$$a_0 = \langle T, N_3 \rangle, \quad b_0 = \langle N, N_3 \rangle, \quad c_0 = \langle B, N_3 \rangle$$

are gotten. From (18),

$$\begin{cases} a_0 = \left\langle T, \cos \varphi \left( -\frac{\kappa}{f} T + \frac{\tau}{f} B \right) - \sin \varphi \left( \frac{\tau}{f} T + \frac{\kappa}{f} B \right) \right\rangle \\ \quad = -X, \\ b_0 = \left\langle N, \cos \varphi \left( -\frac{\kappa}{f} T + \frac{\tau}{f} B \right) - \sin \varphi \left( \frac{\tau}{f} T + \frac{\kappa}{f} B \right) \right\rangle \\ \quad = 0, \\ c_0 = \left\langle B, \cos \varphi \left( -\frac{\kappa}{f} T + \frac{\tau}{f} B \right) - \sin \varphi \left( \frac{\tau}{f} T + \frac{\kappa}{f} B \right) \right\rangle \\ \quad = Y. \end{cases} \quad (25)$$

If (25) is substituted in (24),

$$N_3 = -XT + YB$$

is obtained. And similarly,

$$B_3 = YT + XB$$

is gotten. On the other hand,  $T$  is written as a linear combination of  $N, N_3, B_3$  as follows:

$$T = d_0 N + e_0 N_3 + f_0 B_3, \quad (26)$$

where  $d_0, e_0, f_0$  are coefficients. If the inner product with  $N, N_3, B_3$  is applied to both sides of (26),

$$d_0 = \langle N, T \rangle, \quad e_0 = \langle N_3, T \rangle, \quad f_0 = \langle B_3, T \rangle$$

are gotten. So,

$$\begin{cases} d_0 = 0, \\ e_0 = \langle -XT + YB, T \rangle = -X, \\ f_0 = \langle -XT + YB, B \rangle = Y. \end{cases} \quad (27)$$

If (27) is substituted in (26),

$$T = -XN_3 + YB_3$$

is obtained. And similarly,

$$B = YN_3 + XB_3$$

is gotten. Thus, the proof is completed.

**Theorem 3.2.** There are the following matrix relationships between type-1 Bishop frame  $\{T, N_1, B_1\}$  and type-2 Bishop frame  $\{N_2, B_2, B\}$  of any curve  $\gamma$  in  $E^3$ :

$$\begin{bmatrix} N_2 \\ B_2 \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \phi & \cos \phi \cos \theta & \cos \phi \sin \theta \\ -\cos \phi & \sin \phi \cos \theta & \sin \phi \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ N_1 \\ B_1 \end{bmatrix}$$

or

$$\begin{bmatrix} T \\ N_1 \\ B_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \phi & -\cos \phi & 0 \\ \cos \phi \cos \theta & \sin \phi \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos \phi \sin \theta & \sin \phi \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_2 \\ B_2 \\ B \end{bmatrix},$$

where  $\theta = \int \|\gamma'\| \tau$ ,  $\phi = \int \|\gamma'\| \kappa$ .

**Proof:** From (3),

$$B = -\sin \theta N_1 + \cos \theta B_1.$$

$N_2$  is written as a linear combination of  $T, N_1, B_1$  as follows:

$$N_2 = a_1 T + b_1 N_1 + c_1 B_1, \quad (28)$$

where  $a_1, b_1, c_1$  are coefficients. If the inner product with  $T, N_1, B_1$  is applied to both sides of (28),

$$a_1 = \langle T, N_2 \rangle, \quad b_1 = \langle N_1, N_2 \rangle, \quad c_1 = \langle B_1, N_2 \rangle$$

are gotten. From (3) and (8),

$$\begin{cases} a_1 = \langle T, \sin \phi T + \cos \phi N \rangle \\ \quad = \sin \phi, \\ b_1 = \langle \cos \theta N - \sin \theta B, \sin \phi T + \cos \phi N \rangle \\ \quad = \cos \theta \cos \phi, \\ c_1 = \langle \sin \theta N + \cos \theta B, \sin \phi T + \cos \phi N \rangle \\ \quad = \sin \theta \cos \phi. \end{cases} \quad (29)$$

If (29) is substituted in (28),

$$N_2 = \sin \phi T + \cos \theta \cos \phi N_1 + \sin \theta \cos \phi B_1$$

is obtained. And similarly,

$$B_2 = -\cos \phi T + \cos \theta \sin \phi N_1 + \sin \theta \sin \phi B_1$$

is gotten. On the other hand, from (8)

$$T = \sin \phi N_2 - \cos \phi B_2.$$

$N_1$  is written as a linear combination of  $N_2, B_2, B$  as follows:

$$N_1 = d_1 N_2 + e_1 B_2 + f_1 B, \quad (30)$$

where  $d_1, e_1, f_1$  are coefficients. If the inner product with  $N_2, B_2, B$  is applied to both sides of (30),

$$d_1 = \langle N_2, N_1 \rangle, \quad e_1 = \langle B_2, N_1 \rangle, \quad f_1 = \langle B, N_1 \rangle$$

are gotten. From (3) and (8),

$$(31) \quad \begin{cases} d_1 = \cos \theta \cos \phi, \\ e_1 = \langle -\cos \phi T + \sin \phi N, \cos \theta N - \sin \theta B \rangle \\ \quad = \cos \theta \sin \phi, \\ f_1 = \langle B, \cos \theta N - \sin \theta B \rangle = -\sin \theta. \end{cases}$$

If (31) is substituted in (30),

$$N_1 = \cos \theta \cos \phi N_2 + \cos \theta \sin \phi B_2 - \sin \theta B$$

is obtained. And similarly,

$$B_1 = \sin \theta \cos \phi N_2 + \sin \theta \sin \phi B_2 + \cos \theta B$$

is gotten. Thus, the proof is completed.

**Theorem 3.3.** There are the following matrix relationships between type-1 Bishop frame  $\{T, N_1, B_1\}$  and N-Bishop frame  $\{N, N_3, B_3\}$  of any curve  $\gamma$  in  $E^3$ :

$$\begin{bmatrix} N \\ N_3 \\ B_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ -X & -Y \sin \theta & Y \cos \theta \\ Y & -X \sin \theta & X \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ N_1 \\ B_1 \end{bmatrix}$$

or

$$\begin{bmatrix} T \\ N_1 \\ B_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -X & Y \\ \cos \theta & -Y \sin \theta & -X \sin \theta \\ \sin \theta & Y \cos \theta & X \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N \\ N_3 \\ B_3 \end{bmatrix}$$

where

$$X = \frac{\kappa}{f} \cos \varphi + \frac{\tau}{f} \sin \varphi, \quad Y = -\frac{\kappa}{f} \sin \varphi + \frac{\tau}{f} \cos \varphi,$$

$$\theta = \int \|\gamma'\| \tau, \quad \varphi = \int g.$$

**Proof:** From (3),

$$N = \cos \theta N_1 + \sin \theta B_1.$$

$N_3$  is written as a linear combination of  $T, N_1, B_1$  as follows:

$$N_3 = a_2 T + b_2 N_1 + c_2 B_1, \quad (32)$$

where  $a_2, b_2, c_2$  are coefficients. If the inner product with  $T, N_1, B_1$  is applied to both sides of (32), respectively

$$a_2 = \langle T, N_3 \rangle, \quad b_2 = \langle N_1, N_3 \rangle, \quad c_2 = \langle B_1, N_3 \rangle$$

are gotten. From (3) and (23),

$$(33) \quad \begin{cases} a_2 = \langle T, -XT + YB \rangle = -X, \\ b_2 = \langle \cos \theta N - \sin \theta B, -XT + YB \rangle = -Y \sin \theta, \\ c_2 = \langle \sin \theta N + \cos \theta B, -XT + YB \rangle = Y \cos \theta. \end{cases}$$

If (33) is substituted in (32),

$$N_3 = -XT - Y \sin \theta N_1 + Y \cos \theta B_1$$

is obtained. Similarly,

$$B_3 = YT - X \sin \theta N_1 + X \cos \theta B_1$$

is gotten. On the other hand,  $N_1$  is written as a linear combination of  $N, N_3, B_3$  as follows:

$$N_1 = d_2 N + e_2 N_3 + f_2 B_3, \quad (34)$$

where  $d_2, e_2, f_2$  are coefficients. If the inner product with  $N, N_3, B_3$  is applied to both sides of (34),

$$d_2 = \langle N, N_1 \rangle, \quad e_2 = \langle N_3, N_1 \rangle, \quad f_2 = \langle B_3, N_1 \rangle$$

are gotten. From (3) and (23),

$$(35) \quad \begin{cases} d_2 = \langle N, \cos \theta N - \sin \theta B \rangle = \cos \theta, \\ e_2 = \langle -XT - Y \sin \theta N_1 + Y \cos \theta B_1, N_1 \rangle \\ \quad = -Y \sin \theta, \\ f_2 = \langle YT - X \sin \theta N_1 + X \cos \theta B_1, N_1 \rangle \\ \quad = -X \sin \theta. \end{cases}$$

If (35) is substituted in (34),

$$N_1 = \cos \theta N - Y \sin \theta N_3 - X \sin \theta B_3$$



is obtained. And similarly,

$$B_1 = \sin \theta N + Y \cos \theta N_3 + X \cos \theta B_3,$$

$$T = -XN_3 + YB_3$$

are gotten. Thus, the proof is completed.

**Theorem 3.4.** There are the following matrix relationships between type-2 Bishop frame  $\{N_2, B_2, B\}$  and N-Bishop frame  $\{N, N_3, B_3\}$  of any curve  $\gamma$  in  $E^3$ :

$$\begin{bmatrix} N \\ N_3 \\ B_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -X \sin \phi & X \cos \phi & Y \\ Y \sin \phi & -Y \cos \phi & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_2 \\ B_2 \\ B \end{bmatrix}$$

or

$$\begin{bmatrix} N_2 \\ B_2 \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -X \sin \phi & Y \sin \phi \\ \sin \phi & X \cos \phi & -Y \cos \phi \\ 0 & Y & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N \\ N_3 \\ B_3 \end{bmatrix}$$

where

$$X = \frac{\kappa}{f} \cos \varphi + \frac{\tau}{f} \sin \varphi, \quad Y = -\frac{\kappa}{f} \sin \varphi + \frac{\tau}{f} \cos \varphi,$$

$$\phi = \int \|\gamma'\| \kappa, \quad \varphi = \int g.$$

**Proof:** From (8),

$$N = \cos \phi N_2 + \sin \phi B_2.$$

$N_3$  is written as a linear combination of  $N_2, B_2, B$  as follows:

$$N_3 = a_3 N_2 + b_3 B_2 + c_3 B, \quad (36)$$

where  $a_3, b_3, c_3$  are coefficients. If the inner product with  $N_2, B_2, B$  is applied to both sides of (36), respectively

$$a_3 = \langle N_2, N_3 \rangle, \quad b_3 = \langle B_2, N_3 \rangle, \quad c_3 = \langle B, N_3 \rangle$$

are gotten. From (8) and (23),

$$\begin{cases} a_3 = \langle \sin \phi T + \cos \phi N, -XT + YB \rangle \\ \quad = -X \sin \phi, \\ b_3 = \langle -\cos \phi T + \sin \phi N, -XT + YB \rangle \\ \quad = X \cos \phi, \\ c_3 = \langle B, -XT + YB \rangle = Y. \end{cases} \quad (37)$$

If (37) is substituted in (36),

$$N_3 = -X \sin \phi N_2 + X \cos \phi B_2 + YB$$

is obtained. Similarly,

$$B_3 = Y \sin \phi N_2 - Y \cos \phi B_2 + XB$$

is gotten. On the other hand,

$N_2$  is written as a linear combination of  $N, N_3, B_3$  as follows:

$$N_2 = d_3 N + e_3 N_3 + f_3 B_3, \quad (38)$$

where  $d_3, e_3, f_3$  are coefficients. If the inner product with  $N, N_3, B_3$  is applied to both sides of (38),

$$d_3 = \langle N, N_2 \rangle, \quad e_3 = \langle N_3, N_2 \rangle, \quad f_3 = \langle B_3, N_2 \rangle$$

are gotten. From (8),

$$(39) \quad \begin{cases} d_3 = \langle N, \sin \phi T + \cos \phi N \rangle = \cos \phi, \\ e_3 = \langle -X \sin \phi N_2 + X \cos \phi B_2 + YB, N_2 \rangle \\ \quad = -X \sin \phi, \\ f_3 = \langle Y \sin \phi N_2 - Y \cos \phi B_2 + XB, N_2 \rangle \\ \quad = Y \sin \phi. \end{cases}$$

If (39) is substituted in (38),

$$N_2 = \cos \phi N - X \sin \phi N_3 + Y \sin \phi B_3$$

is obtained. And similarly,

$$B_2 = \sin \phi N + X \cos \phi N_3 - Y \cos \phi B_3,$$

$$B = YN_3 + XB_3$$

are obtained. Thus, the proof is completed.

### 3.2. Relationships Between Darboux Vectors Belonging to Frenet and Bishop Frames of Any Regular Curve in $E^3$

**Theorem 3.5.** There is the following equation between Darboux vector  $F$  belonging to Frenet frame and Darboux vector  $F_1$  belonging to type-1 Bishop frame of any curve  $\gamma$  in  $E^3$ :

$$F_1 = F - \|\gamma'\| \tau T. \quad (40)$$

**Proof:** If (3) and (5) is substituted in (7),

$$F_1 = \|\gamma'\| \kappa B$$

is obtained. From (2), the proof is completed.

**Theorem 3.6.** There is the following equation between Darboux vector  $F$  belonging to Frenet frame and Darboux vector  $F_2$  belonging to type-2 Bishop frame of any curve  $\gamma$  in  $E^3$ :

$$F_2 = F - \|\gamma'\| \kappa B. \quad (41)$$

**Proof:** If (8) and (10) is substituted in (12),

$$F_2 = \|\gamma'\| \tau T$$

is obtained. From (2), the proof is completed.

**Theorem 3.7.** There is the following equation between Darboux vector  $F$  belonging to Frenet frame and Darboux vector  $\bar{F}$  belonging to alternative frame of any curve  $\gamma$  in  $E^3$ :

$$\bar{F} = F + gC.$$

**Proof:** Since  $W = \frac{\tau T + \kappa B}{\sqrt{\kappa^2 + \tau^2}}$ , from (2) and (15),

$$F = \|\gamma'\| fW \quad (42)$$

is gotten. (42) is substituted in (17), the proof is completed.

**Theorem 3.8.** There is the following equation between Darboux vector  $F$  belonging to Frenet frame and Darboux vector  $F_3$  belonging to N-Bishop frame of any curve  $\gamma$  in  $E^3$ :

$$F_3 = F. \quad (43)$$

**Proof:** If (18) and (20) is substituted in (22),

$$F_3 = \|\gamma'\| fW$$

is obtained. From (42), the proof is completed.

**Corollary 3.1.** There is the following equation between Darboux vectors  $F, F_1, F_2$  and  $F_3$  belonging to Frenet, type-1 Bishop, type-2 Bishop and N-Bishop frame of any curve  $\gamma$  in  $E^3$ , respectively:

$$F = F_3 = F_1 + F_2.$$

**Proof:** From (40), (41) and (43), the proof is completed.

### 3.3. Their Relationships and Pole Vectors Belonging to Bishop Frames of Any Regular Curve in $E^3$

**Theorem 3.9.** Pole vector  $W_1$  belonging to type-1 Bishop frame of any curve  $\gamma$  in  $E^3$ :

$$W_1 = -\sin \theta N_1 + \cos \theta B_1. \quad (44)$$

**Proof:** If (5) is substituted in (7),

$$W_1 = \frac{F_1}{\|F_1\|} = -\frac{\tau_1}{\kappa} N_1 + \frac{\kappa_1}{\kappa} B_1$$

is obtained. So, the proof is completed.

**Corollary 3.2.** There is the following equation between binormal vector  $B$  and pole vector  $W_1$  belonging to type-1 Bishop frame of any curve  $\gamma$  in  $E^3$ :

$$W_1 = B.$$

**Proof:** From (3) and (44), it is clear.

**Theorem 3.10.** Pole vector  $W_2$  belonging to type-2 Bishop frame of any curve  $\gamma$  in  $E^3$ :

$$W_2 = \sin \phi N_2 - \cos \phi B_2. \quad (45)$$

**Proof:** If (10) is substituted in (12),

$$W_2 = \frac{F_2}{\|F_2\|} = -\frac{\tau_2}{\tau} N_2 + \frac{\kappa_2}{\tau} B_2$$

is obtained. So, the proof is completed.

**Corollary 3.3.** There is the following equation between tangent vector  $T$  and pole vector  $W_2$  belonging to type-2 Bishop frame of any curve  $\gamma$  in  $E^3$ :

$$W_2 = T.$$

**Proof:** From (8) and (45), it is clear.

**Theorem 3.11.** Pole vector  $\bar{W}$  belonging to alternative frame of any curve  $\gamma$  in  $E^3$ :

$$\bar{W} = \frac{g}{\sqrt{g^2 + \|\gamma'\|^2 f^2}} N + \frac{\|\gamma'\| f}{\sqrt{g^2 + \|\gamma'\|^2 f^2}} W.$$

**Proof:** From (17), the proof is completed.

**Theorem 3.12.** Pole vector  $W_3$  belonging to N-Bishop frame of any curve  $\gamma$  in  $E^3$ :

$$W_3 = -\sin \varphi N_3 + \cos \varphi B_3. \quad (46)$$

**Proof:** If (20) is substituted in (22),

$$W_3 = \frac{F_3}{\|F_3\|} = -\frac{\tau_3}{f} N_3 + \frac{\kappa_3}{f} B_3$$

is obtained. So, the proof is completed.

**Corollary 3.4.** There is the following equation between pole vector  $W$  and pole vector  $W_3$  belonging to type-1 Bishop frame of any curve  $\gamma$  in  $E^3$ :

$$W_3 = W.$$

**Proof:** From (2), (18) and (46), it is clear.

**Corollary 3.5.** There is the following equation between pole vectors  $W$ ,  $W_1$ ,  $W_2$  and  $W_3$  belonging to Frenet, type-1 Bishop, type-2 Bishop, N-Bishop frames of any curve  $\gamma$  in  $E^3$ , respectively:

$$W = W_3 = \frac{\kappa}{\sqrt{\kappa^2 + \tau^2}} W_1 + \frac{\tau}{\sqrt{\kappa^2 + \tau^2}} W_2.$$

**Proof:** From (2), (44), (45) and (46), it is clear.

#### 4. Conclusion

In this study, the relationships between various Bishop frames and their Darboux vectors are discussed and new results are obtained. These results will be evaluated in the studies that have been done or will be done on Bishop frames. In addition, these results can be examined in various spaces such as Galilean space, Lorentz space, Dual Lorentz space.

#### 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, 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

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

#### Acknowledgment

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.

#### References

- Aliç, Ş. and Yılmaz, B., 2021. Smarandache Curves According to Alternative Frame in  $E^3$ . *Journal of Universal Mathematics*, **4**, 140–156. <https://www.doi.org.tr/10.33773/jum.956862>
- Bishop, R.L., 1975. There is more than one way to frame a curve. *The American Mathematical Monthly*, **82**, 246–251. <https://doi.org/10.1080/00029890.1975.11993807>
- Bükcü, B., and Karacan, M.K., 2008. Special Bishop motion and Bishop Darboux rotation axis of the space curve. *Journal of Dynamical Systems and Geometric Theories*, **6**, 27–34. <https://doi.org/10.1080/1726037X.2008.10698542>
- Bükcü, B. and Karacan, M.K., 2009. The slant helices according to Bishop frame. *International Journal of Computational and Mathematical Sciences*, **3**, 67–70.
- Çakmak A. and Şahin, V., 2022. Characterizations of Adjoint Curves According to Alternative Moving Frame. *Fundamental Journal of Mathematics and Applications*, **5**, 42–50. <https://doi.org/10.33401/fujma.1001730>
- Damar, E., Yüksel, N. and Vanlı, A.T., 2017. The ruled surfaces according to type-2 Bishop frame in  $E^3$ . *International Mathematical Forum*, **12**, 133–143. <https://doi.org/10.12988/imf.2017.610131>
- Hacısalıhoğlu, H.H., 1983. Diferansiyel Geometri. İnönü Üniversitesi Yayınları.
- Kelleci, A., Bektaş, M. and Ergüt, M., 2019. The Hasimoto surface according to bishop frame. *Adiyaman Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, **9**, 13–22.
- Keskin, O. and Yaylı, Y., 2017. An application of N-Bishop frame to spherical images for direction curves. *International Journal of Geometric Methods in Modern Physics*, **14**, 1750162.

- <https://doi.org/10.1142/S0219887817501626>
- Kılıçoğlu, Ş. and Hacısalihoğlu, H.H., (2013). On the ruled surfaces whose frame is the Bishop frame in the Euclidean 3-space. *International Electronic Journal of Geometry*, **6**, 110–117.
- Kızıltuğ, S., Kaya, S. and Tarakcı, O., 2013. The slant helices according to type-2 Bishop frame in Euclidean 3-space. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, **2**, 211–222.  
<http://dx.doi.org/10.12732/ijpam.v85i2.3>
- Masal, M. and Azak, A.Z., 2015. The Ruled Surfaces According to Type-2 Bishop Frame in the Euclidean 3-Space  $E^3$ . *Mathematical Sciences and Applications E-Notes*, **3**, 74–83.  
<https://doi.org/10.36753/mathenot.421334>
- Masal, M. and Azak, A., 2019. Ruled surfaces according to Bishop frame in the Euclidean 3-spaces. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences*, **89**, 415–424.
- Ouarab, S., Ouazzani, A. and Izid, M., 2018. Ruled surfaces with alternative moving frame in Euclidean 3-space. *International Journal of Mathematical Sciences and Engineering Applications*, **12**, 43–58.
- Samancı, H.K. and İncesu, M., 2020. Investigating a quadratic Bezier curve due to NCW and N-Bishop frames. *Turkish Journal of Mathematics and Computer Science*, **12**, 120–127.  
<https://doi.org/10.47000/tjmcs.704794>
- Samancı, H.K. and Sevinç, M., 2022. N-Bishop Çatısına Göre Regle Yüzeylerin Bazı Karakterizasyonları. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, **12**, 113–134.  
<https://doi.org/10.31466/kfbd.937683>
- Scofield, P.D., 1995. Curves of constant precessions. *The American mathematical monthly*, **102**, 531–537.
- Şenyurt, S., 2018. D-Smarandache Curves According to the Sabban Frame of the Spherical Indicatrix Curve. *Turkish Journal of Mathematics and Computer Science*, **9**, 39–49.
- Şenyurt, S. and Kaya, G., 2018. NC and NW Smarandache Curves According to Alternative Frame. *Turkish Journal of Mathematics and Computer Science*, **10**, 269–274.
- Şenyurt, S., Mazlum, S.G., Canlı, D. and Can, E., 2023. Some special Smarandache ruled surfaces according to alternative frame in  $E^3$ . *Maejo International Journal of Science and Technology*, **17**, 138–153.
- Uzunoğlu, B., Gök, İ. and Yaylı, Y., 2016. A New approach on curves of constant precession. *Applied Mathematics and Computation*, **275**, 317–323.  
<https://doi.org/10.1016/j.amc.2015.11.083>
- Yılmaz, S. and Turgut, M., 2010. A new version of Bishop frame and an application to spherical images. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, **371**, 764–776.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2010.06.0127>
- Yılmaz, B. and Has, A., 2022. Obtaining fractional electromagnetic curves in optical fiber using fractional alternative moving frame. *Optik*, **260**, 169067.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.169067>
- Yılmaz, S. and Savcı, Ü.Z., 2017. A New Version Darboux Vector and Characterization Some Special Curves According to Type-2 Bishop Frame in  $R^3$ . *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences*, **87**, 355–362.  
<https://doi.org/10.1007/s40010-017-0373-6>



## İnsansız Hava Araçlarına Karşı Yeni Bir Silah Sistemi Geliştirilmesi

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 05.04.2023

Kabul/Accepted: 03.02.2024

Yayımlandı/Published: 27.02.2024

### Development Of a New Weapon System Against Unmanned Aerial Vehicle

Sinan KIVRAK<sup>1\*</sup>, Gülüstan Tuğçe ALVALI<sup>2</sup>, Burak YENİPİNAR<sup>3</sup>, Emre TURAN<sup>4</sup>

<sup>1</sup> OSTİM Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup> OSTİM Teknik Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Ankara, Türkiye

<sup>3</sup> OSTİM Teknik Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Ankara, Türkiye

<sup>4</sup> OSTİM Teknik Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

Günümüzde batarya, motor, motor sürücü teknolojilerinin, uzaktan kontrol ve otonom kontrol yöntemlerinin gelişmesi, insansız hava aracı (İHA) teknolojisinin gelişmesine katkı sağlamıştır. İHA'ların kolay temin edilebilmeleri, faydalı yük taşıyabilmeleri, radarlara karşı düşük görünürlüğe sahip olması, kalkış ve iniş için bir piste ihtiyaç duymamaları gibi özelliklerinden dolayı kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Bireysel olarak kullanılabilmesi gibi savunma ve saldırı gibi askeri amaçlarla da İHA'ların kullanımının artması sebebiyle bu sistemlere karşı savunma sistemi geliştirilmesi zorunlu bir ihtiyaç haline gelmiştir. Lazer, RF karıştırıcı, köreltme sistemleri İHA engelleme sistemlerinde yaygın olarak kullanılmakla birlikte bu sistemlerin yüksek maliyetleri, meskûn mahalde kullanılmamaları ve bu sistemlere karşı GPS uygulamaları ile bozucu sinyal kullanılması en önemli eksiklikleridir. Yapılan çalışmada mevcut İHA savunma silah sistemlerine alternatif yeni bir silah sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen sistemde dört adet tüfek eş zamanlı olarak ateşlenerek, 1440 adet 4 mm'lik şarapnelden meydana gelen ve 400 metreye kadar etkili olan bir mermi bulutu oluşturmaktadır. Uygun maliyetinin yanı sıra geliştirilen sistemin yorgun mermisi diğer mühimmat atan silah sistemlerine göre daha az zararlı olması meskûn mahalde çok rahat kullanılmasını sağlamaktadır. Sistem, gerilme, güvenlik katsayısı ve deformasyon analizleri yapılarak geliştirilmiş, üretilmiş ve saha testleri başarılı bir şekilde tamamlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Savunma Sistemleri; İHA; Silah Kontrolü; Kontrol Sistemleri.

#### Abstract

Today, the development of battery, motor, motor control technologies, remote control and autonomous control methods have contributed to the development of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) technology. The use of UAVs is increasing day by day due to their features such as being easily available, carrying a useful load, have low visibility to radars and not needing a runway for take-off and landing. Due to the increase in the use of UAVs for military purposes such as defense and attack, it has become a necessity to develop a defense system against these systems. Although laser, RF jamming and blanking systems are widely used in UAV blocking systems, the most important shortcomings of these systems are their high cost, inability to be used in residential areas, and the use of GPS applications and jamming signals against these systems. In the study, a new weapon system was developed as an alternative to the existing UAV defense weapon systems. In the developed system, four rifles are fired simultaneously, forming a bullet cloud consisting of 1440 pieces of 4 mm shrapnel and effective up to 400 meters. In addition to its affordable cost, the tired projectile of the developed system is less harmful than other ammunition-throwing weapon systems, which makes it very comfortable to use in residential areas. The system was developed, manufactured and field tests were successfully completed by performing stress, safety coefficient and deformation analyzes.

**Keywords:** Defense Systems; UAV; Gun Control; Control Systems

#### 1. Giriş

İnsansız Hava Araçlarının (İHA) küçük olması, radara yakalanmaması, piste ihtiyaç duymaması, faydalı yük taşıyor olabilmesi, ucuz ve kolay temin edilebiliyor olması gibi sebeplerden dolayı günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. İHA'lar ayrıca tespit, teşhis, izleme ve etkisiz hale getirme gibi askeri amaçlarla kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Bireysel olarak tedarik edilebilen ticari İHA'lar bile faydalı yük taşıma kapasitesi

kullanılarak saldırı İHA'ları haline getirilebilmektedir. Sayıları giderek artan İHA'lar ile ilgili güvenlik tehditlerine karşı koruma sistemlerinin tasarlanması ve uygulanması gerekliliği kritik bir konu haline gelmiştir. Bu bağlamda İHA teknolojisinin gelişmesine paralel olarak İHA engelleyici silah sistemleri de gelişmektedir. Literatürde yer alan İHA savunma sistemleri ile ilgili çalışmalar incelendiğinde birbirinden farklı yöntem kullanan birçok çalışma olduğu görülmektedir. RF Karıştırma, Küresel Uydu Seyrüsefer Sistemi Karıştırma (GNSS), Yanıltma

Sinyali (Spoofing), Köreltme, Lazer, Yüksek güçlü mikrodalga (HPM), ağ yöntemi, çarpışan İHA ve mühimmat ile dron düşürme yöntemleri yaygın olarak kullanılan yöntemler olarak karşımıza çıkmaktadır (Genç ve Erciyes 2020, Sütçüoğlu ve Alay 2019, Bhatta 2010, Eldosouky et al. 2019, la Cour-Harbo 2017, Chiper et al. 2022).

Kullanılan İHA savunma sistemlerinde farklı İHA tespit yöntemleri kullanılabilir. Yaygın olarak kullanılan bu yöntemler karşılaştırmalı olarak Çizelge 1’de verilmiştir. İHA’ların tespit edilmesinde kullanılan her tekniğin birbirine göre avantaj ve dezavantajı bulunmaktadır. İHA’ların tespitinde doğruluğu en yüksek yöntem Sensör füzyonudur. Ancak bu yöntemin yüksek maliyetli olması ve sensör bilgisinin işlenmesinin karmaşık bir süreç gerektirmesi bu yöntemin kullanımını kısıtlamaktadır. Ayrıca, İHA algılama yöntemlerinin yüksek maliyetli olması, meskûn mahalde kullanılabilir olmaması ve mühimmat ile dron düşürme sistemlerinin yorgun mermisinin öldürücü etkisinin olması sebebiyle bu sistemlere alternatif bir silah sistemi geliştirilme ihtiyacı doğmuştur. Bununla birlikte günümüzde özellikle savunma sanayinde kullanılan silah sistemlerinin yerli imkânlar ile tasarımı ve üretimi de stratejik öneme sahip önemli bir konudur.

Bu çalışmada, sabit kanatlı ve döner kanatlı İHA’lara karşı kullanılmak üzere bir savunma sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen sistem dört silahtan meydana gelmekte olup eşzamanlı ateşleme yaparak bir mermi bulutu oluşturmaktadır. Elektrik ve mekanik tasarımı tamamlanan sistem prototip olarak üretilmiş ve saha testlerini başarılı bir şekilde tamamlamıştır.

Geliştirilen sistemde yorgun mermisi öldürücü etki yaratmayan dört adet Eşrefoğlu Bulbup tüfek kullanılmıştır. Kullanılan tüfek, 20 mermi kapasiteli şarjör ile kullanılmış olup 18’li şevrotin mermi ile kullanılabilir. Geliştirilen sistemde 10 saniye gibi kısa bir süre içerisinde 4 mm çapında 1440 şarapnelin meydana gelen bir mermi bulutu oluşturulabilmektedir. Oluşturulan bu mermi bulutu ile sabit ve çok kanatlı İHA’ların elektrik ve mekanik ekipmanlarının zarar görme olasılığı oldukça yükseltilmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

Tasarım süresince öncelikle geliştirilen mühimmat tabanlı anti-dron sisteminin konsept tasarımı gerçekleştirilmiştir. Öncelikle dört adet Eşrefoğlu Bulbup tüfeğin kullanıldığı sistem tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemin geri tepme kuvvetleri, farklı kuvvetlerde gerilme

değeri ve deformasyon miktarı Sonlu Eleman Analiz yöntemi ile analiz edilmiştir. Analiz çalışmasının sonucunda dört silahlı sistem üretilmiş ve saha testlerine tabi tutulmuştur. Saha testlerinin başarılı olması ile birlikte çalışmada kullanılan yöntemin doğrulanması yapılmıştır. Daha sonraki çalışmalar için Eşrefoğlu Bulbup tüfeğin kullanıldığı yedi silahlı anti-dron sisteminin tasarımı ve analizleri sunulmuştur.

**Çizelge 1.** İHA tespit yöntemlerinin karşılaştırılması (Jeong et al. 2018, Journ et al. 2021, Guvenc et al. 2018, Oh et al. 2019, Park et al. 2021, Wellig et al. 2018, Aledhari et al. 2021, Benyamin and Goldman 2014).

Yöntem	Avantaj	Dezavantaj
RF Algılama	Düşük maliyetlidir. Uzaktan kumanda taklit edilerek İHA’nın kontrolü ele geçirilebilmektedir .	Aynı frekans bandında farklı sinyaller de olduğu için doğruluğu düşüktür. İHA’nın otonom uçuş gerçekleştirmesi durumunda gelen RF sinyalinin olmaması nedeniyle bu yöntem başarısız olmaktadır.
Radar	Düşük maliyetli Frequency-Modulated Continuous-Wave Radar (FMCW Radar) ları sis, bulut, tozdan etkilenmezler. Tespit için İHA ile aktif veri alışverişine ihtiyaç duymamaktadır. Uzun mesafeden İHA’ları tespit edebilmektedir .	İHA’ların radar kesitinin (RCS) küçük olması sebebiyle tespit edilmesini zorlaştırmaktadır. Farklı İHA türleri göz önünde bulundurularak, hassas drone algılama/sınıflandırma ve makine öğrenimi teknikleri için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.
Akustik	İHA’lar duyulabilir olduğu sürece basit mikrofonlar ile ucuz sistemler kurulabilmektedir.	Farklı İHA’lar için akustik imza veritabanına ihtiyaç duyulmaktadır. Şehir gibi yüksek gürültülü ortamlarda kötü çalışabilir.
Sensör Füzyonu	Yüksek algılama doğruluğu ve uzun mesafeli çalışma için birden fazla farklı algılama tekniğinin avantajlarını birleştirmektedir.	Yüksek maliyetlidir. Bilgiyi işlemek karmaşık bir süreç gerektirir. Etkin sensör füzyon algoritmalarına ihtiyaç duyulmaktadır.

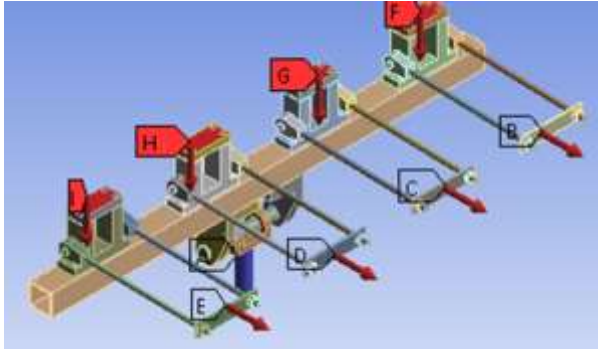
### 2.1 Mekanik tasarım

Öncelikle dört silahlı Eşrefoğlu Bulbup tüfeğin kullanıldığı dört silahlı anti-dron sisteminin konsept tasarımı Şekil 1’de görülmektedir. Üretim aşamasına geçmeden önce tasarımın, gerilme ve titreşim analizleri yapılarak geliştirilmiş ve test edilmiştir. Gerilme analizleri tasarımın güvenlik kriterlerinin belirlenmesi için, modal analizi ise titreşimsel bir sonuca ulaşmak için dinamik tepkiyi görmek ve bu cevabı matematiksel bir modelde ifade etmek için yapılmıştır. 4’lü sistem tasarımı ANSYS sonlu elemanlar paket programına aktarılmış ve ilk olarak gerilme analizleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Dört silahlı anti-İHA silah sistemi

Sistem kullanımı sırasında silahlar geri tepme kuvvetine maruz kalmaktadır. Sisteme farklı silah türleri bağlanabileceği için dört farklı geri tepme kuvveti uygulanmış ve kuvvetler sonucunda oluşan deformasyon miktarı belirlenmiştir. Geri tepme kuvvetlerinin etki edeceği yüzey ve sistemin bağlantı yerleri Şekil 2’de verilmiştir.



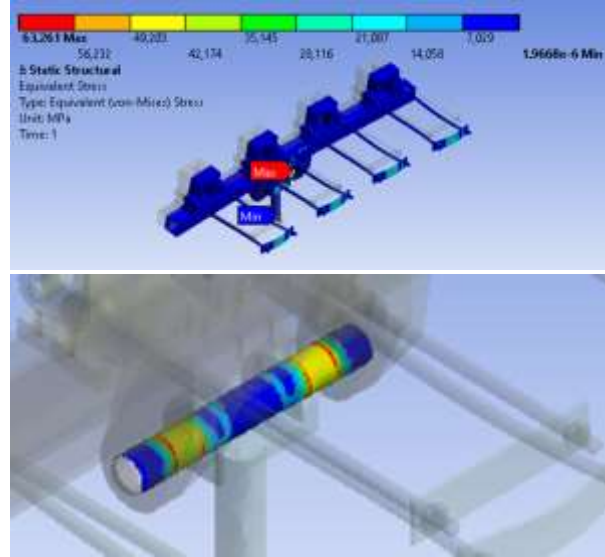
Şekil 2. Dört silahlı anti-İHA sistemine uygulanan kuvvetler

Tasarım A noktasından sabitlenmiş ve silahın ateşlenmesi sonucunda bağlantı yerlerine (B, C, D, E noktalarında) geri tepme kuvvetlerinin eşdeğerinde kuvvetler ve silah montajın yapıldığı bağlantı yerlerine (F, G, H, I noktalarına) sıkıştırma kuvvetleri uygulanmıştır. Sisteme 50 N’luk, 100 N’luk, 150 N’luk ve 200 N’luk kuvvetler uygulanmış ve oluşan gerilme kuvveti, güvenlik katsayısı ve deformasyon miktarları hesaplanmıştır (Çizelge 2).

Şekil 3’te 4’lü sistem tasarımına 200 N’luk yük uygulandığında oluşan gerilmeler gösterilmiştir. 200 N yük altında 63,261 MPa gerilme oluşmuş ve güvenlik katsayısı 3,9519 olarak bulunmuştur. Doğal frekansını belirlemek için modal analiz yapılmıştır. Bu analizi yapmaktaki temel amaç, titreşimsel bir sonuca ulaşmak için dinamik tepkiyi görmek ve bu cevabı matematiksel bir modelde ifade etmektir. İlk 15 titreşim modu için titreşim analizi yapılmıştır. 15 mod için elde edilen deformasyon ve doğal frekans çizelgelerinde verilmiştir (Çizelge 3).

Çizelge 2. Uygulanan kuvvetlere göre gerilme değerleri, deformasyon miktarları ve güvenlik katsayıları

Uygulanan Kuvvetler (N)	Gerilme Değeri (MPa)	Gerilme Değeri (MPa)	Güvenlik Katsayısı
50	18,358	0,11992	13,618
100	31,958	0,20957	7,8228
150	47,609	0,31231	5,2511
200	63,261	0,41507	3,9519



Şekil 3. Dört silahlı sisteme 200 N yük altında oluşan kuvvet.

Çizelge 3. İlk 15 Mod için yer değiştirme miktarları

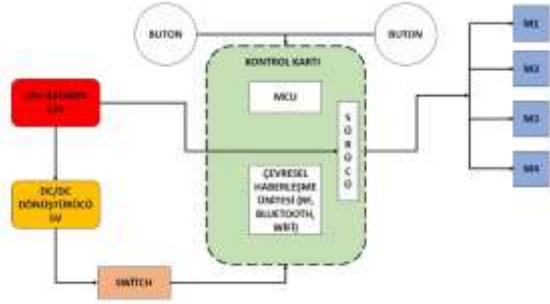
Mod	Doğal Frekans (Hz)	Yer Değiştirme (mm)
1	47,375	38,969
2	49,338	49,771
3	50,815	54,335
4	51,016	60,678
5	60,374	26,194
6	69,709	32,333
7	73,672	52,634
8	73,906	47,832
9	74,128	28,872
10	75,059	36,438
11	88,33	22,983
12	157,04	55,723
13	159,76	66,022
14	160,03	56,055
15	160,28	70,329

## 2.2 Elektronik Tasarım

Sistemin kontrol edilebilmesi ve eş zamanlı olarak silahların ateşlenebilmesi için bir kontrol kartı

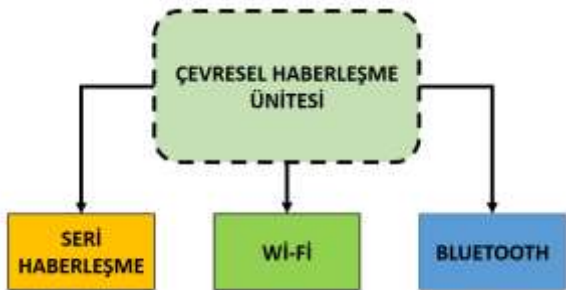


tasarlanmıştır. Kontrol kartı, sistemin sekiz silaha kadar kontrolünü hem manuel hem de uzaktan kontrol şeklinde sağlayabilmektedir.



Şekil 4. Elektronik kontrol sisteminin kontrol diyagramı

Şekil 4’de kontrol kartına ait diyagram gösterilmiştir. Kontrol kartının enerjisi, LiPo pillerin gerilimi 12V değerinden DC/DC Dönüştürücü sayesinde 5V’a indirgenerek sağlanmıştır. Sistemin çalışabilmesi için bir anahtar kullanılmıştır. Anahtar (Switch) kontrol kartını çalıştırarak sistem kontrolünü kullanıcı için hazır hale getirmektedir. Kullanıcı butonlar yardımıyla silahların entegre olduğu motorları çalıştırmaktadır. Motorlara ait sürücü LiPo pillere ait 12V gerilim ile çalışmaktadır. Kontrol kartı üzerinde bulunan mikro işlemci sayesinde tetik mekanizmalarının kontrolü sağlanmaktadır. Mikro işlemci sistemin yarı otonom kontrol edilmesinin yanında haberleşme modülleri ile sistemin uzaktan kontrol edilmesine de olanak sağlamaktadır. Kontrol kartının çıkışında 4 adet servo motor bulunmaktadır. Her servo motor tek bir silahın tetik mekanizmasında bulunup silahın kontrolünü sağlayarak toplamda 4 silahın senkron ateşlenmesi sağlamıştır. Kontrol kartı uzaktan kontrol için haberleşme uygulamaları ile desteklenmiştir. Şekil 5’ de bu uygulamalar verilmiştir.



Şekil 5. Elektronik kontrol sisteminin haberleşme uygulamaları

Şekil 5’de kontrol kartı çok fonksiyonlu haberleşme uygulamaları verilmiştir. Seri haberleşme uygulaması ile servo haberleşme girişinden verilen data verisi ile seri port haberleşme yapılabilmektedir. Bunun yanında

bluetooth ile RF (radyo-frekans) sinyal çalıştırma uygulaması yapılabilir. Bluetooth ile nRF (Kablosuz alıcı/verici haberleşme modülü) ile harici rc rf cihazı, cihaz üzerindeki bir sinyali alıp işlenebilmektedir.

### 3. Bulgular

Tasarımı ve bilgisayar ortamında sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilen dört tüfekli anti-İHA silah sisteminin prototip üretimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 5).



(a)



(b)



(c)

Şekil 5. Dört silahlı prototip, (a) tetik mekanizması, (b) Tetik mekanizmasının silaha montajlanması, (c) Sistemin genel görüntüsü

Şekil 5’de servo motor, elektronik kontrol ünitesi ve mekanik aksanlar gösterilmiştir. Servo motor, 1,8° derece hassasiyette kontrol sağlayabilmekte ve 5Nm tutma torkuna sahiptir. Elektronik kontrol ünitesi yarı otonom olarak sistemin kontrolünü sağlamaktadır. Mekanik aksanlar ise St-37 çelik alaşımlı malzeme kullanılarak üretilmiştir. Sistem testleri açık alanda gerçekleştirilmiştir. Yapılan testlerde 4 silahın eş zamanlı olarak ateşlendiği gözlemlenmiştir (Şekil 6).





Şekil 6. Saha testleri

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Yapılan bu çalışmada insansız hava araçlarına karşı çok namlulu otomatik atış sistemi tasarlanmış ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Sistem testlerinde 10 şarjöre sahip 4 silah, toplamda 40 adet mermiyi ateşlemiştir. Bu çalışmada İHA'ları engellemek için geleneksel olarak kullanılan silah sistemlerine alternatif bir silah sistemi geliştirilmiştir. Mekanik tasarım sürecinde sistemin gerilme, güvenlik katsayısı ve meydana gelen deformasyon miktarı sonlu eleman analiz yöntemlerinden faydalanılarak tespit edilmiştir. Bu analiz sonuçlarına göre 200N'luk kuvvet uygulanan sistemde 63,261 MPa gerilme oluşmuştur. Tasarımı doğrulanan sistem prototip olarak üretilerek saha testlerine tabi tutulmuştur. Sistemde dört adet Eşrefoğlu Bulbup tüfek kullanılmış olup çok kısa bir süre içerisinde 1440 adet 4mm'lik şarapnelden meydana gelen bir mermi bulutu oluşturulmaktadır. Testler esnasında dört tüfeğin eş zamanlı olarak çalıştırılabildiği ve istenilen mermi bulutunu oluşturduğu tespit edilmiştir. Görüntü işleme yöntemleri ve yapay zeka algoritmaları ile sistem geliştirilmeye açıktır. Çalışma bu alanda literatürde yapılacak çalışmaların temelini oluşturacaktır.

#### Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

#### Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Araştırma, Fikir Sahibi, Deney tasarımı, Proje Yöneticisi, Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak  
Yazar 2: Kaynaklar, Araştırma, Deney, Yazma – orijinal taslak  
Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak- Analiz ve yorumlama  
Yazar 3: Kaynaklar, Araştırma, Deneyleme, Biçimsel analiz, Doğrulama, Metodoloji, Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak,  
Yazar 4: Kaynaklar, Araştırma, Deneyleme, Biçimsel analiz, Doğrulama, Metodoloji, Görselleştirme, 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

Bu çalışma OSTİM Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından koordinatörlüğün BAP202206 numaralı “UZAKTAN KONTROLLÜ ATIŞ SİSTEMİ TASARIMI VE ÜRETİMİ” başlıklı projesi ile desteklenmiştir. Bu bağlamda OSTİM Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederiz.”

#### 5. Kaynaklar

- Aledhari, M., Razzak, R., Parizi, R. M., & Srivastava, G. (2021, April). Sensor fusion for drone detection. In *2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring)* (pp. 1-7). IEEE.
- Benyamin, M., & Goldman, G. H. (2014). Acoustic detection and tracking of a Class I UAS with a small tetrahedral microphone array. Army Research Lab Adelphi MD.
- Bhatta, B. (2010). Global navigation satellite systems: insights into GPS, GLONASS, Galileo, Compass, and others. BS Publications.
- Chiper, F. L., Martian, A., Muscalu, D. I., Vladeanu, C., & Marghescu, I. (2022, June). Aerial Drone Defense System based on Software Defined Radio Platforms. In *2022 14th International Conference on Communications (COMM)* (pp. 1-4). IEEE.
- Eldosouky, A., Ferdowsi, A., & Saad, W. (2019). Drones in distress: A game-theoretic countermeasure for protecting uavs against gps spoofing. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(4), 2840-2854.
- GENÇ, Y. M., & ERCİYES, E. (2020). İnsansız Hava Araçları (İHA) Tehditleri ve Güvenlik Yönetimi. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 2(2), 36-42.
- Guvenc, I., Koohifar, F., Singh, S., Sichitiu, M. L., & Matolak, D. (2018). Detection, tracking, and interdiction for amateur drones. *IEEE Communications Magazine*, 56(4), 75-81.
- la Cour-Harbo, A. (2017). Mass threshold for 'harmless' drones. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 9(2), 77-92.
- Jeong, W. H., Choi, H. R., & Kim, K. S. (2018). Empirical path-loss modeling and a RF detection scheme for various drones. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2018.

- Jurn, Y. N., Mahmood, S. A., & Aldhaibani, J. A. (2021, August). Anti-Drone System Based Different Technologies: Architecture, Threats and Challenges. In *2021 11th IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE)* (pp. **114-119**). IEEE.
- Oh, H. M., Lee, H., & Kim, M. Y. (2019, October). Comparing Convolutional Neural Network (CNN) models for machine learning-based drone and bird classification of anti-drone system. In *2019 19th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)* (pp. **87-90**). IEEE.
- Park, S., Kim, H. T., Lee, S., Joo, H., & Kim, H. (2021). Survey on anti-drone systems: Components, designs, and challenges. *IEEE Access*, 9, 42635-42659.
- Sütçüoğlu Ö & Alay M. (2019). Anti-Drone Savunma Sistemleri. Ankara: STM Teknoloji Düşünce Merkezi.
- Wellig, P., Speirs, P., Schuepbach, C., Oechslin, R., Renker, M., Boeniger, U., & Pratisto, H. (2018, June). Radar systems and challenges for C-UAV. In *2018 19th International Radar Symposium (IRS)* (pp. **1-8**). IEEE.



## Yüksek Güçlü Lazer Silah Sistemlerinin Türk Deniz Kuvvetleri Komutanlığı Envanterindeki Savaş Gemilerine Entegrasyonu

\*Makale Bilgisi / Article Info  
Alındı/Received: 30.05.2023  
Kabul/Accepted: 18.01.2024  
Yayımlandı/Published: 27.02.2024

## The Integration of High Power Laser Weapon Systems into The Turkish Naval Forces Warships

Fehmi SANDIKÇI<sup>1\*</sup>, Nigar Berna TEŞNELİ<sup>2</sup>, Ahmet Yahya TEŞNELİ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

<sup>2</sup> Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mühendislik Temel Bilimleri Bölümü, Sakarya, Türkiye

<sup>3</sup> Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

### Öz

Bu çalışma kapsamında Yüksek Güçlü Lazer Silah Sistemlerinin (YGLSS) Türk Deniz Kuvvetleri Komutanlığı envanterindeki savaş gemilerine entegrasyonu incelenmiştir. Savaş gemileri için önemli bir tehdit olan insansız hava ve deniz araçlarının etkisiz hale getirilebilmesi için ihtiyaç duyulan YGLSS çıkış güçleri hesaplanarak bu çıkış gücüne sahip sistem için gerekli olan elektriksel güç ve montaj alanı belirlenmiştir. Elde edilen değerler Türk Deniz Kuvvetleri Komutanlığı envanterindeki savaş gemilerinin alt yapısı ile karşılaştırılarak entegrasyon için uygun gemiler belirlenmiştir. Sonuç olarak; belirli senaryolar dahilinde Türk Deniz Kuvvetleri Komutanlığı envanterindeki firkateynlerin, korvetlerin ve hücum botlarının entegrasyon için uygun olduğu ancak sistem boyutlarından dolayı bazı tadilatların yapılması gerektiği değerlendirilmiştir.

### Anahtar Kelimeler

Yüksek güçlü lazer silah sistemi, Savaş gemileri, İnsansız hava araçları, İnsansız deniz araçları

### Abstract

The integration of High Power Laser Weapon Systems (HPLWS) into the warships in the inventory of the Turkish Naval Force Command has been examined. By calculating the needed output power of HPLWS for the destruction of unmanned aerial vehicles (UAVs) and unmanned surface vehicles (USVs) which is an important threat for the warships, the electrical power and installation area required for the system with this output power were determined. The obtained values were compared with the substructure of the warships in the inventory of the Turkish Naval Forces Command and the appropriate ships for integration were determined. As a result it is evaluated that frigates, corvettes and assault boats in the inventory of Turkish Navy Command are suitable for integration within certain scenarios but some modifications may be required due to the system dimensions.

### Keywords

High power laser weapon system, Warships, Unmanned aerial vehicle (UAV), Unmanned surface vehicle (USV)

### 1. Giriş

Yüksek Güçlü Lazer Silah Sistemi (YGLSS) lazer teknolojisini kullanan yönlendirilmiş bir enerji silahıdır. Uzun süre yapılan AR-GE çalışmaları neticesinde, deniz platformlarının savunmasında kullanılacak operasyonel askeri silah haline getirilmiştir (O'Rourke, 2022). YGLSS'ler konvansiyonel silahlar ile karşılaştırıldığında atım adedi, atış maliyeti ve hızlı tepki süresi açısından çok önemli avantajlar sağlamaktadır (O'Rourke, 2015).

Bu çalışma kapsamında YGLSS'nin savaş gemilerinin savunmasında kullanımı incelenecektir. Diğer kullanım alanları olan kara birliklerinin savunması, hava platformlarının savunması ya da sivil tesis veya yerleşim

yerlerinin savunması gibi konular çalışma kapsamına alınmamıştır.

Literatürde YGLSS'lerin savaş gemisine entegrasyonunun değerlendirildiği çok az sayıda çalışma mevcuttur.

2012 yılında Ang (2012) tarafından, patlayıcı yüklü küçük ve hızlı bot saldırılarına karşı koymak için bir YGLSS'nin Amerikan Donanmasına ait LCS (Littoral Combat Ship) sınıfı bir gemide kullanılabilirliği analiz edilmiştir. Çalışmada; hedef imhası için gerekli YGLSS gereksinimleri LCS sınıfı gemilerin altyapı imkanları ile karşılaştırılarak, YGLSS'lerin LCS sınıfı savaş gemilerinde belirli senaryolar dahilinde kullanılabilirliği ortaya konulmuştur.

2018 yılında ise Gildemeyer vd. (2018) tarafından; Amerikan Donanmasına ait LPD-17 (Landing Platform

Dock) sınıfı bir gemide, bir YGLSS'nin entegrasyonu için belirlenen 8 adet güverte üstü yerleşim yerinin, belirlenen 5 farklı kriter (gemi entegrasyon etkileri, türbülans, çevresel etkiler, dikey ve yatay kaplama alanı) kullanılarak entegrasyon için uygunlukları değerlendirilmiştir.

2021 yılında ise Taylor (2021) tarafından farklı formasyondaki sürü dronlarının, deniz ortamında belirlenen angajman stratejileri çerçevesinde, YGLSS savunmasına karşı etkinlikleri incelenmiş ve sürü dron formasyonları değiştirilerek saldırı başarı oranı artırılabilirdiği ya da uygun angajman stratejisi ile YGLSS ile gemi savunma başarı oranının artırılabilirdiği ortaya konulmuştur.

YGLSS geliştirme ve savaş gemilerine entegrasyonu kapsamında; Amerika Birleşik Devletleri tarafından, test gemisine entegre edilen 105 kW'lık prototip MLD (Maritime Laser Demonstration) Sisteminin Nisan 2011 tarihinde deniz ortamında başarıyla test edilmesi (O'Rourke, 2015), Aralık 2014 tarihinde USS Ponce gemisine entegre edilen 30 kW'lık prototip LaWS (Laser Weapon System) sisteminin operasyonel silah olduğunun beyan edilmesi (O'Rourke, 2022), Mayıs 2020 tarihinde USS Portland gemisine entegre edilen 150 kW'lık prototip LWSD (Laser Weapon System Demonstrator) sisteminin deniz ortamında başarı ile test edilmesi (O'Rourke, 2022), Ağustos 2022 tarihinde USS Preble gemisine 60 kW'lık HELIOS (High-Energy Laser with Integrated Optical dazzler and Surveillance) sisteminin entegrasyonu ve deniz testlerine hazır hale getirilmesi (İnternet Kaynakları-1 (İnt. Kyn. 1)) önemli aşamalar olarak sıralanabilir. Türkiye'de ise deniz platformuna entegre edilen bir YGLSS bulunmamaktadır, ancak TÜBİTAK BİLGEM tarafından geliştirilen Türkiye'nin ilk askeri standartlara uygun milli lazer silah sistemi ARMOL (Araca Monte Milli Lazer Sistemi) (İnt. Kyn. 2) IŞIN projesi kapsamında deniz platformlarına uygun hale getirilerek entegre edilmesi beklenmektedir.

Bir savaş gemisinin görevi, barış zamanında istihbarat faaliyetleri ve terör saldırılarına karşı savunma iken, savaş zamanında ise buna düşman birliklerinden yapılan saldırılara karşı koruma da eklenir. Bu saldırılar veya istihbarat elde etme faaliyetleri günümüzde yoğun bir şekilde İnsansız Hava Aracı (İHA), Silahlı İnsansız Hava Aracı (SİHA), kamikaze dronlar (gezici mühimmat) ve bomba yüklü insansız deniz aracı (İDA) gibi sistemler kullanılarak yapılmaktadır (İnt. Kyn. 3, İnt. Kyn. 4). Bu çalışma kapsamında kamikaze dron veya bomba yüklü İDA'nın savaş gemisine tehdit olduğu senaryolar üzerinde çalışılmıştır.

YGLSS'lerin savaş gemilerine entegrasyonunda dikkate alınması gereken ihtiyaçlar; elektriksel güç, yerleşim alanı, iklimlendirme, savaş yönetim sistemi entegrasyonu, stabilizasyon ve sistem maliyeti olarak sınıflandırılabilir. Bu çalışmada sadece elektriksel güç ve yerleşim alanı ihtiyacı açısından değerlendirme yapılmıştır.

Bu kapsamda; ilk olarak kamikaze dron ve bomba yüklü İDA'nın imha edilmesine yönelik senaryolar oluşturulmuş, kamikaze dronun gemi için belirlenen güvenli bölgenin ötesinde imha senaryosu senaryo 1 (S1), bomba yüklü İDA'nın gemi için belirlenen güvenli bölgenin ötesinde imha senaryosu senaryo 2 (S2) olarak adlandırılmıştır. Belirlenen senaryolar çerçevesinde tehditleri etkisiz hale getirecek YGLSS'nin ihtiyaç duyacağı çıkış gücü hesaplanmış ve bu gücü sağlayabilecek YGLSS'lerin Türk Deniz Kuvvetleri Komutanlığı'nın envanterindeki savaş gemilerine entegrasyonu için ihtiyaç duyacağı elektriksel güç ve yerleşim alanı ihtiyaçları belirlenmiştir. Belirlenen bu değerler mevcut gemilerin alt yapı imkanları ile karşılaştırılarak entegrasyonun yapılabileceği savaş gemileri tespit edilmiştir.

Bu çalışma ile hangi savaş gemilerin YGLSS entegrasyonu için uygun olduğunun belirlenmesi ile birlikte; tehditlerin belirlenmesinin YGLSS seçiminde etkin olduğu ve seçilen YGLSS'nin inşa edilecek gemilerin tasarımına önemli etkileri olduğu da değerlendirilmektedir. Çalışmada ulaşılan sonuçların bu yönü ile gemi tasarım ve inşa alanında yapılan çalışmalar için kullanılabilir bir veri ve karar vericiler için farkındalık oluşturulması beklenebilir.

Bu çalışmada herkes tarafından ulaşılabilen, açık kaynaklardan elde edilebilen ve gizlilik derecesi olmayan bilgiler kullanılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot / Materials and Methods

### 2.1 Yüksek güçlü lazer silah sistemleri

Yüksek Güçlü Lazer Silah Sistemi (YGLSS) lazer teknolojisini kullanan yönlendirilmiş bir enerji silahıdır. Uzun süre yapılan arge çalışmaları neticesinde, deniz platformlarının savunmasında kullanılabilecek operasyonel askeri silah haline getirilmiştir (O'Rourke, 2022). YGLSS'ler konvansiyonel silahlar ile karşılaştırıldığında atım adedi, atış maliyeti ve hızlı angajman süresi açısından çok önemli avantajlar sağlamaktadır (O'Rourke, 2015).

Türkiye'nin de aralarında olduğu pek çok ülkede YGLSS geliştirme ve savaş gemilerine entegrasyonuna yönelik çalışmalar sürdürülmektedir.

Bu çalışma kapsamında değerlendirilecek YGLSS'ler ve özellikleri aşağıda sunulmuştur.

### 2.1.1 YGLSS'lerin ana özellikleri

Bu bölümde YGLSS'lerin etkinliğini belirlemek için kullanılacak özellikler açıklanacaktır.

#### 2.1.1.1 Işın gücü

Işın gücü, lazerin hedefe verebileceği tahribatın derecesini belirleyen, lazer ışınının bir özelliğidir. Watt (W, kW ve MW) cinsinden ölçülen lazer ışın gücü, lazer ışınının optik güç çıkışını ifade eder.

#### 2.1.1.2 Işın kalitesi

Işın kalitesi, ışının bir noktaya ne kadar iyi odaklanabildiğinin bir ölçüsüdür. Hem Işın Parametresi Çarpımı (Beam Parameter Product (BPP<sub>A</sub>)) hem de M<sup>2</sup>, ışın kalitesinin ölçüleridir. Denklem (1) ile tanımlanan BPP<sub>A</sub>, uzak alan ışın sapma açısı (θ) ile ışının orta kısmındaki yarıçapının (W) çarpımıdır. Lazer ışınının orta kısmı, yayın yönünde demet yarıçapının en az olduğu bölgedir.

$$BPP_A = \theta W \quad (1)$$

Denklem (2) ile tanımlanan M<sup>2</sup>, BPP<sub>A</sub> ile BPP<sub>G</sub>'nin oranıdır. BPP<sub>G</sub> (Beam Parameter Product of a diffraction-limited Gaussian beam), BPP<sub>A</sub> ile aynı dalga boyuna sahip kırınım sınırlı bir Gauss ışınının ışın parametresi çarpımıdır. Kırınım sınırlı Gauss ışını, ışının belirli bir dalga boyu için en iyi şekilde odaklandığı ideal bir ışındır.

$$M^2 = BPP_A / BPP_G \quad (2)$$

En iyi ışın kalitesi M<sup>2</sup> = 1 olduğunda elde edilir.

#### 2.1.1.3 YGLSS enerji dönüşüm verimliliği

Denklem (3) ile ifade edilen duvar prizi verimliliği (wall-plug efficiency) veya ışınım verimliliği, sistemin elektrik gücünü optik güce dönüştürdüğü enerji dönüşüm verimliliğidir. Optik çıkış gücünün giriş elektrik gücüne oranı olarak tanımlanır. Lazer sistemlerinde bu verimlilik, yalnızca lazerin kendisini değil, güç kaynağındaki kayıpları, kontrol sisteminin güç ihtiyacı ve aynı zamanda soğutma sistemi için gereken gücü de içerir.

$$\eta = P_{\text{çıkış}} / P_{\text{giriş}} \quad (3)$$

### 2.1.2 Deniz tipi lazer gösterimi sistemi

Deniz Tipi Lazer Gösterimi (MLD (Maritime Laser Demonstration)) Sistemi, Northrop Grumman firması tarafından geliştirilmiş, Levha (Slab) tipi katı hal lazer

teknolojisini kullanan, 105 kW'lık çıkış gücüne sahip bir prototip YGLSS'dir. Her biri 15 kW'lık çıkış gücüne sahip 7 adet levha tipi lazerin eş fazlı olarak birleştirilmesi ile 105 kW'lık çıkış gücüne ulaşılmıştır. Özellikleri Çizelge 1'de verilen MLD Sistemi 6 Nisan 2011 tarihinde deniz ortamında başarıyla test edilmiştir (O'Rourke, 2015). Test çalışmaları tamamlanan sistem geliştirme çalışmalarında kullanılmak maksadıyla üretici firmaya teslim edilmiştir. 105 kW'lık çıkış gücüne sahip bir YGLSS, %20 ile %25 (O'Rourke, 2015) arasında enerji dönüşüm verimliliği ile çalışması durumunda gemi güç sisteminden 420 kW ile 525 kW arasında güç çekecektir. YGLSS'ler lazer cihazı, demet kontrol cihazları ve güç kaynağından oluşmaktadırlar. Savaş gemilerinde iklimlendirme imkanına sahip kapalı mahaller güverte altı olarak, açık mahaller ise güverte üstü olarak adlandırılmaktadır. YGLSS'yi oluşturan alt sistemlerden demet kontrol cihazı güverte üstü bölgeye, lazer cihazı ve güç kaynağı ise güverte altı bölgeye monte edilmektedir. YGLSS'lerin kullandığı lazer teknolojisinin hem yakın zamanda geliştirilmiş/geliştirilmeye devam ediyor olması hem de savaş ortamında düşmana karşı üstünlük sağlamaya katkı sağlayacak önemli bir silah olması nedeniyle açık kaynaklarda YGLSS'ler hakkında ayrıntılı bilgilere ulaşılamamaktadır. Bu çalışmada MLD sisteminin güverte üstü birimleri 600 kg, güverte altı birimleri ise 800 kg kabul edilmiştir (Ang, 2012). Bu sistemin entegrasyonu ile gemiye toplam 1400 kg'lık bir yük ilave edilmiş olacaktır. Çizelge 2'de MLD'nin boyut ve ağırlık bilgileri verilmiştir.

**Çizelge 1.** MLD sisteminin özellikleri (O'Rourke, 2015)

Özellikler	Açıklama
Teknoloji	Levha Tipi Katı Hal Lazer
Üretici Firma	Northrop Grumman
Işın Gücü (kW)	105
Işın Kalitesi (M <sup>2</sup> )	< 3
Enerji Dönüşüm Verimliliği (%)	20-25
Dalga Boyu (µm)	1,064
Elektriksel Güç İhtiyacı (kW)	420-525
Test Safhası	Deniz ortamında test edildi

**Çizelge 2.** MLD sistemi için boyut ve ağırlık bilgileri (Ang, 2012).

Alt Sistem	Hacim (m <sup>3</sup> )	Ağırlık (kg)
Demet Kontrol Sistemi (Güverte Üstü)	5,7	600
Lazer Cihazı (Güverte Altı)	2	200
Güç Kaynağı (Güverte Altı)	6	600

Bu çalışmada YGLSS'nin savaş gemisine kalıcı olarak entegre edileceği, elektrik ve iklimlendirme ihtiyaçlarını gemi alt yapısından karşılayacağı ve ilave güç depolama birimlerine ihtiyaç duymayacağı varsayılmıştır.

### 2.1.3 Lazer silah sistemi

LaWS (A/N SEQ-3 Lazer Weapon System), Amerikan Deniz Kuvvetleri tarafından geliştirilmiş, fiber lazer teknolojisini kullanan, 30 kW'lık çıkış gücüne sahip bir prototip YGLSS'dir. Özellikleri Çizelge 3'de verilen LaWS Sistemi Aralık 2014 tarihinde deniz ortamında sürü bot ve sürü İHA tehditlerine karşı başarıyla test edilmiş ve operasyonel bir silah olduğu beyan edilmiştir (O'Rourke, 2022). 2017 yılına kadar kullanılan sistem daha sonra karaya konuşlu test sistemine dönüştürülmüştür.

**Çizelge 3.** LaWS sisteminin özellikleri (O'Rourke, 2015).

Özellikler	Açıklama
Teknoloji	Fiber Lazer
Üretici Kurum	U.S. Naval Research Laboratory
Işın Gücü (kW)	30
Işın Kalitesi (M <sup>2</sup> )	17
Enerji Dönüşüm Verimliliği (%)	25
Dalga Boyu (µm)	1,064
Elektriksel Güç İhtiyacı (kW)	120
Test Safhası	Deniz ortamında test edildi

30 kW'lık çıkış gücüne sahip LaWS, %25 enerji dönüşüm verimliliği ile çalışması durumunda gemi güç sisteminden 120 kW'lık güç çekecektir.

Günümüzde YGLSS'lerde kullanılan lazer teknolojilerini geliştirmeye yönelik çalışmaların sürmesi ve sistemlerin savunma amaçlı kullanımı YGLSS'ler hakkında açık kaynaklarda ayrıntılı bilgilerin bulunmamasına sebep olduğundan, bu çalışmada MLD sistemi referans alınarak diğer sistemlerin ağırlık bilgileri hesaplanacaktır. Çıkış gücü MLD sisteminden az olan sistemlerin MLD sistemi ile aynı ağırlığa sahip olduğu varsayılacak, çıkış gücü MLD sisteminden fazla olan sistemlerin ağırlık bilgileri ise denklem (4) kullanılarak hesaplanacaktır. Denklem (4); sistemlerin çıkış gücü ve ağırlıkları arasında doğrusal bir ilişki olduğu varsayılarak türetilmiştir. LaWS sisteminin çıkış gücü MLD sisteminden düşük olduğu için güverte üstü birimleri 600 kg, güverte altı birimleri ise 800 kg kabul edilmiştir. Bu sistemin entegrasyonu ile gemiye toplam 1400 kg'lık bir yük ilave edilmiş olacaktır (Ang, 2012).

$$\text{Yeni Ağırlık} = \left( \frac{\text{Yeni Çıkış Gücü}}{\text{Referans Çıkış Gücü}} \right) \times \text{Referans Ağırlık} \quad (4)$$

### 2.1.4 Lazer silah sistemi gösterimi

LaWS sisteminin gelişmiş versiyonu olan LWSD (Laser Weapon System Demonstrator), Katı Hal Lazer Geliştirme Programı (Solid-State Laser Technology Maturation (SSL-TM)) kapsamında Northrop Grumman tarafından geliştirilmiş, fiber lazer teknolojisini kullanan, 150 kW'lık çıkış gücüne sahip bir prototip YGLSS'dir. Özellikleri Çizelge 4'de verilen LWSD, Mayıs 2020 tarihinde su üstü savaş gemisine entegre edilerek deniz ortamında sürü bot ve sürü İHA tehditlerine karşı başarıyla test edilmiştir (O'Rourke, 2022). 2024 yılında çalışmaların tamamlanarak sistemin sökülmesi planlanmaktadır.

**Çizelge 4.** LWSD sisteminin özellikleri (O'Rourke, 2022).

Özellikler	Açıklama
Teknoloji	Fiber Lazer
Üretici Kurum	Northrop Grumman
Işın Gücü (kW)	150
Işın Kalitesi (M <sup>2</sup> )	17
Enerji Dönüşüm Verimliliği (%)	25
Dalga Boyu (µm)	1,064
Elektriksel Güç İhtiyacı (kW)	600
Test Safhası	Deniz ortamında test edildi

150 kW'lık çıkış gücüne sahip LWSD, %25 enerji dönüşüm verimliliği ile çalışması durumunda gemi güç sisteminden 600 kW'lık güç çekecektir.

Bu çalışmada LWSD sisteminin ağırlık bilgileri denklem (4) kullanılarak, MLD sisteminin ağırlık bilgilerinin çıkış güçleri oranı kadar artırılması ile bulunmuştur. Yeni çıkış gücü 150 kW, referans çıkış gücü 105 kW ve referans ağırlık 1400 kg alınırsa bu sistemin entegrasyonu ile gemiye toplam 2100 kg'lık bir yük ilave edilmiş olacaktır.

### 2.1.5 Su üstü gemileri lazer silah sistemi

HELIOS (High-Energy Laser with Integrated Optical dazzler and Surveillance), Lockheed Martin tarafından geliştirilmiş, fiber lazer teknolojisini kullanan 60 kW'lık çıkış gücüne sahip bir YGLSS'dir. Özellikleri Çizelge 5'de verilen HELIOS Sistemi 2022 yılında su üstü savaş gemisine entegre edilerek deniz testlerine hazır hale getirilmiştir (O'Rourke, 2022). Sistemin geliştirilmesinde LaWS ve LWSD sistemlerinden elde edilen tecrübeden yararlanılmıştır.

60 kW'lık çıkış gücüne sahip LWSD, %25 enerji dönüşüm verimliliği ile çalışması durumunda gemi güç sisteminden 240 kW'lık güç çekecektir.

**Çizelge 5.** HELIOS sisteminin özellikleri (O'Rourke, 2022).

Özellikler	Açıklama
Teknoloji	Fiber Lazer
Üretici Kurum	Northrop Grumman
Işın Gücü (kW)	60
Işın Kalitesi (M <sup>2</sup> )	17
Enerji Dönüşüm Verimliliği (%)	25
Dalga Boyu (µm)	1,064
Elektriksel Güç İhtiyacı (kW)	240
Test Safhası	Deniz ortamında test edilecektir

HELIOS sisteminin çıkış gücü MLD sisteminden düşük olduğu için güverte üstü birimleri 600 kg, güverte altı birimleri ise 800 kg kabul edilmiştir. Bu sistemin entegrasyonu ile gemiye toplam 1400 kg'lık bir yük ilave edilmiş olacaktır.

### 2.1.6 Yüksek güçlü lazer sistemi (IŞIN Projesi)

IŞIN projesi kapsamında; Savunma Sanayii Başkanlığı koordinesinde, TÜBİTAK BİLGEM tarafından yüksek güçlü lazer sistemi (YGLS) geliştirme faaliyetleri devam etmektedir. Bu kapsamda geliştirilen ilk ürün olan Araca Monte Milli Lazer Sistemi (ARMOL), fiber lazer teknolojisini kullanan, 20 kW'lık çıkış gücüne sahip bir YGLSS'dir. Özellikleri Çizelge 6'da verilen ARMOL TSK'nın hizmetine sunulan Türkiye'nin ilk askeri standartlara uygun milli lazer sistemidir (İnt. Kyn. 2). Gelecek yıllarda IŞIN projesi kapsamında su üstü savaş gemisine uyarlanarak entegre edilebileceği değerlendirilmektedir.

YGLS'nin enerji dönüşüm verimliliği açık kaynaklardan bulunamadığı için muadilleri ile aynı olacağı varsayılarak %25 kabul edilmiştir. 20 kW'lık çıkış gücüne sahip YGLS, gemi güç sisteminden 80 kW'lık güç çekecektir.

**Çizelge 6.** YGLS'nin özellikleri.

Özellikler	Açıklama
Teknoloji	Fiber Lazer
Üretici Kurum	TÜBİTAK BİLGEM
Işın Gücü (kW)	20
Işın Kalitesi (M <sup>2</sup> )	2
Enerji Dönüşüm Verimliliği (%)	25
Dalga Boyu (µm)	1,064
Elektriksel Güç İhtiyacı (kW)	80

ARMOL deniz versiyonu olacak YGLS'nin çıkış gücü MLD sisteminden düşük olduğu için güverte üstü birimleri

600kg, güverte altı birimleri ise 800kg kabul edilmiştir. Bu sistemin entegrasyonu ile gemiye toplam 1400kg'lık bir yük ilave edilmiş olacaktır.

### 2.2 Türk deniz kuvvetleri envanterindeki savaş gemileri

Türk Deniz Kuvvetleri Komutanlığı envanterinde Çizelge 7'de ayrıntıları verilen 16 adet firkateyn, 9 adet korvet, 18 adet hücumbot bulunmaktadır. Ayrıca Çizelge 7'de yer almayan denizaltı, mayın avlama gemisi ve yardımcı sınıf gemiler de mevcuttur. YGLSS entegrasyonu kapsamında montaj için tahsis edilecek alan ve gemiden çekilecek elektriksel güç ihtiyacı inceleneceğinden bu bölümde verilen bilgiler bu iki kriter ile sınırlı tutulmuştur.

Savaş gemilerinde dizel jeneratörler tarafından üretilen elektrik enerjisi; silah sistemleri, seyir sistemleri, muhabere sistemleri ve diğer sistemler tarafından kullanılmaktadır. Mevcut savaş gemilerine yeni bir sistem entegre edebilmek için sistemin ihtiyacı olan elektrik enerjisi gemi alt yapısı tarafından sağlanıyor olması gerekmektedir.

Bu çalışmada; belirlenen senaryolar çerçevesinde tespit edilen YGLSS çıkış güçleri, gemi altyapısı tarafından sağlanacak elektrik enerjisi ile karşılaştırılarak entegrasyonun uygun olup olmadığı değerlendirilecektir. Ancak Türk Deniz Kuvvetlerinin envanterindeki savaş gemilerindeki dizel jeneratörler tarafından üretilen elektrik enerjisi miktarlarının açık kaynaklarda bulunmaması nedeniyle bu değerler açık kaynaklarda bulunabilen her savaş gemisinin kendine ait tahrik sisteminin gücünün %10'u kadar olacağı; bu değerinde %15'inin savaş ortamında YGLSS tarafından kullanılabilmesi (Ang, 2012) varsayılmıştır. Sivil firma tarafından üretilmiş Yeni Tip Karakol Botu gemisinin teknik özellikler (İnt. Kyn. 5) incelendiğinde; tahrik sistemi her biri 2720 kW iki adet dizel makine ile sağlandığını, elektrik enerjisinin ise her biri 250 kW iki adet dizel jeneratör ile sağlandığını ve bu değerinde tahrik sisteminin yaklaşık %10'u kadar olduğu tespit edilmiştir.

Türk Deniz Kuvvetlerinin envanterindeki gemiler Çizelge 7'de verilen teknik özellikleri açısından incelendiğinde firkateynler ve korvetlerin hem fiziki yer ihtiyacı hem de elektrik enerjisi açısından YGLSS entegrasyonuna daha uygun oldukları görülmektedir. Yapılan/yapılacak olan modernizasyon projeleri ile gemilerin gelişmiş silah ve sensör sistemlerine sahip olması sağlanmaktadır ancak halihazırda hiçbir savaş gemisinde lazer silah sistemi bulunmamaktadır.

**Çizelge 7.** Türk Deniz Kuvvetleri envanterindeki savaş gemileri.

Sınıfı	Sayısı (Adet)	Boyu (m)	Ağırlığı (ton)	Tahrik Sistemi için Üretilen Güç (MW)	Tahmini Elektriksel Güç (MW)	YGLSS için kullanılacak Tahmini Elektriksel Güç (kW)
<b>Fırkateynler</b>						
GABYA (İnt. Kyn. 6)	8	135	4100	30,5	3,05	458
BARBAROS (İnt. Kyn. 7)	4	118	3380	53,43	5,34	801
YAVUZ (İnt. Kyn. 8)	4	115	2919	22	2,2	330
<b>Korvetler</b>						
ADA (İnt. Kyn. 9)	4	99,5	2300	31,64	3,16	475
BURAK (İnt. Kyn. 10)	5	80	1325	8,82	0,88	132
<b>Hücumbotlar</b>						
DOĞAN (İnt. Kyn. 11)	3	58	436	13	1,3	195
RÜZGAR (İnt. Kyn. 12)	4	58	410	13	1,3	195
YILDIZ (İnt. Kyn. 13)	2	58	433	11,1	1,1	167
KILIÇ (İnt. Kyn. 14)	9	62	548	11,1	1,1	167

### 3. Bulgular ve Tartışma / Results and Discussions

#### 3.1 Tehdit senaryoları ve güç ihtiyacının hesabı

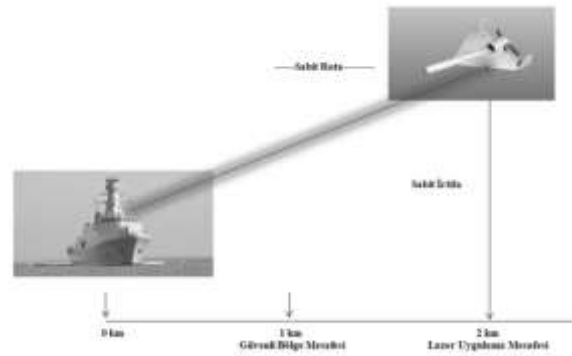
Gemilerde mevcut sensörler aracılığıyla tespit edilen tehditler, gemiler için tehlikeli olacak mesafeye gelmeden önce takip edilmeye başlanır ve imha edilmek istenir. Amaç hedefleri mümkün olduğunca uzak mesafelerde etkisiz hale getirmektir ancak daha uzak mesafelerdeki hedefleri imha etmek için daha büyük boyutlarda ve daha yüksek çıkış gücüne sahip sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada iki adet tehdit senaryosu belirlenmiştir. Birinci senaryoda, Şekil 1'de, hem saldırı hem de istihbarat amacıyla kullanılan kamikaze dron (gezici mühimmat ya da bomba yüklü İHA), ikinci senaryoda, Şekil 2'de, hem saldırı hem de istihbarat amacıyla kullanılan bomba yüklü İDA etkisiz hale getirilecektir. Her iki senaryoda hedeflerin gemiye sabit hız, sabit irtifa, sabit rota ve YGLSS'nin görüş açısından yaklaştıkları varsayılmıştır. Meydana gelebilecek patlamalardan etkilenmemesi için geminin güvenlik mesafesi 1 km olarak belirlenmiştir (Ang, 2012). Senaryo 1 ve Senaryo 2'de tehditlerin en geç 1 km mesafede imha edilmesi hedeflenmektedir.

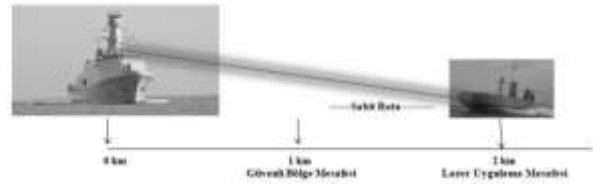
Bu bölümde senaryolar çerçevesinde tehditleri etkisiz hale getirecek YGLSS'nin çıkış gücü hesaplanmıştır.

#### 3.1.1 Kamikaze dronu etkisiz hale getirmek için ihtiyaç duyulan YGLSS çıkış gücünün hesaplanması

İlk olarak Çizelge 8'de özellikleri verilen örnek kamikaze dronun (İnt. Kyn. 15) tehdit olarak savaş gemisinin üzerine geldiği varsayılarak imha edilebilmesi için uygulanacak çıkış gücü hesaplanmıştır. Örnek alınan kamikaze dron alüminyum malzemesinden yapılmıştır ve malzeme kalınlığı 2 mm'dir (Michnewich, 2018).



Şekil 1. Kamikaze dron imha senaryosu



Şekil 2. Bomba yüklü İDA imha senaryosu

Çizelge 8. Örnek kamikaze dron (IAI Harpy) özellikleri

Özellikler	Açıklama
Uzunluk (m)	2,7
Kanat Açıklığı (m)	2,1
Maksimum Hız (m/s)	51
Patlayıcı (kg)	32

Bir kamikaze dronun etkisiz hale getirilmesi, üretildiği malzemenin ısıtılması ve eritilmesi ile sağlanabilir. Kamikaze drona verilecek her hangi bir hasar aerodinamiği ve stabiliteyi etkiler ve görev yapamaz hale getirir. Çizelge 9'deki bilgiler ile kamikaze dronun etkisiz hale getirilmesi için ihtiyaç duyulan çıkış gücü aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.



Çıkış gücünü hesaplamak için kullanılan önemli parametrelerden biri birim alana düşen enerji miktarı olarak tanımlanan enerji yoğunluğu ( $F_{-}$ ) ya da enerji akısıdır ve denklem (5) ile verilir (İnt. Kyn. 16).

$$F_{-} = \frac{E}{A} (J/cm^2) \quad (5)$$

Burada, E lazerin enerjisi, A aydınlanan alana (spot alanına) karşılık gelmektedir.

Malzemelerin ısını artırmak ve erime noktasına çıkarmak için, uygulanacak enerji yoğunluğu, denklem (6) ile hesaplanır (İnt. Kyn. 17). Hesaplama ortam sıcaklığı  $T_{ORTAM}$  300 K olarak alınmıştır.

$$F = \{C_p(T_{ERİME} - T_{ORTAM}) + \Delta H_{FÜZYON}\} \rho h \quad (6)$$

**Çizelge 9.** Örnek olarak seçilen kamikaze dronun imal edildiği malzemeye ait değerler

Simge	Tanım	Alüminyum (Michnewich, 2018)
Cp	Özısı (J/g-K)	0,9
$T_{ERİME}$	Erime Sıcaklığı (K)	934
$\Delta H_{FÜZYON}$	Füzyon Isısı (J/g)	387
$\rho$	Yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )	2,95
h	Malzeme Kalınlığı (mm)	2
F	Hesaplanan Enerji Yoğunluğu (J/cm <sup>2</sup> )	565

Kamikaze dronun etkisiz hale getirilmesi için ihtiyaç duyulan enerji yoğunluğu 565 J/cm<sup>2</sup> dir.

Çıkış gücünü hesaplamak için kullandığımız diğer bir parametre ise birim alana düşen optik güç olarak ifade edilen güç yoğunluğudur ve denklem (7) ile verilir (İnt. Kyn. 18).

$$I = \frac{P}{A} (W/cm^2) \quad (7)$$

Burada, P optik güç, A ise aydınlanan alana karşılık gelmektedir.

Güç yoğunluğu denklem (7) ile ifade edildiği gibi enerji yoğunluğunun uygulama süresine bölünmesiyle bulunabilir. YGLSS'ler ısınma probleminden dolayı uzun süre lazer üretemezler. Bu süre soğutma altyapısının kapasitesine bağlı olarak farklı değerlerde olabilir. Bu çalışmada uygulama süresi 10 sn olarak kabul edilmiştir

(Michnewich, 2018). YGLSS çıkış gücü ve gemi iklimlendirme altyapısına bağlı olarak 1 sn, 5 sn ve 20 sn gibi farklı uygulama süreleri kullanılabilir.

$$I = \frac{F}{t} (W/cm^2) \quad (8)$$

Denklem (8)'e göre kamikaze dronun etkisiz hale getirilmesi için t=10 s boyunca, F=565 J/cm<sup>2</sup> enerji yoğunluğu uygulanırsa I=56,5 W/cm<sup>2</sup> güç yoğunluğu elde edilir.

Hedefi etkisiz hale getirecek çıkış gücünü hesaplamak için kullanılan enerji ve güç yoğunluğuna ilave olarak diğer önemli bir parametre hedefin yansıtıcılığıdır. Hedef yüzeyine bağlı olarak gelen ışık, tek bir açı ile yansıtılabilir veya birden fazla farklı açı ile yansıtılabilir. Genel olarak hedef yüzeyleri lazer dalga boyları için oldukça pürüzlüdür ve farklı açılar ile yansıtma davranışı daha baskındır. Yansıtıcılığın (R) lazer gücüne etkisi denklem (9) ile tanımlanmaktadır (İnt. Kyn. 19). Bu çalışmada alüminyumun yansıtıcılık oranı %85 (Michnewich, 2018); dron yüzeyinin mat siyah boyasının (Jha, 2016) yansıtıcılık oranı %4 (Sabatini vd.,2010) olarak kabul edilmiştir.

$$I(\text{yeni}) = I \times \frac{100}{(100-R)} (W/cm^2) \quad (9)$$

Yansıtıcılığın etkisi hesaba dahil edildiğinde; I=56,5 W/cm<sup>2</sup>, alüminyum için R=85, yeni güç yoğunluğu I(yeni)=376,7 W/cm<sup>2</sup>, siyah mat boya için R=4, yeni güç yoğunluğu I (yeni) = 392 W/cm<sup>2</sup> olarak hesaplanır.

Lazer demetinin odaklandığı alan küçüldükçe yıkıcı etkisi artar. Bu nedenle lazer demetinin mümkün olan en küçük noktaya odaklanması hedeflenir. Ancak demet odaklanmasını bozan bazı faktörler vardır ve kırımın bunlardan biridir. Işığın karşılaştığı bazı engelleri yolunu değiştirerek geçmesi olarak tanımlanan kırımdan dolayı aydınlanan alan boyutları (S) daha geniş olmaktadır ve denklem (10)'de verilmiştir (İnt. Kyn. 20).

$$S > \frac{\lambda R}{D} \quad (10)$$

Burada;  $\lambda$  dalga boyu, R hedefin mesafesi ve D ise açıklık çapıdır. Kısa mesafelerde kamikaze dronları imha etmek, kısa mesafelerde daha az titreşim meydana gelmesi ve zayıflamadan dolayı meydana gelen kayıpların az olması nedeniyle uzun mesafelere göre daha kolaydır. Ancak lazer silahının kullanımını sadece güvenlik mesafesi ile sınırlayamayacağımız için daha uzun menzilde YGLSS'nin

etkinliğinin sağlanması gerekmektedir. Bu çalışmada YGLSS'lerin kısa mesafe savunma sistemi olduğu varsayılarak etkinlik mesafesi 3 km (O'Rourke, 2022), açıklık çapı ise 30 cm kabul edilecektir (Taylor, 2021).

3 km mesafede  $\lambda = 1 \mu\text{m}$ ,  $D = 30 \text{ cm}$ , ve  $R = 3 \text{ km}$  kabul edilirse denklem (10)'a göre hedef nokta genişliği (aydınlanan alan) 1 cm den daha büyük olacaktır.

Lazer demet yönlendiricisindeki salınımdan veya takip hatasından kaynaklanan demet titreşimi etkisi aynı zamanda hedef nokta genişliğini de etkiler.

Titreşim değerinin spot alan üzerindeki etkisi denklem (11) ile ifade edilir (Fussman, 2014).

$$w \approx Q_{\text{rms}} \ell \quad (11)$$

$Q_{\text{rms}}$  titreşimden kaynaklı açısal değişimi,  $\ell$  ise hedefe olan mesafedir.

Titreşimden kaynaklı açısal değişim 5  $\mu\text{rad}$  (Michnewich, 2018) kabul edilirse, 3 km'de hedef nokta genişliği (yarıçapı) yaklaşık 2,5 cm ve hedef nokta alanı (aydınlanan alan) 4,9  $\text{cm}^2$  olur.

Denklem (9) ile  $\text{cm}^2$  başına 392 W olarak bulunan güç yoğunluğu, 4,9  $\text{cm}^2$  olarak belirlenen hedef nokta alanı için hesaplandığında hedef kamikaze dronu etkisiz hale getirmek için ihtiyaç duyulan minimum optik güç 1,92 kW olarak bulunur.

Lazer demeti atmosferde yayıldığı için gazlar tarafından soğurulma ile ortaya çıkan atmosferik kayıplardan dolayı güçte azalma olur. Bu azalma denklem (12) ile ifade edilir (Weichel, 1990).

$$\tau(R) = \frac{P(R)}{P(0)} = e^{-\sigma R} \quad (12)$$

Burada  $\tau(R)$  R mesafedeki iletkenliği,  $P(R)$  R mesafedeki lazer gücünü,  $P(0)$  kaynaktaki lazer gücünü,  $\sigma$  ise güçteki azalma katsayısını ifade etmektedir.

Troposferde yağışsız ortamda, %80 bağıl nem ve 10 km görüş mesafesi koşulları altında güçteki azalma katsayısı,  $\sigma = 0,1424 \text{ km}^{-1}$  dir (Ang, 2012).

Kayıp katsayısının dB/km olarak ifadesi denklem (13) ile hesaplanır.

$$10^{-0,1424R} = e^{-\sigma R} \quad (13)$$

Burada A, mesafeye bağlı kayıp katsayısı olan  $0,1424 \text{ km}^{-1}$  in dB/km olarak ifadesidir ve 0,6 dB/km olarak hesaplanır.

Hedefin imhası için mesafeden bağımsız olarak  $P(R)$ 'nin 1,92 kW olması gerekmektedir. Atmosferik kayıpları dikkate alarak YGLSS çıkış gücü denklem (12) kullanılarak hesaplanmış ve Çizelge 10'da verilmiştir.

Hedefi 1 km mesafede etkisiz hale getirebilmek için denklem 12'de  $P(1) = 1,92 \text{ kW}$ ,  $\sigma = 0,6 \text{ dB/km}$  ise  $P(0) = 3,5 \text{ kW}$  olarak hesaplanır; 2 km mesafede etkisiz hale getirebilmek için denklem 12'de  $P(2) = 1,92 \text{ kW}$ ,  $\sigma = 0,6 \text{ dB/km}$  ise  $P(0) = 6,4 \text{ kW}$  olarak hesaplanır; 3 km mesafede etkisiz hale getirebilmek için denklem 12'de  $P(3) = 1,92 \text{ kW}$ ,  $\sigma = 0,6 \text{ dB/km}$  ise  $P(0) = 11,6 \text{ kW}$  olarak hesaplanır.

Sistemin enerji dönüşüm verimliliği %25 kabul edilirse, denklem (14) kullanılarak 1 km mesafe için optik güç = 3,5 kW, enerji dönüşüm verimliliği 0,25 ise sistemin elektriksel güç ihtiyacı 14 kW olarak hesaplanır.

$$\text{Elektriksel Güç} = \frac{\text{Optik Güç}}{\text{Enerji Dönüşüm Verimliliği}} \quad (14)$$

Mesafeye bağlı gemiden çekilecek güç ihtiyacı da Çizelge 10'da verilmiştir.

**Çizelge 10.** Mesafelere bağlı YGLSS çıkış gücü ve elektriksel güç

Senaryo	Hedef Mesafesi (km)	YGLSS Çıkış Gücü (kW)	Elektriksel Güç (kW)
S1	0	1,92	-
S1	1	3,5	14
S1	2	6,4	25,6
S1	3	11,6	46,4

Hedef kamikaze dronun, güvenlik mesafesi olan 1 km'de etkisiz hale getirilebilmesi için; hedefin hızı 51 m/s ve imha süresi 10 sn dikkate alınır en az 500 m önceden lazer uygulamaya başlanması gerekmektedir. Gelişen teknoloji ile birlikte kamikaze dronların hızları artarsa bu mesafe de artacaktır. Bu nedenle bu çalışmada savaş gemileri altyapısı ile karşılaştırmak için kullanacağımız değer; 2 km mesafede kamikaze dronu etkisiz hale getirmek için ihtiyacımız olan YGLSS çıkış gücü 6,4 kW olacaktır.

### 3.1.2 Bomba yüklü insansız deniz aracını etkisiz hale getirmek için ihtiyaç duyulan YGLSS çıkış gücünün hesaplanması

İlk olarak Çizelge 11'de özellikleri verilen örnek bomba yüklü İDA'nın (İnt. Kyn. 21) tehdit olarak savaş gemisinin üzerine geldiğini varsayarak imha edilebilmesi için uygulanacak çıkış gücü hesaplanmıştır. Örnek alınan İDA

alüminyum malzemedendir yapılmıştır, malzeme kalınlığının ise 3 mm'dir (Michnewich, 2018).

**Çizelge 11.** Örnek bomba yüklü İDA özellikleri

Özellikler	Açıklama
Uzunluk (m)	12
Genişlik (m)	3,4
Maksimum Hız (m/s)	18
Patlayıcı	Mazotlu Amonyum Nitrat

Bir botun imha edilmesi için önce teknenin lazer ile delinmesi sonra da içerideki bombanın aktif hale getirilmesi gerekmektedir. Botun içine yüklenen patlayıcının amonyum nitrat ve mazot hammaddelerinden yapıldığı varsayılarak bombanın imhası, amonyum nitratın erime noktasına kadar ısıtılıp patlaması sağlanarak gerçekleştirilecektir. Patlama etkisi patlayıcı içerisindeki mazot ile artırılmaktadır.

Bomba yüklü İDA'yı imha etmek için ihtiyaç duyulan güç seviyesi Çizelge 12'de verilen değerler kullanılarak denklem (6) ile hesaplanır. Bu hesaplamada ortam sıcaklığı  $T_{ORTAM}$  300 K olarak alınmıştır.

**Çizelge 12.** Örnek olarak seçilen bomba yüklü İDA ve bombanın imal edildiği malzemeye ait değerler

Simge	Tanım	Teknede Delik Açılması	Patlayıcının Aktif Hale Getirilmesi
		Alüminyum (Michnewich, 2018)	Amonyum Nitrat (Ang, 2012)
$C_p$	Özısı (J/g-K)	0,9	1,7
$T_{ERİME}$	Erime Sıcaklığı (K)	934	443
$\Delta H_{FÜZYON}$	Füzyon Isısı (J/g)	387	76,3
$\rho$	Yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )	2,95	1,29
$h$	Malzeme Kalınlığı (mm)	3	5
$F$	Hesaplanan Enerji Yoğunluğu (J/cm <sup>2</sup> )	847	206

Bombaya lazer uygulanarak, bombanın 5 mm kadar delinmesi ve patlamasına sebep olunacak, böylece bomba yüklü İDA etkisiz hale getirilmesi sağlanacaktır. Teknenin delinmesi için ihtiyaç duyulan enerji yoğunluğu, 847 J/cm<sup>2</sup>, hem teknenin delinmesi için hem de patlayıcının varsa kutusunun delinmesi ve aktif hale getirilmesi için yeterlidir.

Denklem (8)'e göre bomba yüklü İDA'nın teknesinin delinmesi için  $t=10$  s boyunca,  $F=847$  J/cm<sup>2</sup> enerji yoğunluğu uygulanırsa  $I=84,7$  W/cm<sup>2</sup> güç yoğunluğu elde edilir; bombanın aktif hale getirilmesi için  $t=10$  sn boyunca,  $F=206$  J/cm<sup>2</sup> enerji yoğunluğu uygulanırsa  $I=20,6$  W/cm<sup>2</sup> güç yoğunluğu elde edilir. Teknenin delinmesi için ihtiyaç duyulan güç yoğunluğu aynı zamanda bombayı aktif hale getirmek için yeterli olduğu için sonraki hesaplar bomba için tekrarlanmayacaktır.

Hedef malzemenin yansıtıcılık özelliğinin güç yoğunluğu üzerindeki etkisi denklem (9) ile ifade edilmiştir. Hedefin %85 oranındaki yansıtıcılık ile yeni güç yoğunluğu  $I(\text{yeni})=565$  W/cm<sup>2</sup> olarak hesaplanır.

Aydınlanan alan veya hedef nokta genişliği (S) denklem (10) ile verilmektedir. 3 km uzaktaki hedef için  $\lambda=1\mu\text{m}$  ve  $D=30$  cm kabul edilirse hedef nokta genişliği 1 cm'den daha büyük olacaktır.

Hedef nokta genişliği, lazer demet yönlendiricisindeki salınımdan veya takip hatasından kaynaklanan demet titreşiminden etkilenir. Titreşim değerinin hedef nokta genişliği üzerindeki etkisi denklem (11) ile ifade edilir. Titreşimden kaynaklı açısal değişim 5  $\mu\text{rad}$  (Michnewich, 2018) kabul edilirse, 3 km'de hedef nokta genişliği yaklaşık 2,5 cm ve hedef nokta alanı 4,9 cm<sup>2</sup> olur. Denklem (9) ile cm<sup>2</sup> başına 565 W olarak bulunan güç yoğunluğu, 4,9 cm<sup>2</sup> olarak belirlenen hedef nokta alanı için hesaplandığında hedef bomba yüklü İDA'yı etkisiz hale getirmek için ihtiyaç duyulan minimum optik güç 2,77 kW olarak hesaplanır.

Deniz çevresinde yağışsız ortamda, %80 bağıl nem ve 10 km görüş mesafesi koşulları altında kayıp katsayısı  $\sigma=0,3423$  km<sup>-1</sup> dir. Kayıp katsayısını dB/km olarak ifadesi denklem (10) ile 1,5 dB/km olarak hesaplanır.

Hedefin imhası için mesafeden bağımsız olarak P(R)'nin 2,77 kW olması gerekmektedir. YGLSS çıkış gücü, atmosferik kayıplar dikkate alınarak denklem (12) ile hesaplanmış ve Çizelge 13'de verilmiştir.

Hedefi 1 km mesafede etkisiz hale getirebilmek için denklem (12)'de  $P(1)=2,77$  kW,  $\sigma = 1,5$  dB/km ise  $P(0)=12,4$  kW olarak hesaplanır; 2 km mesafede etkisiz hale getirebilmek için denklem (12)'de  $P(2)=2,77$  kW,  $\sigma=1,5$  dB/km ise  $P(0)=55,6$  kW olarak hesaplanır; 3 km mesafede etkisiz hale getirebilmek için denklem (12)'de  $P(3)=2,77$  kW,  $\sigma=1,5$  dB/km ise  $P(0)=249,3$  kW olarak hesaplanır.

Sistemin enerji dönüşüm verimliliği %25 kabul edilirse, denklem (14) kullanılarak, 1 km mesafede Optik güç=4,5 kW, enerji dönüşüm verimliliği 0,25 ise sistemin elektriksel güç ihtiyacı 49,6 kW olarak hesaplanır. Farklı mesafeler için belirlenen çıkış güçleri ve gemiden çekilecek güç miktarı Çizelge 13'de verilmektedir.

**Çizelge 13.** Mesafelere bağlı YGLSS çıkış gücü ve elektriksel güç

Senaryo	Hedef Mesafesi (km)	YGLSS Çıkış Gücü (kW)	Elektriksel Güç (kW)
S2	0	2,77	-
S2	1	12,41	49,6
S2	2	55,6	222,4
S2	3	249,3	997,2

Hedef bomba yüklü İDA'nın, güvenlik mesafesi olan 1 km'de etkisiz hale getirilebilmesi için; hedefin hızı 18 m/s ve imha süresi 20 sn (teknenin delinmesi ve bombanın aktif hale getirilmesi) dikkate alınır 360 m önceden lazer uygulamaya başlanması gerekmektedir. Gelişen teknoloji ile birlikte bomba yüklü İDA'ların hızları artarsa bu mesafe de artacaktır; ancak bu çalışmada bu mesafenin etkisi dikkate alınmayacak, savaş gemileri altyapısı ile karşılaştırmak için 1 km mesafede bomba yüklü İDA'yı etkisiz hale getirmek için ihtiyacımız olan 12,41 kW YGLSS çıkış gücü kullanılacaktır.

#### 4. Sonuçlar / Conclusions

YGLSS'lerin bir savaş gemisine entegrasyonu için ihtiyaç duyulacak yerleşim alanı ve elektriksel güç ihtiyacı, belirlenen tehdit ve imha senaryoları çerçevesinde yağışsız hava koşulları için hesaplanmış ve Türk Deniz Kuvvetleri Komutanlığı'nın envanterindeki savaş gemilerinin teknik alt yapıları incelenerek entegrasyon için uygunlukları değerlendirilmiştir.

Tehdit olarak belirlenen kamikaze dron ve bomba yüklü İDA'yı güvenlik mesafesine girmeden önce etkisiz hale getirecek YGLSS çıkış gücü sırasıyla 6, 4 kW ve 12,41 kW olarak hesaplanmıştır. Bu değerler tüm YGLSS'ler tarafından karşılanmaktadır ve Çizelge 14'de sunulmuştur.

**Çizelge 14.** YGLSS çıkış güçleri ile ihtiyaç duyulan elektriksel güç karşılaştırma tablosu

Sistem	Çıkış Gücü (kW)	İhtiyaç Duyulan Çıkış Gücü (kW)	
		S1_2	S2_1
		6,4	12,41
YGLS	20	✓	✓
LAWS	30	✓	✓
HELIOS	60	✓	✓
MLD	105	✓	✓
LWSD	150	✓	✓

YGLSS'lerin boyut ve ağırlık bilgileri bölüm 2.1'de belirtilen kabuller doğrultusunda belirlenmiş ve Çizelge 15'de sunulmuştur.

Bu kapsamda; savaş gemisini belirlenen tehditlere karşı koruyabilen, bölüm 2.1'de özellikleri verilen YGLSS'lerin Türk Deniz Kuvvetleri envanterindeki savaş gemilerine entegrasyonuna yönelik değerlendirmeler firkateynler

için Çizelge 16'da, korvetler için Çizelge 17'de, hücum botları için Çizelge 18'de sunulmuştur.

**Çizelge 15.** YGLSS'lerin boyut ve ağırlık bilgileri

Sistem	Çıkış Gücü (kW)	Hacim (m <sup>3</sup> )	Ağırlık (kg)
YGLS	20	14	1400
LAWS	30	14	1400
HELIOS	60	14	1400
MLD	105	14	1400
LWSD	150	21	2100

Yapılan değerlendirme kriterleri şunlardır: YGLSS ağırlığının platformların ağırlıklarının %1'ini aşmaması gerektiği kabul edilmiştir; YGLSS'nin kullanabileceği elektriksel gücün dizel jeneratörlerin ürettiği varsayılan değerlerin %15'ini aşmaması gerektiği kabul edilmiştir (Ang, 2012).

Tablolarda; entegrasyon küçük tadilatlar ile yapılabilir durumda "✓" işareti, entegrasyondan önce önemli tadilatlar gerekeceği değerlendirilen durumlarda "±" işareti, entegrasyon yapılamaz durumda "-" işareti kullanılmıştır.

Çizelge 16 incelendiğinde; firkateynler 100 m üzeri boyları ve yaklaşık 3000 ton ve üzeri tonajları ile YGLSS entegrasyonu için en uygun savaş gemileridir. Belirlenen senaryolar çerçevesinde güvenliğini sağlayabilecek YGLSS'lerden; ilk üç sistem olan YGLS, LAWS ve HELIOS için elektriksel güç ihtiyacı ve yer ihtiyacı tüm firkateynler tarafından sağlanmaktadır. MLD için GABYA ve BARBAROS sınıfı entegrasyon ihtiyaçlarını sağlayabilirken, LWSD için yalnızca BARBAROS sınıfı entegrasyon ihtiyaçlarını sağlayabilmektedir. Ancak, gemi boyları 100 m ve üstü olduğu için küçük tadilatlar ile entegrasyonun sağlanabileceği değerlendirilmektedir.

Çizelge 17 incelendiğinde; korvetlerden ADA sınıfının YGLSS'lerden ilk üç sistem olan YGLS, LAWS ve HELIOS için elektriksel güç ihtiyacı ve yer ihtiyacını sağlandığı ve küçük tadilatlar ile entegrasyonun gerçekleştirilebileceği, BURAK sınıfının ise sadece YGLS ve LAWS için elektriksel güç ihtiyacı ve yer ihtiyacının sağlandığı ve önemli tadilatlar ile entegrasyonun gerçekleştirilebileceği değerlendirilmektedir.

Çizelge 18 incelendiğinde; tüm hücum botlarının YGLSS'lerden ilk iki sistem olan YGLS ve LAWS için elektriksel güç ihtiyacı ve yer ihtiyacını sağlandığı ve önemli tadilatlar ile entegrasyonun gerçekleştirilebileceği tespit edilmiştir. YGLSS'ler tek tek değerlendirildiğinde ulaşılan sonuçlar şöyle özetlenebilir. İlk sistem olan YGLS'nin, elektriksel güç ihtiyacı tüm gemiler tarafından sağlanmakta, yer ihtiyacı ise boyu 100 m ve üstü gemilerde küçük tadilatlar ile, boyu 100 m altı gemilerde

ise önemli tadilatlar sonrası sağlanabileceği değerlendirilmektedir. İkinci sistem olan LAWS'nin, elektriksel güç ihtiyacı tüm gemiler tarafından sağlanmakta, yer ihtiyacı ise boyu 100 m ve üstü gemilerde küçük tadilatlar ile, boyu 100 m altı gemilerde ise önemli tadilatlar sonrası sağlanabileceği değerlendirilmektedir. Üçüncü sistem olan HELIOS'un elektriksel güç ihtiyacı fırkateynler ve ADA sınıfı korvetler tarafından sağlanmakta, yer ihtiyacı ise küçük tadilatlar ile sağlanabileceği değerlendirilmektedir. Dördüncü sistem olan MLD'nin elektriksel güç ihtiyacı GABYA ve BARBAROS sınıfı fırkateynler tarafından sağlanmakta, yer ihtiyacı ise küçük tadilatlar ile sağlanabileceği değerlendirilmektedir. Beşinci sistem olan LWSD'nin elektriksel güç ihtiyacı yalnızca BARBAROS sınıfı fırkateynler tarafından sağlanmakta, yer ihtiyacı ise küçük tadilatlar ile sağlanabileceği değerlendirilmektedir. Sonuç olarak; günümüzde yakın mesafe savunma sistemi olarak savaş gemilerinin savunmasında görev alacak YGLSS'lerin boyu 100 m ya da tonajı 2000 ton üzeri savaş

gemilerine entegrasyon için daha uygun olduğu tespit edilmiştir.

YGLSS entegrasyonu yapılan Amerikan Deniz Kuvvetlerine ait LPD sınıfı (25300 ton ve 208 m) ile DDG (Destroyer, Guided Missile) sınıfı (9200 ton ve 155 m) savaş gemileri de bu tespiti doğrulamaktadır. Bu çalışma ile hangi savaş gemilerin YGLSS entegrasyonu için uygun olduğunun belirlenmesi ile birlikte; tehditlerin belirlenmesinin YGLSS seçiminde önemli olduğu ve seçilen YGLSS'nin inşa edilecek gemilerin tasarımına önemli etkileri olduğu konusunda karar vericilerde farkındalık oluşturulmasına katkı sunulabilir. Müteakiben yapılacak çalışmalarda; birden fazla farklı türde İHA ve İDA'nın aynı anda saldırı düzenlediği senaryoların da gözönünde bulundurulması, elektriksel güç ihtiyacı ve montaj alanına ilave olarak sistem stabilizasyonunun sağlanması, savaş yönetim sistemine entegrasyonu, harici güç batarya kullanımı ve sistem maliyeti gibi ilave konuların da incelenmesi, ayrıca inşası planlanan veya devam eden yüksek tonajlı gemilerinde (amfibi hücum gemisi, hava savunma harbi muhribi vb.) çalışmaya dahil edilmesinin faydalı olacağı değerlendirilmektedir.

**Çizelge 16.** Fırkateynler için entegrasyona uygunluk değerlendirmesi sonuçları

Sınıf	Fırkateyn					
	GABYA	BARBAROS	YAVUZ			
<b>Boy (m)</b>	135	118	115			
<b>Ağırlık (Ton)</b>	4100	3380	2919			
<b>YGLSS için kullanılabilir ağırlık (Ton)</b>	41	34	30			
<b>Tahmini elektriki güç miktarı (MW)</b>	3,05	5,34	2,20			
<b>YGLSS için kullanılacak tahmini elektriki güç miktarı (kW)</b>	458	801	330			
<b>Sistem</b>	<b>Elk. Güç (kW)</b>	<b>Hacim (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Ağırlık (kg)</b>			
YGLS	80	14	1400	✓	✓	✓
LAWS	120	14	1400	✓	✓	✓
HELIOS	240	14	1400	✓	✓	✓
MLD	420	14	1400	✓	✓	-
LWSD	600	21	2100	-	✓	-

**Çizelge 17.** Korvetler için entegrasyona uygunluk değerlendirmesi sonuçları

Sınıf	Korvet				
	ADA	BURAK			
<b>Boy (m)</b>	99	80			
<b>Ağırlık (Ton)</b>	2300	1325			
<b>YGLSS için kullanılabilir ağırlık (Ton)</b>	23	13			
<b>Tahmini elektriki güç miktarı (MW)</b>	3,16	0,88			
<b>YGLSS için kullanılacak tahmini elektriki güç miktarı (kW)</b>	475	132			
<b>Sistem</b>	<b>Elk. Güç (kW)</b>	<b>Hacim (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Ağırlık (kg)</b>		
YGLS	80	14	1400	✓	±
LAWS	120	14	1400	✓	±
HELIOS	240	14	1400	✓	-
MLD	420	14	1400	-	-
LWSD	600	21	2100	-	-

**Çizelge 18.** Hücumbotlar için entegrasyona uygunluk değerlendirme sonuçları

Sınıf	Hücumbot			
	DOĞAN	RÜZGAR	YILDIZ	KILIÇ
<b>Boy (m)</b>	58	58	58	62
<b>Ağırlık (Ton)</b>	436	410	433	548
<b>YGLSS için kullanılabilir ağırlık (Ton)</b>	5	4	5	6
<b>Tahmini elektrik gücü miktarı (MW)</b>	1,30	1,30	1,11	1,11
<b>YGLSS için kullanılacak tahmini elektrik gücü miktarı (kW)</b>	195	195	167	167
Sistem	Elk. Güç (kW)	Hacim (m <sup>3</sup> )	Ağırlık (kg)	
YGLS	80	14	1400	±
LAWS	120	14	1400	±
HELIOS	240	14	1400	-
MLD	420	14	1400	-
LWSD	600	21	2100	-

#### Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

#### Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Literatür taraması, Araştırma, Hesaplamaların Yapılması, Sonuçların Analizi, Makalenin Yazımı

Yazar 2: Çalışmanın Planlanması ve Yönlendirilmesi, Sonuçların Değerlendirilmesi ve Yorumlanması, Makalenin Yazımı

Yazar 3: Sonuçların Değerlendirilmesi ve Yorumlanması, Makalenin Yazımı

#### 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 / References

Ang, C.N., 2012. Analysis of High Energy Laser Weapon Employment from a Navy Ship. Yüksek Lisans Tezi, Naval Postgraduate School, California, USA, 87

Fussman, C.R., 2014. High Energy Laser Propagation in Various Atmospheric Conditions Utilizing a New, Accelerated Scaling Code. Yüksek Lisans Tezi, Naval Postgraduate School, California, USA, 87

Gildemeyer, S.J., Hager, D.B., Liensdorf, D., Malone, A.C., and Mugerditchian, K.A., 2018. Analysis of Shipboard Effects and Coverage for the Integration of a High-Energy Laser on a LPD 17. Yüksek Lisans Tezi, Naval Postgraduate School, California, USA, 147

Jha, A. R., 2016. Theory, Design, and Applications of Unmanned Aerial Vehicles, CRC Press, 256.

Michnewich, D.A., 2018. Modeling Energy Storage Requirements For High-Energy Lasers On Navy Ships. Yüksek Lisans Tezi, Naval Postgraduate School, California, USA, 105

O'Rourke R., 2022. Navy Shipboard Lasers: Background and Issues for Congress. Congressional Research Service, **R44175**, 2-21

O'Rourke R., 2015. Navy shipboard lasers for surface, air, and missile defense: Background and issues for Congress. Congressional Research Service, **R41526**, 2-19

Sabatini R. and Richardson M. A., 2010. Airborne Laser Systems Testing and Analysis, Research and Technology Organisation North Atlantic Treaty Organisation, AG-300-V26, 91.

Taylor, A.B., 2021. Counter-Unmanned Aerial Vehicles Study: Shipboard Laser Weapon System Engagement Strategies for Countering Drone Swarm Threats in The Maritime Environment. Yüksek Lisans Tezi, Naval Postgraduate School, California, USA, 95

Weichel, H., 1990. Laser beam propagation in the atmosphere, Volume TT3, Roy F.P., USA: SPIE Optical Engineering Press, 12-23.

#### İnternet kaynakları / Internet References

1- Trevithick J., Here's Our First Look At A HELIOS Laser-Armed Navy Destroyer, <https://www.thedrive.com/the-war-zone/heres-our-first-look-at-a-helios-laser-armed-navy-destroyer> , (22.05.2023)

2- Araca Monte Milli Lazer Sistemi (ARMOL), <https://bilgem.tubitak.gov.tr/tr/haber/araca-monte-milli-lazer-sistemi-armol> , (22.05.2023)

3- Lister T., A Russian naval base was targeted by drones, <https://edition.cnn.com/2022/10/31/europe/sevastopol-drone-russia-ukraine-grain-intl-cmd/index.html> , (22.05.2023)

4- Axe D., Ukraine's Drone Boats, <https://www.forbes.com/sites/davidaxe/2022/11/20/th>

- e-ukrainian-navy-has-no-big-warships-its-winning-the-  
naval-war-anyway-with-drones/?sh=36b5bb214fc5 ,  
(22.05.2023)
- 5- <https://www.dearsan.com/pdfler/DEARSAN-57m-Patrol-Vessel.pdf> , (22.05.2023)
- 6- <https://www.dzkk.tsk.tr/Destek/icerik/gabya-sinifi> ,  
(22.05.2023)
- 7- [https://www.dzkk.tsk.tr/Destek/icerik/ barbaros-sinifi](https://www.dzkk.tsk.tr/Destek/icerik/barbaros-sinifi)  
, (22.05.2023)
- 8- [https://www.dzkk.tsk.tr/Destek/icerik/ yavuz-sinifi](https://www.dzkk.tsk.tr/Destek/icerik/yavuz-sinifi) ,  
(22.05.2023)
- 9- <https://www.dzkk.tsk.tr/Destek/icerik/ada-sinifi>,  
(22.05.2023)
- 10- <https://www.dzkk.tsk.tr/Destek/icerik/burak-sinifi>,  
(22.05.2023)
- 11- <https://www.dzkk.tsk.tr/Destek/icerik/dogan-sinifi>,  
(22.05.2023)
- 12- [https://www.dzkk.tsk.tr/Destek/icerik/ ruzgar-sinifi](https://www.dzkk.tsk.tr/Destek/icerik/ruzgar-sinifi),  
(22.05.2023)
- 13- <https://www.dzkk.tsk.tr/Destek/icerik/yildiz-sinifi>,  
(22.05.2023)
- 14- <https://www.dzkk.tsk.tr/Destek/icerik/kilic-sinifi>,  
(22.05.2023)
- 15- Harpy, <https://www.israeli-weapons.com/weapons/aircraft/uav/harpy/HARPY.html>  
, (22.05.2023)
- 16- Paschotta R., Fluence, <https://www.rp-photonics.com/fluence.html>, (13.11.2023)
- 17- Polezhaev Y.V., Melting, <https://www.thermopedia.com/content/947/>,  
(13.11.2023)
- 18- Paschotta R., Fluence, [https://www.rp-photonics.com/power\\_density.html](https://www.rp-photonics.com/power_density.html) , (13.11.2023)
- 19- Paschotta R., Reflectivity, <https://www.rp-photonics.com/reflectivity.html>, (13.11.2023)
- 20- Spot Size and Beam Waist, <https://www.gentec-eo.com/laser-calculators/beam-waist-spot-size> ,  
(13.11.2023)
- 21- Fleet-class unmanned surface vessel, [https://en.wikipedia.org/wiki/Fleet-class\\_unmanned\\_surface\\_vessel](https://en.wikipedia.org/wiki/Fleet-class_unmanned_surface_vessel) , (22.05.2023)



## İnsansız Kara Araçları İçin Çapraz Platform Destekli Telemetri Sistemi Tasarımı

### Cross-Platform Telemetry System Design For Unmanned Ground Vehicles

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 13.07.2023

Kabul/Accepted: 18.01.2024

Yayımlandı/Published: 27.02.2024

Uğur KIRÇIL<sup>\*</sup>, Cengiz TEPE

Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

İnsansız kara araçları günümüzde büyük öneme sahiptir. Bu araçlar, askeri, afet/arama kurtarma, gözetim/güvenlik veya tarımsal alanlarda olmak üzere kullanılabilir. Bu kara araçları otonom, yarı otonom veya insan kontrollü çalışabilir. Üç fonksiyonda da bu kara araçlarının bir yer istasyonu ile haberleşmesi gerekmektedir. Bu yer istasyonunda bir arayüz bulunur ve bu arayüzde aracın birçok anlık durumu bilgileri ve kamera görüntüsü gösterilir. Böylece operatör, kara aracın yanında bulunmadan araç üzerindeki verileri okuyabilir. Herhangi bir arıza durumunda araca zamanında müdahale edebilir. Bu çalışmada insansız kara araçları için özgün çapraz platform destekli bir telemetri sistemi tasarlanmıştır. Bu telemetri sisteminde veri gönderim kartı ve yer istasyonu arayüzü bulunmaktadır. Mikrodenetleyici kartının üstüne takılabilen veri aktarım kartında RF verici, konnektörler ve çeşitli sensörler bulunmaktadır. Yer istasyonundaki RF alıcı, verileri aldıktan sonra tasarlanan çapraz platform destekli arayüz üzerinde gösterilmektedir. Arayüz üzerinde pil durumu, katedilen mesafe, aracın aktif durumu, depo doluluğu gibi bilgiler yer almaktadır. Ayrıca kara aracı üzerindeki kamera vericisi ile kamera verisi alınmaktadır ve arayüz üzerinde canlı olarak kamera görüntüsü de gösterilmektedir. Arayüzün iletişim fonksiyonları test edilmiştir ve başarıyla çalışmaktadır. Bu arayüzün çeşitli platformda performans ve fonksiyon testleri yapılmıştır. Testlerden alınan performans verileri incelenmiştir. Ayrıca mevcut olan diğer arayüzlerle karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda taşınabilir, düşük maliyetli, özgün bir donanım ve çapraz platform desteğine sahip basit, hafif ve kullanışlı bir arayüz elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** İnsansız Kara Aracı; Telemetri; AvaloniaUI; Çapraz Platform

#### Abstract

Unmanned ground vehicles are of great importance today. These vehicles can be used in military, disaster/search and rescue, surveillance/security or agricultural fields. These ground vehicles can operate autonomously, semi-autonomously or human-controlled. These ground vehicles must communicate with a ground station in all three functions. This ground station has an interface that displays instant status information and video footage. Thus, the operator can read the data on the vehicle without being near the ground vehicle. In case of any malfunction, an operator can intervene in time. In this study, a unique cross-platform telemetry system for unmanned ground vehicles is designed. This telemetry system includes a transmission board and a ground station interface. The transmission board, which can be mounted on the microcontroller board, contains an RF transmitter, connectors and various sensors. After the RF receiver at the ground station receives the data, it displays it on the designed cross-platform supported interface. The interface displays information such as battery status, distance traveled, active status of the vehicle, and tank fullness. In addition, camera data is received with the camera transmitter on the ground vehicle and the live camera image is displayed on the interface. The communication functions of the interface have been tested and work successfully. Performance and function tests of this interface have been performed on various platforms. The performance data from the trials are analyzed. It is also compared with other existing interfaces. The result of the study is a portable, low-cost, simple, lightweight and useful interface with unique hardware and cross-platform support.

**Keywords:** Unmanned Ground Vehicle; Telemetri; AvaloniaUI; Cross-Platform

#### 1. Giriş

İnsansız Kara Araçları (İKA), büyük bir öneme sahiptir. Bu araçlar, otonom, yarı-otonom veya tamamen insan kontrolünde çalışabilir. İKA'nın geniş kullanım alanı vardır. Bu araçlar, askeri(Gündoğdu & Çalhan 2013), afet/arama kurtarma(Enshasy et al. 2019), gözetim/güvenlik(Shah et al. 2019, Vishnu et al. 2022) veya tarımsal alanlarda (Durmus et al. 2015, Pei et al. 2014, Vaeljaots et al. 2018) kullanılabilir. Bu araçlar da ana görevleri yapan kontrol

bilgisayarı (Raspberry Pi, Nvidia Jetson vs.), motor sürücü sistemleri, güç dağıtım sistemleri, otopilot kartları ve telemetri sistemlerinden oluşmaktadır. Araçlar otonom bir biçimde çalışsa bile aracın durumunu saptayabilmek için bir telemetri sistemi ile araç üzerindeki verilerin bir yer istasyonuna aktarılması gerekmektedir. Bu telemetri sistemleri sensörlerden, kameralardan, kablosuz alıcı-vericilerden ve arayüzden oluşmaktadır (Kıvanç et al. 2019, Shah et al. 2019, Snipes et al. 2018, Vaeljaots et al.



2018). Literatürdeki donanım ve arayüz yazılım çalışmaları incelendiğinde mikrodenetleyici donanımı olarak çoğunlukla üzerinde ATMEGA tabanlı mikrodenetleyicileri bulunduran Arduino mikrodenetleyici kartların kullanıldığı görülmektedir (Enshasy et al. 2019, Hassan et al. 2017, Nagchaudhuri et al. 2018, Shah et al. 2019, Vaeljaots et al. 2018, Vishnu et al. 2022). Bunlara ek olarak ARM tabanlı mikrodenetleyicilerin (Durmus et al. 2015) kullanıldığı çalışmalar da vardır. Kablosuz veri aktarımı için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. 3G / 4G hücresel ağ veri aktarımı en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir (Durmus et al. 2015, Kıvanç et al. 2019, Snipes et al. 2018, Vaeljaots et al. 2018). Bu yöntemin en büyük avantajı gönderilen verinin internet üzerinden aktarılabilmesidir. Bu durum da mesafe problemini ortadan kaldırmaktadır. Ancak bu yöntemin kullanılabilmesi için bölgede baz istasyonları ve mobil hat aboneliği gerekmektedir. Köylerdeki tarlalarda, askeri alanlarda ve afet alanlarında baz istasyonu problemi yaşanabileceği için hücresel ağ ile veri aktarmak mümkün olmayabilir. Hücresel ağın yüksek güç kullanımı, düşük güç tüketimli geniş alan ağının (LPWAN) ortaya çıkışına zemin hazırlamıştır. LoRaWAN veri aktarım yöntemi, az miktarda veriyi uzun mesafelere aktarmak için en uygun seçeneklerden biridir (Turčinović et al. 2020). Bu sebeple telemetri sistemlerinde LoRaWAN kullanan çalışmalar mevcuttur (Vishnu et al. 2022). Bunun dışında xBee veri aktarım yöntemi de telemetri sistemlerinde kullanılmaktadır (Shah et al. 2019). Bu yöntemler orta-uzun mesafeli aktarım yöntemleridir. LoRaWAN, daha düşük aktarım hızlarını kullanarak xBee'ye göre veri aktarım mesafesini 2'ye katlayabilmektedir (Ferreira et al. 2020, İnt. Kyn. 2, İnt. Kyn. 5). Ayrıca bu yöntemlerin dışında yakın mesafelere Wi-Fi ile aktarımın yapıldığı çalışmalar da bulunmaktadır (Vaeljaots et al. 2018).

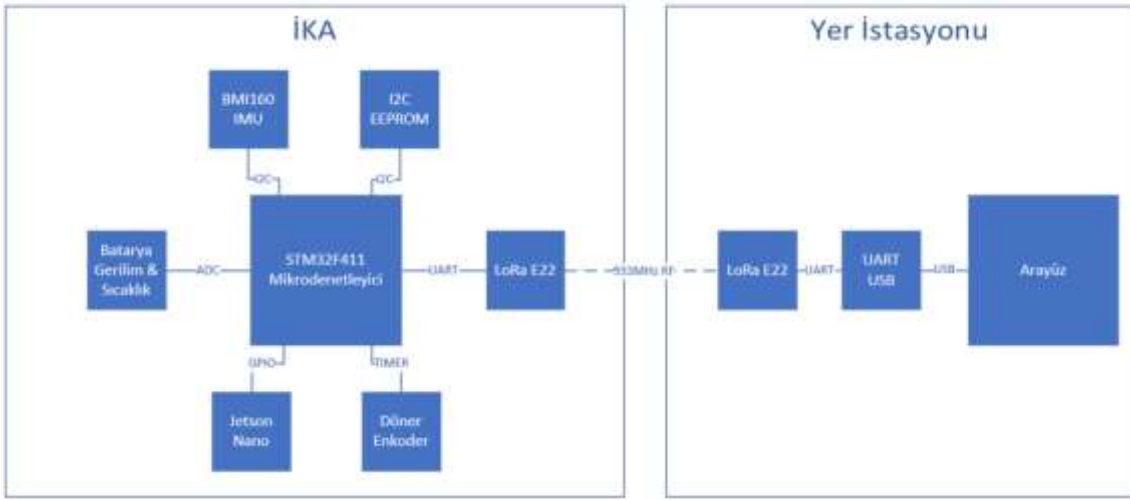
Literatürdeki çalışmalarda farklı tip arayüz kullanımları vardır. Mission Planner programının asıl kullanım amacı otonom sürüş olmasına rağmen birçok çalışmada tak-çıkartır özelliğinden dolayı telemetri arayüzü olarak da kullanılmıştır (Hassan et al. 2017, Nagchaudhuri et al. 2018). Mission Planner, İnsansız hava araçları (İHA) ve İKA'larda otonom sürüş sağlamak için kullanılmaktadır. Ancak arayüz üzerinde gösterilen bilgiler ve sensör değerleri, İHA çalışmaları için daha uygundur. Ayrıca yazılım tarafından desteklenmeyen farklı tipte sensörlerin arayüze eklenmesi mümkün değildir. Ayrıca literatürde, kullanıcı tarafından MATLAB (Shah et al. 2019), Python (Rahman et al. 2023) ve C# WinForms (Enshasy et al. 2019) dilinde hazırlanan özel tasarım arayüzler de yer almaktadır. Literatürdeki bu

çalışmalarda arayüzlere görüntü aktarımı çoğunlukla 5.8GHz görüntü aktarım kitleriyle sağlanmaktadır (Enshasy et al. 2019, Vishnu et al. 2022). Bunların dışında Hücresel Veri (Snipes et al. 2018) ve Wi-Fi (Shah et al. 2019) ile görüntü aktarımı yapan çalışmalar da bulunmaktadır. Mevcut çoğu çalışmadaki en büyük eksiklik, güncel, modern, çok amaçlı bir arayüz yazılımının bulunmamasıdır. Hazırlanan özgün yazılımlar ise WinForms gibi daha eski yazılım çerçeveleri ile hazırlanmıştır. Ayrıca çoğu çalışmada 8 bitlik yetersiz mikrodenetleyici kullanılması, veri alımı ve işlenmesinde istenen performansın yakalanmamasına sebep olabilir (Enshasy et al. 2019, Hassan et al. 2017, Nagchaudhuri et al. 2018, Shah et al. 2019, Vaeljaots et al. 2018, Vishnu et al. 2022).

Bu çalışmada, kara araçları için spesifik olarak yapılan literatür taramasında daha önce kullanımına rastlanılmayan özgün ve çapraz platform destekli bir telemetri sistemi hazırlanmıştır. Kara araçlarında telemetrinin veri gönderim kartında STM32F serisi yüksek performanslı mikrodenetleyici kullanımı sayesinde sadece yazılımsal değişikliklerle donanımın potansiyel gelişmelere uyumlu olması sağlanacaktır. ST Nucleo geliştirme kartlarına uygun olarak tasarlanan tak-çıkartır genişletme kartı sayesinde sensör bağlantılarının kablo karmaşası azaltılmıştır. Ayrıca tak-çıkartır yapı sayesinde gelecekte oluşabilecek mikrodenetleyici değişimleri basit bir hale getirilmiştir. Telemetri sisteminde kullanılacak olan arayüz, açık kaynaklı AvaloniaUI platformu kullanılarak hazırlanmıştır. Arayüz, WinForms gibi tasarım ve kütüphane destekleri yetersiz platformlarla hazırlanan arayüzlere göre daha modern bir tasarımı vardır. Ayrıca hem Windows hem de Linux işletim sistemlerinde çalışabilmektedir. Yüksek güç gerektirmeyen kullanım alanları için düşük maliyetli ve düşük güç tüketen tek kart bilgisayarlar (Raspberry PI, Jetson NANO vs) idealdir (Gonzalez et al.). Bu çalışmada tasarlanan telemetri sistemi Intel-AMD işlemciler ile birlikte ARM işlemcilerle de çalışabilmektedir. Böylece yapılan çalışmalarda yer istasyonlarında yüksek güç tüketen maliyetli bilgisayarlar yerine düşük maliyetli ve düşük güç tüketen tek kart bilgisayarlar kullanılabilir. Ayrıca arayüz üzerinde birden fazla kamera görüntüsü gösterilebilmektedir.

## **2. Materyal ve Metot**

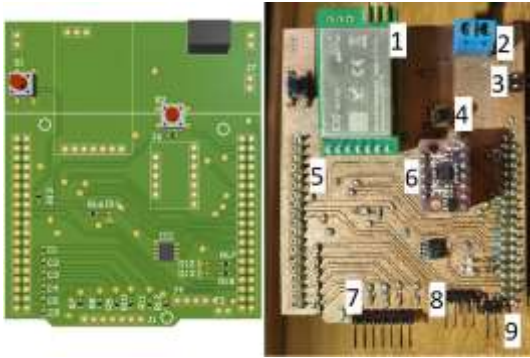
Çalışmada, İKA üzerindeki verilerin kablosuz aktararak bilgisayar üzerindeki arayüzde gösterilmesi hedeflenmiştir. Şekil 2.1'de gösterildiği gibi telemetri sistemi İKA donanımından ve yer istasyonundan oluşmaktadır.



Şekil 2.1. Telemetri Sistemi

### 2.1. Donanım

Bu çalışmada STM32F411 Nucleo kartının üstüne takılabilir Şekil 2.2'deki özgün genişletme kartı tasarlanmıştır. Bu şekil üzerinde 1 numaralı kısımda LoRa Modülü, 2 numaralı kısımda güç girişi, 3 numaralı kısımda harici kart haberleşmesi konnektör, 4 numaralı kısımda kart ayarlaması için buton, 5 numaralı kısımda STM32F411 Nucleo kart konnektörü, 6 numaralı kısımda IMU sensör, 7 numaralı kısımda batarya konnektörü, 8 numaralı kısımda enkoder konnektörü ve 9 numaralı kısımda NTC konnektörü gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Genişletme Kartı a) 3B Görünümü b) Gerçekleşmiş Hali

Telemetri sistemi, İKA'nın arazi üzerinde toplam katettiği mesafeyi, arazi üzerindeki hareket hızını, bataryasının gerilim, doluluk ve sıcaklık bilgilerini, arazi üzerindeki eğimini, üzerinde herhangi bir sıvı bulunduracaksa deponun doluluk durumunu, ilaçlanan bitki sayısını ve İKA'ya verilmiş görev bilgilerini göstermektedir. Çalışmada tasarlanan telemetri sistemi, çeşitli kullanım alanları için özelleştirilebilir. Çalışmada STM32F411 mikrodnetleyici kullanılmıştır. Şekil 2.3'de mikrodnetleyici yazılımının akış şeması gösterilmiştir.

### 2.2. Pil Gerilimi, Doluluğu ve Sıcaklığının Ölçülmesi

Bu çalışmada gerçekleştirilen özgün genişletme kartı ile lityum polimer bataryalarda 6 hücreye kadar gerilim okuması yapılabilir. Ayrıca, kurşun asit, lityum demir fosfat gibi farklı batarya türleri de kullanılabilir. Bataryadaki hücrelerin gerilimleri, STM32F411 mikrodnetleyici ADC çevre birimi ile Doğrudan Hafıza Erişimli (DMA) olarak okunmaktadır.

Alınan ilgili hücre geriliminden o hücrenin gerilim ve empedans profil verileri ile karşılaştırması yapılarak tahmini bir batarya doluluk yüzdesi elde edilmiştir. Pil sıcaklığını okumak amacıyla batarya üzerine bir adet Negatif Sıcaklık Katsayılı (NTC) sıcaklık sensörü yerleştirilmiştir. NTC'nin üretici firma tarafından sağlanan  $\beta(25/50 \text{ }^\circ\text{C})$  sabiti, Eşitlik 1'deki sadeleştirilmiş Steinhart-Hart denklemi kullanılarak Kelvin sıcaklık değerine çevrilmiştir. Ardından santigrat olarak dönüştürülmektedir.

$$T_{\circ K} = \left[ \left( \frac{1}{\beta_{25}} \right) \ln \left( \frac{RT}{RT_0} \right) + \frac{1}{T_0} \right] \quad (1)$$

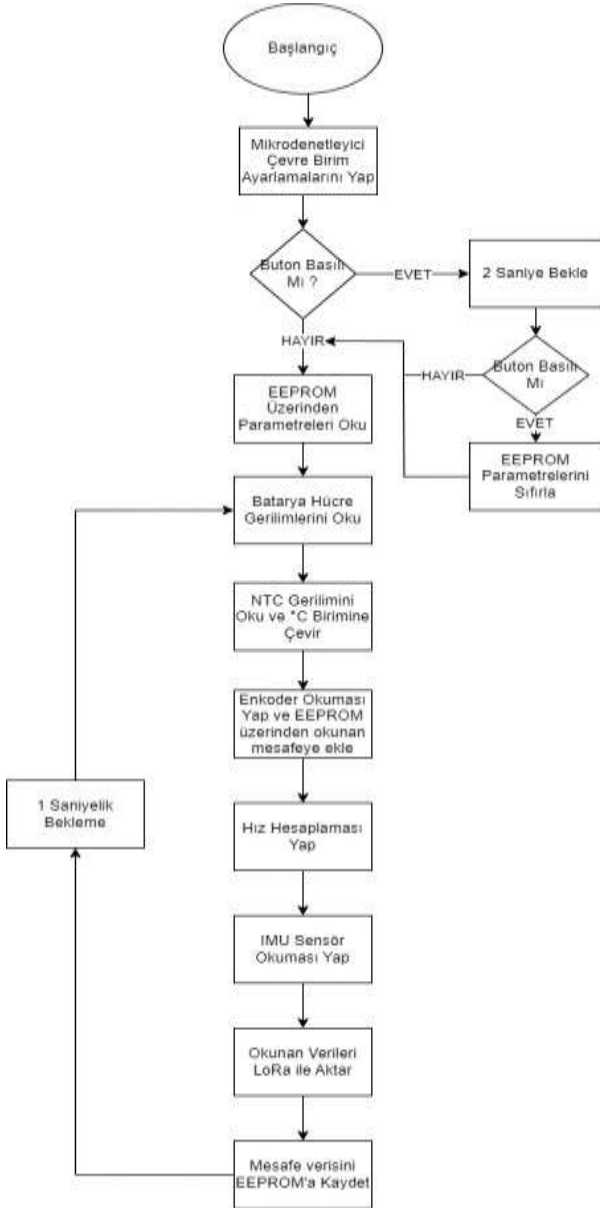
### 2.4. Mesafe ve Eğim Ölçümü

İKA'nın katettiği mesafenin ölçülmesi için araç tekerleğine bir adet 360 pals enkoder bağlıdır. Enkoder, STM32 zamanlayıcı biriminde, "Encoder Mode" olarak ölçülmüştür. İKA'nın katettiği yol denklem 2 ve hızı ise denklem 3 ile hesaplanmaktadır.

$$x = n \frac{2\pi r}{360} \quad (2)$$

$$V = \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

Burada  $x$  = yol (m),  $V$ :hız (m/dk),  $n$ :enkoder puls sayısı,  $r$ :teker yarıçapı,  $x$ :yol,  $t$ : zamandır. Araç eğimini ölçmek için BMI160 IMU (İnt. Kyn. 1) kullanılmıştır. Bu sensör açtığı verilerini doğrudan vermektedir.



Şekil 2.3. Mikrodenetleyici Yazılımı Akış Şeması

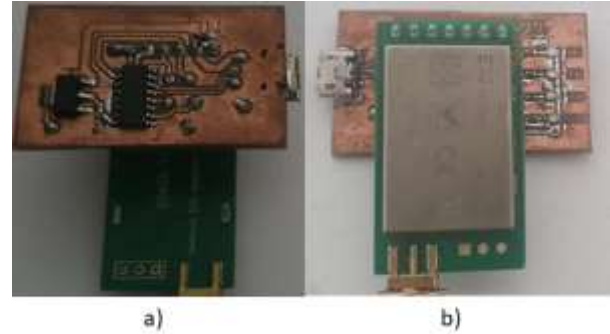
## 2.5. Haberleşme Modülü

İKA veri aktarımı için LoRa E32 verici ve alıcı modülü (İnt. Kyn. 2) kullanılmıştır. Gönderilen verilerin arayüz tarafından alınabilmesi için yer istasyonu tarafında bir adet LoRa E32 Alıcı kullanılmıştır. Bu alıcının yer istasyonuna bağlanması için Şekil 2.4'de gösterilen UART – USB dönüştürücü kartı tasarlanmıştır. Tasarlanan bu dönüştürücü kart sayesinde, mevcut tasarımlardan farklı olarak kullanıcı müdahalesi gerektirmeden alıcı modülün parametrelerinin yazılımsal olarak otomatik ayarlanması sağlanmıştır.

## 2.6. Depo Seviyesinin Ölçülmesi

Çalışmanın türüne bağlı olarak İKA'larda su, yakıt, ilaç veya herhangi bir kimyasal madde kullanılabilir. İKA'nın deposunda kalan sıvı miktarının yer istasyonunda gösterilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak herhangi bir sensör kullanılmadan yazılımsal depo sıvı seviyesi ölçümü yapılmıştır. Başlangıçta tam dolu depo ile kaç kez spreyleme yapıldığı ölçülmüştür. Sonrasında her bir spreylemede harcanan sıvı miktarı, toplam spreyleme sayısı ile çarpılıp depo kapasitesinden çıkarılarak depoda kalan sıvı miktarı hesaplanmıştır. Böylece yazılımsal bir sıvı seviye algılayıcısı yapılmıştır.



Şekil 2.4. LoRa Alıcı Devresi a) Ön Yüz b) Arka Yüz

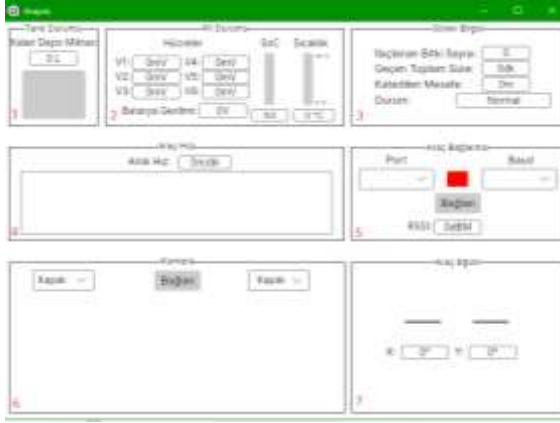
## 2.7. Kablosuz Görüntü Aktarımı

Görüntü aktarımı için, telemetri kartından bağımsız olarak bir görüntü iletim seti (İnt. Kyn. 4) kullanılmaktadır. Alıcı, bilgisayara standart bir USB protokolü ile bağlanmaktadır. Gelen veri direkt olarak kullanılabilir.

## 2.8. Arayüz Yazılımı

Arayüz yazılımı, Visual Studio geliştirme ortamında hazırlanmıştır. Arayüzün arka yüz yazılımı C# dili ile hazırlanmıştır. Önyüz yazılımında ise .Net platformu ile açık kaynaklı ve çapraz platform destekli Avalonia UI çerçevesi kullanılmıştır. Arayüzün görseli Şekil 2.5'de gösterilmiştir.

Arayüzdeki her bir eleman, ayrı bir ızgara ile bölünmüştür. Arayüzün 1 numaralı bölümü sıvı durumunu göstermektedir. Bu bölümde kullanılan "ilerleme çubuğu" elemanının maksimum değeri, deponun maksimum kapasitesine gösterecek şekilde ayarlanmıştır. Alınan veriye göre elemanın doluluğu, deponun gerçek zamanlı doluluğuna göre değişecektir.



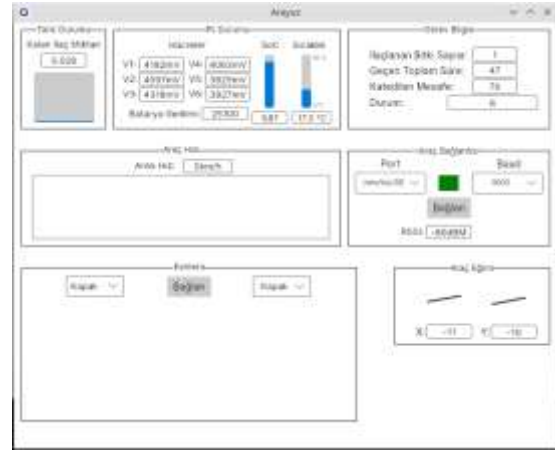
Şekil 2.5. Yer İstasyonu Arayüzü

Arayüzün 2 numaralı kısmında kara aracının pil durumu gösterilmektedir. Bu kısımda bataryanın her bir hücresinin gerilimi, tüm batarya gerilimi, pilin doluluğu (SoC), ve pil sıcaklığı gösterilmektedir. Pil doluluğu ve sıcaklık için birer “ilerleme çubuğu” elemanı eklenmiştir. Alınan verilere göre eşzamanlı olarak dolulukları değişmektedir. Arayüzün 3 numaralı bölümünde aracın kat ettiği mesafe, toplam kullanım süresi, araç durumu ve kara aracının kullanım alanına özel görev bilgileri anlık olarak gösterilmektedir. Arayüzün 4 numaralı bölümünde aracın hızı (m/dak.) gösterilmektedir ve aynı şekilde gerçek zamanlı olarak grafiği çizilmektedir. Arayüzün 5 numaralı bölümü sayesinde veri aktarımı ayarları yapılmaktadır. Bu kısımda alıcının bağlı olduğu COM portu ve kullanılacak olan Baud hızı ayarlanabilmektedir. Arayüzün 6 numaralı kısmında kamera görüntüsü gösterilmektedir. Kamera görüntüsü alabilmek için OpenCV'nin açık kaynaklı ve çapraz desteğine sahip OpenCVSharp sarmalayıcısı kullanılmaktadır. Arayüz, aynı anda 2 adet kamera görüntüsü gösterebilmektedir. Bunun için öncelikle seçim listesi üzerinden kamera numarası seçilir ve ardından “bağlan” butonuna basılır. Arayüz yenileme kodları yürütme metodu ile çalıştırıldığı için diğer fonksiyonlara performans bakımından negatif bir etkisi bulunmamaktadır. Arayüz meşgul olmadığı sürece görüntü yenilemesi sağlanmaktadır. Arayüzün 7 numaralı kısmında araç eğimi gösterilmektedir. Araç eğimi, arazi koşulları göz önüne alındığında İKA için büyük önem oluşturmaktadır. İKA'dan alınan açı verileri

kullanılarak eğim değerleri 2 adet metin kutusuna yazılmaktadır. Ayrıca buna ek olarak aracın eğimi ile canlı olarak değişen görsel kullanılarak bu fonksiyon desteklenmektedir.

### 3. Bulgular

Hazırlanan arayüz yazılımı, farklı işletim sistemleri ve platformlarda denenmiştir. Şekil 3.1'de gösterildiği gibi farklı ekran çözünürlüklerinde arayüz bütünlüğü korunmaktadır ve veriler İKA üzerinden başarıyla alınmaktadır.



Şekil 3.1. Ubuntu İşletim Sistemine Sahip Jetson Nano Kartı KDE Masaüstü Ortamında Ekran Görüntüsü

Hazırlanan arayüz, Intel işlemcili bilgisayarlarda farklı işletim sistemlerinde, Nvidia ARM64 işlemcili Jetson Nano tek kart bilgisayarda denenmiştir. Ayrıca aynı arayüz çapraz platform desteği bulunmayan geleneksel Windows Presentation Foundation(WPF) platformu kullanılarak da derlenmiştir. Buna ek olarak benzer işlevleri sağlayan açık kaynak kod bir arayüz yazılımı da aynı sistem üzerinde çalıştırılmıştır. Farklı arayüz, donanım ve işletim sistemi denemeleri sonucunda tespit edilen kaynak kullanımları karşılaştırmalı olarak Çizelge 1'de gösterilmiştir.

STM32 mikrodenetleyici ve LoRa E32 tarafından kablosuz gönderilen veriler, yer istasyonundaki alıcı tarafından başarıyla alınmıştır

Çizelge 1. Arayüzün farklı platformlardaki kaynak kullanımı

Arayüz	Donanım	İşletim Sistemi	RAM Kullanımı (Megabayt)	% İşlemci Kullanımı	Depolama Kullanımı (Megabayt)
Bu Çalışma – WPF	Intel Bilgisayar	Windows 11	105	%0 - %1	121MB
Bu Çalışma – AvaloniaUI	Intel Bilgisayar	Windows 11	132	%0 - %1	116MB
Bu Çalışma – AvaloniaUI	Intel Bilgisayar	Ubuntu 18.04	129	%0 - %1	116MB
Bu Çalışma – AvaloniaUI	Jetson NANO	Ubuntu 18.04	126	%0 - %1	116MB
(İnt. Kyn. 3)	Intel Bilgisayar	Windows 11	360	%1 - %3	300MB

Alınan işlenmemiş veri, başarıyla bir dizi içerisine kaydedilmiş ve bu dizi içerisinden veriler okunmuştur. Okunan bu veriler başarıyla arayüz üzerinde gösterilmiştir.

Kamera görüntüsü aktarımı başarıyla sağlanmıştır. Arayüzde aynı anda 2 adet kamera görüntüsü 30FPS ile, arayüzün diğer fonksiyonlarında yavaşlamaya sebep olmadan gösterilmiştir. Batarya gerilim ve doluluk ölçüm fonksiyonu sorunsuz çalışmıştır. Batarya gerilimi ölçümü test edilmiştir. Veriler Çizelge 2’de gösterilmiştir.

**Çizelge 2.** Batarya gerilim ölçümü farklılıkları

Ölçüm	Hücre 1 Gerilimi	Hücre 2 Gerilimi	Hücre 3 Gerilimi	Hücre 4 Gerilimi	Hücre 5 Gerilimi	Hücre 6 Gerilimi
Arayüz	4.01V	3.87V	3.94V	3.65V	3.53V	3.33V
Voltmetre	4.02V	4.03V	4.04V	4.03V	4.03V	4.04V
Hata	-0.01V	-0.16V	-0.1V	-0.38V	-0.5V	-0.71V

Telemetri sisteminin, İKA üzerinde 40x20 m boyutlarında bir arazide denemesi gerçekleştirilmiştir. İKA bu arazi üzerinde hareket ettirilmiştir. Arazi boyutları ile arayüz üzerindeki ölçülen mesafe verileri karşılaştırılmıştır. Hız ve mesafe verileri, arazi boyut ölçüleri ile tutarlılık göstermektedir. İKA yaklaşık 1 km mesafe yol katetmiştir. Araç hızı 0-35 m/dk arasında değişmektedir. Ancak arazinin eğim ve engebe durumlarına bağlı olarak tekerleğin boşa dönmesi arazi kaynaklı ölçümde küçük de olsa hatalar meydana gelmektedir. Bu çalışmada eğim 0-180° arası ölçüm yapılmaktadır. Fakat denemeleri yapılan İKA aracı eğimi 0-15° derecelik arazide hareket kabiliyeti olduğu için bu aralık arasında eğim ölçümü alınmıştır.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada sadece tek bir işletim sisteminde çalışan arayüz ile iki farklı işletim sisteminde çalışan arayüzün RAM, işlemci ve boyut olarak çok ciddi farklar olmadığı hatta işlemci olarak hiçbir değişiklik olmadığı gözlemlenmiştir. Böylelikle iki farklı işletim sisteminde çalışan arayüzün farklı kullanıcılara da hitap etmesi avantajlı bir durumdur. Ayrıca bu çalışmada yapılan çapraz platform destekli arayüz ile bireysel kullanıcılar tarafından sıklıkla kullanılan bir açık kaynak kod yazılım arayüzü (İnt. Kyn. 3) ile de karşılaştırma yapılmıştır. Bu açık kaynak kod yazılımı, Çizelge 1’de görüldüğü gibi tüm karşılaştırma parametrelerinde yaklaşık olarak iki katı kaynak kullanımına sahiptir Bu bağlamda bu çalışmada yapılan arayüzün kaynak kullanımı bakımından daha verimli olduğu söylenebilir.

Batarya gerilimi ölçümünde Çizelge 2’de gösterildiği gibi farklılıklar bulunmaktadır. Bunun sebebi gerilim

bölücülerde kullanılan dirençlerin toleransı ve ADC ölçümünün 0-3.3V aralıklı 12-bit olmasıdır. Ancak pil yüzdesi 1 numaralı hücrenin gerilim değerine göre hesaplandığı için sistemi etkilememektedir. Çünkü 1 numaralı hücrenin hata gerilim değeri ihmal edilebilir bir düzeydedir.

Bu çalışmada, 32 bitlik ARM tabanlı stm32F411 mikrodenetleyici kullanılmıştır. Bu mikrodenetleyici mevcut diğer çalışmalarda(Enshasy et al. 2019, Hassan et al. 2017, Nagchaudhuri et al. 2018, Shah et al. 2019, Vaeljaots et al. 2018, Vishnu et al. 2022) kullanılan 8 bit mikrodenetleyicilerden daha yüksek çekirdek hızına, performansı artırılmış ve doğrudan bellek erişimi fonksiyonuna sahip çevre birimlerine, 12 bit ADC dönüştürücüye ve daha yeni üretim teknolojileri sayesinde düşük güç tüketimine sahiptir. Bu mikrodenetleyici kart için tasarlanan genişletme kartı sayesinde batarya gerilimi ölçümü dahil olmak üzere tüm sensörler tek bir noktada toplanmıştır ve kablo karmaşasının önüne geçilmiştir.

Bu çalışmada kara araçlarında kullanılmak üzere özgün ve çapraz platform destekli bir telemetri sistemi geliştirilmiştir. Bu sistem Linux ve Windows işletim sistemlerinde hem masaüstü hem de tek kart bilgisayar ortamlarında başarı ile çalıştırılmıştır. Telemetri veri gönderimi STM32F411 denetleyicisi ile yapılmıştır. Sensörleri ve modülleri bir arada tutmak için STM32F411 kartına uyumlu taşınabilir, hafif ve özgün bir genişletme kartı tasarlanmıştır. Gelecek çalışmalarda, algılayıcılar artırılarak ve arayüzde gerekli değişiklikler yapılarak hava ve deniz araçları için bu arayüz uyarlanabilir.

#### Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

#### Yazarlık Katkı Beyanı

Uğur Kırçıl: Kaynaklar, araştırma, deney tasarımı, yazma, görselleştirme.

Cengiz Tepe: Kaynaklar, araştırma, deney tasarımı, yazma, 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.

#### Teşekkür

Bu çalışma, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından PYO.MUH.1908.22.084 proje numarası ile desteklenmiştir.

## 5. Kaynaklar

- Durmus, H., Gunes, E. O., Kirci, M., & Ustundag, B. B. ,2015. The design of general purpose autonomous agricultural mobile-robot: AGROBOT. *Fourth International Conference on Agro-Geoinformatics*. <http://www.doi.org/10.1109/Agro-Geoinformatics.2015.7248088>
- Enshasy, H., Al-Badi, I., Al-Saleh, M., Bu-Shalf, A., Al-Dosseri, A., & Abu Al-Haija, Q. ,2019. A Comprehensive Design of Unmanned Ground Search and Rescue Robot. *Journal of Computer Science and Technology*, **14**, 52-80.
- Ferreira, A. E., Ortiz, F. M., Costa, L. H. M. K., Foubert, B., Amadou, I., & Mitton, N.,2020. A study of the LoRa signal propagation in forest, urban, and suburban environments. *Annals of Telecommunications*, **75(7-8)**,333-351. <http://www.doi.org/10.1007/s12243-020-00789-w>
- Gonzalez, S., Vargas, T. R., Arce, P., & Guerri, J. C. ,2016. Energy optimization for video monitoring system in agricultural areas using single board computer nodes and wireless ad hoc networks. *2016 XXI Symposium on Signal Processing, Images and Artificial Vision (STSIVA)*. <http://www.doi.org/10.1109/STSIVA.2016.7743350>
- Gündoğdu, K., & Çalhan, A. ,2013. İnsansız Askeri Kara Aracı Tasarımı. *Düzce Üniversitesi İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, **2 (1)**,36-45.
- Hassan, S., Alam, M., Siddiqui, N. A., Siddiqui, A. A., & Qadri, M. T. ,2017. Designing and control of autonomous Unmanned Ground Vehicle. *International Conference on Innovations in Electrical Engineering and Computational Technologies (ICIEECT)*. <http://www.doi.org/10.1109/ICIEECT.2017.7916547>
- Kıvanç, Ö. C., Mungan, T. E., Atila, B., & Tosun, G. ,2019. İnsansız kara aracı geliştirmeye bütünlük bir yaklaşım: tasarım, analiz, uygulama ve öneriler. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **34 (4)**, 1957-1974. <https://www.doi.org/10.17341/gazimmfd.571644>
- Nagchaudhuri, A., Mitra, M., Hartman, C., Ford, T., & Pandya, J. ,2018. Mobile Robotic Platforms to Support Smart Farming Efforts at UMES. *14th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA)*. <http://www.doi.org/10.1109/MESA.2018.8449182>
- Pei, W., Lan, Y. B., Luo, X. W., Zhou, Z. Y., Wang, Z., & Wang, Y. ,2014. Integrated sensor system for monitoring rice growth conditions based on unmanned ground vehicle system. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, **7**, 75-81. <http://www.doi.org/10.3965/j.ijabe.20140702.009>
- Rahman, M. Z. U., Raza, U., Akbar, M. A., Riaz, M. T., Gumaei, A. H., & Ahmad, N. ,2023. Radio-Controlled Intelligent UGV as a Spy Robot with Laser Targeting for Military Purposes. *Axioms*, **12(2)**, 176. <https://www.doi.org/10.3390/axioms12020176>
- Shah, S. H. H., Hussain, A., Shah, R., & Abro, S. ,2019. Mini Rover-Object Detecting Ground Vehicle (UGV). *University of Sindh Journal of Information and Communication Technology*, **3(2)**, 104-108.
- Snipes, W., Stapleton, J., Yuan, M., Walters, B., Pierce, D., & Lewin, G. C. ,2018. Design of a 3D printed unmanned ground vehicle. *Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS)*. <http://www.doi.org/10.1109/SIEDS.2018.8374731>
- Turčinović, F., Vuković, J., Božo, S., & Šišul, G. ,2020. Analysis of LoRa Parameters in Real-World Communication. *2020 International Symposium ELMAR*. <http://www.doi.org/10.1109/ELMAR49956.2020.9219028>
- Vaeljaots, E., Lehiste, H., Kiik, M., & Leemet, T. ,2018. Soil sampling automation case-study using unmanned ground vehicle. *17th International Scientific Conference Engineering for Rural Development*. <http://www.doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N503>
- Vishnu, S., Anil Kumar, M., Manjasha, M. G., Pasha, Z., & Madhu, S. ,2022. A Low-Cost Prototyping Approach for Autonomous Unmanned Ground Vehicle for Real-Time Surveillance. *IEEE International Conference on Artificial Intelligence in Engineering and Technology (IICAJET)*. <http://www.doi.org/10.1016/j.fcij.2018.10.001>

## İnternet kaynakları

- 1-[https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/product\\_flyer/bst-bmi160-fl000.pdf](https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/product_flyer/bst-bmi160-fl000.pdf) (03.07.2023)

2-<https://www.micros.com.pl/mediaserver/info-rf%20e22-900t22s.pdf> (03.07.2023)

3-<https://github.com/ArduPilot/MissionPlanner>  
(03.07.2023)

4-[https://hyperion-world.com/download\\_files/manuals/HP-FP58TS5823-Manual.pdf](https://hyperion-world.com/download_files/manuals/HP-FP58TS5823-Manual.pdf) (03.07.2023)

5-<https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/pdfs/90001500.pdf> (03.07.2023)





## UV ve Vakum Uygulamalarının Beyaz Peynirin Kalite Özellikleri ile Raf Ömrü Üzerine Etkileri

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 12.04.2023

Kabul/Accepted: 05.01.2024

Yayımlandı/Published: 27.02.2024

### Effects of UV and Vacuum Applications on Quality Properties and Shelf Life of White Cheese

Ramazan Şevik , Gökhan Akarca , Mehmet Kılınç , Senem Güner , Teslime Ekiz Ünsal ,  
Çiğdem Aşçıoğlu , Harun Dıraman 

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

Bu çalışmada UV, vakum ve ikili kombinasyon uygulamaları altında depolanan beyaz peynirlerin fizikokimyasal, tekstürel ve mikrobiyolojik özelliklerinde depolama süresince meydana gelebilecek değişimler incelenmiştir. Ayrıca üründe oluşabilecek küflenme probleminin giderilmesi ve ürünün raf ömrünün uzatılması hedeflenmiştir. Depolama süresi boyunca örneklerin aw, pH, L\*, gevreklik ve iç yapışkanlık değerlerinde azalma, buna karşın a\*, b\*, sertlik, dış yapışkanlık ve tutunabilirlik değerlerinde ise artış tespit edilmiştir (P<0,05). Yapılan analizler sonucunda kontrol örneğinde meydana gelen değişimler ile UV ve vakum uygulamasına tabi tutulan örneklerde meydana gelen değişimler arasında önemli farklılıklar olduğu belirlenmiştir (P<0,05). Mikrobiyolojik analiz sonuçlarında ise; toplam aerobik mezofilik bakteri, laktik asit bakterisi, toplam maya ve küf sayılarının kontrol örneğine kıyasla uygulanan işlemlere bağlı olarak azalış gösterdiği ortaya konulmuştur. Araştırma ile beyaz peynirde yüzeyde meydana gelebilecek küf probleminin önlenmesi, ürünün organoleptik ve tekstürel özelliklerinde meydana gelebilecek bozulmaların önlenmesi ve daha gelişmiş kalite özellikleri sağlanabilmesi için UV ışın ve vakum uygulamalarının kullanımının etkili olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler** Vakum; UV; Beyaz peynir; Küf; Kalite

#### Abstract

In this study, changes in the physicochemical, textural and microbiological properties of white cheeses stored under UV, vacuum and double combination applications during storage were investigated. In addition, it was aimed to eliminate the mold problem that may occur in the product and to extend its shelf life. During the storage, the aw, pH, L\*, springiness and cohesiveness values of the samples decreased, while a\*, b\*, hardness, adhesiveness and resilience values were increased (P<0.05). According to the result of the analysis, it was found that there were significant differences between the changes in the control sample and the changes in the samples subjected to UV and vacuum application (P<0.05). In the results of microbiological analysis; it was revealed that the total aerobic mesophilic bacteria, lactic acid bacteria, total yeast and mold numbers decreased depending on the treatments applied compared to the control sample. With the research, it has been determined that the use of UV rays and vacuum applications is effective in preventing the mold problem that may occur on the surface of white cheese, preventing the deterioration of the organoleptic and textural properties of the product, and providing more advanced quality properties.

**Keywords** Vacuum; UV; White cheese; Mold; Quality

#### 1. Giriş/Introduction

Gıdalar, daha fazla raf ömrü sağlamak çeşitli özellikleri (renk, lezzet, doku vb.) uzun süre ile korumak amacıyla çeşitli yöntemlerle (kurutma, dondurma, soğutma, fermentasyon, pastörizasyon, sterilizasyon vb.) muhafaza edilmektedir (Güneş ve Ekren 2017). Bu yöntemlerden birisi olan soğutma gıdaların korunması için en çok kullanılan yöntemlerden birisidir. Soğutma yönteminde gıdalar donma noktası üzerinde uygun bir sıcaklıkta depolanarak bakteri ve diğer mikroorganizmaların etkinliği önlenmiş olur ve kimyasal reaksiyonlar yavaşlatılmış olur (Öztürk vd. 2004).

Hava soğutma sistemi, buhar sıkıştırırmalı mekanik soğutma sistemi, absorpsiyonlu soğutma sistemi, adsorpsiyonlu soğutma sistemi, sterling soğutma sistemi, buhar-jet (ejektör) soğutma sistemi termoelektrik soğutma sistemi ve vakum soğutma sistemi bilinen çeşitli soğutma sistemlerinden bazılarıdır (Öztürk vd. 2004). Vakumlu soğutma, bazı tarım ve gıda ürünlerini soğutmak için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Ozturk ve Ozturk 2009). Hızlı bir soğutma yöntemi olan vakum soğutma yönteminde, madde içerisindeki suyun vakum odasında buharlaştırılması ile maddeden ısı çekilmekte ve madde soğutulmuş olmaktadır (Suslow 2000). Suyun buharlaşması doğrudan çevredeki buhar



basıncına bağlıdır ve sıcaklığın düşmesine neden olur (Ozturk ve Ozturk 2009). Vakum odasındaki basınç düştükçe, suyu buharlaştırmak için gereken enerji ürünün kendisi tarafından gizli buharlaşma ısısı şeklinde sağlanır (MacDonald ve Sun 2000). İçerisinde serbest su bulunan ve vakum altında yapısı bozulmayacak her ürün vakumla soğutulabilmektedir (Wang ve Sun 2000). Taze meyve, sebze, et, balık ve sosların soğutulmasında en etkili yöntemlerden birisidir (Ozturk ve Ozturk 2009). Ultraviyole (UV) ışık teknolojisi ısılmayan teknolojilerden bir tanesidir. Dalga boylarına göre UV-A, UV-B, UV-C ve vakum UV olarak alt sınıflara ayrılmaktadır (Nagarajarao 2016). UV ışık ile birlikte gıda yüzeyinde bulunan mikroorganizmalar ısı işlem uygulamadan ve kimyasal madde kullanımı olmadan kısa sürede inaktive edilebilmekte ve böylece raf ömrü artırılabilir (Koutchma 2009, Koca vd. 2018). Bu yöntem ile birlikte, geleneksel yöntemlere göre kalite kayıpları, duyu kusurları ve besin değerindeki kayıplar en düşük seviyelere inmektedir (Koca vd. 2018).

Peynir dünya çapında en çok tüketilen süt ürünlerinden bir tanesidir. 2021 yılında ülkemizde 763 bin ton peynir üretilmiş, bunun yaklaşık %96'sını inek sütünden üretilen peynir oluşturmaktadır (Omrak 2022). Ülkemizde yaklaşık 200 civarı çeşitli yöresel ve global peynir çeşidi bulunmaktadır. Beyaz peynir özellikle kahvaltılık olarak ülkemizde en çok tüketilen peynir çeşitlerinden biridir. Beyaz peynir, salamurada olgunlaştırılan ve dolayısıyla tuzlu-ekşi bir aromaya sahip bir üründür. Endüstriyel ölçekte üretilen beyaz peynirin olgunlaştırma işlemi 4 °C'de yaklaşık 3 ayda gerçekleşmektedir. Yapısı diğer sert peynirlere göre daha yumuşaktır ve aroması çiğ süte, üretim şekline ve olgunlaştırma süresine bağlı olarak değişmektedir (Çelik ve Uysal 2009).

Bu çalışmada, UV, vakum ve kombinasyonu uygulamaları altında depolanan beyaz peynirlerin, fizikokimyasal, tekstürel ve mikrobiyolojik özelliklerinde depolama süresince meydana gelebilecek değişimler incelenmiştir. Ayrıca, özellikle üründe oluşabilecek küflenme probleminin giderilmesi ve ürünün raf ömrünün uzatılması hedeflenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1 Materyal

Bu çalışmada kullanılan beyaz peynir örnekleri Afyonkarahisar ilinde faaliyet gösteren bir süt fabrikasında üretilmiştir. Araştırmada kullanılan beyaz peynirlerin üretimi için 250 L inek sütü kullanılmıştır. Sütün pastörizasyonu plakalı ısı değiştiricide (Kromel,

Türkiye) 85 °C'de 5 dk süre ile gerçekleştirildikten sonra süt 33 °C'ye kadar soğutulmuş ve peynir mayalama tanklarına alınmıştır. Süt içerisine starter kültür (DVS Rsf-776, Peyma, Türkiye) ilave edilmiş ve 30 dk ön olgunlaştırma için beklenilmiştir. Ardından süt içerisine sırasıyla CaCl<sub>2</sub> ve 1:16.000 kuvvetindeki peynir mayasından (Yayla, Türkiye) 25 mL ilave edilmiştir. Ardından 60 dk pıhtı kesim olgunluğuna gelinceye kadar beklenilmiştir. Pıhtı kırılıp, peynir altı suyu ayrıldıktan sonra cendere bezinde baskıya alınan teleme daha sonra mastra ve bıçak yardımıyla 9 x 9 x 9 cm boyutlarında kesilmiştir. Ardından salamura (12.5 °C) ilave edilmiş olan peynirler 23 °C'de 5 saat salamurada tutulmuştur. Peynirlerin salamura suyu süzülmesi ve SH değeri 65'e ulaşılana kadar bekletilmiştir. Bu çalışmada kullanılan kabin ise Biosan (Konya, Türkiye) firması tarafından özel olarak tasarlanarak üretilmiştir.

### 2.2 Metot

Peynir örnekleri bu çalışma için özel olarak tasarlanan kabin içerisinde, 14 gün süre ile ayrı ayrı, vakum, IR ve vakum IR kombinasyonu uygulamalarına tabi tutulmuştur. Uygulamalarda ortam koşulları (Vakum ve IR + Vakum) Basınç: -300 mbar, sıcaklık: 30°C, nem: %55,7, oksijen konsantrasyonu: % 0.06, karbondioksit: 0.13 ppm olarak belirlenmiştir. IR uygulamasında ise sıcaklık: 30°C, nem: %65,1, oksijen konsantrasyonu: %14,3, karbondioksit: 0.733 ppm olarak belirlenmiştir.

#### 2.2.1 Fizikokimyasal Analizler

##### 2.2.1.1 pH

10 g homojenize örnek alınarak 25 ml' ye saf su ile seyreltilmiş ve WTW marka (330 / Set-1) pH metre ile pH değerleri okunmuştur (AOAC 2016).

##### 2.2.1.2 Su Aktivitesi (aw)

Analize hazırlanan örneklerin su aktivitesi, örneklerden yeterli miktarda alınarak Novasina su aktivitesi ölçüm cihazı ile AOAC (1990) metodu kullanılarak belirlenmiştir.

##### 2.2.1.3 Renk Tayini

Örneklerin renk analizleri (L\*,a\*,b\*), Minolta kolorimetre (Chroma Meter, CR-400, Japan) cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Anonymous 1979).

##### 2.2.1.4 Tekstür Analizi

Peynir örneklerinin tekstür profil analizleri (TPA) TA.XT Plus Texture Analyzer (Stable Microsystems Ltd.,

Godalming, UK) cihazı kullanılarak Everard vd. (2007)'de belirtildiği metoda göre yapılmıştır.

### 2.2.1.5 Mikrobiyolojik Analizler

Toplam aerobik mezofil bakteri (TAMB) sayımı yayma plak yöntemiyle, Plate Count (PCA) Agar (104463, Merck Millipore, Almanya) kullanılarak yapılmıştır. Ekim yapılan petripler 30°C' de inkübatörlerde (Incucell, MMM, Almanya) 24-48 saat inkübasyona bırakılmış, inkübasyon sonunda besiyeri üzerinde gelişen 0,5 mm den daha büyük 30-300 arasında sayıda olan koloniler sayılmıştır (Halkman 2005, Dokuzlu 2004).

Laktik asit bakterilerinin sayısı (LAB) yayma plak yöntemi ile de Man Rogosa and Sharpe (MRS) Agar (110660, Merck Millipore, Almanya) kullanılarak yapılmıştır. Ekim işlemi sonrası petripler 30°C'deki inkübatörlerde 48-72 saat süre ile inkübasyona bırakılmıştır. Inkübasyon sonunda besiyeri üzerinde gelişen 30-300 arasında sayıdaki gri renkli koloniler sayılmıştır (Halkman 2005).

Toplam maya ve küf (TMK) sayımı, yayma plak yöntemi ile Potato Dextrose Agar (PDA) (110130, Merck Millipore, Almanya) kullanılarak yapılmıştır. Ekim işlemi sonrasında petri kutuları 20-25°C'deki inkübatörde 5-7 gün inkübasyona bırakılmıştır. Inkübasyon sonunda besiyeri üzerinde gelişen koloniler sayılmıştır (Dokuzlu 2004).

### 2.2.1.6 İstatistiksel Analizler

Araştırma 4 (kontrol, Basınç, UV ve Basınç + UV uygulamaları) x 4 (depolama süresi) (1, 4, 7 ve 14. gün) x 2 (tekerrür) olmak üzere tam şansa bağlı faktöriyel deneme planına göre yürütülmüştür. Önemli çıkan ortalamalar arasındaki farklılıklar Duncan çoklu karşılaştırma testi değerlendirilmiştir.

## 3. Bulgular ve Tartışma

### 3.1 pH

Beyaz peynir örneklerine ait pH değerleri Çizelge 1' de verilmiştir. Örneklerin tamamında pH değerleri depolamaya bağlı olarak azalış göstermiştir. pH değeri üzerinde örnek çeşidi etkileşimi varyasyon analiz sonuçlarına göre çok fazla anlamlı (P<0.0001) olarak tespit edilmiştir. Bu azalış kontrol örneği hariç diğer tüm örneklerde istatistiksel olarak anlamsız olarak tespit edilmiştir. (P>0.05). Buna karşın aynı depolama zamanlarında örnekler arasındaki pH değerleri arası fark ise, istatistiksel olarak anlamlıdır (P<0.05). Dört farklı örnek çeşidi arasında tüm depolama zamanlarında en düşük pH değerine sahip olan örneğin basınç

uygulanmasına tabi tutulan numuneler olduğu tespit edilmiştir. Beyaz peynir örneklerinde en düşük pH değeri (4,09) 14. günde kontrol örneğinde, en yüksek pH değeri ise (4,30) 4. günde UV ışın uygulanmış örneklerinde belirlenmiştir. Bu çalışmadaki beyaz peyniri örneklerinde belirlenen pH değerleri miktarları Akın vd. (2003) ve Topçu ve Saldamlı (2006)' ya benzerdir.

### 3.2 Su Aktivitesi (aw)

Beyaz peynir örneklerine ait aw değerleri Çizelge 2' de verilmiştir. Örneklerin tamamında aw değerleri depolamaya bağlı olarak azalmıştır (P<0.05). Aynı depolama zamanında örnekler arasındaki farklılık da istatistiksel olarak anlamlıdır (P<0.05). Ayrıca aw değeri üzerinde örnek çeşidi, depolama zamanı ve örnek çeşidi x depolama zamanı etkileşimleri istatistiksel olarak çok fazla anlamlı (P<0.0001) bulunmuştur. Ek olarak aw değeri üzerinde örnek çeşidi ve depolama zamanı etkileşimleri pozitif yönlü çok fazla korelatif etki göstermiştir. Beyaz peynir örneklerinde en düşük su aktivitesi (0,50) 14. günde UV-basınç birlikte uygulanmış örnekte, en yüksek su aktivitesi miktarı ise (0,85) 1. günde kontrol örneğinde belirlenmiştir (Çizelge 1). Bu çalışmadaki beyaz peyniri örneklerinde belirlenen su aktivitesi miktarları Erol (2018)'den düşüktür.

Erol (2018) tarafından peynirler üzerinde yapılan bir çalışmada, yüksek basınçla kombine edilen sonikasyon süresindeki artışın peynir örneklerinin su aktivite değerlerinde düşüğe sebep olduğu gözlemlenmiştir. Peynir yüzeyinin su aktivite değerinin, örneklerin dış yüzeyi ile çevre atmosfer arasındaki kütle ve ısı aktarım kinetiğinin ana etmeni olduğu düşünülmektedir (Hardy 1984, Pajonk vd. 2003, Ruegg 1985).

### 3.3. Renk Tayini

Örneklerin L\* değerleri Çizelge 3' de gösterilmiştir. Tüm örneklerde L\* değeri depolama süresi boyunca azalış göstermiştir (P<0.05). İlk depolama günü hariç diğer tüm depolama zamanlarında örneklerin L\* değerleri arasındaki farkında istatistiksel olarak anlamlı olduğu (P<0.05) belirlenmiştir. Buna ek olarak L\* değeri üzerinde örnek çeşidi, depolama zamanı ve örnek çeşidi x depolama zamanı etkileşimlerinin çok fazla anlamlı (P<0.0001) olduğu, ayrıca pH değeri üzerinde örnek çeşidi ve depolama zamanı etkileşimlerinin negatif yönlü çok fazla korelatif etki gösterdiği belirlenmiştir. Depolama süresince L\* değeri en düşük örneklerin UV + basınç uygulanmasına tabi tutulan örneklerin olduğu ortaya konulmuştur. Beyaz peynir örneklerinde en düşük L\* değeri (81,69) 14. günde UV-basınç birlikte

uygulanmış örnekte, en yüksek  $L^*$  değeri miktarı ise (98,04) 1. günde kontrol örneğinde belirlenmiştir. Bu çalışmadaki beyaz peyniri örneklerinde belirlenen  $L^*$  değeri miktarları Özdemir (2016) ile benzerdir.

Örneklerin  $a^*$  değerleri depolama süresince artış göstermiştir ( $P<0.05$ ; Çizelge 4). Tüm depolama zamanlarında örnekler arasında en düşük  $a^*$  değerine sahip olan örneğin UV-basınç kombinasyonu uygulanmış örnekler olduğu tespit edilmiştir. Aynı şekilde aynı zaman diliminde örneklerin  $a^*$  değerlerinde meydana gelen farklılıkların istatistiksel olarak anlamlı olduğu tespit edilmiştir ( $P<0.05$ ). Beyaz peynir örneklerinde en düşük  $a^*$  değeri (2,04) 1. günde UV-basınç birlikte uygulanmış örnekte, en yüksek  $a^*$  değeri miktarı ise (3,79) 14. günde UV örneğinde belirlenmiştir. Bu çalışmadaki beyaz peyniri örneklerinde belirlenen  $a^*$  değeri miktarları Özdemir (2016) farklıdır. Peynir örneklerinde gözlenen renk değişimleri, doğal mikrofloranın biyokimyasal aktivitesi, uygulanan teknolojik işlemler ve kullanılan olgunlaştırma teknolojisi ile ilişkili olduğu düşünülmektedir (Marchesini vd. 2009).

Peynir örneklerinde depolama süresince belirlenen  $b^*$  değerleri Çizelge 5' de verilmiştir. Varyasyon analiz sonuçlarına göre  $b^*$  değeri üzerinde örnek çeşidi, depolama zamanı ve örnek çeşidi x depolama zamanı etkileşimlerinin çok fazla anlamlı ( $P<0.0001$ ) olduğu ayrıca, depolama zamanı etkileşiminin pozitif yönde çok fazla korelatif etki gösterdiği ( $r:0.622$ ) ortaya konulmuştur. Bütün örneklere ait  $b^*$  değerleri depolama süresince artış göstermiştir ( $P<0.05$ ). Tüm depolama zamanlarında örnekler arasında en yüksek  $b^*$  değeri UV-basınç uygulamasına tabi tutulan örneklerde olduğu tespit edilmiş olup ( $P<0.005$ ), örnekler arasında en düşük  $b^*$  değeri (4,37) 1. günde UV uygulanmış örnekte, buna karşın en yüksek  $b^*$  değeri ise (19,15) 14. günde UV-basınç işlemini uygulanmış örneklerde olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmadaki beyaz peynir örneklerinde belirlenen  $b^*$  değerleri Özdemir (2016) farklıdır. Peynirdeki renk değişimleri doğal mikrofloranın biyokimyasal aktivitesi, teknolojik işlemler ve olgunlaştırma teknolojisi ile ilişkilidir (Marchesini vd. 2009).

### 3.4. Tekstür Analizi

Yapılan varyans analiz sonuçlarına göre sertlik, yapışkanlık ve gevreklik değerleri üzerinde örnek çeşidi, depolama zamanı ve örnek çeşidi x depolama zamanı etkileşimlerinin çok fazla ( $P<0.0001$ ) anlamlı olduğu ortaya konulmuştur. Yapışkanlık değeri üzerinde örnek çeşidi ve depolama zamanı, sakızimsılık değeri üzerinde,

depolama zamanı ve çignenebilirlik değeri üzerinde ise örnek çeşidi ve depolama zamanı x örnek çeşidi etkileşimlerinin aynı şekilde çok fazla anlamlı olduğu ( $P<0.0001$ ) tespit edilmiştir.

Beyaz peynir örneklerine ait sertlik değerleri Çizelge 6' da verilmiştir. Korelasyon analiz sonuçlarına göre sertlik değeri üzerinde depolama zamanı etkileşiminin pozitif çok fazla korelatif ( $r:0.691$ ) etkisinin olduğu belirlenmiştir. Peynir örneklerinin sertlik değerleri depolama süresince artış göstermiş ( $P<0.05$ ) olup, örneklere ait en düşük sertlik değeri (127,49 N) 1. günde UV uygulanmış örnekte, en yüksek sertlik değeri ise (1033,74 N) 14. günde UV-basınç işlemi uygulanmış örneğinde olduğu tespit edilmiştir.

On dört günlük depolama süresince örneklere ait dış yapışkanlık değerleri Çizelge 7' de gösterilmiştir. Tüm örneklerde dış yapışkanlık değerleri depolama süresine bağlı olarak artış göstermiştir ( $P<0.05$ ). Ayrıca örnek çeşidi üzerinde örnek çeşidi etkileşimi pozitif yönlü çok ( $r: 0.538$ ) fazla korelatif etki göstermiştir. Dört farklı örnek arasında en yüksek dış yapışkanlık değeri (2,401) 1. günde kontrol örneğinde, en düşük dış yapışkanlık değeri ise (0,085) 14. günde UV-basınç işlemi uygulanmış örneğinde olduğu belirlenmiştir.

Peynir örneklerine ait gevreklik değerleri Çizelge 8' de belirtilmiştir. Beyaz peynir örneklerinde gevreklik değerleri 14 günlük depolama zamanında azalış göstermiştir ( $P<0.05$ ). Buna ek olarak gevreklik değeri üzerinde örnek çeşidi etkileşimi negatif yönlü çok fazla ( $r:-0.562$ ) depolama zamanı etkileşimi ise yine negatif yönlü fazla korelatif ( $r:-0.376$ ) etki göstermiştir. Beyaz peynir örneklerinde en düşük gevreklik değeri (1,55) 14. günde UV-basınç işlemi uygulanmış örnekte, en yüksek gevreklik değeri miktarı ise (7,31) 1. günde kontrol örneğinde olduğu belirlenmiştir.

Dört farklı peynir örneğinde depolama zamanı boyunca tespit edilen iç yapışkanlık değerleri Çizelge 9' da belirtilmiştir. İki haftalık depolama süresi boyunca iç yapışkanlık değerlerinin tüm örneklerde azalış gösterdiği ( $P<0.05$ ) ortaya konulmuş olup, iç yapışkanlık değeri üzerinde örnek çeşidi etkileşiminin negatif yönlü çok fazla ( $r:-0.533$ ), depolama zamanı etkileşimi üzerinde ise yine negatif yönlü fazla ( $r:-0.451$ ) korelatif etki gösterdiği tespit edilmiştir. Örnek çeşitleri arasında en düşük iç yapışkanlık değeri (0,01) 14. günde UV-basınç işlemi uygulanmış örnekte, en yüksek iç yapışkanlık değeri miktarı ise (0,83) 1. günde kontrol örneğinde olduğu belirlenmiştir.

Beyaz peynir örneklerine ait sakızimsılık değerleri Çizelge 10' da verilmiştir. Depolama zamanı süresince kontrol ve UV uygulamasına tabi tutulmuş örneklerde artış göstermesine karşın diğer iki örnekte azalış göstermiştir ( $P<0.05$ ). Ayrıca korelasyon analiz sonuçlarına göre; sakızimsılık değeri üzerinde depolama zamanı etkileşiminin negatif yönlü çok fazla korelatif ( $r:-0.591$ ) etki gösterdiği tespit edilmiştir. Beyaz peynir örneklerinde 14 günlük depolama süresince en düşük sakızimsılık değeri (14,05) 14. günde UV-basınç işlemi uygulanmış örnekte, en yüksek sakızimsılık değeri miktarı ise (268,42) 14. günde kontrol örneğinde olduğu belirlenmiştir. Peynir örneklerinin depolama süresince tespit edilen çıgnenebilirlik değerleri Çizelge 11' de belirtilmiştir. Depolama süresince çıgnenebilirlik değerleri kontrol örneğinde artış göstermesine karşın basınç ve UV-basınç uygulamasına tabi tutulan örneklerde ise azalış olduğu ortaya konulmuştur ( $P<0.05$ ). UV uygulamasına tabi tutulan örneklerde ise azalış olduğu ortaya konulmuştur ( $P<0.05$ ). UV uygulamasına tabi tutulan örnekte ise çıgnenebilirlik değerleri depolamanın ilk yedi günü artış göstermesine karşın daha sonra azalmıştır ( $P<0.05$ ). Ayrıca çıgnenebilirlik değeri üzerinde depolama zamanı negatif yönlü çok fazla korelatif ( $r:-0.664$ ) etki gösterdiği belirlenmiştir. Örnekler arasında en düşük çıgnenebilirlik değeri (1367,00) 14. günde kontrol örnekte, en yüksek çıgnenebilirlik değeri miktarı ise (22,33) 14. günde UV-basınç örneğinde belirlenmiştir. Tüm örneklerin tutunabilirlik değerleri depolama süresince artış göstermiştir ( $P<0.05$ ; Çizelge 12). Ayrıca, aynı depolama zamanı süresince örneklerde tespit edilen tutunabilirlik değerleri istatistiksel olarak anlamlı olduğu ortaya konulmuş ve tutunabilirlik değeri üzerinde depolama zamanı etkileşiminin pozitif yönlü çok fazla ( $r:0.625$ ) korelatif etki gösterdiği belirlenmiştir. Beyaz peynir örneklerinde en düşük tutunabilirlik değeri (0,480) 1. günde kontrol örnekte, en yüksek tutunabilirlik değeri miktarı ise (0,862) 14. günde UV-basınç örneğinde belirlenmiştir. Tekstür analizine ilişkin çalışmada elde edilen değerler Yanmaz (2019) ve Yaşar (2018) tarafından yapılan çalışmalarda elde edilen verilerden farklıdır. Ortaya çıkan bu farklılığın peynir üretiminde uygulanan işlem, üretim koşulları ve yöntemi, depolama koşulları vb. etkenlerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

### 3.5. Mikrobiyolojik Analizler

Beyaz peyniri örneklerine ait TAMB değerleri Çizelge 13' de belirtilmiştir. Tüm örneklerde depolama süresince TAMB sayıları artış göstermiştir ( $P<0.05$ ). Tüm depolama

günleri içerisinde TAMB sayısı en fazla artış gösteren örnekler kontrol grubuna ait örnekler olmuştur ( $P<0.05$ ). TAMB sayısı üzerinde örnek çeşidi ve depolama zamanı etkileşimlerinin çok fazla ( $P<0.0001$ ) olduğu, ayrıca TAMB sayısı üzerinde örnek çeşidi etkileşimi negatif yönlü ( $r:-0.597$ ), depolama zamanı etkileşimi ise pozitif yönlü ( $r:0.522$ ) çok fazla korelatif etki göstermiştir.

Beyaz peynir örneklerinde en düşük TAMB sayısı (2,35 log kob/g) 1. günde UV-basınç işlemi uygulanmış örnekte, en yüksek TAMB sayısı ise (4,21 log kob/g) 14. günde kontrol örneğinde belirlenmiştir. Peynirlerin olgunlaşma dönemlerine ait genel ortalama TAMB sayısı 7,242 log kob/g olarak ifade edilmiştir (Ayar 1996). Şener ve Celasin (2013) tarafından yapılan bir çalışmada ise toplam aerobik mezofilik bakteri sayısı  $5,2 \times 10^4 - 5,68 \times 10^{11}$  arasında tespit edilmiştir. Çalışmamızla olan bu farklılığın, çalışmalarda kullanılan peynirlerdeki su ve tuz miktarlarındaki farklılıklardan ileri gelmekte olduğu düşünülmektedir (Tzanetakis vd. 1992). Depolama süresince kontrol örneklerinin LAB sayılarında artış olmasına karşın UV ve basınç uygulamalarına maruz bırakılan örneklerde ise genel olarak bir azalma olduğu tespit edilmiştir ( $P<0.05$ ; Çizelge 14). Korelasyon analiz sonuçlarına göre örnek çeşidi ve örnek çeşidi x depolama zamanı etkileşimlerinin çok fazla anlamlı ( $P<0.0001$ ) olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, LAB bakteri sayısı üzerinde örnek çeşidi etkileşiminin negatif yönlü çok fazla korelatif etkisinin ( $r: -0.627$ ) olduğu da yapılan korelasyon analizleri ile ortaya konulmuştur. Örnekler arasında en düşük LAB sayısı (2,08 log kob/g) 14. günde UV-basınç işlemi uygulanmış örnekte, en yüksek LAB sayısı ise (3,65 log kob/g) 14. günde kontrol örneğinde olduğu ortaya konulmuştur. Bu çalışmada elde edilen sayılar; Şahingil (2012) çalışmasında elde ettiği sayılardan farklıdır. Farklılığın, uygulanan teknolojik işlemler, üretim yöntemi, depolama zamanı salamurada bekletme süresi ve konsantrasyonu gibi proses aşamalarındaki farklılıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Peynir örneklerinin tamamında depolama süresi boyunca TMK sayılarında artış belirlenmiş ( $P<0.05$ ; Çizelge 15) olup tüm depolama zamanlarında en fazla artışın kontrol örneklerinde olduğu ortaya konulmuştur ( $P<0.05$ ). Ayrıca, TMK sayısı üzerinde örnek çeşidi etkileşiminin çok fazla anlamlı ( $P<0.0001$ ) olduğu ve negatif yönlü ( $r:-0.785$ ) çok fazla korelatif etki gösterdiği de yapılan istatistiksel analizler neticesinde belirlenmiştir.

Tüm peynir örnekleri arasında 14 günlük depolama süresince en düşük TMK sayısı (2,47 log kob/g) 4. günde UV-basınç işlemi uygulanmış örnekte, en yüksek TMK sayısı ise (3,61 log kob/g) 14. günde kontrol örneğinde

olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmadaki beyaz peyniri vd. (2012) ve Aba (2019)' un çalışmalarında elde ettikleri örneklerinde belirlenen TMK sayısı değerleri Kesenkaş sonuçlara paralellik göstermektedir.

**Çizelge 1.** Peynir örneklerinde depolama süresince pH değerindeki değişim

Uygulama	1.Gün	4.Gün	7.Gün	14.Gün
Kontrol	4,14±0.01 <sup>Ab</sup>	4,13±0.01 <sup>ABc</sup>	4,12±0.01 <sup>ABd</sup>	4,09±0.01 <sup>Bc</sup>
Basınc	4,17±0.01 <sup>Ab</sup>	4,21±0.01 <sup>Ab</sup>	4,20±0.01 <sup>Ab</sup>	4,19±0.01 <sup>Ab</sup>
UV	4,28±0.01 <sup>Aa</sup>	4,30±0.02 <sup>Aa</sup>	4,29±0.01 <sup>Aa</sup>	4,28±0.01 <sup>Aa</sup>
UV+Bas	4,14±0.01 <sup>Ab</sup>	4,17±0.02 <sup>Abc</sup>	4,16±0.01 <sup>Ac</sup>	4,14±0.01 <sup>Ac</sup>

a - c (↓): Aynı satırda farklı büyük harflere sahip değerler istatistiksel olarak farklılık gösterir (P<0.05) A - C (→): Aynı sütunda farklı küçük harflere sahip değerler istatistiksel olarak önemli ölçüde farklılık gösterir (P< 0.05).

**Çizelge 2.** Peynir örneklerinde depolama süresince aw değerindeki değişim

Uygulama	1.Gün	4.Gün	7.Gün	14.Gün
Kontrol	0,85±0.01 <sup>Aa</sup>	0,81±0.01 <sup>Ba</sup>	0,77±0.01 <sup>Ca</sup>	0,64±0.01 <sup>Da</sup>
Basınc	0,73±0.01 <sup>Ac</sup>	0,68±0.01 <sup>Bb</sup>	0,66±0.01 <sup>Cbc</sup>	0,51±0.01 <sup>Dc</sup>
UV	0,84±0.01 <sup>Ab</sup>	0,80±0.01 <sup>ABa</sup>	0,73±0.06 <sup>Bab</sup>	0,61±0.01 <sup>Cb</sup>
UV+Bas	0,73±0.01 <sup>Ac</sup>	0,66±0.01 <sup>Bc</sup>	0,64±0.01 <sup>Cc</sup>	0,50±0.01 <sup>Dc</sup>

a - c (↓): Aynı satırda farklı büyük harflere sahip değerler istatistiksel olarak farklılık gösterir (P<0.05) A - C (→): Aynı sütunda farklı küçük harflere sahip değerler istatistiksel olarak önemli ölçüde farklılık gösterir (P< 0.05).

**Çizelge 3.** Peynir örneklerinde depolama süresince L\* değerindeki değişim

Uygulama	1.Gün	4.Gün	7.Gün	14.Gün
Kontrol	98,04±0.44 <sup>Aa</sup>	97,38±0.07 <sup>ABa</sup>	97,01±0.33 <sup>Ba</sup>	96,85±0.33 <sup>Ba</sup>
Basınc	93,77±0.48 <sup>Ab</sup>	89,84±0.99 <sup>Bc</sup>	87,98±0.79 <sup>BCc</sup>	86,55±1.25 <sup>Cc</sup>
UV	94,35±0.30 <sup>Ab</sup>	93,67±0.79 <sup>Ab</sup>	93,09±0.20 <sup>Ab</sup>	92,94±1.16 <sup>Ab</sup>
UV+Bas	91,95±0.27 <sup>Ac</sup>	89,76±0.97 <sup>Ac</sup>	84,94±0.43 <sup>Bd</sup>	81,69±1.91 <sup>Cd</sup>

a - c (↓): Aynı satırda farklı büyük harflere sahip değerler istatistiksel olarak farklılık gösterir (P<0.05) A - C (→): Aynı sütunda farklı küçük harflere sahip değerler istatistiksel olarak önemli ölçüde farklılık gösterir (P< 0.05).

**Çizelge 4.** Peynir örneklerinde depolama süresince a\* değerindeki değişim

Uygulama	1.Gün	4.Gün	7.Gün	14.Gün
Kontrol	2,41±0.04 <sup>Cb</sup>	2,73±0.08 <sup>Ba</sup>	2,86±0.04 <sup>Ba</sup>	3,46±0.16 <sup>Aa</sup>
Basınc	2,17±0.08 <sup>Cc</sup>	2,33±0.05 <sup>BCb</sup>	2,47±0.12 <sup>Bb</sup>	2,97±0.12 <sup>Ab</sup>
UV	2,59±0.06 <sup>Ca</sup>	2,75±0.04 <sup>BCa</sup>	2,95±0.03 <sup>Ba</sup>	3,79±0.16 <sup>Aa</sup>
UV+Bas	2,04±0.03 <sup>Bc</sup>	2,17±0.08 <sup>ABb</sup>	2,32±0.06 <sup>Ab</sup>	2,34±0.05 <sup>Ac</sup>

a - c (↓): Aynı satırda farklı büyük harflere sahip değerler istatistiksel olarak farklılık gösterir (P<0.05) A - C (→): Aynı sütunda farklı küçük harflere sahip değerler istatistiksel olarak önemli ölçüde farklılık gösterir (P< 0.05).

**Çizelge 5.** Peynir örneklerinde depolama süresince b\* değerindeki değişim

Uygulama	1.Gün	4.Gün	7.Gün	14.Gün
Kontrol	4,76±0.11 <sup>Cc</sup>	6,11±0.07 <sup>Bc</sup>	6,31±0.06 <sup>Bb</sup>	6,52±0.05 <sup>Ab</sup>
Basınc	5,41±0.06 <sup>Da</sup>	6,75±0.17 <sup>Cb</sup>	10,74±0.86 <sup>Ba</sup>	18,24±0.10 <sup>Aa</sup>
UV	4,37±0.08 <sup>Cb</sup>	5,69±0.08 <sup>Bd</sup>	6,18±0.13 <sup>Ab</sup>	6,29±0.08 <sup>Ab</sup>
UV+Bas	5,69±0.19 <sup>Ca</sup>	8,61±0.22 <sup>Ca</sup>	11,70±0.50 <sup>Ba</sup>	19,15±0.87 <sup>Aa</sup>

a - c (↓): Aynı satırda farklı büyük harflere sahip değerler istatistiksel olarak farklılık gösterir (P<0.05) A - C (→): Aynı sütunda farklı küçük harflere sahip değerler istatistiksel olarak önemli ölçüde farklılık gösterir (P< 0.05).

**Çizelge 6.** Peynir örneklerinde depolama süresince sertlik değerindeki değişim (N)

Uygulama	1.Gün	4.Gün	7.Gün	14.Gün
Kontrol	136,78±7.73 <sup>Dc</sup>	167,83±4.93 <sup>Cc</sup>	357,82±5.09 <sup>Bb</sup>	427,02±6.92 <sup>Ac</sup>
Basınc	300,51±2.29 <sup>Cb</sup>	310,89±10.99 <sup>Cb</sup>	490,73±11.99 <sup>Ba</sup>	809,83±26.32 <sup>Ab</sup>
UV	127,49±10.03 <sup>Cc</sup>	139,63±2.11 <sup>Cd</sup>	248,48±32.29 <sup>Bc</sup>	382,77±69.10 <sup>Ac</sup>
UV+Bas	336,97±2.17 <sup>Ca</sup>	365,22±4.39 <sup>Ca</sup>	502,36±14.22 <sup>Ba</sup>	1033,74±30.52 <sup>Aa</sup>

a - c (↓): Aynı satırda farklı büyük harflere sahip değerler istatistiksel olarak farklılık gösterir (P<0.05) A - C (→): Aynı sütunda farklı küçük harflere sahip değerler istatistiksel olarak önemli ölçüde farklılık gösterir (P< 0.05).

**Çizelge 7.** Peynir örneklerinde depolama süresince iç yapışkanlık değerindeki değişim (N.s)

Uygulama	1.Gün	4.Gün	7.Gün	14.Gün
Kontrol	-2,40±0.02 <sup>Dd</sup>	-2,12±0.03 <sup>Cd</sup>	-1,87±0.01 <sup>Bc</sup>	-1,68±0.05 <sup>Ac</sup>
Basınc	-0,48±0.07 <sup>Cb</sup>	-0,39±0.02 <sup>Bcb</sup>	-0,30±0.01 <sup>ABa</sup>	-0,23±0.02 <sup>Aa</sup>
UV	-2,06±0.07 <sup>Cc</sup>	-2,00±0.01 <sup>Bcc</sup>	-1,81±0.08 <sup>Bc</sup>	-1,40±0.10 <sup>Ab</sup>
UV+Bas	-0,22±0.02 <sup>Ca</sup>	-0,15±0.02 <sup>Ba</sup>	-0,11±0.01 <sup>ABb</sup>	-0,09±0.01 <sup>Aa</sup>

a - c (↓): Aynı satırda farklı büyük harflere sahip değerler istatistiksel olarak farklılık gösterir (P<0.05) A - C (→): Aynı sütunda farklı küçük harflere sahip değerler istatistiksel olarak önemli ölçüde farklılık gösterir (P< 0.05).

**Çizelge 8.** Peynir örneklerinde depolama süresince gevreklik değerindeki değişim

Uygulama	1.Gün	4.Gün	7.Gün	14.Gün
Kontrol	7,31±0.05 <sup>Aa</sup>	7,00±0.08 <sup>Aa</sup>	6,43±0.29 <sup>Ba</sup>	5,09±0.07 <sup>Ca</sup>
Basınc	4,24±0.11 <sup>Ac</sup>	3,98±0.04 <sup>ABc</sup>	3,69±0.08 <sup>Bc</sup>	1,90±0.16 <sup>Cb</sup>
UV	6,38±0.08 <sup>Ab</sup>	6,19±0.03 <sup>Ab</sup>	5,92±0.05 <sup>Bb</sup>	5,15±0.13 <sup>Ca</sup>
UV+Bas	3,19±0.05 <sup>Ad</sup>	3,12±0.03 <sup>ABd</sup>	2,90±0.03 <sup>Bd</sup>	1,55±0.16 <sup>Cb</sup>

a - c (↓): Aynı satırda farklı büyük harflere sahip değerler istatistiksel olarak farklılık gösterir (P<0.05) A - C (→): Aynı sütunda farklı küçük harflere sahip değerler istatistiksel olarak önemli ölçüde farklılık gösterir (P< 0.05).

**Çizelge 9.** Peynir örneklerinde depolama süresince iç yapışkanlık değerindeki değişim

Uygulama	1.Gün	4.Gün	7.Gün	14.Gün
Kontrol	0,83±0.02 <sup>Aa</sup>	0,78±0.01 <sup>Aa</sup>	0,69±0.01 <sup>Ba</sup>	0,63±0.06 <sup>Ba</sup>
Basınc	0,34±0.06 <sup>Ab</sup>	0,28±0.01 <sup>Ab</sup>	0,12±0.05 <sup>Bc</sup>	0,05±0.02 <sup>Bc</sup>
UV	0,78±0.04 <sup>Aa</sup>	0,73±0.07 <sup>Aa</sup>	0,50±0.11 <sup>Bb</sup>	0,31±0.03 <sup>Bb</sup>
UV+Bas	0,38±0.01 <sup>Ab</sup>	0,16±0.01 <sup>Bc</sup>	0,05±0.01 <sup>Cc</sup>	0,01±0.01 <sup>Dc</sup>

a - c (↓): Aynı satırda farklı büyük harflere sahip değerler istatistiksel olarak farklılık gösterir (P<0.05) A - C (→): Aynı sütunda farklı küçük harflere sahip değerler istatistiksel olarak önemli ölçüde farklılık gösterir (P< 0.05).

**Çizelge 10.** Peynir örneklerinde depolama süresince sakımsızlık değerindeki değişim

Uygulama	1.Gün	4.Gün	7.Gün	14.Gün
Kontrol	113,72±7.90 <sup>Ba</sup>	130,27±5.96 <sup>Ba</sup>	247,40±1.80 <sup>Aa</sup>	268,42±17.38 <sup>Aa</sup>
Basınc	102,56±16.00 <sup>Aa</sup>	86,75±3.94 <sup>ABc</sup>	58,37±14.44 <sup>Bcb</sup>	39,04±13.09 <sup>Cc</sup>
UV	99,90±13.05 <sup>Aa</sup>	102,27±8.13 <sup>Ab</sup>	125,03±30.70 <sup>Ab</sup>	117,97±9.58 <sup>Ab</sup>
UV+Bas	129,07±5.12 <sup>Aa</sup>	58,43±0.19 <sup>Bd</sup>	24,85±0.25 <sup>Cc</sup>	14,05±6.99 <sup>Cc</sup>

a - c (↓): Aynı satırda farklı büyük harflere sahip değerler istatistiksel olarak farklılık gösterir (P<0.05) A - C (→): Aynı sütunda farklı küçük harflere sahip değerler istatistiksel olarak önemli ölçüde farklılık gösterir (P< 0.05).

**Çizelge 11.** Peynir örneklerinde depolama süresince çiğnenebilirlik değerindeki değişim

Uygulama	1.Gün	4.Gün	7.Gün	14.Gün
Kontrol	831,51±62.88 <sup>Ca</sup>	911,58±31.72 <sup>Ca</sup>	1591,37±57.91 <sup>Aa</sup>	1367,00±107.27 <sup>Ba</sup>
Basınc	433,95±56.25 <sup>Ac</sup>	345,36±19.38 <sup>Aa</sup>	214,45±70.74 <sup>Bc</sup>	73,14±18.32 <sup>Cc</sup>
UV	636,77±74.99 <sup>Ab</sup>	633,26±47.57 <sup>Ab</sup>	740,64±263.65 <sup>Ab</sup>	608,00±65.09 <sup>Ab</sup>
UV+Bas	411,43±10.39 <sup>Ac</sup>	182,36±1.07 <sup>Bd</sup>	72,04±1.83 <sup>Cc</sup>	22,33±13.12 <sup>Dc</sup>

a - c (↓): Aynı satırda farklı büyük harflere sahip değerler istatistiksel olarak farklılık gösterir (P<0.05) A - C (→): Aynı sütunda farklı küçük harflere sahip değerler istatistiksel olarak önemli ölçüde farklılık gösterir (P< 0.05).

**Çizelge 12.** Peynir örneklerinde depolama süresince tutunabilirlik değerindeki değişim

Uygulama	1.Gün	4.Gün	7.Gün	14.Gün
Kontrol	0,48±0.01 <sup>Cb</sup>	0,50±0.01 <sup>Cc</sup>	0,55±0.03 <sup>Bc</sup>	0,61±0.01 <sup>Ab</sup>
Basınc	0,55±0.01 <sup>Ca</sup>	0,59±0.01 <sup>Cb</sup>	0,69±0.04 <sup>Bb</sup>	0,82±0.04 <sup>Aa</sup>
UV	0,49±0.02 <sup>Bb</sup>	0,50±0.01 <sup>Bc</sup>	0,53±0.02 <sup>ABc</sup>	0,57±0.03 <sup>Ab</sup>
UV+Bas	0,57±0.01 <sup>Da</sup>	0,66±0.02 <sup>Ca</sup>	0,78±0.02 <sup>Ba</sup>	0,86±0.01 <sup>Aa</sup>

a - c (↓): Aynı satırda farklı büyük harflere sahip değerler istatistiksel olarak farklılık gösterir (P<0.05) A - C (→): Aynı sütunda farklı küçük harflere sahip değerler istatistiksel olarak önemli ölçüde farklılık gösterir (P< 0.05).

**Çizelge 13.** Peynir örneklerinde depolama süresince TAMB değerindeki değişim (log kob/g).

Uygulama	1.Gün	4.Gün	7.Gün	14.Gün
Kontrol	3,32±0.04 <sup>Da</sup>	3,41±0.04 <sup>Ca</sup>	4,01±0.01 <sup>Ba</sup>	4,21±0.06 <sup>Aa</sup>
Basınç	2,92±0.16 <sup>Bab</sup>	2,98±0.04 <sup>Bb</sup>	3,06±0.11 <sup>ABc</sup>	3,16±0.06 <sup>Ac</sup>
UV	3,08±0.02 <sup>Da</sup>	3,17±0.04 <sup>Cab</sup>	3,69±0.03 <sup>Bb</sup>	3,97±0.04 <sup>Ab</sup>
UV+Bas	2,35±0.37 <sup>Bb</sup>	2,44±0.18 <sup>ABc</sup>	2,84±0.06 <sup>ABd</sup>	3,02±0.01 <sup>Ad</sup>

a - c (↓): Aynı satırda farklı büyük harflere sahip değerler istatistiksel olarak farklılık gösterir (P<0.05) A - C (→): Aynı sütunda farklı küçük harflere sahip değerler istatistiksel olarak önemli ölçüde farklılık gösterir (P< 0.05).

**Çizelge 14.** Peynir örneklerinde depolama süresince LAB sayılarındaki değişim (log kob/g).

Uygulama	1.Gün	4.Gün	7.Gün	14.Gün
Kontrol	2,99±0.01 <sup>Ca</sup>	3,01±0.01 <sup>Ca</sup>	3,19±0.06 <sup>Ba</sup>	3,65±0.07 <sup>Aa</sup>
Basınç	2,84±0.07 <sup>Aab</sup>	2,79±0.01 <sup>Ac</sup>	2,76±0.09 <sup>Ab</sup>	2,54±0.21 <sup>Ab</sup>
UV	2,96±0.04 <sup>Aa</sup>	2,93±0.05 <sup>Ab</sup>	2,94±0.10 <sup>bAa</sup>	2,97±0.02 <sup>Aab</sup>
UV+Bas	2,80±0.08 <sup>Ab</sup>	2,78±0.02 <sup>Ac</sup>	2,38±0.25 <sup>Bc</sup>	2,08±0.01 <sup>Bc</sup>

a - c (↓): Aynı satırda farklı büyük harflere sahip değerler istatistiksel olarak farklılık gösterir (P<0.05) A - C (→): Aynı sütunda farklı küçük harflere sahip değerler istatistiksel olarak önemli ölçüde farklılık gösterir (P< 0.05).

**Çizelge 15.** Peynir örneklerinde depolama süresince TMK Sayılarındaki değişim (log kob/g).

Uygulama	1.Gün	4.Gün	7.Gün	14.Gün
Kontrol	2,93±0.02 <sup>Ca</sup>	2,94±0.04 <sup>Ca</sup>	3,25±0.05 <sup>Ba</sup>	3,61±0.12 <sup>Aa</sup>
Basınç	2,82±0.04 <sup>Ba</sup>	2,84±0.02 <sup>Bab</sup>	2,86±0.02 <sup>ABb</sup>	2,93±0.01 <sup>Aab</sup>
UV	2,81±0.09 <sup>Aa</sup>	2,77±0.06 <sup>Aab</sup>	2,82±0.04 <sup>Ab</sup>	2,86±0.03 <sup>Aab</sup>
UV+Bas	2,54±0.16 <sup>Ab</sup>	2,47±0.35 <sup>Ab</sup>	2,58±0.04 <sup>Ac</sup>	2,63±0.09 <sup>Ab</sup>

a - c (↓): Aynı satırda farklı büyük harflere sahip değerler istatistiksel olarak farklılık gösterir (P<0.05) A - C (→): Aynı sütunda farklı küçük harflere sahip değerler istatistiksel olarak önemli ölçüde farklılık gösterir (P< 0.05).

#### 4. Sonuç

Bu araştırmada, UV, vakum ve kombinasyonu uygulamaları altında depolanan beyaz peynirlerin, fizikokimyasal, tekstürel ve mikrobiyolojik özelliklerinde depolama süresince meydana gelebilecek değişimler ile özellikle üründe oluşabilecek küflenme probleminin giderilmesi ve ürünün raf ömrünün uzatılması hedeflenmiştir

Depolama süresi boyunca örneklerin aw, pH, L\* değeri, gevreklik ve iç yapışkanlık değerlerinde azalma, buna karşın a\* ve b\* değerleri, sertlik, dış yapışkanlık ve tutunabilirlik değerlerinde ise artış tespit edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda kontrol örneğinde meydana gelen değişimler ile UV ve vakum uygulamasına tabi tutulan örneklerde meydana gelen değişimler arasında önemli farklılıklar olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bu farklılıkların istatistiksel olarak da anlamlı olduğu ortaya konulmuştur.

Fizikokimyasal kalite açısından peynir örneklerine uygulanan işlemler arasında UV uygulamasının diğer metodlara kıyasla tekstürel değerleri daha az olumsuz yönde etkilediği, bu işlemi UV + Basınç uygulamasının izlediği ortaya konulmuştur. Örnekler mikrobiyolojik kalite açısından değerlendirildiğinde 14 günlük depolama

sonucunda UV – Basınç Uygulamasına tutulan peynir örneklerinin diğer örneklere kıyasla daha düşük MO sayısına sahip olduğu tespit edilmiştir. Gerek fizikokimyasal ve gerekse mikrobiyolojik kalite kriterleri açısından herhangi bir işleme tabi tutulmayan kontrol örneğinin en düşük kalite değerlerine sahip olduğu ortaya konulmuştur.

Sonuç olarak, üretici raf ömrü uzun, kaliteli, güvenilir, az maliyetli, kolay taşınabilir bir gıda üretme eğilimindeyken; tüketici ise güvenli, doğal, minimal işlem görmüş, duyu özelliklerini koruyan bir ürün talep etmektedir.

Günümüzde bu talepleri karşılayabilecek özelliğe sahip yeni minimal işlem teknolojileri gıda endüstrisinin çeşitli aşamalarında kullanılmasına başlanılmıştır. Vakum ve UV ışın mikrobiyolojik açıdan daha güvenilir ürünlerin tüketicilerinin taleplerinin karşılanmasında başarılı bir şekilde gıda muhafaza metodu olarak geliştirilen bir yöntemdir. Bu yöntem üzerine yeni çalışmaların yapılması gerekmektedir. Özetle kullanılan bu teknolojilerle ilgili elde edilen bu sonuçlarda beyaz peynirin raf ömrünü uzatmada mikrobiyal güvenilirlik açısından kullanılabilirliği tespit edilirken, daha detaylı

ve farklı oranlarda, yapısal ve duyuşal özelliklerinde olduğu daha detaylı çalışmaların yapılmasının gerektiği düşünölmektedir.

### Teşekkür

Bu araştırma, Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (20.Tematik.02) tarafından desteklenmiştir.

### Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uydıklarını beyan ederler.

### Yazarlık Katkı Beyanı

- Yazar 1: Kaynaklar, Fikir/Kavram, Proje Yöneticisi, Yazma-orijinal taslak  
Yazar 2: Kaynaklar, Araştırma, Tasarım ve Dizayn, Deneyleme, Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak,  
Yazar 3: Araştırma, Tasarım ve Dizayn, Deneyleme, Görselleştirme  
Yazar 4: Eleştirel inceleme, Analiz ve Yorum  
Yazar 5: Veri Toplama, Literatür Taraması, Yazma  
Yazar 6: Veri Toplama, Literatür Taraması, Yazma  
Yazar 7: Denetleme/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

- Aba, S. 2019. Farklı yağ oranlarına sahip manda sütünden köy tipi beyaz peynir üretimi üzerine bir çalışma. Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, 112.
- Akın, N., Aydemir, S., Koçak, C. And Yıldız, M.A. 2003. Changes of free fatty acid contents and sensory properties of white pickled cheese during ripening. *Food Chemistry*, **80(1)**, 77-83.
- Anonymous, 1979. "DIN", 6174, Farbmtrische Bestimmung van Farbab Standen bei Körperfarben nach der. CIELAB Formol. Beuth Vertrieb GmbH., Berlin 30, Köln 1, 1.
- AOAC., 1990. "Official Method 979.23", Saccharides (major) in corn syrup.
- AOAC., 2016. Official Methods of Analysis. Association of Analytical Chemists, 20th ed. Washington, DC, USA.
- Ayar, A. 1996. Çeşitli aroma maddelerinin beyaz peynirin duyuşal, mikrobiyolojik ve kimyasal özelliklerine etkileri üzerinde bir araştırma. Doktora Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Van, 170.

- Çelik, Ş. ve Uysal, Ş., 2009. Beyaz peynirin bileşim, kalite, mikroflora ve olgunlaşması. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 40(1), 141-151.
- Dokuzlu, C. 2004. Gıda Analizleri. Marmara Kitapevi Yayınları. Bursa.
- Erol, F. 2018. Beyaz Peynirlerin Bazı Fizikokimyasal Özelliklerinde Depolama Sırasında Meydana Gelen Bazı Değişimler Üzerine Süte Yüksek Hidrostatik Basınç, Orta Isı ve Ultrasound Uygulamasının Kombine Etkisinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 66 s.
- Everard, C.D., O'Donnell, C.P., O'Callaghan, D.J., Sheehan, E.M., Delahunty, C.M., O'Kennedy, B.T. and Howard, V., 2007. Prediction of sensory textural properties from rheological analysis for process cheeses varying in emulsifying salt, protein and moisture contents. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **87(4)**, 641-650.
- Güneş, Ç.N. ve Ekren, O., 2017. Vakum soğutma tekniğinin fesleğen için incelenmesi, Teskon 2017 / Soğutma Teknolojileri Sempozyumu, 1749-1758.
- Halkman, K., 2005. Gıda Mikrobiyolojisi Uygulamaları. Başak Matbaacılık ve Tanıtım Hizmetleri Ltd. Şti. Ankara.
- Hardy, J., 1984, L'activitè de l'eau et le salage des fromages. In A. Eck (Ed.), Le Fromage (pp. 37-61). Paris, France: Technique et Documentation Lavoisier.
- Kesenkaş, H., Dinkçi, N. ve Kınık, Ö., 2012. Farklı işletmelerde üretilen köy peynirlerinin özellikleri. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, **49(2)**, 167-173.
- Koca N., Saatli, T.E., ve Urgan M., 2018. Gıda sanayisinde ultraviyole ışığın yüzey uygulamaları. *Akademik Gıda*, **16(1)**, 88-100.
- Koutchma, T., 2009. Advances in ultraviolet light technology for non-thermal processing of liquid foods. *Food and Bioprocess Technology*, **2**, 138-155.
- McDonald, K. And Sun, D.W., 2000. Vacuum cooling technology for the food processing industry: a review. *Journal of Food Engineering*, **45(2)**, 55-65.
- Marchesini, G., Balzan, S., Segato, S., Novelli, E. and Andrighetto, I., 2009. Colour traits in the evaluation of the ripening period of asiago cheese. *Italian Journal of Animal Science*, **2**, 412-413.
- Nagarajarao, R.C., 2016. Recent advances in processing and packaging of fishery products: A review. *Aquatic procedia*, **7**, 201-213.
- Omrak, H., 2022. Son 10 yılda peynir üretimi yüzde 33 arttı. Tarım ve Orman Dergisi. Erişim: 14 Mart 2022.
- Ozturk, H.M. and Ozturk, H K., 2009. Effect of pressure on the vacuum cooling of ice berg lettuce. international journal of refrigeration, *International Journal of Refrigeration*, **32(3)**, 402-410.
- Özdemir, K.T., 2016. Besinsel lif ilavesinin beyaz peynirin özellikleri üzerine etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 102.



- Öztürk M, H., Öztürk, H.K, ve Yapar, A., 2004 “Gıda Sanayisinde Vakum Soğutma Sistemi: Bölüm 1”.DTK, **8(92)**, 50-56.
- Pajonk, A., Saurel, R., Andrieu, J., Laurent, P. and Blanc, D., 2003. Heat transfer study and modeling during emmental ripening, *Journal of Food Engineering*, **57**, 249-255.
- Ruegg, M., 1985. Water in dairy products related to quality, with special reference to cheese. In D. Simatos, & J. L. Multon (Eds.), *Properties of water in foods* (pp. 603-625). Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers.
- Suslow, T. 2000. *Postharvest Handling For Organic Crops* Division of Agriculture and Natural Resources, Publication: 7254, University of California.
- Şahingil, D., 2012. Beyaz peynir üretiminde kullanılan bazı laktik asit bakterilerinin proteoliz, ace-inhibisyon aktivitesi ve aroma oluşumuna etkilerinin belirlenmesi. Doktora Tezi Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, , Tekirdağ, 177.
- Şener A. and Celasin N., 2013. Bacterial contamination in fresh white cheeses sold in bazaars. Çanakkale, Turkey. *International Food Research Journal*, **20**, 1469-1472.
- Topçu, A. and Saldamli, I., 2006. Proteolytical, chemical, textural and sensorial changes during the ripening of Turkish white cheese made of pasteurized cows' milk. *International Journal of Food Properties*, **9(4)**, 665-678.
- Tzanetakis, N. and Litopoulou-Tzanetaki, E., 1992. Changes in numbers and kinds of lactic acid bacteria in Feta and Teleme, two Greek cheeses from ewes' milk. *Journal of Dairy Science*, **75(6)**, 1389-1393.
- Wang, L. and Sun, D.W., 2002. Modelling vacuum cooling process of cooked meat—part 1: analysis of vacuum cooling system. *International Journal of Refrigeration*, **25(7)**, 854-861.
- Yanmaz, B., 2019. Tuz konsantrasyonu ve salamurada bekleme süresinin beyaz peynirin bazı kalite kriterleri üzerine etkileri. Yüksek Lisans Tezi Çanakkale On Sekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çanakkale, 102.
- Yaşar, M., 2018. Termosonikasyon uygulanmış süttten üretilen beyaz peynirlerin yağ asidi, uçucu aroma bileşenleri ve tekstürel özelliklerinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 61.



## Mersin'in Farklı Kuraklık İndeksleri Aracılığıyla Kuraklık Tehdidinin Araştırılması

\*Makale Bilgisi / Article Info

Geliş/Received: 23.07.2023

Kabul/Accepted: 03.01.2024

Yayınlanma/Published: 27.02.2024

### Investigation of Mersin's Drought-Threat through Different Drought Indexes

Mehmet Özgür ÇELİK<sup>\*</sup>, Murat YAKAR

Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Mersin, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

Dünya genelinde küresel iklim değişikliğinin etkileri giderek artmaktadır. Akdeniz havzasında bulunan yerler için küresel iklim değişikliğinin temel olumsuz etkileri arasında kuraklık gelmektedir. Çalışma alanı Türkiye'nin güneyinde Akdeniz havzasında yer alan Mersin'dir ve kuraklık tehdidi altındadır. Bu yüzden, çalışma alanının kuraklık analizi farklı kuraklık indeksleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunun için iklimsel verileri kullanan Palmer Drought Severity Index (PDSI), Palmer Hydrological Drought Index (PHDI), Standardized Precipitation Index (SPI) ve Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) standart kuraklık indeksleri tercih edilmiştir. Bu indeksler kuraklık analizinde standart kabul edilmektedir. Söz konusu indeksler hesaplanmış ve grafikler oluşturulmuştur. Buna göre, Mersin'in kuraklık analizi gerçekleştirilmiş ve kuraklık riski altında olduğu saptanmıştır. Ayrıca, gelecek yıllardaki olası durumu tahmin edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kuraklık, PDSI, PHDI, SPI, SPEI, Akdeniz havzası, Mersin

#### 1. Giriş

Dünya genelinde küresel iklim değişikliğinin olumsuz etkileri giderek artmakta ve doğrudan canlıların yaşamını tehdit etmektedir. Hâlihazırda, dünya 1.1° ısınmıştır ve iklim sınırı 1.5° olarak kabul edilmektedir (Öztürk ve Gürsoy 2022). Artış trendinin devam etmesi küresel ısınmanın atmasına, dolayısıyla iklim değişikliğinin dünya üzerindeki negatif etkilerinin giderek yükselmesine yol açacağı aşikârdır. Sel, taşkın, yangın ve kuraklık gibi doğal afetler daha da sık görülmeye başlayacaktır. Bu noktada, farklı iklim ve coğrafi özelliklere sahip bölgeler bu afetlerden farklı derecede etkilenecektir. Akdeniz havzasında yer alan bölgelerde kuraklık, iklim değişikliğinin en önemli etkileri arasında yer alacaktır (Hadri et al. 2021). Mevcut durumda bu havzada kuraklaşan yerler bulunmaktadır (İban 2022). Kuraklık, uzun zaman dilimi içerisinde olumsuz etkisi giderek artan

#### Abstract

Global climate change is having a growing impact all around the world. Drought is one of the most destructive effects of global climate change in the Mediterranean basin. The study area is Mersin, which is located in southern Türkiye and is threatened by drought. Therefore, a drought analysis of the research area was conducted. Palmer Drought Severity Index (PDSI), Palmer Hydrological Drought Index (PHDI), Standardized Precipitation Index (SPI), and Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) were chosen as drought indices that employ climatic data. The indices are considered standard indices in drought analysis. The indices were calculated, and graphs were created. As a result, it was concluded that Mersin is at risk of drought. The prospective condition in the future was also forecasted

**Keywords** Drought; PDSI; PHDI; SPI; SPEI; Mediterranean basin; Mersin

ve geniş kapsamlı sonuçları doğuran bir doğal afettir. Kuraklık meteorolojik, tarımsal ve hidrolojik olmak üzere üçe ayrılmaktadır (Hobbins et al. 2008). Meteorolojik kuraklık, normalin altında yağışların olması sonucunda aylar ile yıllar süren kuraklık olarak ifade edilmektedir (Palmer 1965). Tarımsal kuraklık, ortalamanın altında yağış, yoğun ancak seyrek yağış veya normalin üzerinde buharlaşma olan dönemler olarak tanımlanmaktadır (Liu et al. 2016). Hidrolojik kuraklık ise, akarsu akışı ve su depolamanın uzun vadeli ortalama seviyenin altına düştüğü dönemler olarak ifade etmek mümkündür (Van Loon 2015). Kuraklığın meydana getirdiği olumsuz etkilerin belirlenmesi, ortadan kaldırılması ya da en aza indirilmesi için analiz edilmesi gerekmektedir (Yılmaz vd. 2023, Alahacoon and Edirisinghe 2022, Sawadogo et al. 2020, Ateşoğlu vd. 2017, Mishra and Singh 2011). Kuraklığın analiz edilmesi ve mekânsal ölçekte kuraklığın

tanımlanabilmesi için Palmer Kuraklık Şiddeti İndeksi (Palmer Drought Severity Index - PDSI) (Palmer 1965), Palmer Hidrolojik Kuraklık İndeksi (Palmer Hydrological Drought Index - PHDI) (Palmer, 1968), Standartlaştırılmış Yağış İndeksi (Standardized Precipitation Index - SPI) (Pande et al. 2023) Standartlaştırılmış Yağış-Buharlaştırma İndeksi (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index - SPEI) (Beguería et al. 2014) Ürün Nem İndeksi (Crop Moisture Index - CMI), Soil Moisture Drought Index (SMDI) (Afshar et al. 2022), Vegetation Condition Index (VCI) (Zhang et al. 2022), Keşif Kuraklık İndeksi (Reconnaissance Drought Index – RDI) ve Akış Kuraklık İndeksi (Streamflow Drought Index - SDI) gibi indeksler kullanılmaktadır. Bununla birlikte, PDSI, PHDI, SPI ve SPEI kuraklığın tanımlanmasında ve analiz edilmesinde standart indeksler olarak kabul görmektedir (İnt. Kyn. 1, Peña-Gallardo et al. 2018). Literatürde yer alan bazı

**Çizelge 1.** KAK / AÖ ile ilgili literatürde yer alan bazı çalışmalarda kullanılan yöntem ve veriler

Referans	İndeksler								
	PDSI	PHDI	SPI	SPEI	CMI	SMDI	VCI	SDI	RDI
Shoumik et al. (2023)	●		●	●					
Kheyri et al. (2023)	●								
Katipoğlu (2023)								●	
Vicente-Serrano (2006)			●						
Varol et al. (2023)				●				●	
Nie et al. (2018)	●	●	●						
Sohrabi et al. (2015)	●		●	●		●			
Zambrano et al. (2016)							●		
Tigkas et al. (2017)									●
Karadirek (2022)	●		●		●				
Zhang et al. (2023)		●	●	●					

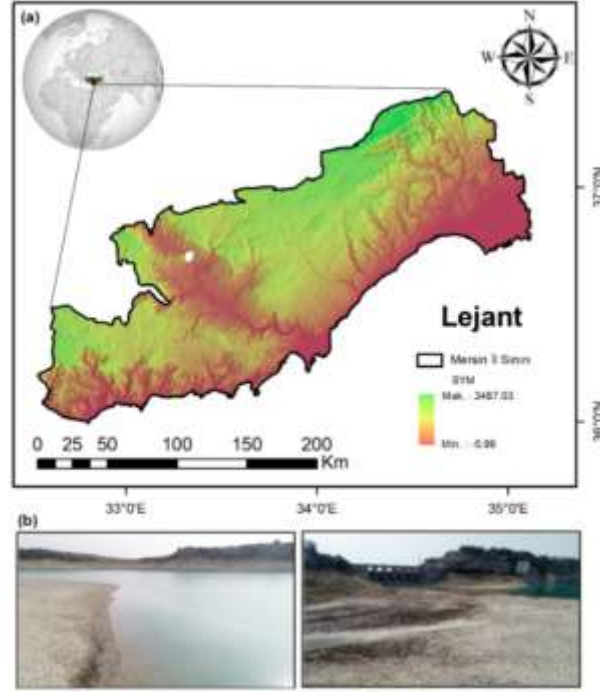
Çalışma bölgesi olan Mersin Akdeniz havzasında yer alması nedeniyle kuraklaşma tehditi altında bulunmaktadır. Ayrıca, arazi kullanımındaki tercihler ve sürdürülebilir olmayan arazi yönetimi anlayışı (Çoruhlu and Çelik 2022, Yıldız et al. 2018, Sertel vd. 2017) da kuraklığı tetiklemektedir. Bu yüzden kuraklık analizinin yapılması son derece önemlidir. Bu çalışmada, iklimsel verileri (sıcaklık ve yağış) kullanan PDSI, PHDI, SPI ve SPEI indeksleri aracılığıyla Mersin'in kuraklık analizi gerçekleştirilmiş ve gelecekteki kuraklığı tahmin edilmiştir. Mersin gibi il ölçeğinde geniş çaplı ve detaylı kuraklık analizinin yapılmamış olması çalışmanın gerçekleştirilmesinde önemli etken olmuştur.

## 2. Çalışma Alanı

Çalışma alanı, Türkiye'nin güneyinde 36-37° Kuzey enlemleri ile 33-35° Doğu boylamları arasında bulunan Mersin ilidir (Şekil 1). Nüfusu 1,916,432 ve yüzölçümü 15,853  $km^2$ 'dir (İnt. Kyn. 2). Mersin il merkezinde ve sahil ilçelerinde rakım 0-10 m arasında değişirken,

çalışmalarda kullanılan indeksler Çizelge 1'de sunulmuştur. Tigkas et al. (2015) tarafından yapılan çalışmada RDI, SDI ve SPI indekslerini kullanılarak Yunanistan'ın Nakşa adasının kuraklık analizi gerçekleştirilmiştir. Dubrovsky et al. (2009)'un yapmış olduğu çalışmada SPI ve PDSI kullanılarak Çekya'nın kuraklığı analiz edilmiştir. Kim et al. (2002) tarafından yapılan çalışmada Meksika'daki Conchos Nehri Havzasında kuraklık şiddetinin tespit edilebilmesi amacıyla PDSI kullanılmıştır. Mishra and Desai (2005) ve Mishra and Singh (2009), tarafından yapılan çalışmalarda Hindistan'ın Kansabati Havzasında farklı zaman konfigürasyonları kullanılarak SPI ile kuraklığın şiddeti, alanı ve sıklığı arasındaki nicel ilişki analiz edilmiştir. Tam et al. (2023)'ün gerçekleştirmiş olduğu çalışmada ise SPEI kullanılarak Kanada'nın kuraklık analizi yapılmış ve gelecek yıllardaki olası kuraklık tahmin edilmiştir.

Mersin'in tepe noktası olan Toros Dağları'nda rakım 3500 m'ye ulaşmaktadır. Nüfus ekseriyetle il merkezinde ve sahil kısmında yer almaktadır. 2022 yılı sonu itibarıyla kent merkezde yaşayan nüfus oranı %86.34'tür (İnt. Kyn. 2). Rakımın yüksek olduğu alanlarda ise nüfus seyrek olup, ormanlık alan fazlalık göstermektedir. Bununla birlikte, bu alanlarda en önemli geçim kaynağı hayvancılıktır (Bekçi, 2022). Rakımın düşük olduğu az eğimli alanlarda ve ovalarda (3,315.27  $km^2$ ) ise tarımsal faaliyetler aktif şekilde yapılmaktadır (İnt. Kyn. 3). Akdeniz havzasında yer alan ve Akdeniz iklimi görülen bölgede kuraklık tehdit oluşturmaktadır. Özellikle, yaygın şekilde tarım yapılan alanlar için kuraklık ciddi şekilde risk oluşturmaktadır. Türkiye'nin tarımsal ürünlerinin birçoğunun üretildiği, iç-dış piyasaya gönderildiği ve tarımsal üretim değerinin yaklaşık 17 milyar ₺ olan Mersin'de (İnt. Kyn. 4) gıda güvenliğinin sağlanması için kuraklığın analiz edilmesi son derece önem arz etmektedir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün (MGM) verilerine göre, yıllık ortalama sıcaklık yaz döneminde



Şekil 1. (a) Çalışma alanı, (b) Mersin'de meydana gelen kuraklık örneği (İnt. Kyn. 7)

27.1°C, kış döneminde 11.1°C; yıllık ortalama yağış miktarı ise yazın 28.8 mm, kışın 344.3 mm'dir (İnt. Kyn. 5). Dünya yağış ortalamasının 900 mm olduğu dikkate alındığında, Mersin'in kuraklık tehdidi altında söylemek mümkündür. İfade edilen problem durumunu MGM desteklemekte ve Mersin'de son yıllarda şiddetli kuraklık görüldüğü belirtilmektedir (İnt. Kyn. 6). Etkisi giderek artan kuraklaşmanın incelemesi için Mersin çalışma alanı olarak seçilmiştir.

### 3. Materyal ve Metot

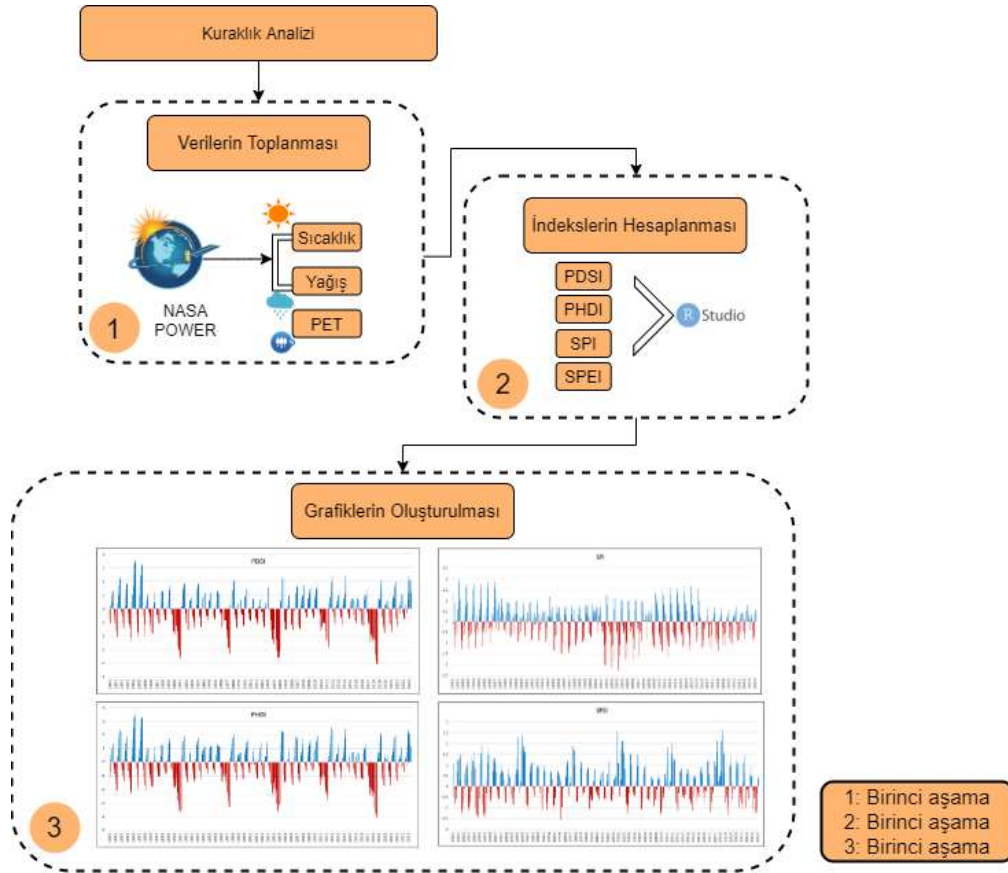
Kuraklık analizinin gerçekleştirilebilmesi için PDSI, PHDI, SPI ve SPEI indeksleri hesaplanmıştır. Bunun için üç aşamalı bir metot uygulanmıştır (Şekil 2). İlk olarak, temel iklimsel veriler olan maksimum ile minimum sıcaklık ve yağış NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER) sitesinden temin edilmiştir (İnt. Kyn. 8). Kuraklık indekslerinin hesaplanması ve analizlerin gerçekleştirilebilmesi için Dünya Meteoroloji Örgütü (World Meteorological Organization - WMO) en az 30 yıllık verilerin olması gerektiğini ifade etmektedir (İnt. Kyn. 9). Daha uzun zaman dilimine sahip veriler ile çalışmak doğruluğu artırmaktadır. Bu doğrultuda, çalışma alanının 1981-2023 zaman dilimine ait 42 yıllık veri hesaplar için kullanılmıştır. İkinci olarak, veriler düzenlendikten sonra sırasıyla PDSI, PHDI, SPI ve SPEI indeksleri R Studio programında hesaplanmıştır. Bu program istatistiksel hesaplamalar ve grafiklerin oluşturulmasına imkân tanıyan, bir programlama dili olan

R için geliştirilmiş ortam olma özelliği taşımaktadır. Son olarak, hesaplanan indeksler için grafikler oluşturulmuştur.

#### 3.1. PDSI Hesabı

PDSI, 1965 yılında Wayne Palmer tarafından geliştirilen bir meteorolojik kuraklık indeksidir (Palmer 1965). Bir bölgedeki kuraklık olaylarını izlemek, kuraklık olaylarının alansal boyutunu ve şiddetini incelemek için kullanılan yaygın bir indekstir (Hobbins et al. 2008, Jacobi et al. 2013). Toprak neminin ve buharlaşma, su kaybı gibi neme bağlı etkilerin belirlenmesinde etkili olan bir indekstir (Palmer 1965, Karl 1986). PDSI ABD'nin bölgesel iklim verileri (Kansas ve Central Iowa merkezlerinden elde edilen ampirik sabitler) kullanılarak test edilmiş ve kuraklık indeksi olarak literatüre eklenmiştir. Ancak, dünyanın her yerinde aynı sabitleri kullanmak kuraklık analizinin doğruluğunu olumsuz etkilemektedir. Çünkü iklimsel özellikler her yerde aynı değildir. Mevcut sorunu çözmek adına, Wells et al. (2004) çalışma alanına bağlı olarak farklı iklim verilerinin kullanılarak PDSI'nin düzenlenmesi gerektiğini ifade etmiştir. Bunun sonucunda, PDSI'nin kümülatif toplamı alınarak ampirik sabitlerin bölgeye göre değiştiği ve otomatik olarak kalibre edildiği scPDSI geliştirilmiştir.

Böylece, bölgesel iklim koşullarına uygun daha doğru PDSI değerleri elde edilebilmektedir. Bu çalışmada da Mersin'nin 42 yıllık iklim verilerine göre scPDSI hesaplanmış, kolaylık için PDSI olarak ifade edilmiştir.



PDSI sıcaklık ve yağış verileri kullanarak hesaplanmaktadır (Jacobi et al. 2013, Ramirez 2023). Bunlara ek olarak, potansiyel buharlaşma (potential evapotranspiration - PET) parametresi de kullanılarak kuraklık analizi yapılmaktadır. Hesaplanan PDSI değerleri standartlaştırılmış sınıflara ayrılmaktadır. Buna göre değerler -10 (kuru) ile +10 (ıslak) arasında değişmekte, -4 ve altındaki değerler aşırı kuraklığı, +4 ve üzerindeki değerler ise aşırı ıslaklığı temsil etmektedir. Çalışmada Mersin iline ait sıcaklık, yağış ve maksimum ile minimum sıcaklık farkına göre hesaplanan PET verileri kullanarak PDSI hesaplanmış ve grafiği oluşturulmuştur. Bunun için öncelikle PET verisi hesaplanmıştır. Thornthwaite, Penman-Monteith ve Hargreaves yöntemleri PET hesabında kullanılan başlıca yöntemlerdir. Thornthwaite yöntemi ile sınırlı sayıda girdi parametreleri kullanılarak PET kolaylıkla hesaplanabilmektedir (Wells et al. 2004). Penman-Monteith yönteminde meteorolojik istasyonlardaki hava durumu verileri sayesinde hesap gerçekleştirilmektedir. Bununla birlikte, bu istasyonların büyük bölümünde aynı tipte veri bulunmamakta ya da doğruluğu düşük ölçümler sonucunda veriler elde edilmektedir. Bundan dolayı, Penman-Monteith yöntemi kullanılarak oluşturulan PET verisinin doğruluğu her bölgede aynı seviyede olmamaktadır. Ancak, Birleşmiş

Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO) bu yöntemi PET hesabı için standart yöntem kabul etmektedir (Allen et al. 1998). Bu yüzden, yöntemin dezavantajını elimine etmek için Hargreaves yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem ile ortalama, minimum ve maksimum sıcaklık değerleri kullanılarak hesap yapılmaktadır (Hargreaves and Samani 1985). İfade edilen diğer iki yöntemle göre daha hassas olması, bu çalışmada PET hesabı için tercih edilme sebebidir (Eşitlik 1-3).

```
> install.packages("SPEI") (1)
```

```
> library(SPEI)
```

```
> library(readxl) (2)
```

```
>
```

```
PET_data <-  
-read_excel("G:/kuraklik_uygulamaları/  
PET_data")
```

```
> view(PET_data)
```

```
> PET_data <- hargreaves(Tmin =  
PET_data$Tmin, Tmax = PET_data$Tmax, lat =  
36.25 (3)
```

```
> PET_data$PET
```

İkinci olarak, sıcaklık, yağış ve PET verileri ile R Studio programında PDSI hesaplanmıştır. Hesap için düzenlenmiş yağış verisi programa aktarılmış (Eşitlik 4),

PDSI hesaplanmış (Eşitlik 5) ve grafiği üretilmiştir (Eşitlik 6).

```
> install.packages(scPDSI) (4)
```

```
> library(readxl)
```

```
> PDSI <- read_excel("G:/kuraklik_uygulamaları/PDSI")
```

```
> view(PDSI)
```

```
> scpdsi <- pdsi(PDSI$Precipitation, PDSI$PET, start = 1981, sc = FALSE) (5)
```

```
> plot(scpdsi) (6)
```

### 3.2 PHDI Hesabı

PHDI uzun süreli hidrolojik kuraklığı ve yağış koşullarını tanımlamak için kullanılan PDSI'dan geliştirilmiş bir kuraklık indeksidir (Alley, 1984). Yeraltı suyunun seviyesi hakkında güvenilir bilgilerin elde edilmesini sağladığı için dikkat çekmektedir. PHDI hidrolojik kuraklığın izlenmesinde kullanıldığından dolayı daha kısa süreli kuraklıkların tanımlanmasında PDSI kadar başarılı değildir (Nie et al. 2018). PDSI'dan türetilmiş ve ekseriyetle su depolama, akarsu akışı ve de hidrolojik kuraklığı analiz etmek için geliştirilen PHDI hesabında sıcaklık ve yağış verileri kullanılmaktadır. Kullanılan veriler ve hesaplanması yönüyle PDSI ile benzer özellik göstermektedir. Bu yüzden, eşitlikler tekrardan kaçınmak adına sunulmamıştır.

### 3.3. SPI Hesabı

SPI belirli zaman konfigürasyonunda (1, 3, 6, 9, 12, 36 ve 48 ay) bir bölgedeki meteorolojik kuraklığın tanımlanmasında kullanılan standart kuraklık indeksidir (İnt. Kyn. 1). 1-6 aylık gibi kısa süreli zamanlarda toprak neminin belirlenmesinde başarılı sonuçlar veren SPI, 6-48 ay gibi daha uzun sürelerde yeraltı suyu ve depolanan su hakkında güvenilir bilgilerin toplanmasında aktif rol oynamaktadır (İnt. Kyn. 9). Sadece yağış verisi kullanılarak hesaplanan SPI'da farklı zaman konfigürasyonlarında analiz yapılabildiği için PDSI'ya kıyasla daha detaylı bilgiler elde edilebilmektedir. Ancak, kuraklığın sadece yağışa değil, sıcaklığa da bağlı olması ve PDSI'nın her iki veriyi de kullanarak kuraklığı analiz etmesi SPI'nın önüne geçmesini sağlamaktadır (Mishra and Singh 2011). Bu bakımdan, PDSI ile SPI'nın birlikte kullanılması bir bölgedeki kuraklık analizinin daha sağlıklı yapılmasına katkı sunmaktadır.

İklimsel özellikleri farklı olan bölgelerde yağış verileri aracılığıyla standartlaştırılmış yağış anomalisi belirlenir ve

SPI indeksi hesaplanır (Eşitlik 7). Hesaplanan SPI değerleri standart sınıflara ayrılır. (-2 ve altı) aşırı kuraklığı, (+2 ve üzeri) ise aşırı ıslaklığı temsil etmektedir.

$$SPI = PP^* / \sigma_p \quad (7)$$

Burada yağış  $P$ , ortalama yağış  $P^*$  ve standart sapma  $\sigma_p$  ile gösterilmektedir. Eşitlik 8 ile SPI R Studio programında hesaplanmıştır. Düzenlenmiş yağış verisi programa aktarılmış ve çalışma alanına ait 12 aylık periyotta SPI hesaplanmış ve grafiği oluşturulmuştur (Eşitlik 8-11). Çalışmada uzun süreli kuraklık analizi yapılması nedeniyle 12 ay zaman konfigürasyonu tercih edilmiştir.

```
> install.packages("SPEI") (8)
```

```
> library(SPEI)
```

```
> library(readxl)
```

```
> SPI_data <- read_excel("G:/kuraklik_uygulamaları/SPI_data") (9)
```

```
> view(SPI_data)
```

```
> spi <- pdsi(SPI_data$Precipitation, 12) (10)
```

```
> plot(spi) (11)
```

### 3.4. SPEI Hesabı

SPEI, yağış ve PET (maksimum ve minimum sıcaklık ile belirlenen) bir kuraklık indeksidir (Vicente-Serrano et al. 2010). Bu yönüyle, SPI'nın üst versiyonu olarak nitelendirilmektedir (İnt. Kyn. 10). Sıcaklığa bağlı olarak buharlaşmanın meydana gelmesi, kuraklığı tetiklemektedir. SPEI da ağırlık olarak buharlaşma ve mevcut su kapasitesinin karşılaştırılmasında tercih edilen bir indekstir. Bu yüzden, SPEI hesabında yağış ve PET verileri kullanılmaktadır. SPEI, kuraklık türlerinin ayırt edilmesinde ve hidrolojik kuraklığın tanımlanmasında diğer kuraklık indekslerine göre daha başarılıdır (Tigkas et al. 2015).

SPEI, sıcaklık verisini kullanmasından dolayı SPI'dan farklılaşır ve sıcaklık değişimine bağlı olarak meydana gelen etkilerin analiz edilmesini sağlamaktadır. Ancak, doğrudan küresel ısınma ve kuraklık üzerindeki sıcaklığın ne derecede rolü olduğunu bulmada kullanılamaz. Bunun yerine, herhangi bir yerdeki kuraklığın belirlenmesi ve analiz edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, SPEI hesabında PET verisi kullanılmasından dolayı PET hesabında tercih edilen yöntemle bağlı olarak SPEI'nin doğruluğu farklılık göstermektedir. SPEI hesabı için ilk olarak düzenlenmiş

yağış ve PET verisi programa aktarılmış (Eşitlik 12), ikinci olarak çalışma alanına ait SPEI, SPI'da olduğu gibi 12 aylık zaman konfigürasyonu seçilerek hesaplanmıştır (Eşitlik 13) ve son olarak da grafik oluşturulmuştur (Eşitlik 14).

```
> install.packages("SPEI") (12)
```

```
> library(SPEI)
```

```
> library(readxl)
```

```
>
```

```
SPEI_data <-  
read_excel("G:/kuraklik_uygulamaları/  
SPEI_data")
```

```
> view(SPEI_data)
```

```
> wBal <- SPEI_data$Precipitation -  
SPEI_data$PET
```

```
> wBal (13)
```

```
> spei <- spei(wBal, 12)
```

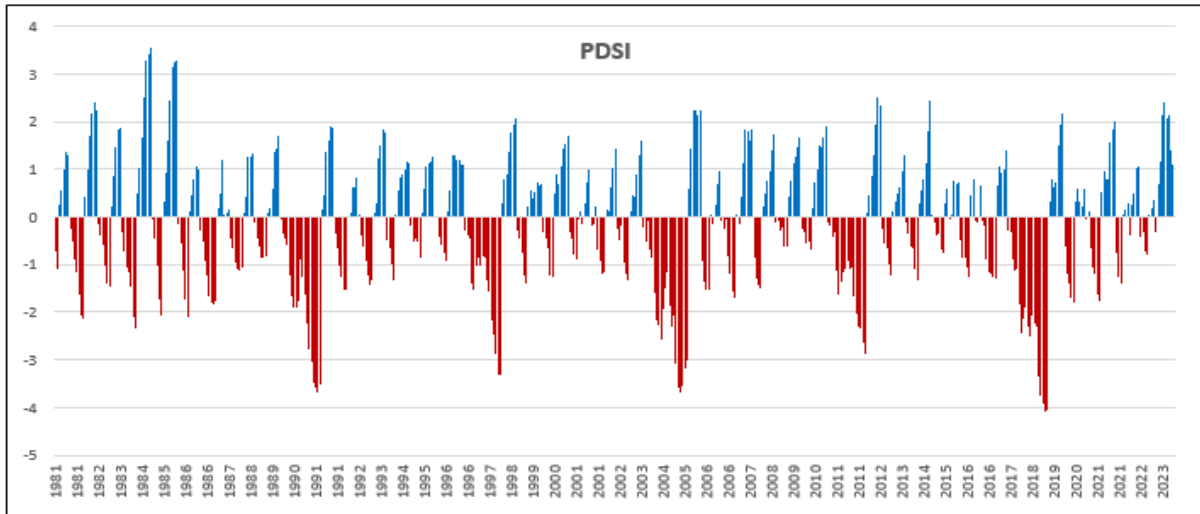
```
> plot.spei(spei12) (14)
```

#### 4. Bulgular

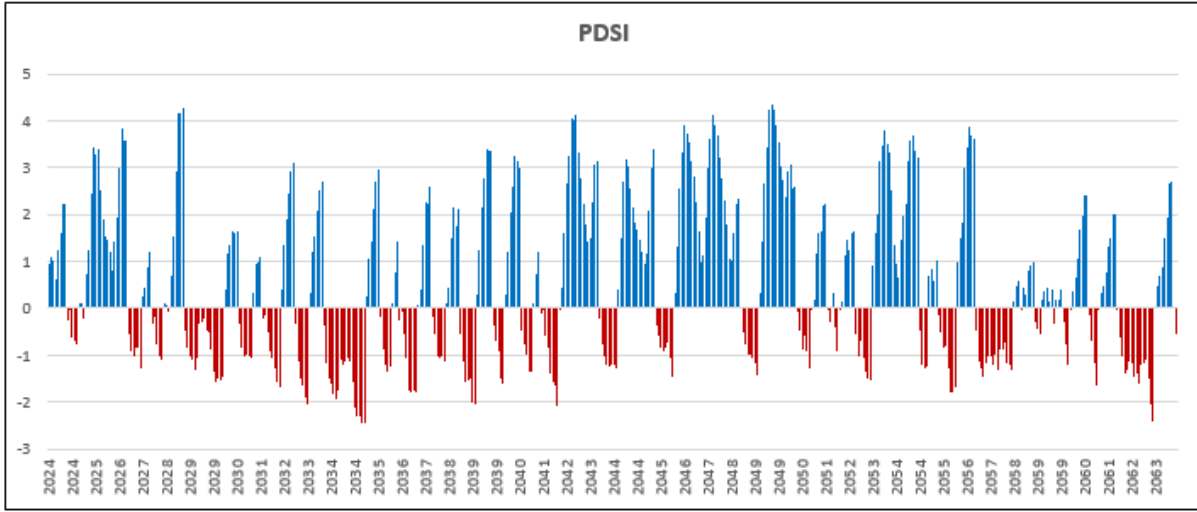
(1981-2023)<sub>1</sub> ve (2024-2063)<sub>2</sub> yıllarına ait kuraklık indeksleri hesaplanmış ve grafikler oluşturulmuştur.

(1981-2023)<sub>1</sub> yıllarına ait grafikler geçmiş ve hâlihazırdaki durumu ifade ederken, (2024-2063)<sub>2</sub> yıllarına ait grafikler ise gelecekteki olası kuraklık durumunu tahmin etmektedir.

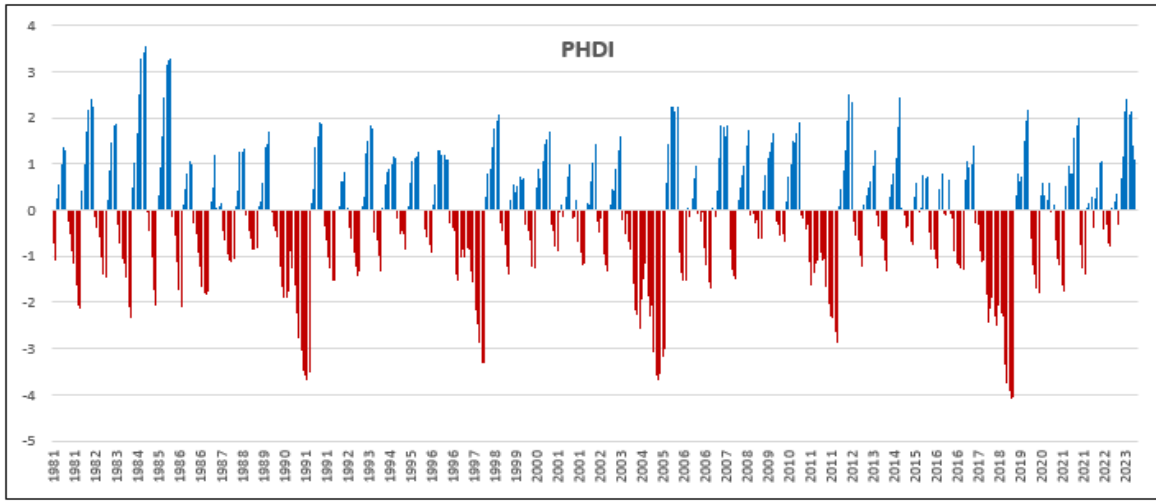
PDSI<sub>1</sub> grafiği incelendiğinde, özellikle son yıllarda (2018, 2019 ve 2020) kuraklığın arttığı gözlenmektedir (Şekil 3). Ayrıca, 42 yıllık süre içerisinde PDSI değerlerine bakıldığında, maksimum değerlerin aşırı ıslaklık değerine (+4 ve üzeri) ulaşmadığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, (1989-1991), (1996-1998), (2003-2006) ve (2018-2020) olmak üzere 5 farklı zaman diliminde aşırı kuraklık değerine (-4 ve altı) yaklaşıldığı belirlenmiştir. Çıkan bu sonuçların, bölgenin bulunduğu coğrafi konum ve iklimsel verilerle örtüşünü söylemek mümkündür. PDSI<sub>2</sub> grafiğinde ise önümüzdeki 40 yıl boyunca kuraklığın bazı dönemlerde (2027-2030), (2033-2035), (2056-2058) ve (2061-2062) artacağı ancak kuraklık şiddetinin (-2 ile -3 arası) nispeten daha az olacağı tahmin edilmektedir (Şekil 4). Bazı dönemlerde ise (2024-2026), (2042-2043), (20244-2045), (2046-2048) ve (2053-2054) azalma trendine girebileceğini söylemek mümkündür.



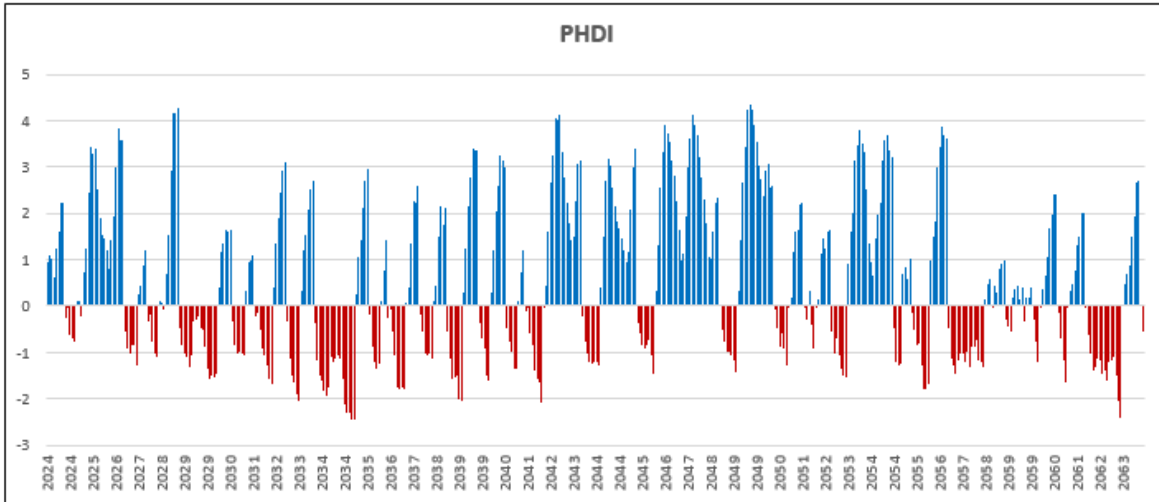
Şekil 3. PDSI<sub>1</sub>



Şekil 4. PDSI<sub>2</sub>



Şekil 5. PHDI<sub>1</sub>



Şekil 6. PHDI<sub>2</sub>

PHDI, PDSI'dan geliştirilmiş olmasından dolayı grafikteki değerler benzer sonuçlar göstermiştir (Şekil 5). Bununla birlikte, PHDI çalışma alanının hidrolojik kuraklığı hakkında güvenilir bilgiler sunmaktadır. PHDI<sub>1</sub> grafiği analiz edildiğinde, son yıllarda (2018-2023) kuraklık artış

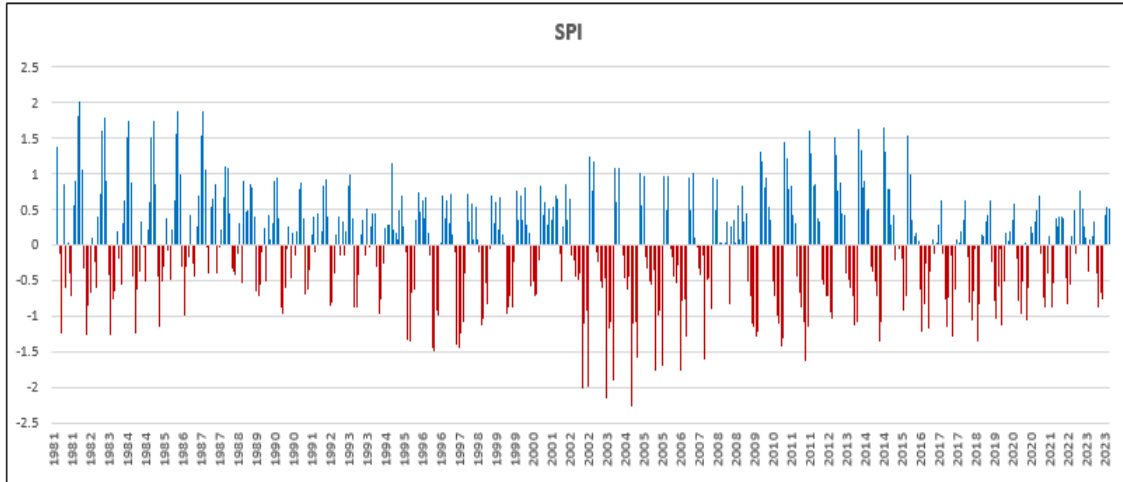
eğilimindedir. Gerçekten de aynı zaman dilimi içerisinde doğal ve yapay su kaynaklarının seviyesi azalış göstermiştir. PHDI<sub>2</sub> ise PDSI<sub>2</sub>'de olduğu gibi kuraklığın şiddetinde azalma olabileceğini tahmin etmektedir (Şekil 6). SPI<sub>1</sub> grafiğinde 42 yıllık zaman dilimi içerisinde SPI



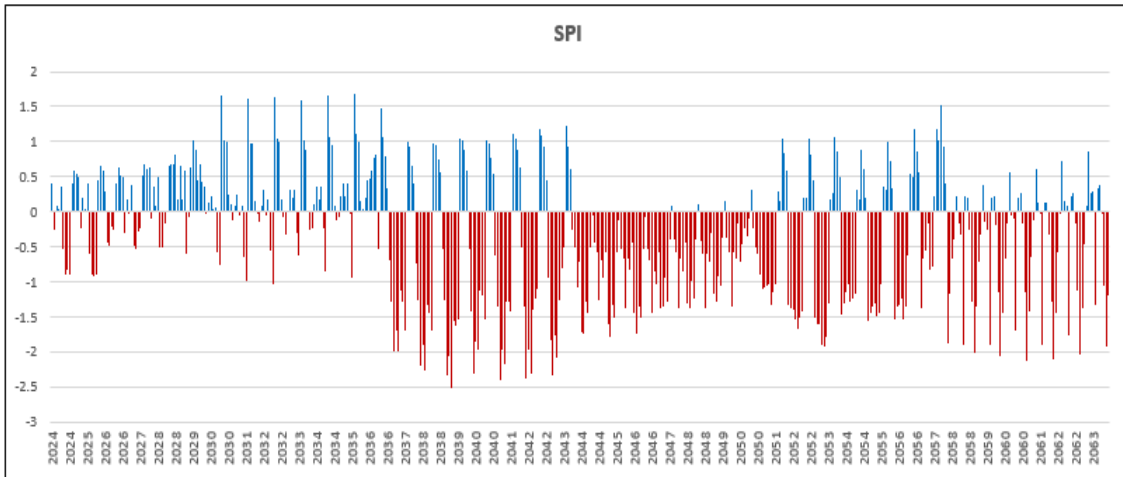
değerlerinde dalgalanmalar görülmektedir (Şekil 7). PDSI'ya benzer olarak maksimum değerler aşırı ıslaklık değerine (+2 ve üzeri) ulaşmazken, minimum değerler aşırı kuraklık değerine (-2 ve altı) ulaşmıştır. Özellikle 2001 yılında sonra (2001-2002), (2003-2004) ve (2005-2006) kuraklık şiddetinde artış olduğu gözlenmektedir. SPI<sub>2</sub> grafiği incelendiğinde, gelecek 40 yılda ıslaklık şiddetinin azalacağı ve kuraklık şiddetinin artacağı öngörülmektedir (Şekil 8). 2036 yılından itibaren kuraklığın daha uzun süreler süreceği, yağışın azalacağı ve kuraklığın olağan bir durum haline geleceği tahmin edilmektedir. (2043-2051) yıllarında uzun süreli bir kuraklığın olma ihtimalinin bulunduğu ve (2057-2063) döneminde ise kuraklık şiddetinin yine artış trendine girebileceği öngörülmektedir.

SPEI yağış ve PET verisini kullanan, SPI'nın gelişmiş versiyonu olan bir indeks olmasından dolayı SPEI

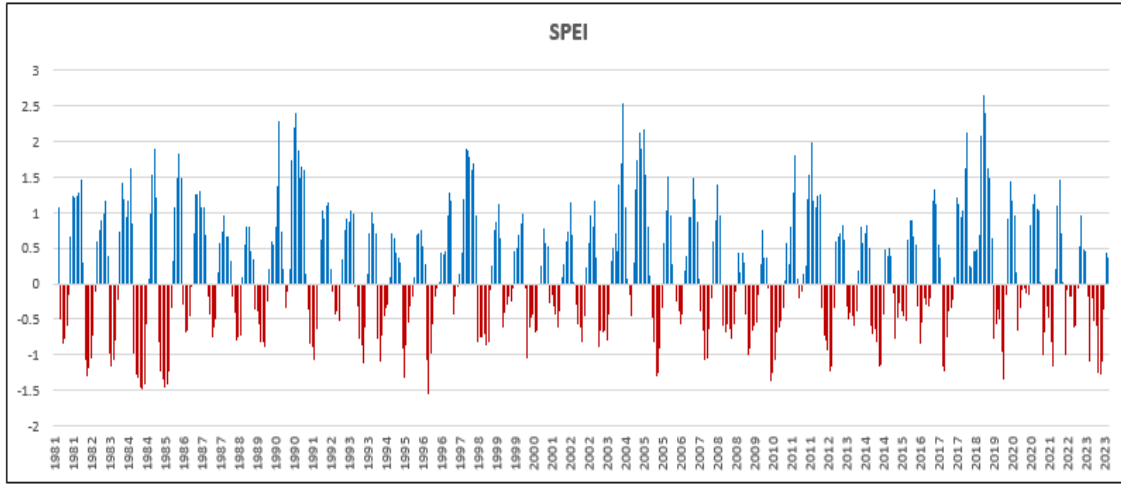
değerlerine bakılarak daha detaylı analizler yapılabilmektedir. SPEI<sub>1</sub> grafiğine göre son iki yılda (2021, 2022) ve günümüzde (2023) küresel ısınmanın da etkisiyle Akdeniz havzasında yer alan çalışma alanında kuraklığı arttığı gözlenmektedir (Şekil 9). Kuraklığın tahmini için oluşturulan SPEI<sub>2</sub> grafiğine bakıldığında, SPI<sub>2</sub>'de olduğu gibi burada da kuraklığın şiddetinin artış gösterebileceği öngörülmektedir (Şekil 10). 2028, 2051 ve 2052 yıllarında kuraklık şiddetinin aşırı kuraklık değerinde (-2 ve altı) olacağı tahmin edilmektedir. Ayrıca, sadece 2036 yılında (Ekim ayı, değer: 2.04) aşırı ıslaklık değerine (+2 ve üzeri) ulaşabileceği öngörülmektedir. Bunun dışında, genel olarak ıslak değerinin ve şiddetinin azalma eğiliminde olabileceğini ifade etmek mümkündür.



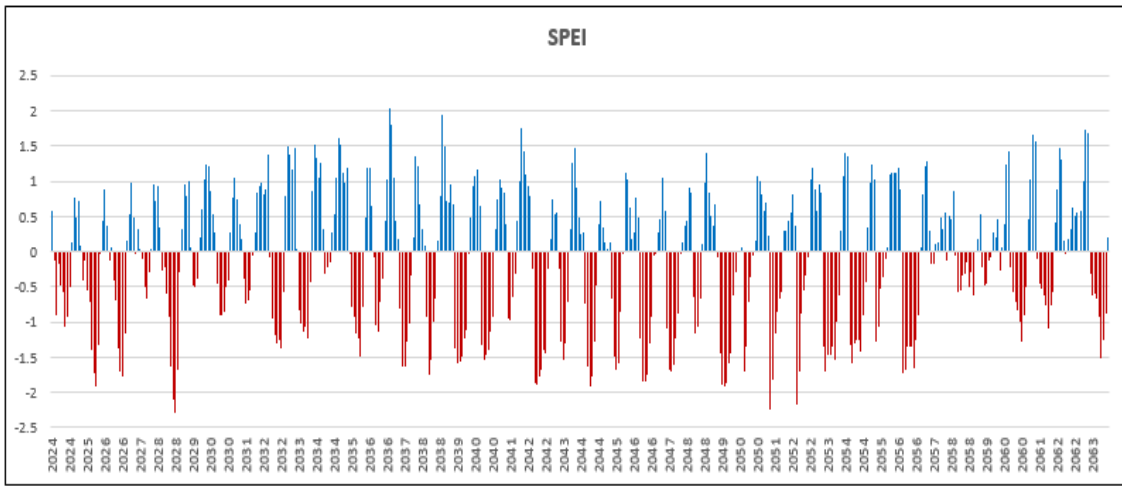
Şekil 7. SPI<sub>1</sub>



Şekil 8. SPI<sub>2</sub>



Şekil 9. SPEI<sub>1</sub>



Şekil 10. SPEI<sub>2</sub>

## 5. Tartışma

Farklı indeksler (PDSI, PHDI, SPI ve SPEI) kullanılarak gerçekleştirilen kuraklık analizinden elde edilen sonuçlara bakıldığında, çalışma alanının ciddi şekilde kuraklık tehdidi altında olduğu ve gelecek yıllarda kuraklığın artış gösterebileceği saptanmıştır. MGM'den elde edilen mevcut iklimsel veriler (yağış, sıcaklık) de analiz sonuçları desteklemektedir.

Çalışmada dört farklı kuraklık indeksi tercih edilmiş ve analizler gerçekleştirilmiştir. Bu yönüyle literatürdeki pek çok çalışmadan ayrılmaktadır. Mishra and Desai (2005) ve Mishra and Singh (2009), çalışmalarında sadece SPI kullanarak kuraklığı analiz etmiştir. Tam et al. (2023) tarafından gerçekleştirilmiş çalışmada, yine tek bir indeks (SPEI) tercih edilmiş ve kuraklık analizi yapılmıştır. Dubrovsky et al. (2009) tarafından yapılan çalışmada da SPI ve PDSI olmak üzere iki indeks kullanılmıştır. Shoumik et al. (2023) ise çalışmasında üç indeks (SPI, SPEI ve PDSI) ile analiz yapmıştır. Bu çalışmada ise kuraklık analizi için standart kabul edilen dört indeks de kullanılmış ve gerekli analiz yapılmıştır. Bu kapsamda, ifade edilen

çalışmalara göre daha detaylı analiz yapıldığını söylemek mümkündür.

Akdeniz havzasında yer alan ve yarı kurak iklim kuşağı altında olan Mersin için kuraklık en temel sorunların başında gelmektedir (İnt. Kyn. 11). Bu sorun, %20.91'inde tarım yapılan ve tarımsal üretim hacminin 17 milyar ₺ olan çalışma alanında tarım alanlarının azalmasına yol açacağı ve de tarımın sürdürülebilirliğini olumsuz etkileyeceği aşikârdır. Seyam et al. (2023) tarafından yapılan çalışmada ifade edildiği üzere tarım alanlarının azalması sürdürülebilir gıda güvenliğini olumsuz etkilemektedir. Çelik ve Yakar (2023)'ün de çalışmasında ifade ettiği üzere Mersin'in 2000-2022 yılları arasında tarım alanı azalmıştır. Buna göre, hâlihazırda azalma trendine giren tarım alanlarının kuraklık sonucunda olumsuz etkileneceği ve azalacağı tahmin edilmektedir. Kuraklığın etkisinin giderek artması, Mishra and Singh (2011)'in de ifade ettiği üzere kuraklığın bilimsel normlar eşliğinde ve uzun vadede bir kuraklık yönetiminin benimsenmesini zorunlu kılmaktadır. Bunun için kuraklığın tespit edilmesi, analiz edilmesi ve buna göre bir yönetim modelinin hazırlanması gerekmektedir.

Bayissa (2018) ve Dikici & Aksel (2021)'nin çalışmalarında vurguladığı üzere kuraklığın tespiti için de standart kabul edilen indekslerin sadece biri değil, mümkünse hepsinin kullanılarak yapılması ve analiz edilmesi son derece önem arz etmektedir. Bu çalışmada da standart kabul edilen PDSI PHDI, SPI ve SPEI indeksleri kullanılmış, analizler yapılmış ve kuraklık yönetimi için ilk şart olan kuraklığın belirlenmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Ancak, bu çalışmada Savari vd. (2022), Drisya & Sathish Kumar (2023) ve Kikon and Deka (2022) çalışmalarında vurguladığı gibi detaylı bir kuraklık yönetimi yapılmamıştır.

## 6. Sonuçlar

Çalışma alanı olan Mersin bulunduğu Akdeniz havzası nedeniyle küresel ısınmanın olumsuz etkilerine maruz kalmaktadır. Bu etkilerin başında da kuraklık gelmektedir. Ayrıca, yanlış arazi kullanımı ve sürdürülebilir olmayan arazi yönetimi anlayışı kuraklığı artırıcı etki oluşturmaktadır. Tüm bunlar, çalışmanın yapılmasına ilham kaynağı olmuştur. Kuraklığın incelenmesi için 4 farklı indeks hesaplanmış ve grafikler oluşturulmuştur. Elde edilen değerler yorumlanmış ve kuraklık analizi gerçekleştirilmiştir. Buna göre, yarı kurak iklim kuşağı bölgesinde yer alan Mersin için kuraklığın hâlihazırda problem teşkil etmeye başladığı saptanmıştır. Dört (PDSI, PHDI, SPI ve SPEI) kuraklık indeksiyle analizler yapılmış ve 42 yıllık zaman dilimi içerisinde (1981-2023) kuraklığın özellikle son yıllarda artış trendine girdiği dört indekste de görülmüştür. İlerleyen periyotta (2024-2063) ise kuraklığın başlıca problem durumu haline geleceği tahmin edilmiştir.

Yapılan uygulama neticesinde, sürdürülebilir arazi yönetimi ve kullanımı için çıkan değerlerin karar vericilere katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

Yapılan çalışma sürecinde literatür araştırması, gerçekleştirilen uygulama ve makalenin yazım sırasında elde edilen bilgiler ışığında kuraklık konusunda çalışan araştırmacıların bazı noktalara dikkat edilmesi tavsiye edilmektedir.

(1) Kuraklık çok değişkenli bir olay olmasından dolayı farklı iklimsel veriler kullanılarak analizler gerçekleştirilmelidir. Sadece yağış veya sadece sıcaklık ile yapılan kuraklık analizleri özellikle uzun süreli hidrolojik kuraklığın belirlenmesinde başarılı sonuçların elde edilmesini olumsuz etkilemektedir.

(2) Farklı indekslerin entegre edildiği bir yaklaşımla kuraklığın analiz edilmesi son derece önemlidir. Bununla birlikte, kuraklık tek çeşit olmayıp üç farklı (meteorolojik, tarımsal ve hidrolojik) kuraklık tipi bulunmaktadır. Bu yüzden, farklı indeksler kullanılarak kuraklık detaylı şekilde analiz edilmelidir.

(3) Kuraklık analizinde kullanılacak verilerin çalışma alanına ait ve doğru olması gerekmektedir. Ölçüm istasyonları arasındaki mesafenin fazla olması, bazı ölçüm istasyonlarında eksik ve hatalı ölçümler yapılması analizi doğrudan etkilemektedir. Böyle bir durumda uzaktan algılama (UA) verileri kullanılarak problemler aşılabilir.

(4) UA verilerinin kullanılması alternatif bir çözüm sunarken, bu verilerin farklı çözünürlükte olması uzun vadeli kuraklık analizini ve tahminini olumsuz etkilemektedir. Bundan dolayı, UA ve iklimsel verilerin entegrasyonu çalışmanın güvenilirliği için önemlidir.

Çalışmanın güçlü yanlarının bulunduğu kadar sınırlı olduğu noktalar da mevcuttur. Bu çalışmada detaylı şekilde ve uzun süreli (42 yıllık) iklim verileri kullanılarak mevcut kuraklık analizi yapılmış ve önümüzdeki 40 yılın tahmini gerçekleştirilmiştir. Bu yönüyle avantajlı konumda olduğunu ifade etmek yanlış olmayacaktır. Ancak, kuraklığın neden olduğu sorunlar ve çözüm önerileri detaylı şekilde çalışmaya konu olmamıştır. Her ne kadar bu konu üzerinde durulmamış olsa da tarım alanların korunması ve gıda üretiminin güvenilir şekilde devam etmesi için kuraklığın tespit edilmesi, analizlerin yapılması ve çözüm önerileri geliştirilmesi gerekmektedir. Böylece, karar vericilere ve bu konuda politika üreticilere destek sağlanmış olacaktır. Ayrıca, kuraklık yönetimi konusunda da bu çalışmada ayrıntılı bir araştırma yapılmamıştır. Bu çalışmada temel olarak kuraklığın standart kuraklık indeksleriyle doğru ve hassas tespit edilmesi ve de analizlerin yapılması konu olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda, çalışma tasarlanmış ve uygulama gerçekleştirilmiştir. Gelecek çalışmalarda, bu çalışmanın üzerinde çok fazla durmadığı konular da ele alınarak daha kapsamlı bir araştırma yapılması planlanmaktadır.

### Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

### Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Araştırma, Metodoloji, Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak  
Yazar 2: Biçimsel analiz, İnceleme

### 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.

## 7. Kaynaklar

Afshar, M.H., Bulut, B., Duzenli, E., Amjad, M. and Yilmaz, M.T., 2022. Global spatiotemporal consistency between meteorological and soil moisture drought

- indices. *Agricultural and Forest Meteorology*, **316**, 108848.  
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.108848>.
- Alahacoon, N. and Edirisinghe, M., 2022. A comprehensive assessment of remote sensing and traditional based drought monitoring indices at global and regional scale. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, **13**, 762-799.  
<https://doi.org/10.1080/19475705.2022.2044394>.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome, 300(9), D05109.
- Alley, W.M., 1984. The Palmer drought severity index: limitations and assumptions. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **23**, 1100-1109.  
[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)023<1100:TPDSIL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023<1100:TPDSIL>2.0.CO;2).
- Ateşoğlu, A., Arslan, M., Yılmaz, M., Arıkan, T.B. ve Yıldız, S., 2017. Collect Earth Programı kullanılarak Türkiye kurak alanlarının izleme ve değerlendirilmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **17**, 252-261.
- Bayissa, Y., 2018. Developing an impact-based combined drought index for monitoring crop yield anomalies in the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. CRC Press.  
<https://doi.org/10.1201/9780429399510>.
- Beguiría, S., Vicente-Serrano, S.M., Reig, F and Latorre, B., 2014. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International journal of climatology*, **34**, 3001-3023.  
<https://doi.org/10.1002/joc.3887>.
- Bekçi, R.N., 2022. Güneş Potansiyeli Analizi Ve İnternet Tabanlı CBS Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin, 112.
- Çelik, M.Ö. and Yakar, M., 2023. Arazi kullanımı ve Arazi Örtüsü Değişikliklerinin Uzaktan Algılama ve CBS Yöntemi ile İzlenmesi: Mersin, Türkiye Örneği. *Türkiye Coğrafi Bilgi Sistemleri Dergisi*, **5**, 43-51.  
<https://doi.org/10.56130/tucbis.1300704>.
- Çoruhlu, Y.E. and Çelik, M.Ö., 2022. Protected area geographical management model from design to implementation for specially protected environment area. *Land Use Policy*, **122**, 106357.  
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106357>.
- Dikici, M. and Aksel, M., 2021. Comparison of drought indices in the case of the Ceyhan Basin. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, **8**, 113-125.  
<https://doi.org/10.30897/ijgeo.792379>.
- Drısyay, J. And Sathish Kumar, D., 2023. Evaluation of the drought management measures in a semi-arid agricultural watershed. *Environment, Development and Sustainability*, **25**, 811-833.  
<https://doi.org/10.1007/s10668-021-02079-4>.
- Dubrovsky, M., Svoboda, M.D., Trnka, M., Hayes, M.J., Wilhite, D.A., Zalud, Z. and Hlavinka, P., 2009. Application of relative drought indices in assessing climate-change impacts on drought conditions in Czechia. *Theoretical and Applied Climatology*, **96**, 155-171.  
<https://doi.org/10.1007/s00704-008-0020-x>.
- Hadri, A., Saidi, M.E.M. and Boudhar, A., 2021. Multiscale drought monitoring and comparison using remote sensing in a Mediterranean arid region: a case study from west-central Morocco. *Arabian Journal of Geosciences*, **14**, 1-18.  
<https://doi.org/10.1007/s12517-021-06493-w>.
- Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied engineering in agriculture*, **1**, 96-99.  
<https://doi.org/10.13031/2013.26773>.
- Hobbins, M.T., Dai, A., Roderick, M.L. and Farquhar, G. D., 2008. Revisiting the parameterization of potential evaporation as a driver of long-term water balance trends. *Geophysical Research Letters*, **35**. L12403  
<https://doi.org/10.1029/2008GL033840>.
- İban, M.C., 2022. MODIS Verileri ve VHI İndeksi ile Adana ve Mersin'de Kuraklık Şiddetinin İzlenmesi. 11. Türkiye Ulusal Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Birliği (TUFUAB) Teknik Sempozyumu, 12-14 Mayıs 2022, Mersin, Türkiye, 16-19.
- Jacobi, J., Perrone, D., Duncan, L.L. and Hornberger, G. (2013). A tool for calculating the Palmer drought indices. *Water Resources Research*, **49**, 6086-6089.  
<https://doi.org/10.1002/wrcr.20342>.
- Karadirek, I. E., 2022. Drought Management. In *Water and Wastewater Management: Global Problems and Measures Cham*. Springer International Publishing, 27-34.
- Karl, T.R., 1986. The sensitivity of the Palmer Drought Severity Index and Palmer's Z-index to their calibration coefficients including potential

- evapotranspiration. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 77-86.
- Katipoğlu, O.M. (2023). Prediction of streamflow drought index for short-term hydrological drought in the semi-arid Yesilirmak Basin using Wavelet transform and artificial intelligence techniques. *Sustainability*, **15**, 1109. <https://doi.org/10.3390/su15021109>.
- Kheyruri, Y., Sharafati, A. and Shahid, S., 2023. Evaluation of the impact of large-scale atmospheric indicators and meteorological variables on drought in different regions of Iran. *Environmental Earth Sciences*, **82**, 317. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11015-w>.
- Kikon, A. and Deka, P.C., 2022. Artificial intelligence application in drought assessment, monitoring and forecasting: a review. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, **36**, 1197-1214. <https://doi.org/10.1007/s00477-021-02129-3>.
- Kim, T.W., Valdés, J. B. and Aparicio, J., 2002. Frequency and spatial characteristics of droughts in the Conchos River Basin, Mexico. *Water International*, **27**, 420-430. <https://doi.org/10.1080/02508060208687021>.
- Liu, X., Zhu, X., Pan, Y., Li, S., Liu, Y. and Ma, Y., 2016. Agricultural drought monitoring: Progress, challenges, and prospects. *Journal of Geographical Sciences*, **26**, 750-767. <https://doi.org/10.1007/s11442-016-1297-9>.
- Mishra, A.K. and Desai, V.R., 2005. Spatial and temporal drought analysis in the Kansabati river basin, India. *International Journal of River Basin Management*, **3**, 31-41. <https://doi.org/10.1080/15715124.2005.9635243>.
- Mishra, A.K. and Singh V.P., 2011. Drought modeling—A review. *Journal of Hydrology*, **403**, 157-175. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.049>.
- Mishra, A.K. and Singh, V.P., 2011. Drought modeling—A review. *Journal of Hydrology*, 403(1-2), 157-175. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.049>.
- Mishra, A.K., and Singh V.P., 2009. Analysis of drought severity-area-frequency curves using a general circulation model and scenario uncertainty. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **114**. <https://doi.org/10.1029/2008JD010986>.
- Nie, N., Zhang, W., Chen, H. and Guo, H., 2018. A global hydrological drought index dataset based on gravity recovery and climate experiment (GRACE) data. *Water Resources Management*, 32, 1275-1290. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1869-1>.
- Öztürk, T. ve Gürsoy, F., 2022. Küresel iklim değişikliğinin Arktik Okyanusu'na Jeopolitik Etkisi. *Akdeniz Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, **22**, 117–31. <https://doi.org/10.25294/auibfd.1053878>.
- Palmer W.C., 1968. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: the new crop moisture index. *Weatherwise*, **21**, 156.161. <https://doi.org/10.1080/00431672.1968.9932814>.
- Pande, C.B., Costache, R., Sammen, S.S., Noor, R. and Elbeltagi, A., 2023. Combination of data-driven models and best subset regression for predicting the standardized precipitation index (SPI) at the Upper Godavari Basin in India. *Theoretical and Applied Climatology*, **152**, 535-558. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04426-z>.
- Peña-Gallardo, M., Vicente-Serrano, S.M., Camarero, J. J., Gazol, A., Sánchez-Salguero, R., Domínguez-Castro, F. and Galván, J.D., 2018. Drought sensitiveness on forest growth in peninsular Spain and the Balearic Islands. *Forests*, **9**, 524. <https://doi.org/10.3390/f9090524>.
- Ramirez, S.G., 2023. Applied Machine Learning in Development of Geospatial Information Tools for Sustainable Groundwater Management PhD thesis, Brigham Young University, Department of Civil and Construction Engineering, Brigham, 93.
- Savari, M., Damaneh, H.E. and Damaneh, H.E., 2022. Drought vulnerability assessment: Solution for risk alleviation and drought management among Iranian farmers. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, **67**, 102654. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102654>.
- Sawadogo, A., Tim, H., Gündoğdu, K.S., Demir, A.O., Ünlü, M. and Zwart, S.J., 2020. Comparative analysis of the pysebal model and lysimeter for estimating actual evapotranspiration of soybean crop in Adana, Turkey. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 5(2), 60-65. <https://doi.org/10.26833/ijeg.573503>.
- Sertel, E., Algan, I. Y., Alp, G., Musaoğlu, N. and Kaya, Ş., 2017. Yüksek çözünürlüklü uydu verileri kullanılarak 1: 25000 ölçekli ulusal arazi örtüsü/kullanımı sınıflandırma sisteminin geliştirilmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **17**, 232-241.

- Seyam, M.M.H., Haque, M.R. and Rahman, M.M., 2023. Identifying the land use land cover (LULC) changes using remote sensing and GIS approach: A case study at Bhaluka in Mymensingh, Bangladesh. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, **100293**, <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100293>.
- Shoumik, B.A.A., Khan, M.Z. and Islam, M.S., 2023. Spatio-temporal characteristics of meteorological and agricultural drought indices and their dynamic relationships during the pre-monsoon season in drought-prone region of Bangladesh. *Environmental Challenges*, **11**, 100695. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100695>.
- Sohrabi, M.M., Ryu, J.H., Abatzoglou, J. and Tracy, J., 2015. Development of soil moisture drought index to characterize droughts. *Journal of Hydrologic Engineering*, **20**(11), 04015025. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001213](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001213).
- Tam, B.Y., Cannon, A.J. and Bonsal, B.R., 2023. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) for Canada: assessment of probability distributions. *Canadian Water Resources Journal/Revue canadienne des ressources hydriques*, **1**-17. <https://doi.org/10.1080/07011784.2023.2183143>.
- Tigkas, D., Vangelis, H. and Tsakiris, G., 2015. DrinC: a software for drought analysis based on drought indices. *Earth Science Informatics*, **8**, 697-709. <https://doi.org/10.1007/s12145-014-0178-y>.
- Tigkas, D., Vangelis, H. and Tsakiris, G., 2017. An enhanced effective reconnaissance drought index for the characterisation of agricultural drought. *Environmental Processes*, **4**, 137-148. <https://doi.org/10.1007/s40710-017-0219-x>.
- Van Loon, A. F., 2015. Hydrological drought explained. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, **2**, 359-392. <https://doi.org/10.1002/wat2.1085>.
- Varol, T., Atesoglu, A., Ozel, H.B. and Cetin, M., 2023. Copula-based multivariate standardized drought index (MSDI) and length, severity, and frequency of hydrological drought in the Upper Sakarya Basin, Turkey. *Natural Hazards*, **116**, 3669-3683. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-05830-4>.
- Vicente-Serrano, S.M., 2006. Differences in spatial patterns of drought on different time scales: an analysis of the Iberian Peninsula. *Water resources management*, **20**, 37-60. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-2974-8>.
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S. and López-Moreno, J.I., 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, **23**, 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>.
- Wells, N., Goddard, S. and Hayes, M.J., 2004. A self-calibrating Palmer drought severity index. *Journal of climate*, **17**, 2335-2351. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<2335:ASPSDI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<2335:ASPSDI>2.0.CO;2).
- Yılmaz, C. B., Bodu, H., Yüce, E. S., Demir, V. Ve Sevimli, M.F., 2023. Türkiye'nin uzun dönem ortalama sıcaklık (° C) değerlerinin üç farklı enterpolasyon yöntemi ile tahmini. *Geomatik*, **8**(1), 9-17. <https://doi.org/10.29128/geomatik.984310>.
- Yıldız, O., Coruhlu, Y. E. and Biyik, C., 2018. Registration of agricultural areas towards the development of a future Turkish cadastral system. *Land use policy*, **78**, 207-218. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.06.041>.
- Zambrano, F., Lillo-Saavedra, M., Verbist, K. and Lagos, O., 2016. Sixteen years of agricultural drought assessment of the BioBío region in Chile using a 250 m resolution Vegetation Condition Index (VCI). *Remote Sensing*, **8**, 530. <https://doi.org/10.3390/rs8060530>.
- Zhang, C., Yang, Z., Zhao, H., Sun, Z., Di, L., Bindlish, R. and Yueh, S.H. (2022). Crop-CASMA: A web geoprocessing and map service based architecture and implementation for serving soil moisture and crop vegetation condition data over US Cropland. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **112**, 102902. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102902>.
- Zhang, N., Li, Z. and Quiring, S.M., 2023. Developing Impacts-Based Drought Thresholds for Ohio. *Journal of Hydrometeorology*, **1225**-1240. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-22-0054.1>.

#### İnternet kaynakları

- 1-<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/standardized-precipitation-index-spi>, (14.05.2023).
- 2-<https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Kent-Kir-Nufus-Istatistikleri-2022-49755>, (17.05.2023).
- 3- <https://cip.tuik.gov.tr/#>, (17.05.2023).
- 4- <http://www.mersin.gov.tr/tarim>, (15.06.2023).

5-<https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=MERSIN>, (20.06.2023).

6- <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/kuraklik-analizi.aspx?d=aylik&k=spi#sfB>, (20.06.2023).

7- <https://www.mersin.bel.tr/haber/mersin-cok-siddetli-kuraklik-kategorisine-gecti-1677827585>, (20.06.2023).

8-<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>, (20.06.2023).

9-[https://edo.jrc.ec.europa.eu/documents/factsheets/factsheet\\_spi\\_ado.pdf](https://edo.jrc.ec.europa.eu/documents/factsheets/factsheet_spi_ado.pdf) , (05.07.2023).

10- <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/standardized-precipitation-evapotranspiration-index-spei>, (05.07.2023).

11- <https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Haber/1139/Gida-Guvenligi-Ve-Su-Yonetimi>, (10.07.2023).

## GEDI Uydu Tabanlı Lazer Altimetre Verisinin Arazi Yükseklik Tahmininin Araştırılması

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 25.08.2023

Kabul/Accepted: 08.01.2024

Yayımlandı/Published: 27.02.2024

### Investigation of Terrain Elevation Estimation of GEDI Spaceborne Laser Altimeter

Ömer Gökberk NARİN<sup>\*</sup>, Mustafa YILMAZ

<sup>1</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

Global Ecosystem Dynamics Investigate (GEDI), orman örtüsü, su seviyesi ve arazi yüksekliği tahmini gibi birçok alanda yeryüzünün gözlemlenmesi için kullanılan uzay kaynaklı bir lazer altimetre sistemidir. GEDI verileri, gözlem sırasında kullanılan sensör nedeniyle atmosferik etkilerden etkilenmektedir. Çalışmamızda Türkiye'nin batısında yer alan Afyonkarahisar ili sınırları içerisindeki 55 kontrol noktası ile GEDI noktası karşılaştırmıştır. Ayrıca çalışmada GEDI verisinin hassasiyetinin daha detaylı incelenmesi için "solar\_elevation" ve eğime göre karşılaştırma yapılmıştır. Karşılaştırma için doğruluk metriği olarak Karesel Ortalama Hata (KOH) kullanılmıştır. Sonuç olarak GEDI verisinin gece zamanlarında ve eğimin düşük olduğu alanlarda doğruluğunun arttığı görülmüştür. Çalışmamızda 55 nokta için arazi yüksekliği belirlemede GEDI verisi KOH'a göre 2.79 m, gece ve düşük eğimli 30 noktada ise 2.34 m başarı göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Uydu Altimetresi; GEDI; Arazi yüksekliği; GNSS

#### Abstract

Global Ecosystem Dynamics Investigate (GEDI) is a space-based laser altimeter system used for Earth observation in many areas such as forest cover, water level and land elevation estimation. GEDI data is affected by atmospheric effects due to the sensor used during the observation. In our study, 55 control points within GEDI points were compared in the borders of Afyonkarahisar province located in the west of Turkey. In addition, a comparison was made according to "solar\_elevation" and slope in order to examine the sensitivity of GEDI data in more detail. Root Mean Squared Error (RMSE) was used as the accuracy metric for comparison. As a result, it was observed that the accuracy of GEDI data increased at night and in areas with low slope. In our study, GEDI data showed a success of 2.79 m in determining the height of the land for 55 points, and 2.34 m at 30 points with low slope at night, according to RMSE

**Keywords:** Satellite Altimetry; GEDI; Terrain Height; GNSS

#### 1. Giriş

Arazi yüksekliği hakkında doğru bilgi geomatik, ziraat, jeoloji, maden vd. bilim dallarında büyük fayda sağlamaktadır. Bu sebeple arazi yüksekliği verisi oldukça önemlidir. Ancak arazi yüksekliği bakımından cm doğruluğunda veri toplamak hem maliyet hem de zaman açısından oldukça maliyetlidir. Her ne kadar gelişmiş ülkelerde yüksek doğrulukta sık veri bulunsa da Dünya'nın birçok bölgesinde nispeten düşük doğruluklu veriler kullanılmaktadır. Gelişen teknolojiler ile birlikte arazi yüksekliği ölçmeye yarayan uydu sistemleri tasarlanmıştır ve tasarlanmaya devam etmektedir. Özellikle 2003-2009 yılları arasında aktif şekilde tam dalga formu LiDAR algılayıcısıyla veri toplayan Ice, Cloud and Land Elevation Satellite/Geoscience Laser Altimeter System (ICESat/GLAS) yardımıyla birçok çalışma yapılmıştır (Enble *et al.* 2014, Chen 2010). Ancak ICESat/GLAS verisinin ayak izinin ~70 m olması birçok

çalışma için yetersiz çözünürlüğe sebep olmaktadır (Pang *et al.* 2011).

ICESat/GLAS uydusuna nispeten daha yeni bir uydu olan Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) 2018 yılı aralık ayında Uluslararası Uzay İstasyonuna (International Space Station – ISS) entegre edilmiştir. GEDI tam dalga formu LiDAR algılayıcı ile donatılmış olup 25 m ayak izine sahiptir (Dubayah *et al.* 2020). GEDI, arazi yüksekliği (Liu *et al.* 2021, Narin *et al.* 2023), orman yüksekliği (Vatandaşlar *et al.* 2023), orman biokütle (Dubayah *et al.* 2022), su seviyesi (Fayad *et al.* 2020) gibi birçok alanda çalışmalarda kullanılmaktadır.

GEDI sensörü bulutluluk, güneş ışınları ve eğim gibi topografik ya da hava durumuna bağlı etkenlerden etkilenmektedir (Dubayah *et al.* 2020). Narin *et al.* (2023) yılında yaptıkları çalışmada GEDI arazi yüksekliği tahmini için çoklu kriter stratejisi uygulamıştır.



Çalışmalarında yersel doğruluk olarak LiDAR verisinden üretilen Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) kullanmışlardır. Sonuç olarak Karesel Ortalama Hata'nın (KOH) bulutsuz ve güneş yüksekliğinin düşük olduğu zamanlarda GEDI verisinin 5 m'den daha iyi sonuç verdiğini belirtmişlerdir. Huang *et al.* (2023) yoğun ormanlık alanlar (Kanopi kapallığı > %70) altında arazi yüksekliği tahmini yapmışlardır. Yersel doğruluk olarak LiDAR verisi kullanmışlardır. GEDI ayak izindeki ortalama yüksekliğinde doğruluğun KOH'a göre 6.08 m olduğunu belirtmişlerdir. Ngo *et al.* (2022) yılında Güney Amerika'da bulunan Paracou Tropikal Ormanlarında yaptığı çalışmada GEDI ve P-band TomoSAR verisini, LiDAR verisiyle arazi yüksekliği ve canopy yüksekliği bakımından karşılaştırmış. 417 GEDI verisi için arazi yüksekliği belirlemede doğruluğu KOH'a göre 4.47 m bulmuşlardır. Quiros *et al.* (2021) yılında İspanya'nın 10 farklı bölgesinde yaptıkları çalışmada KOH metriğine göre karşılaştırma yapmışlardır. LiDAR verisiyle GEDI verisi karşılaştırıldığında çalışma sonucunda 6.13 m doğruluğa ulaşmışlardır. Literatüre bakıldığında farklı bölge ve farklı arazi koşullarında GEDI verisinin arazi yüksekliği tahmininde farklı sonuçlar verdiği görülmektedir. Biz çalışmamızda yersel doğruluk olarak LiDAR verisi yerine yüksek doğruluklu GNSS verisi kullandık. Ayrıca çalışma alanı seçiminde yersel ölçümlerde genel olarak arazi yüksekliği belirlemede zorluk yaşanan yüksek arazilerde GEDI verisinin doğruluğuna bakıldı.

## 2. Materyal ve Metot

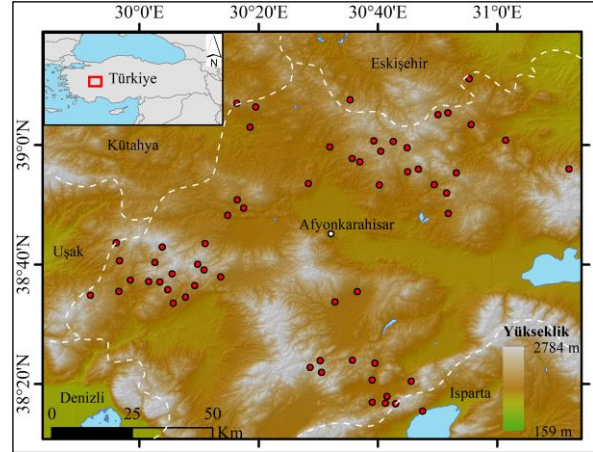
### 2.1 Çalışma alanı ve yer doğruluğu verisi

Çalışma alanı Türkiye'nin batısında Afyonkarahisar il sınırları seçilmiştir (Şekil 1). Yer doğruluğu noktaları çıplak arazi'de yer almaktadır. Kontrol edilen noktaların WGS84 elipsoidine göre en düşük yükseklik 1002.53 m, en yüksek yükseklik 1805.86 m, ortalama yükseklik ise 1355.60 m. dir. Ayrıca en az eğim %0.98, en çok eğim %12.78 ortalama eğim ise %5 dir. Çalışma için, bölgede bulunan Türkiye Ulusal Temel GNSS Ağı (TUTGA) noktaları ve Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü tarafından yürütülmüş olan "Sayısal Kadastro" projesi kapsamında TUTGA noktalarına dayalı olarak statik GNSS gözlemleri ile üretilmiş C1, C2 ve C3 derece sıklaştırma noktaları kullanılmıştır. Çalışma kapsamında doğruluğu < 5 cm. olan toplam 55 adet nokta kullanılmıştır. Bu noktalar GEDI ayak izi içerisinde yer alacak şekilde seçilmiştir (Şekil 2).

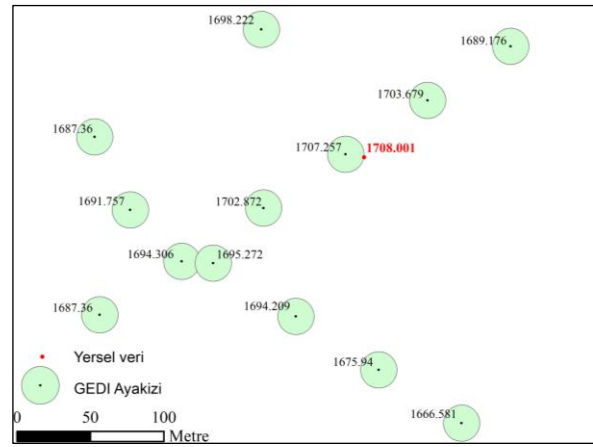
### 2.2 GEDI veri indirme ve filtreleme adımları

GEDI verileri uzaktan algılama verilerini ücretsiz şekilde indirilip, işlenmesine yardımcı olan Google Earth Engine

(GEE) bulut platformu yardımıyla indirilmiştir (İnt. Kyn. 1). Veriler indirilirken GEE katolugundan "GEDI L2A Raster Canopy Top Height (Version 2)" GEDI ürünü kullanılmıştır. GEDI verileri indirilirken herhangi bir zaman filtrelemesi kullanılmamış olup veri topladığı ilk günden itibaren tüm noktalar indirilmiştir. GEDI verisinden yükseklik bilgisi olarak "Elev\_lowestmode" kullanılmıştır.



Şekil 1. Çalışma alanı gösterir harita. Kırmızı noktalar yer doğruluğu verilerini temsil etmektedir.



Şekil 2. GEDI ayak izi içerisinde bulunan örnek yer doğruluğu noktasını gösterir harita.

Elev\_lowestmode WGS84 elipsoidine göre GEDI tarafından üretilen arazi yüksekliğini temsil etmektedir. Veriler indirilirken "quality\_flag=1" olan noktalar seçilmiştir. Quality\_flag her bir GEDI verisi için yardımcı bilgi olarak verilmektedir. Eğer quality\_flag=1 ise kullanılabilir olduğuna quality\_flag=0 ise kullanılamaz veri olduğunu göstermektedir (Barbosa *et al.* 2022). Ayrıca GEDI verisinin sonuçları araştırılırken ölçümün gerçekleştiği zamanın sabah ya da gece olduğunu gösteren "solar\_elevation" bilgisine göre doğruluk araştırılmıştır. Solar\_elevation sıfırdan küçükse gece sıfırdan büyükse gündüzü temsil etmektedir (Adam *et al.*

2020). Çalışma sonuçları değerlendirilirken giriş kısmında da örnek gösterilen birçok çalışmada olduğu gibi KOH doğruluk analizi kullanılmıştır (1).

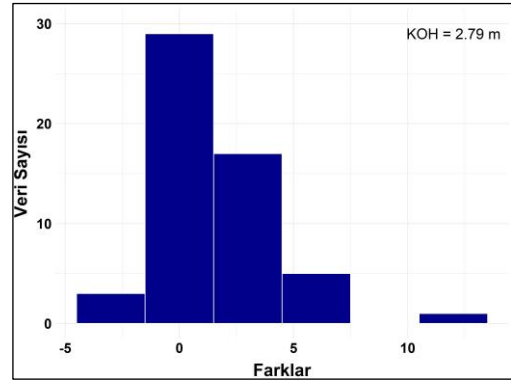
$$KOH = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i^{yrsl} - y_i^{GEDI})^2} \quad (1)$$

n toplam nokta sayısını,  $y_i^{yrsl}$  gerçek olarak kabul edilen yükseklik değerleri,  $y_i^{GEDI}$  GEDI verisine ait yükseklik değerlerini simgelemektedir.

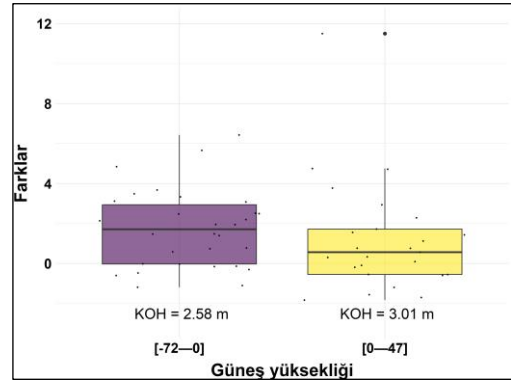
### 3. Bulgular ve Tartışma

Çalışmamızda öncelikle tüm noktaların doğruluğuna bakılmıştır. Yersel doğruluk verisi ile GEDI verisi arasındaki yükseklik farklarına bakıldığında en yüksek fark 11.50 m, en düşük fark -0.01 m'dir. 21 adet GEDI noktasında 1 m'nin altında tahmin etmiştir (Şekil 3). Bununla birlikte tüm noktalar için KOH 2.79 m'dir. Narin *et al.* (2023) çalışmalarında quality\_flag=1 parametresi seçildikten sonra O07933 yörünge isimli veride 1088 nokta için KOH'u 7.01 m olarak bulmuşlardır. Huang *et al.* (2023) kanopi kapallığı 70 ve 90 arasında 5 farklı kategori de GEDI doğruluğu KOH'a göre 4.28 m ile 12.92 m arasında değiştiğini bulmuşlardır. Çalışmamızda ki tüm noktalar için sonuç literatürdeki sonuçlardan daha iyi sonuç vermiştir. Bunun sebebi bizim çalışmamızda ki noktaların çıplak arazide olması sebeplerden birisi olabilir çünkü ormanlık alanlarda ya da şehir alanlarında zemin tespit etmek daha zordur (Huang *et al.* 2023). Çalışmamızda GEDI verisini detaylı şekilde incelemek için veriyi gündüz ve gece olarak iki kategoriye ayırdık (Şekil 4). GEDI verisinin 25 tanesi gündüz 30 tanesi gece ölçülmüştür. Çalışmamızda gece verisinin gündüz verisine göre biraz daha yüksek doğrulukta olduğu görülmüştür. Gündüz vakitlerinde güneş ışınlarından dolayı GEDI verisinde gürültüler artabilmektedir (Adam *et al.* 2020).

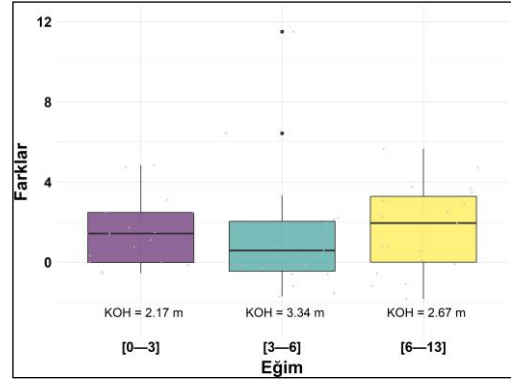
Ayrıca GEDI verisinin doğruluğunun eğim ile ilişkisine bakılmıştır. Çalışmada 3 farklı eğim grubu belirlenmiştir (Şekil 5). 0 ile 3 derece arasındaki eğim grubu KOH'a 2.17 m ile en iyi sonucu vermiştir. En kötü sonucu 3-6 derece arasındaki eğim grubu KOH'a göre 3.34 m ile vermiştir. Burada 3-6 derece arasında en kötü sonucu verme sebebi GEDI verisinin gündüz zamanlı alımlarına denk gelmesidir. Çünkü çalışmamızda en yüksek hata farkının bu kategoride kaldığı görülmüştür (Şekil 5). Çalışmamızda gece verisi ve 6 dereceden düşük eğimli veriler seçilmiştir (Şekil 6). Seçilen noktaların KOH'a göre doğruluğu 2.34 m'dir.



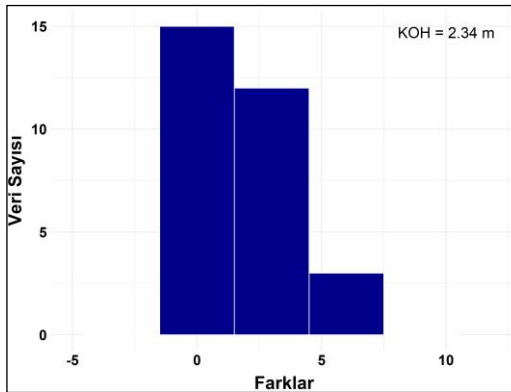
Şekil 3. GEDI verisi'nin hata dağılım grafiği



Şekil 4. GEDI verisinin güneş yüksekliğine göre çizilmiş boxplot grafiği.



Şekil 5. GEDI verisinin güneş yüksekliğine göre çizilmiş boxplot grafiği.



Şekil 6. Filtrelenmiş GEDI verisine ait hata dağılım grafiği.

#### 4. Sonuç

GEDI uydu altimetre sistemi arazi yüksekliği tahmini için önemli bir veri kaynağıdır. Her ne kadar GEDI verisi atmosferik ve topolojik unsurlardan etkilense de birçok çalışmada başarısı gösterilmiştir. Biz de çalışmamızda GEDI verisinin arazi yüksekliği belirlemedeki doğruluğunu hassas yer doğruluğu verisi ile karşılaştırdık. Çalışmanın sonucunda GEDI verisinin KOH'a göre 2.34 m doğruluğa ulaştığı görülmüştür. GEDI verisinde filtreleme işlemi yapıldıktan sonra kullanılması gerekliliği sonucuna varılmıştır ve GEDI verisinin çıplak arazide eğimi düşük alanlarda ve gece ölçümlerinde başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

#### Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

#### Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Araştırma, Görselleştirme, Yazma-rijinal taslak, GEDI verilerinin indirilmesi, Analizler

Yazar 2: Yer doğruluğu verisi temini, Analizler, Sonuçların yorumlanması, Genel yazım kontrolü

#### 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

Adam, M., Urbazaev, M., Dubois, C., and Schmillius, C. 2020. Accuracy assessment of GEDI terrain elevation and canopy height estimates in European temperate forests: Influence of environmental and acquisition parameters. *Remote Sensing*, **12(23)**, 3948. <https://doi.org/10.3390/rs12233948>

Enßle, F., Heinzel, J., and Koch, B. 2014. Accuracy of vegetation height and terrain elevation derived from ICESat/GLAS in forested areas. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, **31**, 37-44. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.02.009>

Barbosa, F. L. R., Guimarães, R. F., de Carvalho Júnior, O. A., Gomes, R. A. T., de Carvalho, O. L. F., and de Lima, T. P. M. 2022. Estimating the Optimal Threshold for Accuracy Assessment of the Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) Data in a Gentle Relief Urban Area. *Remote Sensing*, **14(15)**, 3540. <https://doi.org/10.3390/rs14153540>

Chen, Q. 2010. Assessment of terrain elevation derived from satellite laser altimetry over mountainous forest areas using airborne lidar data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **65(1)**, 111-122.

<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.09.004>

Dubayah, R., Blair, J. B., Goetz, S., Fatoyinbo, L., Hansen, M., Healey, S., ... and Silva, C. 2020. The Global Ecosystem Dynamics Investigation: High-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography. *Science of remote sensing*, **1**, 100002.

<https://doi.org/10.1016/j.srs.2020.100002>

Dubayah, R., Armston, J., Healey, S. P., Bruening, J. M., Patterson, P. L., Kellner, J. R., ... and Luthcke, S. 2022. GEDI launches a new era of biomass inference from space. *Environmental Research Letters*, **17(9)**, 095001.

<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac8694>

Fayad, I., Baghdadi, N., Bailly, J. S., Frappart, F., and Zribi, M. 2020. Analysis of GEDI elevation data accuracy for inland waterbodies altimetry. *Remote Sensing*, **12(17)**, 2714.

<https://doi.org/10.3390/rs12172714>

Huang, J., Xia, T., Shuai, Y., and Zhu, H. 2023. Assessing the performance of GEDI LiDAR data for estimating terrain in densely forested areas. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **20**, 1-5.

<https://doi.org/10.1109/LGRS.2023.3306875>

Liu, A., Cheng, X., and Chen, Z. 2021. Performance evaluation of GEDI and ICESat-2 laser altimeter data for terrain and canopy height retrievals. *Remote Sensing of Environment*, **264**, 112571.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112571>

Narin, O. G., Lindenbergh, R., and Abdikan, S. 2023. Multi-Criteria Strategy for Estimating GEDI Terrain Height. In 2023 10th International Conference on Recent Advances in Air and Space Technologies (RAST2023), 7-9 June 2023, National Defence University, İstanbul.

<https://doi.org/10.1109/RAST57548.2023.10197988>

Ngo, Y. N., Huang, Y., Minh, D. H. T., Ferro-Famil, L., Fayad, I., and Baghdadi, N. 2022. Tropical forest vertical structure characterization: From GEDI to P-band SAR tomography. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **19**, 1-5.

<https://doi.org/10.1109/LGRS.2022.3208744>

Pang, Y., Lefsky, M., Sun, G., and Ranson, J. 2011. Impact of footprint diameter and off-nadir pointing on the precision of canopy height estimates from spaceborne lidar. *Remote Sensing of Environment*, **115(11)**, 2798-2809.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.08.025>

Quiros, E., Polo, M. E., and Fragoso-Campón, L. 2021. GEDI elevation accuracy assessment: a case study of southwest Spain. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **14**, 5285-5299.

<https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3080711>

Vatandaşlar, C., Narin, O. G., and Abdikan, S. 2023. Retrieval of forest height information using spaceborne LiDAR data: a comparison of GEDI and ICESat-2 missions for Crimean pine (*Pinus nigra*) stands. *Trees*, **37(3)**, 717-731.  
<https://doi.org/10.1007/s00468-022-02378-x>

**İnternet Kaynakları**

1- <https://earthengine.google.com/>, (04.09.2023)



## İslahiye-Hassa Trası Katkılı Çimento Harçlarının Dayanım ve Dayanıklılık Özelliklerinin Araştırılması

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 11.04.2023

Kabul/Accepted: 11.01.2024

Yayımlandı/Published: 27.02.2024

### Investigation of the Strength and Durability Properties of Cement Mortars with İslahiye-Hassa Trace Additive

Hadan PEHLİVAN<sup>1\*</sup>, Mahmut AYTEKİN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kilis, Türkiye

<sup>2</sup> Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Teknolojisi Programı, Kilis, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

Bu çalışmada çimento ikamesi olarak %0, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında İslahiye-Hassa Trası (T) içeren donatılı ve donatısız harç numuneler üretilmiştir. Çimento harçlarının kimyasal analiz, moleküler analiz ve termal değişimlerini incelemek için XRF, FT-IR ve TGA uygulamaları yapılmıştır. Çimento harçlarının dayanım testleri için 40x40x160mm boyutunda prizmatik ve elektrokimyasal korozyon ölçümleri için donatılı 50x100 mm silindirik harç numuneleri üretilmiştir. Üç elektrotlu ölçüm yöntemi ile donatının elektrokimyasal korozyon davranışını belirlemek için voltametrik ölçümler yapılmıştır. Korozif ortamda bekleyen donatılara yarı hücre potansiyel yöntemi ile açık devre potansiyel ölçümleri (EADP), kulometri uygulaması ile açık devre potansiyelinde korozyon yüklerinin (QADP) ölçümü gibi tahribatsız elektrokimyasal testler yapılmıştır. Sonuç olarak %10 tras katkılı çimento harç numunelerinde sıcaklığa bağlı kütle değişiminin en düşük olduğu, 180 günlük eğilme (9.72 MPa) ve basınç (50.85 MPa) dayanımının en yüksek olduğu görülmüştür. Aynı zamanda %10 tras katkısı donatı yüzeyinde pasif film oluşmasına katkı sağlayarak korozyona karşı koruyucu bir ortam oluşturmuştur.

#### Abstract

In this study, reinforced and unreinforced mortar samples containing İslahiye-Hassa Trace (T) at the rates of 0%, 10%, 20%, 30% and 40% were produced as a cement substitute. XRF, FT-IR and TGA applications were made to examine chemical analysis, molecular analysis and thermal changes of cement mortars. For the strength tests of cement mortars, prismatic 40x40x160 mm mortar samples and reinforced cylinder 50x100 mm mortar samples for electrochemical corrosion measurements were produced. Voltametric measurements were made to determine the electrochemical corrosion behavior of the reinforcement with the three-electrode measurement method. Non-destructive electrochemical tests such as open circuit potential measurements (EOCP) with half-cell potential method and measurement of corrosion charge (QOCP) at open circuit potential with coulometry application were performed on the reinforcements waiting in a corrosive environment. As a result, it was observed that the mass change due to temperature was the lowest and the 180-day flexural (9.72 MPa) and compressive (50.85 MPa) strength was the highest in the 10% tras added cement mortar samples. At the same time, 10% trass additive contributed to the formation of a passive film on the reinforcement surface, creating a protective environment against corrosion

**Anahtar Kelimeler:** İslahiye-Hassa Trası, XRF, FT-IR, TGA, Dayanım, Korozyon

**Keywords:** İslahiye-Hassa Trace; XRF; FT-IR; TGA; Strength; Corrosion

#### 1. Giriş

İnşaat uygulamalarında yapı malzemesi olarak en yaygın kullanılan çimento yaşam döngüsünün çevre dostu olabilmesi konusunda puzolanlar önemli bir yer almaktadır. Çimento esaslı malzemelere çeşitli agresif çözümlerin temas etmesi ekonomik ömrünü azaltmakta ve güvenlik sorunları yaratmaktadır. Bu sorunlardan en önemlisi malzemede ciddi bozunmalara yol açan kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu ortaya

çıkan korozyondur. Agresif ortamlarda yapıların deprem güvenliği, donatı korozyonu ve dayanıklılık arasındaki ilişkinin ayrıntılı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Çimento esaslı malzemeler, aşırı yüklenme ve sismik etkilerle birlikte çevre ve iklim şartlarından da etkilenecek zaman içerisinde hasara uğramaktadır. Bu nedenle çeşitli çevresel faktörlerden kaynaklanan bozulmaları engellemek için çimentolu sistemlerin

fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin detaylı incelenmesi gerekmektedir (Erdoğan 2013).

Doğal puzolanlar silis ve alümin oksitler bakımından zengin tüf çeşiti olup ince öğütülebildiği için çimento hamurunun mikro boşluklarını hızlı bir şekilde doldurmakta aynı zamanda dayanıklılığını artırmaktadırlar. Mikro yapıda olan doğal puzolanlar çimento esaslı malzemelerin kıvam ve işlenebilirlik özelliklerine de katkı sağlamaktadır (Pan et al. 2003, Sabir vd. 2001, Shannag 2000, Vu 2001).

Dayanıklılık hizmet koşullarına bağlı olduğundan, bir malzemenin kendine özgü bir özelliği değildir. Bu nedenle betonun maruz kaldığı ortamın türüne göre değiştiği bilinmektedir. Betonarmenin karşılaştığı en büyük tehdit çatlama, tabakalara ayrılma ve ciddi durumlarda yapının kısmen veya tamamen çökmesi nedeniyle donatı çeliğinin korozyona uğramasıdır. Bu durumun en önemli nedeni CO<sub>2</sub> gibi agresif ortamlara maruz kalma ve/veya klorür (Cl<sup>-</sup>) iyonlarının girişidir (Aguirre-Guerrero et al. 2021).

Gömülü çeliğin korozyonu süreci genellikle karbonatlaşma veya betonun klorür kirlenmesi sonucu başlar. Sonrasında çeliğin korozyon hızı başta betonun nemi olmak üzere çevre koşullarına ve oksijen erişimine bağlıdır. Korozyon inşaat demirini kademeli olarak metalden daha yüksek hacme (2 ila 6 kat) sahip oksitlere dönüştürür. Korozyon ürünlerinin önemli bir kısmı sürekli olarak inşaat demiri çevresinde katı bir tabaka halinde birikmektedir. Bu durum mekanik bir bakış açısıyla çelik korozyon ürünlerinin oluşumuna bağlı genleşme, dahili çekme gerilmeleri oluşturan inşaat demirinin hacim artışı olarak yorumlanabilir. Bununla birlikte özellikle çok nemli betonda korozyon ürünlerinin bir kısmının inşaat demirinden uzağa taşınabileceği için inşaat demiri etrafındaki çekme gerilmeleri kısmen azalabilmektedir. Sonunda çekme gerilmeleri betonun çekme mukavemetini yenebilir bu da çimentolu kompozitte mikro ve makro çatlaklara yol açarak betonu hasara uğratar (Segovia et al. 2021).

Genel olarak çelik donatılar fiziksel ve kimyasal mekanizmalara dayalı olarak korozyondan korunabilir. Çelik çubukların koruyucu tabakası olan beton örtü aynı zamanda agresif ajanların istilasını önleyen fiziksel bir bariyer görevi görür. Bununla birlikte beton gözenek çözümlerinin pH'ı çelik donatıların yüzeyinde pasif bir koruma filmi oluşumunu destekler. Bununla birlikte su, oksijen, klorürler veya karbon dioksit ile birlikte çelik donatıların yüzeyine ulaştığında, bu filmin pasifliği azalabilir ve hasar görebilir; donatılar ve beton arasındaki ara yüz ve örtü betonunda çatlaklara neden olur.

Betondaki çimentolu bağlayıcıların, hidratasyon ürünlerini ve betonun mikro yapısını belirleyen çok önemli faktörler olduğu ve bu nedenle donatıların korozyon davranışında önemli bir rol oynadığı kabul edilmiştir (You et al. 2020).

Beton yapılarda çeliğin korozyonunun izlenmesi ve değerlendirilmesi için çeşitli elektrokimyasal teknikler geliştirilmiştir. Yerinde korozyon testlerinin en yaygın olanı yarı hücre potansiyel ölçümüdür. Bu yöntemin kullanımı ve sonuçlarının yorumlanması ASTM C876-22b (2022)'de açıklanmıştır. Ancak yarı hücre potansiyel değerleri korozyon hızı hakkında değil yalnızca korozyon olasılığı hakkında bilgi verdiği için başka tahribatsız test yöntemleriyle de desteklenmesi gerekir. Beton yapılarda korozyon olasılığının beton elektrolitinin iyonik iletkenliğine, neme, sıcaklığa ve kabuk betonun kalitesine bağlı olduğu iyi bilinmektedir. İyonik iletkenlik nicel olarak betonun öz direnci olarak ölçülür (Sadowski 2013). Bu çalışmada doğal puzolan olarak İslahiye-Hassa trasının (T) çimento katkı malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Doğal puzolanlar puzolanik aktivite özelliğine sahip volkanik cam, opal, kil mineralleri, zeolitler ve alüminyum hidroksit grubu malzemelerden oluşabilir. Volkanik faaliyetlerin oldukça yoğun görüldüğü Anadolu topraklarında volkanik tüf rezervleri çok yaygındır. Literatür taraması yapıldığında Antakya Hassa Lav Tüpü mağarası olarak envantere geçen ilk volkanik doğal mağara bulunduğu bilgisine ulaşılmıştır. Antakya ve Gaziantep arasında kalan bu bölgede de volkanik saha olarak tanımlanabilecek yerlerin bulunma olasılığı yüksek olduğu için detaylı araştırmaların yapılması gerekmektedir. Bu kapsamda tras katkılı harçlarda dayanım özelliklerinin yanında sodyum klorür çevresel etkisinde dayanıklılık sorunları araştırılmıştır. Özellikle bölgesel önemi olan hammaddelerin değerlendirilmesine yönelik yapılan bu çalışmada çimento esaslı bağlayıcı malzemeler içinde belli oranda tras kullanımının donatı korozyon davranışına etkisi ayrıntılı elektrokimyasal ölçümlerle araştırılmıştır.

## **2. Materyal ve Yöntem**

### **2.1 Materyal**

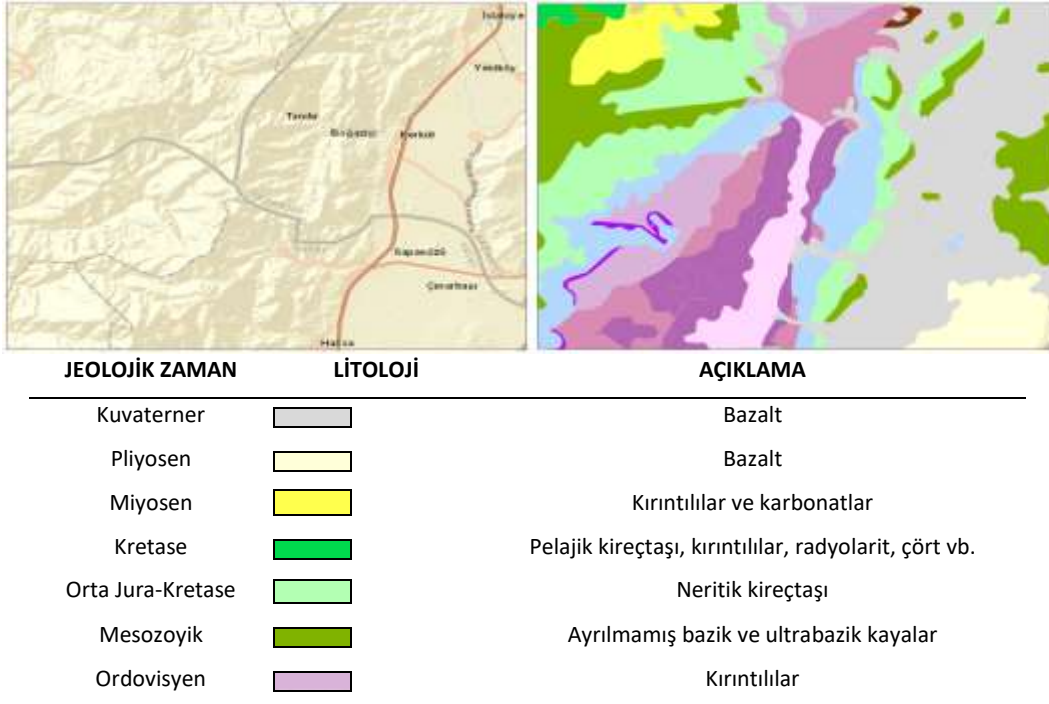
Bu çalışmada çimento olarak CEM I 42,5 R Portland Çimentosu, puzolan olarak İslahiye-Hassa Trası (T), CEN standart kumu, içme suyu, NaCl çözeltisi, donatı, referans elektrot ve karşı elektrot kullanılmıştır.

Bu çalışmada çimento harçlarının üretiminde kullanılan Kahramanmaraş KİPAŞ Çimento Fabrikası'ndan sağlanan TS EN 197-1 (2012) 'e uygun çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 1'de görülmektedir.



**Çizelge 1.** Çimento fiziksel ve kimyasal özellikleri

Fiziksel özellik	KÇS	Standart	Birim	Kimyasal özellik	KÇS	Standart	Birim
Priz başlangıcı	200	En düşük 60	dk	SO <sub>3</sub>	2.48	En yüksek 3.15	%
Priz sonu	240	-	dk	MgO	0.85	-	%
Özgül Ağırlığı	3.15		g/cm <sup>3</sup>	Kızdırma kaybı	2	En yüksek 5	%
Hacim Genleşmesi	1.3	En yüksek 10	mm	Çözünmeyen kalıntı	0.4	En yüksek 5	%
Özgül Yüzey	3880	-	cm <sup>2</sup> /g	Cl <sup>-</sup>	0.0092	En yüksek 0.1	%
Litre ağırlığı	950	-	g/l				
2 günlük dayanım	28.1	En düşük 20.0	MPa				
		En düşük 42.5					
28 günlük dayanım	45.7	En yüksek 62.5					



**Şekil 1.** Çalışma alanının jeoloji haritası(MTA Web Sitesi kullanılarak hazırlanmıştır)

Bu çalışmada mineral katkı olarak kullanılan tras İslahiye-Hassa yöresinde yüzeylenen kayalardan elde edilmiştir. Volkanik sahanın jeoloji haritası Şekil 1'de verilmiştir.

Çalışmada kullanılan materyal ve uygulanan yöntemle ait bilgiler aşağıda verilmiştir.

Genç volkanik aktivitenin yoğun olduğu bölgelerde yeryüzüne yakın magmatik ve tektonik faaliyetlerin etkinliği söz konusudur. Hassa Leçeleri olarak bilinen Antakya-Kahramanmaraş grabeni içerisinde oldukça genç bir volkanik saha bulunmaktadır (Bilgin 1969).

Antakya-Kahramanmaraş graben alanı Ölü Deniz ve Doğu Anadolu Fayları ile Kıbrıs Yay'ının etkisi ile ortaya çıkmıştır. Grabenin çevresi genellikle temel kayaların oluşturduğu ve fayların yükselen bloklarında kalan topoğrafik yükseltilerden oluşur. Grabenin batı kesimini oluşturan Amanos Dağları Kambriyen-Eosen yaşlı

kayaçlardan, doğusunu sınırlayan Kurt Dağları ise Kretase-Miyosen yaşlı birimlerden oluşur. Güneyi ise Kretase yaşlı ofiyolitler ve Miyosen yaşlı kayalardan oluşur.

Pliyosen yaşlı kayalar genellikle karasal kırıntılar ve gölsel birimlerden oluşur.

Kuvaterner yaşlı volkanik kayalar genellikle bazalt karakterlidir. Karasu vadisi boyunca gözlenen ve Reyhanlı-Kırıkhan, Hassa-Fevzipaşa arasında yoğun yüzeylenmektedir. Vadinin batı kenarını denetleyen faylar boyunca yaygın dizili alüvyon yelpazesi gelişimi gözlenmiştir (Toprak vd. 2002).

Çimento harç numunelerinin üretiminde TS EN 196-1 (2009)' uygun dmax'ı yaklaşık 2.0 mm ve yoğunluğu 2.63 g/cm<sup>3</sup> olan CEN standart kumu kullanılmıştır.

Donatı gömülü çimento harçlarının elektrokimyasal korozyon ölçümleri 10 mm çapında 140 mm uzunluğunda nervürlü donatı kullanılarak %3.5 NaCl ortamında alınmıştır.

## 2.2 Yöntem

Bu çalışmada İslahiye-Hassa Trası (T) ağırlıkça %0, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında çimentoya ilave edilerek donatısız ve donatılı harç numuneleri sırasıyla; T0, T10, T20, T30, T40 kodlu üretilmiştir.

### 2.2.1 İslahiye-Hassa Trası malzeme özelliklerinin belirlenmesi

Bu çalışmada çimento katkı maddesi olarak kullanılacak tras numunesinin öncelikle kimyasal ve fiziksel özelliklerini incelemeye yönelik deneyler yapılmıştır. 105°C etüvde 24 saat süreyle kurutulan tras numunesinin öğütme öncesi ve sonrası durumu Şekil 2'de görülmektedir. ASTM C618-19 (2019)'a göre 45µ elekten geçen puzolanik katkı miktarı sınır değerlerine göre öğütülmüştür.

Çalışmada kullanılan öğütülmüş İslahiye-Hassa trasının (T) kimyasal özelliklerini incelemek için X-Işını Floresans (XRF) analizi ve fiziksel özelliklerini incelemek için incelik, özgül ağırlık tayini yapılmıştır.

Çimento harçlarında malzemede termal ağırlık değişimlerini belirlemek için termogravimetrik analiz (TGA) ve tanecikteki molekül gruplarını tanımlamak için Fourier Transform Infrared Spektrofotometre (FT-IR) analizleri yapılarak numunelerin mineralojik yapısında meydana gelen değişimler değerlendirilmiştir. Bu analizleri yapmak için Şekil 3'de görüldüğü gibi harç numuneler kırıldıktan sonra öğütülerek toz haline getirilmiştir.



Şekil 2. İslahiye-Hassa Trası öğütme öncesi ve sonrası



Şekil 3. TGA ve FT-IR analizleri için hazırlanan öğütülmüş numuneler

Hidratasyona tabi tutulan kontrol ve tras katkılı çimento numunelerin termal analizleri (TGA) İleri Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde yapılmıştır. Analizler ASTM C1872-18 (2018) referans alınarak 30°C -1050 °C arasında 10°C sıcaklık artışı ile ısıtılarak ağırlık kayıpları hesaplanmıştır. FT-IR analizleri İleri Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde yapılmıştır. Analizler için dalga sayısı aralığı 400-4000 cm<sup>-1</sup> olarak seçilmiştir.

### 2.2.2 Çimento harç numunelerinin hazırlanması

Çalışmada kullanılan İslahiye- Trası (T) CEM I 42.5 R çimentosuyla ağırlıkça %0-40 oranlarında yer değiştirilerek hazırlanan donatılı ve donatısız harç numuneleri Çizelge 2'de verilen karışım oranlarına göre üretilmiştir. Çizelge 2 incelendiğinde tras ikame oranlarının artması ile harçların su ihtiyacının arttığı görülmüştür. %40 tras katkılı harçlarda su ihtiyacının en fazla (235 gram), katkısız harçlarda ise su ihtiyacının en az (218 gram) olduğu görülmüştür.

Çizelge 2. Harç numunelerine ait malzeme karışım oranları

Kod	Çimento (g)	Tras (g)	Kum (g)	s/b	s (g)
T0	450	0	1350	0.48	218
T10	405	45	1350	0.50	225
T20	360	90	1350	0.51	230
T30	315	135	1350	0.52	233
T40	270	180	1350	0.52	235

Tras katkılı ve katkısız çimento harç karışımlarının tasarımı Şekil 4'de görüldüğü gibi; normal kıvam için gerekli su miktarları ASTM C187-16 (2016)' ya göre, referans numuneye göre yayılma çapları ise ASTM C230/C230M-98E1 (2017)'ye göre belirlenmiştir.



Şekil 4. Çimento harç yayılma tablası

Şekil 5'de görüldüğü gibi çimento harçlarının mekanik özelliklerini belirlemek için 40x40x160mm çimento harç prizma numuneleri, elektrokimyasal korozyon ölçümleri için ise Ø10 donatı kullanılarak 50x100 mm silindirik numuneler üretilmiştir.

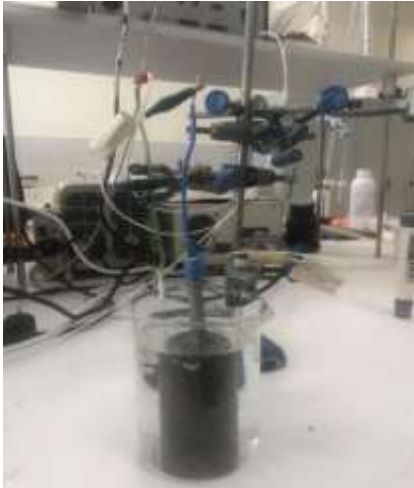


### 2.2.3 Elektrokimyasal ölçümler

Çimento harcı içerisine gömülü donatının elektrokimyasal ölçümleri için Şekil 6'da görüldüğü gibi ASTM C876-22b(2022) göre üç elektrotlu sistem ile potansiyostat cihazı kullanılmıştır. Bu yöntemle göre; donatı çalışma elektrotu, platin karşıt elektrot olarak ve Ag/AgCl elektrodu ise karşılaştırma elektrodu olarak kullanılmıştır.



Şekil 5. Çimento harç prizma ve silindirik numuneler



Şekil 6. Donatılı çimento harçlarının üç elektrotlu sistemle korozyon ölçümü

Donatılı silindirik çimento harç numuneleri %3,5 NaCl çözeltisi içinde 120 gün boyunca bekletilmiş ve 24 günlük periyotlarla tahribatsız korozyon ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümler zamana bağlı elde edilen açık devre potansiyelleri ( $E_{ADP}$ ) ve açık devre potansiyelinde korozyon yüklerinin ( $Q_{ADP}$ ) belirlenmesine yönelik deneysel yöntemlerdir.

analizlerine göre Şekil 7'de görüldüğü gibi çimento hamurlarının faz gelişimleri açıklanmıştır.

Çizelge 3. İslahiye-Hassa Trasına ait XRF analiz sonuçları

Rapor Adı	Miktar (%)
Kızdırma kaybı	0.38
SiO <sub>2</sub>	51.45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.76
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.39
CaO	8.84
MgO	4.31
K <sub>2</sub> O	1.44
Na <sub>2</sub> O	0.93
SO <sub>3</sub>	0.03

Çizelge 4. İslahiye-Hassa Trasına ait fiziksel özellikler

Fiziksel Özellik	Değer
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	2.9
Özgül yüzey (cm <sup>2</sup> /g)	3964

## 3. Bulgular ve Tartışma

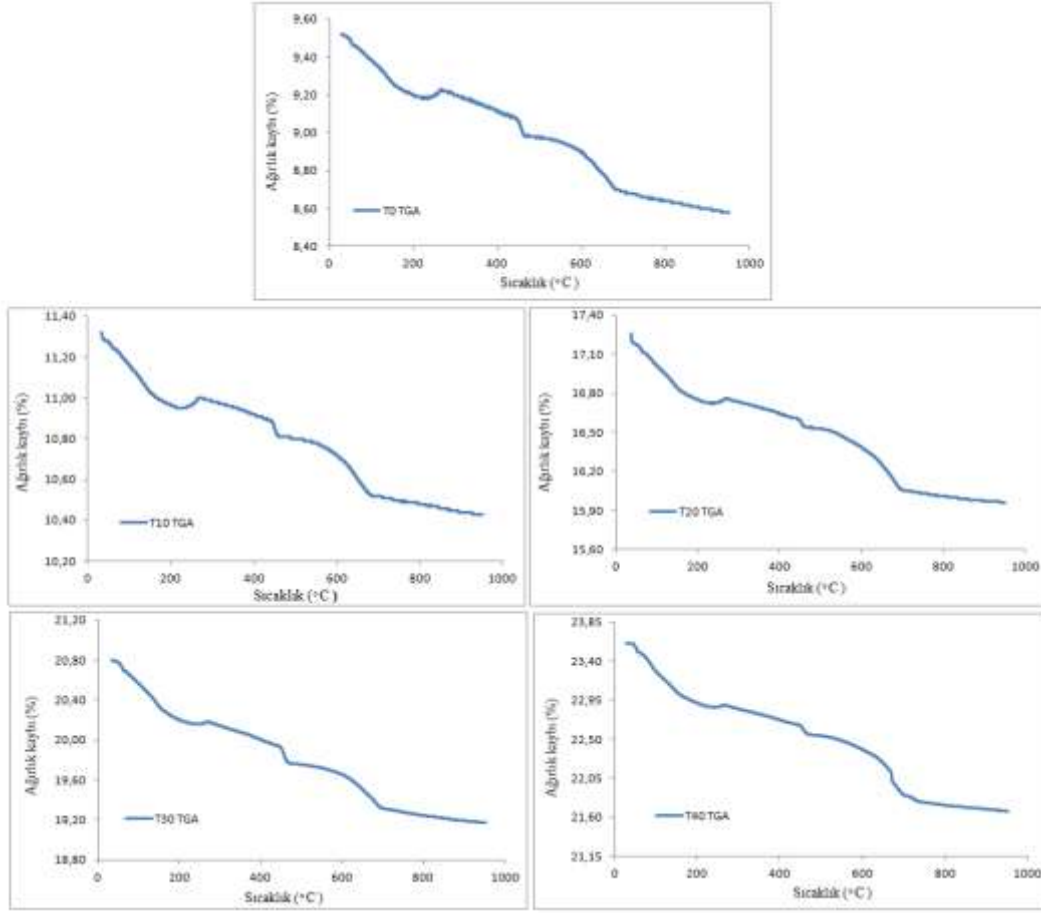
### 3.1 İslahiye-Hassa Trası Malzeme Özelliklerine Ait Bulgular

Çalışmada kullanılan İslahiye-Hassa trasının Çizelge 3'de verilen XRF analizi sonuçları TS 25/T1 (2011)'e göre karşılaştırdığında; trasının SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği % 80.60 olarak standart değerlerin üzerinde kalmıştır. Trasa ait fiziksel özellikler Çizelge 4'de verilmiştir. Çimentolu kompozitlerin termal kütle kayıplarının belirlenmesi ve oluşan hidrasyon ürünlerinin ayrıntılı incelenmesi için TGA bulgularına başvurulmuştur. Farklı oranlarda tras ilave edilmiş çimentolu kompozitlere yapılan TGA

Hidrasyon çimentolu kompozitlerin farklı sıcaklık aralıklarında TGA analizlerinden elde edilen kütle kayıpları Çizelge 5'de verilmiştir. Çizelge 5'de görüldüğü gibi CSH, Ca(OH)<sub>2</sub> ve CaCO<sub>3</sub> içeriklerinin dehidrasyonu ve dekarbonasyonuna bağlı olarak T0, T10, T20, T30 ve T40 karışımlarda kütle kayıpları sırasıyla; %9.4, %8.7, %13.0, %16.1 ve %19.3 olarak bulunmuştur. Bu durumda %10 tras katkılı numunelerde sıcaklığa bağlı kütle değişimi en az olmuştur (Hager 2013, Fichet *et al.* 1998, Dorum vd. 2010, Ubbriaco ve Calabrese 1998, Akça ve Özyurt 2018, Singh and Singh 2016).

25 ve 150 °C sıcaklık aralığında gözlenen ağırlık kaybı ve geniş endotermik pik, serbest suyun buharlaşması ve

CSH'nin ayrışması olarak değerlendirilebilir (Hager 2013, Fichet et al. 1998).



Şekil 7. Farklı oranlarda tras katkılı çimentolu kompozitlerin TGA analizleri

Çizelge5. Çimentolu kompozitlerin farklı sıcaklıklardaki kütle kayıpları (%)

Numune Kodu	Sıcaklık aralığı (°C)				
	25-200	200-400	400-500	500-750	100-1000
T0	3.2	0,8	1,4	3.3	8.0
T10	3.6	0.5	1.1	3.0	7.2
T20	5.1	1.1	1.0	5.0	10.4
T30	6.1	2.0	2.4	4.7	13.8
T40	7.0	1.9	1.7	6.9	15.8

25-200 °C sıcaklık aralığında tüm tras katkılı numunelerde yapısal ve kristal suyun daha fazla olduğu dehidrate CSH fazlarının oluştuğu görülmüştür. 400-500 °C sıcaklık aralığında %10 tras katkılı numunelerde CH daha az dehidratasyona uğramıştır.

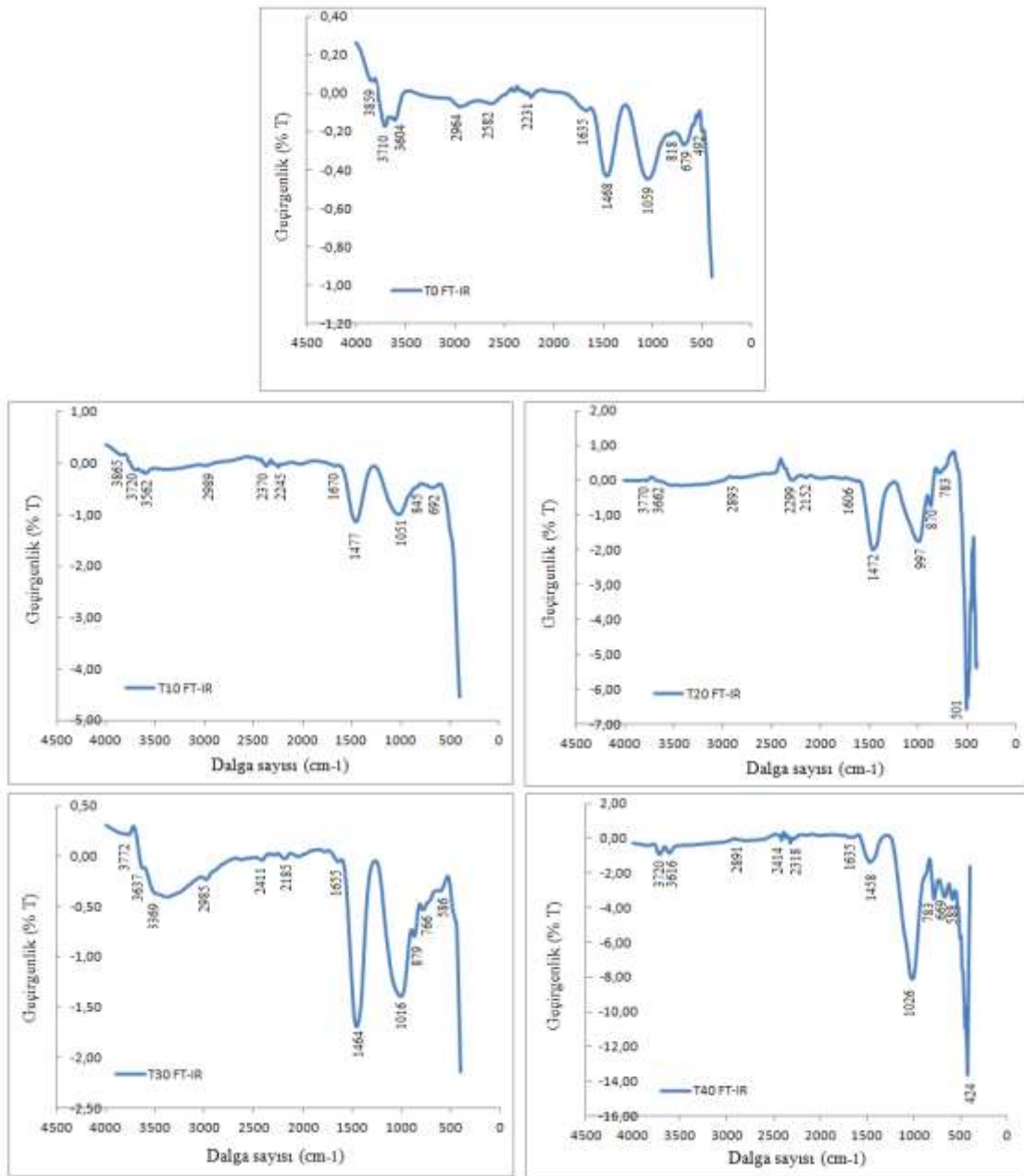
jellerinin farklı aşamalardaki dehidratasyonu olarak geliştiğini, 478-498 °C aralığında  $Ca(OH)_2$ 'nin dehidratasyonunun geliştiğini bildirmiştir. 757-773 °C aralığında ise  $CaCO_3$ 'ün dekarbonasyonunun geliştiğini belirtmiştir.

Literatüre göre puzolanik özellikteki bir malzemenin miktarının artması ile birlikte mekanik performansın arttığı aynı zamanda CSH varlığının arttığı ve CH oranının düştüğü bilinmektedir (Akça ve Özyurt 2018, Du ve Tan 2017). Dorum vd. (2010) çalışmasında, hidratasyona uğrayan çimento hamurunun yaklaşık 100 °C'de kapiler boşluklardaki suyun dehidrate olduğunu, 100-200 °C aralığında endotermik etkilerin görüldüğünü, CSH

Ubbriaco ve Calabrese (1998) çalışmasında, 4x4x16cm boyutlarındaki çimento harcı örneklerine uçucu kül eklenmesi ile iç yapılarındaki değişiklikleri araştırmış, DTA/TG analizi sonucunda endotermik reaksiyon etkisi olarak 100° C'de etrenjit ( $3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$ ) dehidratasyonu ve 700 °C'de dekarbonasyonun oluştuğunu bildirmiştir.

Toz halindeki numunelerin ısıtılması sırasında öncelikle boşluk suyu dehidrasyon ile numuneden uzaklaşır. Bu durum 38-125 °C sıcaklık aralığında gerçekleşir. Daha sonra 125 °C sıcaklıkta kalsiyum silikat hidrat (CSH), etrenjit ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ) ve diğer hidratların dehidrasyon işlemi başlar. Bu hidratların dehidrasyonu 425 °C sıcaklığa kadar devam eder. Bu işlemden sonra portlandit [ $Ca(OH)_2$ ] 425-475 °C sıcaklık aralığında dehidrasyona uğrar. En son  $CaCO_3$ , 475-765 °C sıcaklık aralığında dekarbonasyon sonucu ayrışır. Harç ve/veya betondaki kimyasal bileşenlerin çoğu genellikle 800 °C civarında ayrışır. Bu sınır sıcaklığından sonra harç ve/veya betonun kütle kaybı yavaşlar (Akça ve Özyurt 2018, Singh and Singh 2016).

Çimentolu kompozitlerin hidrasyon reaksiyonları sonrası oluşan bağ yapılarının detaylı incelenmesi için FT-IR bulgularına başvurulmuştur. Farklı oranlarda tras ilave edilmiş çimentolu kompozitlere yapılan FT-IR analizlerine göre Şekil 8’de görüldüğü gibi yapısal dönüşümleri açıklanmıştır. FT-IR spektrumlarına göre, beton veya harcın  $Ca(OH)_2$  piki 3606-3642  $cm^{-1}$  bölgesi ve 3643  $cm^{-1}$  civarındadır (Bulatovic’ *et al.* 2017, Dorum vd. 2010). Beton veya harcın karakteristik  $CaCO_3$  piki 1391-1413  $cm^{-1}$ , 846-868  $cm^{-1}$ , 635-703  $cm^{-1}$  bölgesi ve 1410-1510  $cm^{-1}$  arasında değişmektedir (Witkowski and Koniorczyk 2018, Dorum vd. 2010, Skripkiunas *et al.* 2007).



Şekil 8. Farklı oranlarda tras katkılı çimentolu kompozitlerin FT-IR spektrumları

Şekil 8'de görüldüğü gibi 3606-3643  $\text{cm}^{-1}$  civarındaki en düşük  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  piki T10 numunede görülmüştür. %10 tras katkılı numunede  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  içeriğinin diğer numunelere göre yüksek olmasının nedeni trasın  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ile reaksiyona girerek harç içindeki  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'yi azaltması olarak açıklanabilir. 1391-1510  $\text{cm}^{-1}$  bölgesindeki pikler izlendiğinde %10 tras katkılı numunede  $\text{CaCO}_3$  içeriğinin arttığı görülmektedir.

FT-IR spektrumlarında birinci bölge olarak adlandırılan 400-1100  $\text{cm}^{-1}$  arasındaki bölge Si ile Al bağlarına denk gelmektedir. (Puertas *et al.* 2004, Fernandez-Jimenez 2003). S (kükürt) bölgesi olarak anılan ikinci bölge 1100-1300, 1620-1685 ve 3100-3600  $\text{cm}^{-1}$  aralığında S-O bağı olarak görülmektedir (Akyol vd. 2011). 700-1500  $\text{cm}^{-1}$  dalga sayılarında görülen üçüncü bölge C (C-O) titreşim bağlarını göstermektedir. Bununla birlikte karbonasyona bağlı 2500-3000  $\text{cm}^{-1}$  aralığında ikinci bağlar ortaya çıkmaktadır (Varas *et al.* 2005). Su molekülleri içeren dördüncü bölgede 3400-3450 ve 1620-1650  $\text{cm}^{-1}$  dalga sayıları aralığında O-H deformasyon bağları oluşmaktadır. 3400-3450  $\text{cm}^{-1}$  dalga sayılarında susuz bileşikler ortaya çıkmaktadır. Çimento hidrasyonunda 3650 ve 3630  $\text{cm}^{-1}$  aralığında sırasıyla; portlandit ve tobermorit görülmektedir (Puertas *et al.* 2003, Varas *et al.* 2005).

### 3.2 Çimento Harçlarının Mekanik Özelliklerine Ait Bulgular

Çimento harç numunelerine ait 7, 28, 90 ve günlük kür sonrasındaki eğilme sonuçları Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6 ve Çizelge 7'de verilen çimento harçlarının 7 ve 28 günlük mukavemetleri incelendiğinde; en iyi basınç dayanımı sonucu T0 (Referans) numunesinde 28.72MPa ve 34.60 MPa olarak elde edilmiştir. T0 ve T10 numuneleri eğilme ve basınç dayanımı değerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Harç numunelerin 90 günlük kür sonrasında eğilme ve basınç dayanımı değerleri incelendiğinde; en iyi basınç ve eğilme dayanımı sonucu T10 numunesinde 46.96 MPa ve 7.90 MPa olarak elde edilmiştir. Harç numunelerin 180 günlük kür sonrasında eğilme ve basınç dayanımı değerleri incelendiğinde; en iyi basınç ve eğilme dayanımı sonucu T10 numunesinde 50.85 MPa ve 9.72 MPa olarak elde edilmiştir. Özınan (2010) çalışmasında sileks ve tras katkılı harç ve beton numunelerinin eğilme ve basınç deneylerinde %10 tras katkılı numunenin 28, 56 ve 120 günlük numunelerde en iyi dayanım sonucu verdiğini belirlemiş, tras ikamesinin % 30 ve üzerinde ikame edildiği numunelerde ise dayanımların düştüğünü gözlemlemiştir. Tuncer (2014) Gümüşhane yöresi

volkanik kayaların çimento yerine %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 ikame edilerek hazırlanan harç çubuklarının 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanım sonuçları incelendiğinde; puzolanların %10 olarak kullanımının en uygun olacağı ve puzolan katkıların %20 ve %30 değerine kadar kullanılabileceğini bildirmiştir.

**Çizelge 6.** Üretilen harç numunelerinin 7, 28 ,90 ve 180 günlük eğilme dayanımı sonuçları

Kod	Eğilme Dayanımı (MPa)			
	7 Günlük	28 Günlük	90 Günlük	180 Günlük
T0	6.15	6.48	7.77	8.30
T10	5.86	6.37	7.90	9.72
T20	5.62	6.16	6.83	7.74
T30	5.30	5.89	6.70	7.60
T40	4.31	5.20	6.07	7.43

Çimento harç numunelerine ait 7, 28 ,90 ve 180 günlük kür sonrasındaki eğilme sonuçları Çizelge 7'da verilmiştir

**Çizelge 7.** Üretilen harç numunelerinin 7, 28 ,90 ve 180 günlük basınç dayanımı sonuçları

Kod	Basınç Dayanımı (MPa)			
	7 Günlük	28 Günlük	90 Günlük	180 Günlük
T0	28.72	34.60	44.80	48.30
T10	28.10	30.45	46.96	50.85
T20	22.34	28.83	30.90	43.80
T30	21.85	25.36	28.55	39.42
T40	20.87	21.70	25.78	37.60

Bu çalışmada çimento harçlarının üretiminde kullanılan %10 tras katkısının en iyi dayanım sonuçları vermesi literatürle örtüşmektedir. CEM I 42.5R tipi Portland çimentosunun 28 günlük dayanımının 34.6 MPa olmasının nedeninin ise laboratuvar ortamının soğuk iklim şartlarının çimento hidrasyon reaksiyonlarını bir miktar geciktirmesine bağlı olduğu düşünülmektedir. Çimento harçlarının 90 günlük dayanımlarında yeterli sonuç (44.80 MPa) verdiği görülmüştür. Ayrıca bu durumun eğilme sonrası basınç dayanımı testi yapılan numunelerde mikro çatlaklardan da (hidrasyon ürünlerinin boşlukları gecikmeli doldurmasına bağlı olarak) kaynaklanabileceği ilgili literatüre göre (Ün 2005, Öztürk 2009) düşünülmektedir.

### 3.3 Elektrokimyasal Ölçümlere Ait Bulgular

Bu aşamada farklı oranlarda tras katkısı içeren 50x100 mm donatı gömülü silindir çimento harç numunelerinin %3,5 NaCl çözeltisi içinde 120 gün boyunca belirli

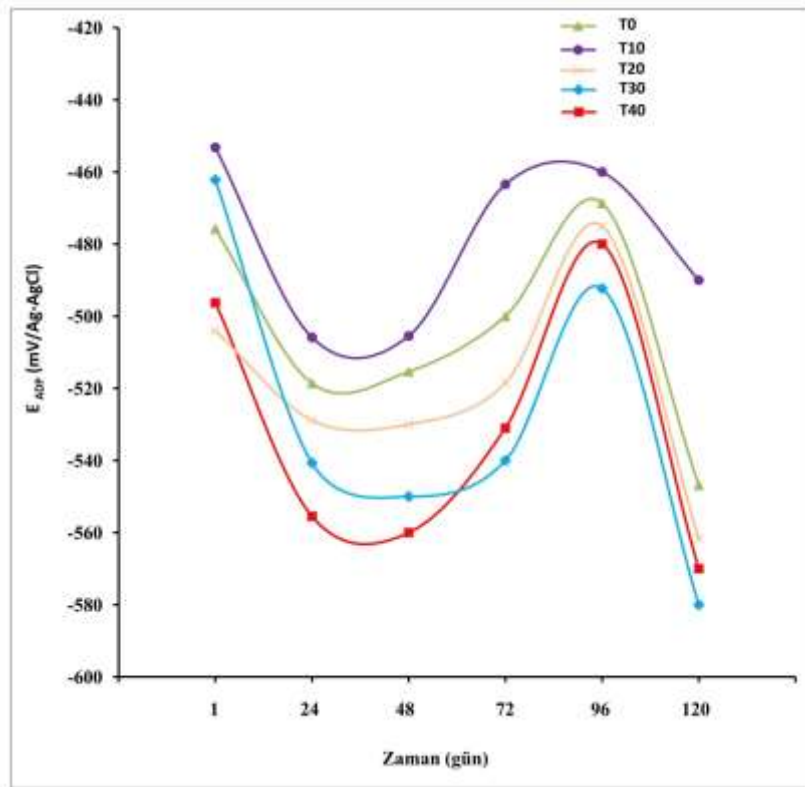
günlerde alınan elektrokimyasal ölçüm sonuçları değerlendirilmiştir.

### 3.3.1 Açık devre potansiyel ölçümleri

ASTM C 876-22b (2019)'a göre betonarme demirlerinin elektrot potansiyelleri  $-256 \text{ mV/Ag-AgCl}$  değerinden daha negatif olduğunda %90 'dan daha fazla olasılıkla korozyon görülebilir. Yarı hücre potansiyel yöntemi olarak bilinen bu yöntemde tras katkılı donatılı çimento harç numunelerinin 1., 24., 48., 72., 96. ve 120. günlerde ölçülen açık devre potansiyellerinin ( $E_{ADP}$ ) grafikleri Şekil 9'da verilmiştir. Şekil 9'a göre donatılı çimento harç numunelerinin tümünde açık devre potansiyellerinin ( $E_{ADP}$ ) standart sınır değerlerinden ( $-256 \text{ mV/Ag-AgCl}$ ) negatif değerler aldığı görülmüştür. Açık devre potansiyelleri ( $E_{ADP}$ ) 120 günde tras katkısız numunelerde

$-475,79 \text{ mV}$  ile  $-546,88$  arasında görülmüştür. Sırasıyla %10, %20, %30 ve %40 tras katkılı numunelerde ise;  $-453,20 \text{ mV}$  ile  $-492,18$  arasında,  $-504,04 \text{ mV}$  ile  $-561,75$  arasında,  $-462,21 \text{ mV}$  ile  $-580,16$  arasında ve  $-496,27 \text{ mV}$  ile  $-571,12$  arasında değişim göstermiştir.

Yüksek negatif potansiyel değerler, betondaki donatılar için daha fazla paslanma eğilimi anlamına gelir (Gurten vd. 2005). Düşük negatif potansiyel değerler ise harç içindeki çelik çubukların pasivasyonunun sürdürüldüğünün bir göstergesidir (Zhao *et al.* 2020). Bu durumda en düşük negatif potansiyel değer T40 numunelerde, en yüksek negatif potansiyel değer ise T10 ve sonrasında T0 referans numunelerde görülmüştür. Tüm katkılı numuneler T10 hariç tüm günlerde referans numunesinden daha negatif potansiyel değer göstermiştir.



Şekil 9. Donatılı çimento harç numunelerinin zamana bağlı ortalama açık devre potansiyelleri ( $E_{ADP}$ )

Yaklaşık 10 gün korozif çözeltide bekletilen çimentolu sistem içerisine gömülü donatıların elektrot potansiyellerinin  $-250$  ile  $-150 \text{ mV}$  aralığında olması demir yüzeyinde pasifliğin devam ettiğine işaret etmektedir. Korozif çözeltide bekletilen donatıların elektrot potansiyellerinin; 30 günden daha uzun sürede  $-400$  ile  $-600 \text{ mV}$  geniş bir saçılma aralığında; 90 gün ve sonrasında  $-450$  ile  $-550 \text{ mV}$  gibi daha dar kararlı aralıkta olduğu bilinmektedir (Pourbaix 1974, Yoon-Seok *et al.* 2006).

Korozif çözeltiler özellikle donatı gibi yumuşak çelik özelliğindeki malzemelerde zaman içerisinde genel korozyona göre daha tehlikeli olan lokalize korozyona neden olmaktadır. Bu durum korozyon akımında ve direncinde önemli değişim yapmadan yıkıcı bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Böyle bir durumun oluşma olasılığına karşın donatı korozyon davranışına sadece açık devre potansiyel ölçümleriyle karar vermemek gerekmektedir. Açık devre potansiyelleri donatı oksit tabakasının kalınlaşmasıyla pozitif değerler alır, incilmesiyle ise

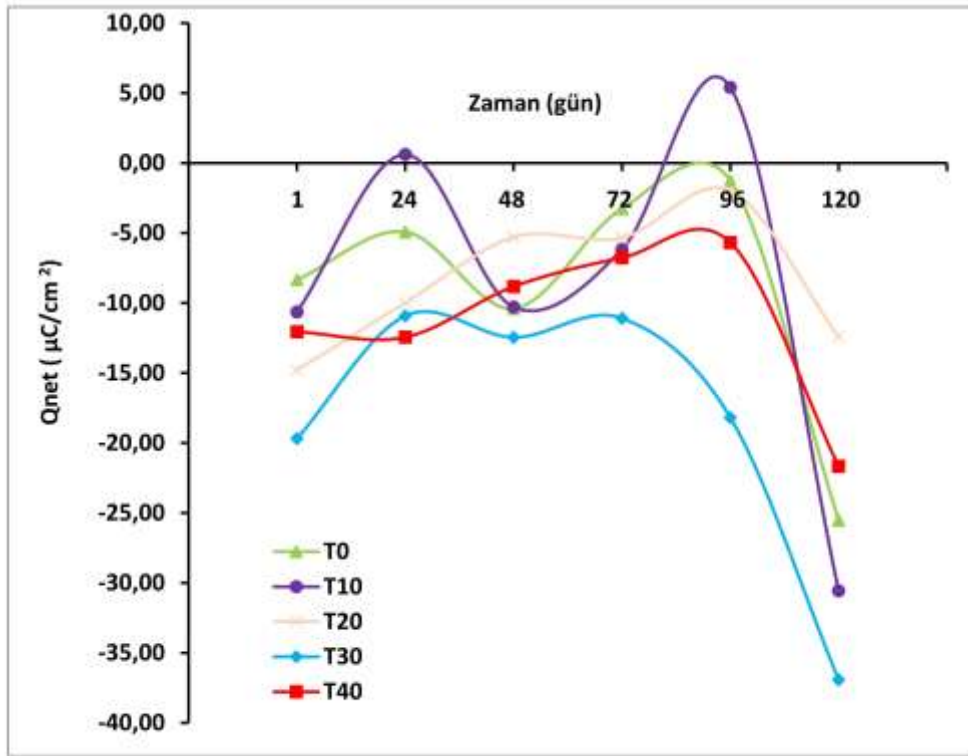


negatif değerler alır. Oluşan oksit tabakası ince ve dirençli olduğunda korozyon yavaşlamasına rağmen potansiyeller negatif değerlerde olabilir.

### 3.3.2 Açık devre potansiyelinde korozyon yükleri

Korozif ortamda 120 gün bekletilen tüm numunelerin açık devre potansiyellerinde elde edilmiş demir yüzey korozyon yükleri Şekil 10'da verilmiştir. Bekletme süreleri sonunda tüm numunelerde görülen katodik korozyon yükleri dikkat çekmekle birlikte bu yükler T30 ve T40 numunelerde daha büyük değerler almıştır. Bu

durum lokalize korozyon açısından riskli olan çimento harcı/donatı ara yüzeyinde oksijen indirgenmesinin hızlanmasına ve çimento harcının boşluk oranının artmasına işaret etmektedir. T10 numunelere ait katodik yüklerin daha küçük değerler alması, anodik yük değerleri de göstermesi lokalize korozyon açısından daha az riskli olabileceğine işaret etmektedir. Bununla birlikte T10 numunelerde harcın boşluk miktarının azalmasına bağlı dayanım artışları da bu durumu desteklemektedir. T0 referans numunelerde de aynı şekilde küçük katodik yükler görülmüştür ancak anodik yükler oluşmamıştır.



Şekil 10. Donatılı çimento harç numunelerinin zamana bağlı açık devre koşullarındaki ortalama korozyon yükleri

Şekil 10'a göre T0, T10, T20, T30 ve T40 numunelerinde tüm günlerde korozyon akım yoğunluğu sırasıyla; -1.26 ile -25.51, +0.62 ile -30.16, -1.98 ile -14.79, -10.92 ile -36.92, -5.68 ile -21.66  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$  aralığında görülmüştür.

## 4. Sonuçlar

Çalışmada kullanılan İslahiye-Hassa trasının içerisinde XRF analizi sonuçlarına göre; %51.45 oranında  $\text{SiO}_2$ , %15.76 oranında  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , %13.39 oranında  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , %8.84 oranında  $\text{CaO}$ , %4.31 oranında  $\text{MgO}$  ve %6.25 diğer bileşenlerin olduğu belirlenmiştir. Trasın özgül ağırlığı 2.90 ve özgül yüzey değeri  $3964 \text{ cm}^2/\text{g}$  olarak bulunmuştur.

Çimento harçlarının su ihtiyacının %40 tras katkılı numunede en fazla, katkısız numunede ise en az olduğu

görülmüştür. Çimento harçlarının 7, 28 günlük kür sonrasında en iyi basınç ve eğilme dayanımı sonucu sırasıyla tras katkısız numunelerde 28.72MPa , 34.60 MPa ve 6.15 MPa, 6.48 MPa olarak bulunmuştur. Harç numunelerin 90, 180 günlük kür sonrasında en iyi basınç ve eğilme dayanımı sonucu %10 tras katkılı numunelerde sırasıyla 46.96 MPa ve 50.85 MPa; 7.90 MPa ve 9.72 MPa olarak elde edilmiştir.

CEM I 42.5R tipi Portland çimentosunun 28 günlük basınç dayanımının 34.6 MPa olmasının nedeninin ise laboratuvar ortamının iklim şartlarına bağlı çimento hidratasyon reaksiyonlarının gecikmesi ve hidratasyon ürünlerinin boşlukları gecikmeli doldurmasına bağlı mikro çatlaklardan kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. Çimento harçlarının 90 günlük basınç dayanımlarının 44.80 MPa olduğu görülmüştür.

CSH, Ca(OH)<sub>2</sub> ve CaCO<sub>3</sub> içeriklerinin dehidrasyonuna ve dekarbonasyonuna bağlı olarak % 0, %10, %20, %30 ve %40 tras katkı karışımlarda kütle kayıpları sırasıyla; %9.4, %8.7, %13.0, %16.1 ve %19.3 olarak bulunmuştur. Bu durumda %10 tras katkı numunelerde sıcaklığa bağlı kütle değişimi en az olmuştur.

FT-IR spektrumlarına göre 3606-3643 cm<sup>-1</sup> ve 1391-1510 cm<sup>-1</sup> bölgesindeki pikler izlendiğinde %10 tras katkı numunede sırasıyla; harç içindeki Ca(OH)<sub>2</sub> içeriğinin azaldığı ve CaCO<sub>3</sub> içeriğinin arttığı görülmektedir.

Tüm donatılı harç numunelerde en düşük en ve en yüksek negatif açık devre potansiyel değerleri sırasıyla; %10 tras katkı numunelerde -453,20 mV ile -492,18 mV ve %40 tras katkı numunelerde -496,27 mV ile -571,12 mV arasında değişim göstermiştir. Donatıların daha az korozyona uğramasına işaret eden referans numunesine göre daha pozitif potansiyel değerleri %10 tras katkı numunelerde tüm günlerde görülmüştür.

Korozif çözeltilerde 120 gün bekletilen tüm numunelerde oluşan katodik korozyon yükleri %30 ve %40 tras katkı numunelerde daha büyük değerler almıştır. %10 tras katkı numunelerde katodik yüklerin daha küçük olması aynı zamanda anodik yük değerleri de göstermesi lokalize korozyon açısından daha güvenli olabileceğine işaret etmektedir.

Sonuç olarak %10'dan fazla tras katkı harçlarda tüm günlerdeki açık devre potansiyelinde korozyon yükleri sonuçları, metalik malzemelerin çevresindeki kimyasal sayısının artmasına bağlı korozyon tehlikesinin artışı ilkesine uygun davranış göstermiştir. Bu nedenle özellikle korozyon riski altında olan çimentolu sistemlerde çok yüksek miktarda tras kullanımının uygun olmadığı belirlenmiştir.

#### **Etik Standartlar Bildirgesi**

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

#### **Yazarlık Katkı Beyanı**

Yazar 1: Proje yönetimi, Metodoloji/Çalışma, deneysel tasarım, deney, Analiz ve yorumlama, Yazma/orijinal taslak, inceleme ve düzenleme, Görselleştirme, Araştırma, Kaynak sağlama.

Yazar 2: Deney, Yazma/inceleme ve düzenleme, Araştırma, Kaynak sağlama.

#### **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 Kilis 7 Aralık Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyon Başkanlığı tarafından Proje No: BAP 12171 adıyla desteklenmiştir.

#### **5. Kaynaklar**

Aguirre-Guerrero, A.M., Robayo-Salazar, R.F. and Mejía de Gutiérrez, R., 2021. Corrosion resistance of alkali activated binary reinforced concrete based on natural volcanic pozzolan exposed to chlorides. *Journal of Building Engineering*, **33**, 101593. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00091-3](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00091-3)

Akça, A.H. and Özyurt, N., 2018. Effects of re-curing on microstructure of concrete after high temperature exposure. *Construction and Building Materials*, **168**, 431-441. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.216>

Akyol, M., Kıymaç, K. ve Ekicibil, A., 2011. Geçiş metali Dy katkı Zn0.80-4yDyyOx bileşiklerinin yapısal ve manyetik özelliklerinin araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **26-2**, 173-182.

ASTM C618-19, 2019. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

ASTM C1872-18, 2018. Standard test method for thermogravimetric analysis of hydraulic cement. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

ASTM C187-16, 2016. Standard test method for amount of water required for normal consistency of hydraulic cement paste. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

ASTM C876-22b, 2022. Standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

ASTM C230/C230M-98E1. Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

Bilgin, T., 1969. Ceyhan doğusunda volkanik şekiller ile Hassa Leçesi. *İstanbul Üniversitesi Yayınları*. 1494, 5-26.

Bulatović, V., Melešev, M., Radeka, M., Radonjanin, V. and Lukić, I., 2017. Evaluation of sulfate resistance of

- concrete with recycled and natural aggregates. *Construction and Building Materials*, **152**, 614-631. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.161>
- Dorum, A., Koçak, Y., Yılmaz, B. ve Uçar, A., 2010. Uçucu kül katkılı çimento hidrasyonuna elektrokinetik özelliklerin etkisi. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi*. **25**, 3, 449-457.
- Du, H. and Tan, K.H., 2017. Properties of high volume glass powder concrete. *Cement and Concrete Composites*. **75**, 22-29. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.10.010>
- Erdoğan, T.Y., 2013. Beton. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Ankara.
- Fichet, R.O., Gauthier, C., Clamen, G. and Boch, P., 1998. Microstructural aspects in a polymer-modified cement. *Cement and Concrete Research*. **28**, 12, 1687-1693. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00153-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00153-7)
- Gurten AA., Erbil M. and Kayakırılmaz K., 2005. Effect of polyvinylpyrrolidone on the corrosion resistance of steel. *Cement and Concrete Composites*, **27**, 7-8, 802-808. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.03.002>
- Hager, I., 2013. Behaviour of cement concrete at high temperature, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, **61**, 1, 145-154. <https://doi.org/10.2478/bpasts-2013-0013>
- Özinan, İ.E., 2010. Silex ve tras katkılı harç ve beton karışımlarının mekanik ve fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, FBE, İstanbul, 87.
- Öztürk, A.U., 2009. Çimento harçlarının mikroyapı-basınç dayanımı ilişkisinin incelenmesi. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, FBE, İzmir, 254.
- Pan, S.C., Tseng, D.H, Lee, C.C. and Lee, C., 2003. Influence of the fineness of sewage sludge ash on the mortar properties. *Cement and Concrete Research*, **33**, 1749-1754. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00165-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00165-0)
- Puertas, F., Fernandez-Jimenez, A. and Blanco-Varela, M.T., 2004. Pore solution in alkali-activated slag cement pastes. Relation to the composition and structure of calcium silicate hydrate. *Cement and Concrete Research*, **34**, 1, 139-148. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00254-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00254-0)
- Puertas F. and Fernandez-Jimenez, A., 2003. Mineralogical and microstructural characterisation of alkali-activated fly ash/slag paste. *Cement and Concrete Composites*, **25**, 287-292. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00059-8](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00059-8)
- Pourbaix, M. 1974. Atlas of Electrochemical Equilibria. NACE, Houston, TX, 307.
- Sabır, B.B., Wild, and Bai, J., 2001. Metacaolin and calcined clays as pozzolan for concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, **23**, 441-454. [http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00092-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00092-5)
- Segovia, E.G., de Vera, G., Miró, M. Ramis, J. and M.A. Climent, 2021. Cement mortar cracking under accelerated steel corrosion test: A mechanical and electrochemical model. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **896**, 115222. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2021.115222>
- Sadowski, L., 2013. Methodology for assessing the probability of corrosion in concrete structures on the basis of half-cell potential and concrete resistivity measurements. *Hindawi Publishing Corporation, The Scientific World Journal*, 714501. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/71450>
- Shannag, M.J, 2000. High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume. *Cement and Concrete Composites*, **22**, 399-406. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00037-8](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00037-8)
- Singh, N. and Singh, S.P., 2016. Carbonation resistance and microstructural analysis of low and high volume fly ash self compacting concrete containing recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*. **127**, 828-842. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.067>
- Skripkiunas, G., Sasnauskas, V. Dauksys, M. and Palubinskaite, D., 2007. Peculiarities of hydration of cement paste with addition of hydrosodalite. *Materials Science*, **25**, 3, 627-635.
- Toprak, V., Rojay ve B., Heimann, A., 2002. *Hatay Grabeninin Neotektonik Evrimi ve Ölüdeniz Fay Kuşağı ile İlişkisi*, Proje No: YDABAG-391, Ankara.
- Tuncer, E., 2014. Gümüşhane yöresi volkanik kayaların puzolanik aktivitesinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi FBE, Gümüşhane, 89.
- TS EN 197-1, 2012. Çimento-Bölüm 1: Genel çimentolar: bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. *TSE.*, Ankara.



- TS 25/T1, 2011. Doğal puzolan (tras)-Çimento ve betonda kullanılan-Tarifler, gerekler ve uygunluk kriterleri. TSE, Ankara.
- Ubbriaco, P. and Calabrese, D., 1998. Solidification and stabilization of cement paste containing fly ash from municipal solid waste., *Thermochimica Acta*, 321, 143-150.  
<https://doi.org/10.3390/ma13010141>
- Ün H., 2005. Değişik tip çimentolarla hazırlanan harçların eğilme sonrası basınç dayanımı ile doğrudan basınç dayanımlarının karşılaştırılması. *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7, 97-109.
- Varas, M. J., Alvarez De Buergo, M. and Fort, R., 2005. Natural cement as the precursor of portland cement: methodology for its identification. *Cement and Concrete Research*, 35, 11, 2055-2065.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.045>
- Vu, D.D, Stroeven, P. and Bui, V.B, 2001. Strength and durability aspects of calcined caolin - blended portland cement mortar and concrete, *Cement and Concrete Composites*, 23, 471-478.  
[https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00091-3](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00091-3)
- Witkowski, H., Koniorczyk, M., 2018. New sampling method to improve the reliability of FTIR analysis for Self-Compacting Concrete. *Construction and Building Materials*, 172,196-203.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.216>
- Yoon-Seok, C., Jung-Gu K. and Kwang-Myong L., 2006. Corrosion behavior of steel bar embedded in fly ash concrete. *Corrosion Science*, 48, 1733-17.  
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.05.019>
- You, N., Shi, J. and Zhang, Y., 2020. Corrosion behaviour of low-carbon steel reinforcement in alkali-activatedslag-steel slag and Portland cement-based mortars under simulated marine environment. *Corrosion Science*, 175, 108874.  
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108874>
- Zhao, K., Liang, Y., Ji, T. Lu, Y. and Lin, X., 2020. Effect of activator types and concentration of CO<sub>2</sub> on the steel corrosion in the carbonated alkali-activated slag concrete. *Construction and Building Materials*, 262, 120044.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120044>



## Atık Malzeme Olarak Uçucu Kül ve Andezit Tozu İçeren PVA Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozitlerin Basınç Dayanımının Tahmininde Yanıt Yüzey Metodolojisinin Kullanılması

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 10.07.2023

Kabul/Accepted: 18.01.2024

Yayımlandı/Published: 27.02.2024

### Utilization of Response Surface Methodology for Predicting the Compressive Strength of PVA Fiber-Reinforced Cementitious Composites Containing Fly Ash and Andesite Powder as Waste Materials

Şükrü ÖZKAN<sup>\*</sup>, Hakan CEYLAN

*Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Isparta, Türkiye*

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

Bu çalışmada çimento esaslı kompozit üretiminde kullanılan atık andezit tozu (AAT) ikamesinin kompozit malzemenin dayanım değerlerine etkisi araştırılmış ve edilen veriler yanıt yüzey yöntemi (YYM) metoduyla modellenerek deneysel veriler ile uyumu incelenmiştir. Çimento esaslı karışımların üretilmesinde AAT, çimento ile ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 olmak üzere 6 farklı oranda ikame edilmiştir. Ayrıca basınç dayanımı üzerine kür süresinin etkisi 90 gün sonunda incelenmiştir. Çimento ve AAT ikame oranları YYM için ana girdi verilerini oluştururken 90 günlük basınç dayanımı değerleri yanıt verilerini oluşturmuştur. YYM ile yapılan basınç dayanımı tahmininden elde edilen veriler ile laboratuvar koşullarında elde edilen deneysel veriler kıyaslandığında aralarındaki uyumun %95'lik bir belirleme katsayısı ile iyi derecede olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca karışımlarda kullanılan %5 ikame oranı, diğer ikame oranları arasında daha yüksek dayanım değerleri elde edilmesini sağlamıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Andezit, Atık, Basınç dayanımı, Çimento esaslı kompozit, Yanıt yüzey metodu.

#### Abstract

In this study, the effect of waste andesite dust (WAD) substitution used in cementitious composite production on the strength values of composite material was investigated and the data were modeled by surface response methodology (RSM) and their compatibility with experimental data was analyzed. In the production of cementitious mixtures, WAD was substituted with cement at six different ratios as 5%, 10%, 15%, 20%, 25% and 30% by weight. In addition, the effect of curing times on compressive strength was investigated at the age of 90-days. While the cement and WAD replacement rates constituted the main input data for the RSM, the 90-days compressive strength values constituted the output data. When the data obtained from the compressive strength estimation conducted by RSM and the experimental data obtained under laboratory conditions were compared, it was determined that the compatibility between them was good with a 95% coefficient of determination. In addition, the 5% substitution rate used in the mixtures provided higher strength values among other substitution rates.

**Keywords** Andesite; Waste, Compressive strength, Cementitious composite, Response surface methodology

#### 1. Giriş

Hızlı ekonomik büyüme, nüfus artışı ve değişen iklim şartları; kaynak kıtlığı ile ilgili sorunların büyümesine yol açmaktadır. Bu nedenle, ulusların kendi aralarında yaptıkları kapsamlı küresel işbirliği çalışmaları, düşük karbonlu sürdürülebilir kalkınmayı desteklemek amacıyla gelişerek devam etmektedir. Ancak inşaat sektörünün kirletici bir sektör olarak dâhil olmadığı bir çalışma, karbon emisyonunu azaltma stratejilerini amacına ulaştırmada yetersiz bırakacaktır (Yazdani et al. 2021). Küresel çapta karbon emisyonunun artışında inşaat sektörünün payı oldukça fazladır (Yazdani et al. 2021). Bu

pay, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerdeki yapı malzemelerine olan benzeri görülmemiş talep karşısında her geçen gün daha da artmaktadır (Ghafourian et al. 2021). Çimento talebi inşaat sektörünün durumuyla doğrudan ilişkili olup, yatırımlar arttıkça çimento talebi de artmaktadır. Başta çimento olmak üzere yapı malzemelerinin üretimi ve tüketimi önemli miktarda karbondioksit (CO<sub>2</sub>) yaymaktadır (Mirmozaffari et al. 2020). Küresel ölçekte ise insanların neden olduğu tüm CO<sub>2</sub> emisyonlarının %8'i (yaklaşık 2.2 milyar ton) çimento üretiminden kaynaklanmaktadır. Betonla ilişkilendirilen CO<sub>2</sub> emisyonlarının da %60-80'i çimento

üretiminden gelmektedir (Ariöz et al. 2012). Bu nedenle sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde azaltmak için inşaat sektöründeki çevreye zararlı etkisi bilinen geleneksel malzeme üretimi yerine geri dönüştürülmüş (Adesina et al. 2021, Alyousef et al. 2021, Gao et al. 2022, Signorini et al. 2022, Valente et al. 2022) veya doğal kaynaklardan elde edilmiş (Davraz et al. 2018, Prošek et al. 2020, Danish et al. 2021, Quedou et al. 2021, Thapa et al. 2021) malzemelerin kullanıldığı çevre dostu üretim süreçlerini tercih etmek fayda sağlayacaktır (Shahmansouri et al. 2022). İnşaat sektöründen kaynaklı küresel ısınmanın etkilerini azaltma üzerine yapılan çalışma sayısı dikkate alındığında bu alanda çevreci ve sürdürülebilir malzemelerin kullanımına ilişkin yapılan araştırmaların sayısının daha az olduğu söylenebilir.

CaCO<sub>3</sub>'ten CO<sub>2</sub> türetilmesi yoluyla CaO oluşumu olarak adlandırılan kalsinasyon süreci, çimento üretiminden kaynaklı CO<sub>2</sub> emisyonunun yaklaşık yarısını oluştururken diğer yarısını üretim süreci boyunca kullanılan enerjiden kaynaklı dolaylı emisyonlar oluşturmaktadır (Yang et al. 2013, Ávalos-Rendón et al. 2018). Portland çimentosunun yapı endüstrisinde en fazla kullanılan bağlayıcı olmasında, dünya üzerinde her yıl yaklaşık 4 milyar ton Portland çimentosu üretilmesi etkili olmaktadır (Pacheco-Torgal et al. 2012). Önümüzdeki 40 yıl için yapılan tahminlere göre bu miktarın 6 milyar tonu bulacağı tahmin edilmektedir (Samimi et al. 2017). Bütün bu tüketim miktarları göz önüne alındığında, nitelikli alternatif hammadde kullanımıyla çimento kompozisyonu içinde bulunan klinker oranının düşürülmesinin, çevresel sorunların bir miktar azaltılmasına ve inşaat sektörünün daha sürdürülebilir duruma getirilmesine yardımcı olması beklenmektedir. Portland çimentosu klinkerinin oranının azaltılmasında; uçucu kül (Deng et al. 2022), silis dumanı (SF) (Ghavami et al. 2021), öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GGBS) (Amani et al. 2021), pirinç kabuğu külü (Zhang et al. 2020) gibi puzolanik özelliğe sahip tamamlayıcı malzemeler kullanılarak betondan kaynaklı CO<sub>2</sub>'yi ve malzeme maliyetini azaltmak mümkün olabilmektedir. Andezit tozu daha önceki yapılan çalışmalarda puzolanik özellik gösteren bir atık malzeme olduğu belirlenmiştir (Davraz et al. 2018). Puzolanik özellikteki mineral katkılar, reolojik özelliklerde iyileşmeye ve dayanım gelişmesine katkıda bulunmakla birlikte çimento esaslı malzemelerin servis ömrü boyunca maruz kalacağı dış etkenlere karşı dayanıklı olmasını da desteklemektedir (Quedou et al. 2021). Davraz vd., AAT'nin beton üretiminde bağlayıcı bir malzeme olarak kullanılabilirliğini dolayısıyla inşaat endüstrisi için değerlendirilebilecek bir atık malzeme özelliği taşıdığını

belirtmiştir (Davraz et al. 2018). Bu sayede AAT'nin atık olarak değerlendirilebilmesi ile malzeme üretim maliyeti yönünden tasarruf sağlanabileceği gibi ekolojik, temiz ve atıkların bertaraf edildiği bir çevreye de katkı sağlanabilecektir. AAT'nin çeşitli malzeme türlerinde kullanımı üzerine literatür araştırması yapıldığında AAT'nin çimento (Hamidi et al. 2013), geleneksel beton (Sogancioglu et al. 2013; Labbaci et al. 2017; Davraz et al. 2018; Kawabata et al. 2019), geopolimer kompozit (Çelikten 2021) üretimi gibi çeşitli malzeme türlerinde kullanıldığı ve bu çalışmaların genellikle malzemelerin mekanik özellikleri üzerine yoğunlaştığı görülmüştür. Literatürde AAT üzerine yapılan çalışmalardan da anlaşılacağı üzere, AAT'nin çimento esaslı kompozit üretiminde kullanımına ilişkin herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. AAT'nin çimento esaslı kompozitlerin üretimi için geri kazanılma imkânı ve AAT ikameli çimento esaslı kompozitlerin çeşitli özelliklerinin araştırılması hala çalışma bekleyen konular arasındadır.

Tasarım kodlarının çoğunda basınç dayanımı başta olmak üzere diğer mekanik özelliklerin laboratuvarda araştırılması zaman ve maliyet gerektirmektedir. Şimdiye kadar birçok çalışmada beton özellikleri ile ilgili tahmin yöntemleri geliştirmeye odaklanılmasına rağmen her beton türü için bu yöntemleri kullanmak her zaman doğru sonuçlar vermemektedir. Regresyona dayalı tahmin yöntemlerinin kullanılması mevcut yöntemlerin esasını oluşturmaktadır. Daha güvenilir ve daha doğru sonuçlar elde etmek için yanıt yüzey metodu (YYM) gibi yöntemlerin kullanılması ile mühendislik dâhil birçok alanda umut verici gelişmeler kaydedilebilmektedir (Zeyad et al. 2020, Abdulkadir et al. 2021, Adamu et al. 2021, Ray et al. 2021). YYM, az sayıda testle bağımsız ve bağımlı yanıtlar arasındaki matematiksel bağlantıyı incelemek için kullanılan güçlü bir sayısal parametre aracıdır. Bir veya daha fazla yanıtın birçok bağımsız değişkenden etkilendiği durumlarda bu yöntem yararlıdır (Abdulkadir et al. 2021, Kalivaradhan et al. 2022). Birçok araştırmacı beton özelliklerini modellemekte kapsamlı olarak farklı yöntemleri kullansa da her beton türü için optimum bir yöntemin varlığından söz etmek doğru olmaz. Sonuç olarak malzeme özelliklerini tahmin etmede daha yenilikçi ve verimli tekniklerin geliştirilmesi çabaları, bilim dünyasının geleceğinde var olmayı sürdürecektir.

AAT ikameli çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımını tahmin etmek ve bu sonuçları laboratuvar ortamında elde edilen gerçek verilerle karşılaştırmak bu çalışmanın amacını oluşturmaktadır. Bu amaç doğrultusunda basınç dayanımlarını yüksek doğrulukla

tahmin etmek için bir yanıt yüzey yöntemi modeli geliştirilmiştir. Deneysel çalışmalar yapılarak elde edilen veriler, model geliştirmekte kullanılmıştır. Üretilen farklı AAT ikame oranlarına ve farklı ağırlıktaki bileşen oranlarına sahip çimento esaslı kompozit karışımların basınç dayanımı testleri 90 günlük kür süresi sonunda gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, altı farklı karışım için üretilen numunelerin deneysel çalışmalar sonucu elde edilen basınç dayanımı değerlerine ait bir veri seti tabanı oluşturulmuştur. Ayrıca parametrik ve duyarlık analizleri, basınç dayanımlarını tahmin etmekte kullanılan farklı girdi değişkenlerinin etkinliğini sağlamak amacıyla yapılmıştır. Bu çalışmanın bulguları, inşaat sektöründe CO<sub>2</sub> emisyonunun azaltılmasına yardımcı olabilecek, geleneksel betona alternatif olarak çevre dostu bir betonun türünün geliştirilmesine katkıda bulunabilecektir.

Son zamanlarda, YYM modelleme tekniği, sorunları gerçekçi bir şekilde değerlendirme ve çözme aracı olarak araştırmacılar arasında giderek daha popüler hale gelmiştir. YYM, matematiksel ve istatistiksel yaklaşımı kullanan bir deney tasarımı yöntemidir. Bağımsız değişkenler olarak adlandırılan girdi parametreleri arasındaki etkileşimin yanıt (bağımlı değişken) olarak adlandırılan sonuç parametresi üzerindeki etkisinin tasarlanmasını ve ardından belirlenmesini gerektirir (Mohammed et al. 2011). Çimento esaslı karışım özelliklerinin modellenmesi ve optimizasyonu için YYM kullanımı yeni değildir. Lye vd. (Lye et al. ), karbon fiber donatılı polimer (KFDP) katkılı Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitlerin (ECC) bağ davranışını modellemek ve optimize etmek için YYM'yi kullanmıştır. Çalışmada, bu modellere dayalı olarak, KFDP güçlendirmenin en iyi çözümünün %2 PVA fiber ve 5 kat KFDP kullanmak olduğu tespit edilmiştir. Alyamac vd. (Alyamac et al. 2017) çalışmalarında YYM kullanarak maksimum miktarda mermer tozu içeren eko-verimli, çevre dostu ve işlenebilir kendiliğinden yerleşen bir beton geliştirmeyi amaçlamışlar. Bu doğrultuda, mümkün olan maksimum miktarda mermer tozu ile eko-verimli bir kendiliğinden yerleşen karışım tasarımı elde etmek için çok amaçlı bir optimizasyon tekniği kullanmışlardır. Sonuç olarak, su-çimento oranı 0.55'ten düşük ve mermer tozu-çimento oranı 0.6'ya kadar olan eko-verimli bir kendiliğinden yerleşen beton elde edilmiştir. Zhou vd. (Zhou et al. 2022) desülfürizasyon-alçı esaslı çimento esaslı kompozit malzemeler üzerinde yaptıkları çalışmalarında YYM'nun Box-Behnken tasarımına dayanarak, çeşitli değişkenlerin etkilerini ve değişkenler arasındaki etkileşimleri bu kompozitlerin mekanik özellikleri ve su direnci üzerindeki etkileşimleri değerlendirmek için regresyon modelleri

oluşturmuşlardır. Sonuçlar, desülfürizasyon- alçı bazlı çimento esaslı kompozit malzemelerin mukavemetinin ve su direncinin, tek faktörlerin yanı sıra faktör çiftlerinin etkileşimlerinden etkilendiğini göstermiştir. Adamu vd. (Adamu et al. 2021) plastik atıkların (PA) ve grafen nanoplateletlerin (GNP) yüksek hacimli uçucu kül (YHUK) betonunun özellikleri üzerindeki etkisi araştırdıkları çalışmalarında, YYM'yi deney, modelleme ve optimizasyon tasarlamak için kullanmışlardır. Çalışmada geliştirilen modellerin, yüksek düzeyde korelasyon ile anlamlı olduğu bulunmuştur. Ayrıca, optimize edilmiş karışım, kaba agreganın %15.3'ü PA kullanılarak, çimentonun %6.07'si YHUK kullanılarak ve GNP'nin %0.22 oranında eklenmesiyle elde edilmiş ve deneysel olarak %5'ten daha az hatayla doğrulanmıştır.

## **2. Materyal ve metod**

### **2.1 Materyal**

Çalışma kapsamında Isparta (Türkiye) Göltaş Çimento Fabrikası tarafından üretilen ve TS EN 197-1 (TS EN 197-1 2012) standart gereklerine uygun olan CEM I 42.5R tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun özgül ağırlığı 3.06 g/cm<sup>3</sup>, Blaine özgül yüzey alanı 3250 cm<sup>2</sup>/g'dır. Çimentoya ait kimyasal ve fiziksel özellikler Çizelge 1'de sunulmuştur. ASTM C 618 standardına göre uçucu küller F ve C-sınıflarına ayrılırlar (ASTM C618-19 2019). Bu çalışmada kullanılmak üzere F-sınıfı uçucu kül, Sugözü (Adana ili Türkiye) Termik santralinden temin edilmiştir. Sugözü uçucu külünün özgül ağırlığı 2.31 g/cm<sup>3</sup>, Blaine özgül yüzeyi ise 2900 cm<sup>2</sup>/g'dır. Numunelerin üretimde agrega olarak ortalama tane büyüklüğü 200 µm, özgül ağırlığı 2.60 g/cm<sup>3</sup> ve su emme kapasitesi % 0.3 olan ince kuvars kumu kullanılmıştır. Uçucu küle, kuvars kumuna ve AAT ait kimyasal özellikler Çizelge 2'de verilmiştir.

AAT, Türkiye'deki Isparta ilinin andezit işleme tesislerinden temin edilerek deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Andezit taş blokların kesim ve diğer işlemleri sırasında çok fazla atık oluşmaktadır. Andezit taşı kesilirken su ile kesim işlemi yapıldığı için oluşan atıklar çamur şeklinde havuzlarda toplanmaktadır. Güneş ve hava koşullarının etkisiyle bu atıklar zamanla suyunu kaybetmekte ve iş makineleri yardımıyla kazılarak üretim alanı dışında depolanmaktadır (Şekil 1). Üretim sürecinin devam etmesiyle giderek artan bu atıklar toz halinde olduğu için çeşitli şekillerde çevreye zarar vermeye birlikte zamanla miktarın artmasıyla büyüyen atık kütleleri görüntü kirliliğine de sebebiyet vermektedir. Bu atıkların çevreye zarar vermeden üretime kazandırılması atık yönetim bakımından büyük önem taşımaktadır.

**Çizelge 1.** Deneysel çalışmalarda kullanılan Portland çimentosunun özellikleri

Portland çimentosunun kimyasal kompozisyonu		TS EN 197-1	Portland çimentosu fiziksel özellikleri		TS EN 197-1
Bileşenler	(%)				
CaO	63.65		Hacim genişmesi (mm)	0.3	<10
SiO <sub>2</sub>	20.21		İncelik (90 µ, %)	0.10	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.11		İncelik (200 µ, %)	1.10	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.44		Blaine yüzey alanı (cm <sup>2</sup> /g)	3340	>160
MgO	1.61	<5	Priz başlangıç süresi (dk.)	144	>60
SO <sub>3</sub>	2.75	<3.5	Priz bitiş süresi (dk.)	240	<600
Cl <sup>-</sup>	0.004	<0.10			
K <sub>2</sub> O	0.48		Özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	3.06	
Na <sub>2</sub> O	0.12				
Serbest CaO	0.25				
Kızdırma kaybı	3.13	<5			
Çözünmeyen kalıntı	0.50	<5			
<b>Portland çimentosu mekanik özellikleri (MPa)</b>					<b>TS EN 197-1</b>
7 günlük eğilme dayanımı (MPa)		5.8	7 günlük basınç dayanımı (MPa)		39.3
28 günlük eğilme dayanımı (MPa)		7.2	28 günlük basınç dayanımı (MPa)		50.6
					>42.5

**Çizelge 2.** Uçucu kül, kuvars kumu ve AAT'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri

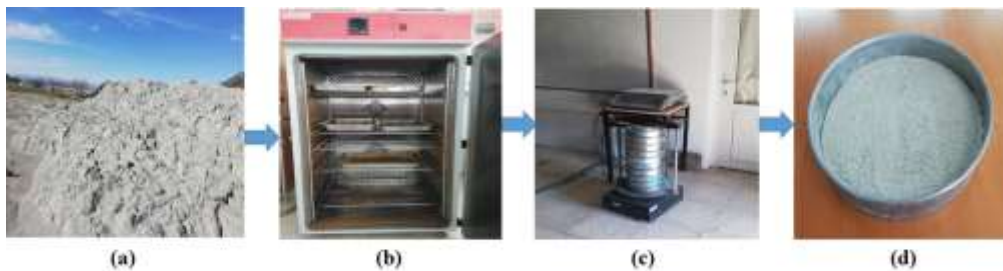
Kimyasal kompozisyon (%)	Uçucu kül	Kuvars kumu	AAT	TS EN 450-1
CaO	1.16	0.02	4.52	
SiO <sub>2</sub>	61.72	99.79	56.33	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.13	0.06	18.20	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.46	0.02	5.61	
MgO	1.80	0.01	1.61	≤4.0
SO <sub>3</sub>	0.22	-	0.16	≤3.0
K <sub>2</sub> O	1.88	0.01	6.51	
Na <sub>2</sub> O (Alkalies)	2.57	0.02	4.69	
Serbest CaO	0.071	-	-	≤1.0
Cl <sup>-</sup>	0.015	-	-	≤0.10
Kızdırma kaybı	2.99	0.07	2.37	≤5.0
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	89.31	99.87	85.07	≥70
28 günlük aktivite indeksi (%)	81.9		76.5	≥75
İncelik, ≥45µm (%)	16.4		14.03	≤40

Bu amaçla çalışmada üretim tesislerinden temin edilen AAT, nemini kaybetmesi için 105 °C etüvde 24 saat boyunca kurutulmuştur. Kabaca yabancı maddelerden arıtılmış AAT, daha sonra elek boyutu 75 µm olan elekten

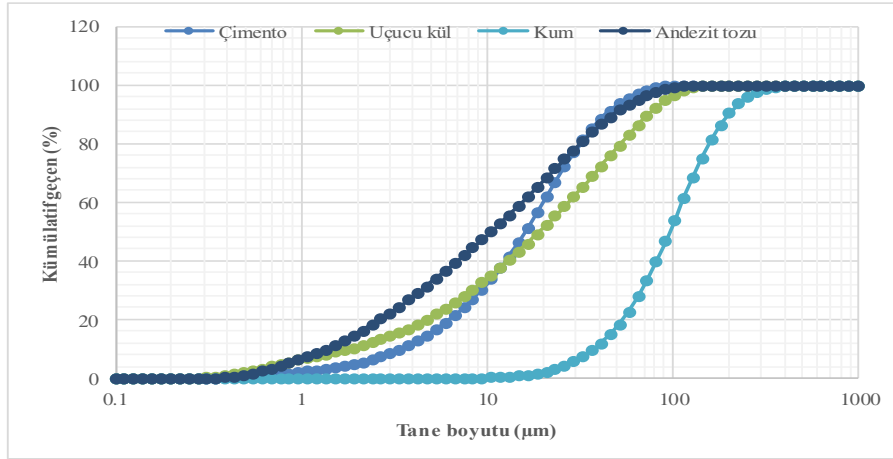
BS EN 933-1:201(BS EN 933-1:2012. 2012) standardına göre elenmiştir. 75 µm boyutlu elekten geçen malzemeler karışımlarda çimento ile belirlenen oranlarda ikame edilerek kullanılmıştır. AAT'nin çimento esaslı malzemelerde ikame malzemesi olarak kullanımı için yapılan işlemleri gösteren süreç Şekil 2'de gösterilmiştir. Çimento esaslı kompozitlerin üretimde kullanılan toz bileşenlerin boyut dağılımını belirlemek için elek analizi yapılmıştır. Analiz sonucu oluşan dağılım eğrileri Şekil 3'de sunulmuştur.



**Şekil 1.** Üretim süreci sonunda atık olarak ortaya çıkan AAT'nin doğada oluşturduğu durum



**Şekil 2.** AAT'nin çimento esaslı kompozit üretimine kazandırılması süreci, (a) Doğada zamanla oluşan atık kütle, (b) Nemli durumdaki AAT'nin etüvde kurutulması, (c) AAT'nin elekler yardımıyla elenmesi, (d) 75 µm elekten geçen AAT'nin deneysel çalışmalara hazır hale gelmiş hali



Şekil 3. Çimento esaslı kompozit üretiminde kullanılan toz bileşenlerin tane boyut dağılımları



Şekil 4. Çalışmada kullanılan PVA lifleri

Çalışmada ECC'ler için özel olarak geliştirilen PVA lifleri kullanılmıştır. Bu liflerin özelliği, yüzeyinin ağırlıkça %1.2 oranında özel bir hidrofobik (su itici) yağ ile kaplı olmasıdır. Çalışmada kullanılan PVA lifine ait fiziksel, mekanik ve geometrik özellikler ile ilgili veriler Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 3. Çalışmada kullanılan liflere ait fiziksel, mekanik ve geometrik bazı özellikler

Lif türü	Çekme dayanımı (MPa)	Çap (µm)	Uzunluk (mm)	Elastik modül (GPa)	Uzama (%)	Özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )
PVA	1620	39	8	42.8	6.0	1.3

### 2.1 Numunelerin hazırlanması ve karıştırma işlemi

Çalışma kapsamında PVA lif miktarı sabit olmak üzere (Hacimce %2) yapılan deneme karışımları neticesinde en uygun oranlar; su/toplam bağlayıcı malzeme(S/BM) oranı 0.26 ve uçucu kül/çimento oranları 1.20 ve kum/bağlayıcı madde (K/BM) oranı 0.36 olarak hesaplanmıştır. Üretilen referans ve çimento esaslı karışımlarda kullanılan PVA lif miktarı, mikro-mekanik tabanlı tasarım sonucu geliştirilen ve literatürde M45 olarak bilinen (Li 2002) karışım tasarımına uygun olarak ağırlıkça 26 kg/m<sup>3</sup> (hacimce %2) olarak belirlenmiştir.

Çalışmada AAT, çimentonun ikamesi olarak ağırlıkça %5, 10, 15, 20, 25 ve 30 oranlarında kullanılarak deneysel çalışmalar yapılmıştır. Hazırlanan AAT ikameli karışımların bir sonraki bölümde anlatıldığı üzere 90 günlük basınç dayanımlarının test edilebilmesi için her bir karışım için altı adet 50 mm<sup>3</sup>lük küp numuneler hazırlanmıştır. AAT ikameli çimento esaslı kompozitlerin üretilmesi için hazırlanan karışım oranları Çizelge 4'de sunulmuştur.

20 litre kapasiteli planet tipi mikserde toz karışım bileşenleri (çimento, uçucu kül ve kuvars kumu) düşük devirde yaklaşık 3 dakika kuru olarak karıştırılmıştır. Aynı bir kaptaki su ve SA karıştırılarak SA'nın reaksiyon süresi başlatılmıştır. Daha sonra bu sıvı karışım kuru karışıma eklenerek yaklaşık 9 dakikalık bir karıştırma işlemi uygulanmıştır. SA'nın harçları belirlenen hedef yayılma seviyesine getirdiği görüldükten sonra PVA lifler karışıma dâhil edilmiştir. Homojen bir lif dağılımı elde edebilmek amacıyla uygulanan bu ortalama 12 dakikalık karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra hazırlanan harç karışımlar plastik kalıplara yerleştirilmiştir. Yüzeyleri düzeltilen numunelerin nem kaybı yaşamaması için üzeri polietilen levhalarla kapatılmış ve 24 saat boyunca oda sıcaklığında muhafaza edilmiştir. Daha sonra, sertleşen harç

numuneler kalıplardan çıkarıldıktan sonra  $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 90 gün boyunca kirece doygun suda kürlenmiştir. Tüm çimento esaslı karışımlarda akışkanlaştırıcı miktarını ayarlamak suretiyle işlenebilirlik özelliği iyileştirilmeye çalışılmıştır. Bunun için lifsiz karışımlar için  $40 \pm 5 \text{ cm}$ , lifli karışımlar için  $20 \pm 5 \text{ cm}$  olan hedef yayılma miktarı elde edilinceye kadar akışkanlaştırıcı karışımlara hassas bir şekilde ilave edilmeye devam edilmiştir.

## 2.3 Deneysel çalışma yöntemleri

### 2.3.1 Basınç dayanımı

Üretilen çimento esaslı kompozit örneklerin basınç dayanımı deneyleri 2000 kN kapasiteli U test (UTC-4231) basınç test cihazında 2.4 kN/s yükleme hızı alınarak, ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-20b 2020) standardına göre 50x50x50 mm'lik küp örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 4.** AAT ikemeli çimento esaslı malzeme karışım miktarları (Ağırlıkça,  $\text{kg}/\text{m}^3$ )

Karışım Kodu	Su/BM <sup>1</sup>			Çimento	AAT	UK	Kum	Su	PVA fiber	SA <sup>2</sup>
	(Çimento + UK <sup>3</sup> +AAT)	Kum/BM (Çimento + UK+AAT)	UK/Çimento							
AAT0 (Ref.)	0.26	0.36	1.20	571	-	685	455	331	26	4.90
AAT5	0.26	0.36	1.26	540	28	682	455	331	26	4.95
AAT10	0.26	0.36	1.33	509	51	679	453	329	26	4.95
AAT15	0.26	0.36	1.41	479	85	677	451	328	26	4.95
AAT20	0.26	0.36	1.50	449	112	674	449	327	26	4.95
AAT25	0.26	0.36	1.60	420	140	671	448	326	26	4.95
AAT30	0.26	0.36	1.71	390	167	669	446	324	26	4.95

<sup>1</sup>BM: Bağlayıcı malzeme, <sup>2</sup>SA: Süperakışkanlaştırıcı, <sup>3</sup>UK: Uçucu kül

### 2.3.2 YYM modelinin geliştirilmesi

Yanıt yüzeyi yöntemi, parametreler ve yanıtlar arasındaki ilişkiyi belirlemek için etkin bir araç olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Bundan başka, geliştirilen model, bireysel parametrelerin etkilerini ve parametrelerin her bir yanıt değişkeni üzerindeki etkileşimini değerlendirmek için ayrıca kullanılabilir. YYM analizi, deneysel serilerin tasarlanması ve deneysel sonuçların yanıtlar şeklinde elde edilmesi, ardından sayısal yanıt yüzey modelinin oluşturulması ve doğruluğunun onaylanması ve son olarak yanıtları tatmin etmek için değişkenlerin optimize edilmesinden oluşur (Alyamac *et al.* 2017). Bu çalışmada, yanıt değişkeni için ikinci dereceden bir model oluşturmak için deneysel verileri içeren bir YYM modeli kullanılmıştır. YYM'nin, yanıt değişkeni için modeli tahmin etme verimliliği, az sayıda deneysel veri noktasıyla sağlam bir model oluşturma, faktörler arasındaki etkileşim derecesini değerlendirme ve optimal yanıt bulma gibi çeşitli avantajları vardır (R. H.Myers 2016).

Bu çalışmada, Design-Expert Stat-Ease-12 yazılımı, çimento esaslı kompozitler için deneysel tasarım, istatistiksel analiz, matematiksel modelleme ve süreç değişkenlerinin optimizasyonunda kullanılmıştır. Çizelge 5'te görüldüğü üzere iki farklı giriş parametresi olarak

çimento ve AAT oranları, yanıt yüzey yönteminin optimizasyonu için başlangıçta belirlenmiştir. Bu değişkenlerin seçilmesinin nedeni, Çimento ve AAT oranının çimento esaslı kompozitlerin dayanımı üzerinde en etkili parametreler olmasıdır. Ayrıca, giriş faktörleri olan çimento ve AAT miktarları ile tepki (90 günlük basınç dayanımı) arasındaki ilişki ve etkileşim tek yönlü varyans analizi (One-way analysis of variance-ANOVA) kullanılarak elde edilmiştir.

**Çizelge 5.** Yanıt yüzey yönteminin optimizasyonunda kullanılan giriş parametreleri ve seviyeleri

Parametreler	Sembol	Birim	Seviyeler ve kodları		
			-1	0	1
Çimento	A	$\text{Kg}/\text{m}^3$	0	390	571
AAT	B	$\text{Kg}/\text{m}^3$	0	83.5	167

## 3. Bulgular ve Tartışma

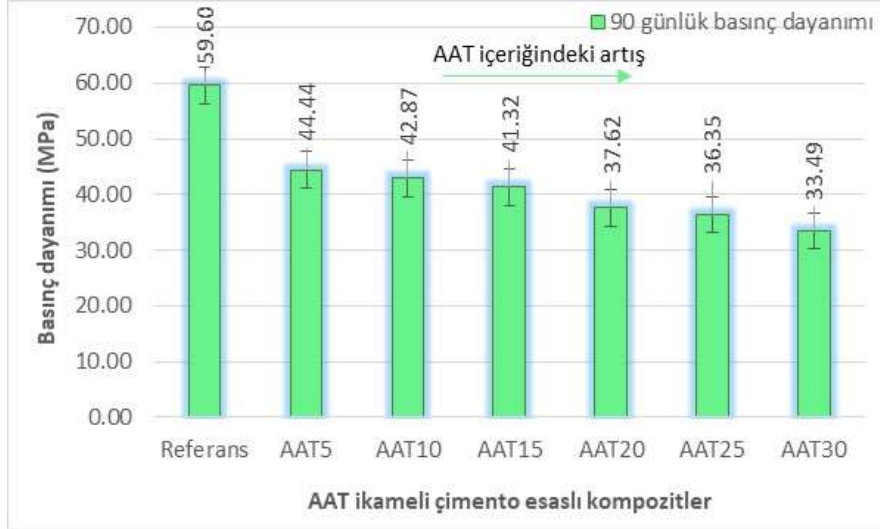
### 3.1 Laboratuvar sonuçları

Şekil 5'de çimento ağırlığının ağırlıkça %5, 10, 15, 20, 25 ve 30 oranlarında azaltılıp AAT ile ikamesi ile elde edilen çimento esaslı kompozit karışımlarının referans örneklerle beraber 90 günlük basınç dayanımı sonuçları gösterilmiştir. Karışımlardaki AAT ikame oranı arttıkça basınç dayanımı değerlerinin azaldığı deneysel çalışmalar



sonucunda elde edilen verilerden anlaşılmaktadır. Basınç dayanımı deneyi sonucunda elde edilen AAT ikameli çimento esaslı karışımların basınç dayanımı değerlerinin 90 günlük kür süresi sonunda referans örnekten daha düşük olduğu görülmüştür. 90 günlük örneklerde, AAT5, AAT10, AAT15, AAT20, AAT25 ve AAT30 örnekleri için referans örneğe göre basınç dayanımı değişimleri

sırasıyla %25.44, %28.07, %30.67, %36.89, %39.01 ve %43.81 olarak elde edilmiştir. Elde edilen verilerden optimum AAT ikame oranının %5 olduğu görülmektedir. Karışımlarda kullanılan uygun ikame oranını %5 olarak kabul ettiğimizde ve karışımları bu oranları dikkate alarak hazırladığımızda 1 m<sup>3</sup> karışımda çimentodan yaklaşık olarak 31 kg tasarruf edebileceğimizi hesaplamış oluruz.



Şekil 5. AAT ikameli çimento esaslı kompozitlerin 90 günlük basınç dayanımları

90 günlük örnekler için basınç dayanımı değerleri; kür süresinin ilerlemesi, hidratlanmamış çimento bileşiklerinin sürekli hidrasyonunun ve bağlayıcı reaksiyonlarından kaynaklı ikincil C-S-H oluşumunun etkisiyle 33.49-44.44 MPa arasında değişiklik göstermiştir (Shannag *et al.* 1995; Mindess 2003). Andezit tozu ikame oranının artması ile düşük dayanım elde edilmesi, andezit tozunun puzolanik özelliğinin olmasına rağmen aktif CaO içeriğinin Portland çimentosu ve uçucu küle göre oldukça düşük olması ve bu nedenle bağlayıcılık özelliğinin yetersiz kalması ile ilişkilendirmiştir (Özkan and Ceylan 2022)(Bkz. Çizelge 1 ve Çizelge 2). Ayrıca, 90 günlük basınç dayanımları üzerine, çimento esaslı karışımlarda yüksek miktarda bulunan uçucu külün puzolanik reaksiyonunun olumlu etkisi olmaktadır. Uçucu kül yüksek bir puzolanik aktiviteye sahiptir. Bu nedenle çimentonun hidrasyon işlemi sırasında Ca(OH)<sub>2</sub> ile kolayca reaksiyona girerek çimento özelliği taşıyan bileşiklere dönüşebilmektedir. Sonuç olarak, uçucu kül ile Portland çimentosu karıştırılarak uzun süreli dayanım olumlu yönde etkilenmektedir (Kocak *et al.* 2014).

### 3.2 YYM ile istatistiksel modelleme

Modelleme aşamasında kuadratik (ikinci dereceden) modelleme kullanılarak deney tasarım planındaki

verilere uygun modelleme yapılmıştır. Kodlanmış faktörler açısından denklem, her bir faktörün belirli seviyeleri için yanıt hakkında tahminlerde bulunmak için kullanılabilir. Varsayılan olarak, faktörlerin yüksek düzeyleri +1 ve düşük düzeyler -1 olarak kodlanır. Kodlanmış denklem, faktör katsayılarını karşılaştırarak faktörlerin göreceli etkisini belirlemek için kullanılır. Kodlanmış faktörler bakımından elde edilen nihai model, Denklem 1'de verilmiştir.

$$BD = 39.09 + 14.02 * A - 0.3059 * B + 0.7945 * AB + 5.03 * A^2 + 1.32 * B^2 \quad (1)$$

Burada; BD: Basınç dayanımı (MPa), A: çimento miktarı (kg/m<sup>3</sup>), B: AAT miktarı (kg/m<sup>3</sup>)'dür.

#### 3.2.1 Çimento ve AAT dozajı girdilerine karşı basınç dayanımı tepkisi

Faktörler arasındaki etkileşim ve her parametrenin yanıt üzerindeki etkisi ANOVA kullanılarak analiz edilmiştir. Merkezi kompozit dizaynı-Yanıt yüzey yöntemine (MKD-YYM) dayanan bu çalışmada, bağımsız değişkenlerin (çimento ve AAT dozajı) basınç dayanımı yanıt değişkenine etkileri araştırılmış ve AAT ikameli çimento esaslı karışımlarının basınç dayanımının optimizasyonu ve tahmini gerçekleştirilmiştir. YYM yazılımı ile regresyon



analizinden sonra, AAT ikameli çimento esaslı karışımların 90 günlük basınç dayanımlarını tahmin etmek için uygun bir ikinci dereceden polinom modeli üretilmiştir. Bu çalışma için, ekstra terimlerin anlamlı olduğu ve yazılım tarafından diğer adların kullanılmadığı en yüksek mertebeden polinom temel alınarak model seçilmiştir. Tepki yüzeyi ikinci dereceden basınç dayanımı modeli için ANOVA sonuçları Çizelge 6'da gösterilmiştir.

**Çizelge 6.** AAT ikameli karışımların basınç dayanımı (yanıt) için ANOVA değerleri

Kaynak	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Ortalama kareler	F-değeri	p-değeri	
Model	1755.05	5	351.01	25.86	<0,0001	Anlamlı
A-Çimento	1572.35	1	1572.35	115.83	<0,0001	
B-AAT	0.7486	1	0.7486	0.0551	0.8211	
AB	2.52	1	2.52	0.1860	0.6792	
A <sup>2</sup>	176.28	1	176.28	12.99	0.0087	
B <sup>2</sup>	12.19	1	12.19	0.8982	0.3748	
Artık değer	95.02	7	13.57			
Uyum eksikliği	81.19	3	27.06	7.83	0.0377	Anlamlı
Hata	13.83	4	3.46			
<b>Toplam</b>	<b>1850.07</b>	<b>12</b>				

AAT ikameli çimento esaslı karışımların basınç dayanımı tepkisi, <0.0001'den küçük anlamlı bir p değeri ve 25.86 olarak daha yüksek bir F değeri sergilemiştir. Model için p-değerinin < 0.05'ten küçük olması modelin veya model terimlerinin anlamlı olduğunu, 0.10'dan büyük değerler ise model terimlerinin anlamlı olmadığını göstermektedir. Bu durumda A ve A<sup>2</sup>, önemli model terimleridir. Modelin anlamlılığını değerlendirmek için %95 güven aralığı kullanılmıştır. Basınç dayanımı modeli göz önüne alındığında, A (çimento) ve A<sup>2</sup> anlamlı model terimleridir. A'nın anlamlı olması, bağımsız değişkenin ikinci dereceden etkisinin yanıtları etkilediğini göstermektedir. B, AB ve B<sup>2</sup> anlamlılık göstermeyen terimler olsa da ANOVA ile elde edilen model terimlerinin hiyerarşisini korumak için modelde tutulurlar. B değişkenleri istatistik olarak anlamlı olmayabilir ancak modelin yanıt çıktısını etkileyen deneysel bir değişkendir. Bu nedenle, istatistiksel olarak önemsiz olsa bile, güçlü bir teorik gerekçeye sahip olan B değişkeninin modelde tutulması teşvik edilir. 25.86 Model F değeri, modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. Gürültü nedeniyle bu kadar büyük bir F değerinin meydana gelme olasılığı sadece % 0.01'dir. Veri girişi veya veri toplanması esnasında oluşan sistem dışı hatalara istatistiksel gürültü denir. İki temel istatistiksel gürültü şekli vardır: hatalar ve artıklar. İstatistiksel bir hata, kesin tutarın doğru cevap olduğu varsayılan

beklenen değerden farklı olan kısmıdır. Bir kalıntı, beklenen sonucun daha geçici bir tahmininin sonucudur. İstatistiksel gürültünün ardındaki genel fikir, belirli bir veri kümesinin zorunlu olarak kesin olmaması ve aynı bilgilerin tekrar toplanması veya hesaplanması durumunda kopyalanamamasıdır (İnt. Kyn.1). Uyum eksikliğinin F-değerinin 7.83 olması modelin anlamlı olduğunu ifade eder. Gürültü nedeniyle bu kadar büyük bir F-değeri eksikliğinin meydana gelme olasılığı sadece% 3.77'dir. Çizelge 7, model doğrulama parametrelerini sunmaktadır. Çizelgeden de görüldüğü üzere model, %94.86'lık çok iyi seviyede belirleme katsayısı (R<sup>2</sup>) değerine sahiptir. Bu değer, modelin verilere ileri düzeyde uyum sağladığını göstermektedir. Benzer şekilde, modelin uyması için ayarlanan R<sup>2</sup> ile tahmin edilen R<sup>2</sup> arasında 0,2'lik bir fark gereklidir. Dolayısıyla, tahmin edilen R<sup>2</sup> =0.6762, ayarlanmış R<sup>2</sup> =0.9120'ye yakın değildir; yani fark 0.2'den fazladır. Bu durum, model ve/veya veriler ile ilgili büyük bir blok etkisinin veya olası bir sorunun göstergesi olabilir. Yeterli hassasiyet değeri ise, sinyal-gürültü oranını ölçer. 4'ten büyük bir oran olması arzu edilir. 15.842 oranı, yeterli bir sinyali göstermektedir. Bu, modellerin yanıtları tahmin etmek için yüksek derecede hassasiyete sahip olduğunu gösterir. Varyasyon değerinin düşük olması (%8.57) ise deneysel sonuçların güvenilirliği ve yüksek hassasiyetini göstermektedir. Ayrıca, model için standart sapma değeri (3.68), elde edilen ortalama değerlerden (43.00) oldukça küçüktür bu da varyans analizinin uygunluğunu ve yeterliliğini göstermektedir. Üretilen modelin ortalama ile standart sapması ne kadar küçükse, test verilerine olan varyansı o kadar düşük olur, bu da deney sonuçlarının model için daha az belirsizlik üreteceği anlamına gelmektedir. Yukarıdaki analize dayanarak üretilen modelin, karışımların basınç dayanımı tepkisinin modellenmesi, optimizasyonu ve tahmini için uygun ve etkili olduğu sonucuna varılabilir.

**Çizelge 7.** Model doğrulama parametreleri

İstatistiksel analiz	Yanıt değeri	Yorum
	Basınç dayanımı (MPa)	
Standart sapma	3.68	İstatistiksel değerlendirme için sonuçlar uygundur
Ortalama	43.00	
Korelasyon katsayısı (R <sup>2</sup> )	0.9486	
Düzeltilmiş R <sup>2</sup>	0.9120	
Tahmini R <sup>2</sup>	0.6762	
Yeterli hassasiyet	15.8418	
Varyans katsayısı (%)	8.57	

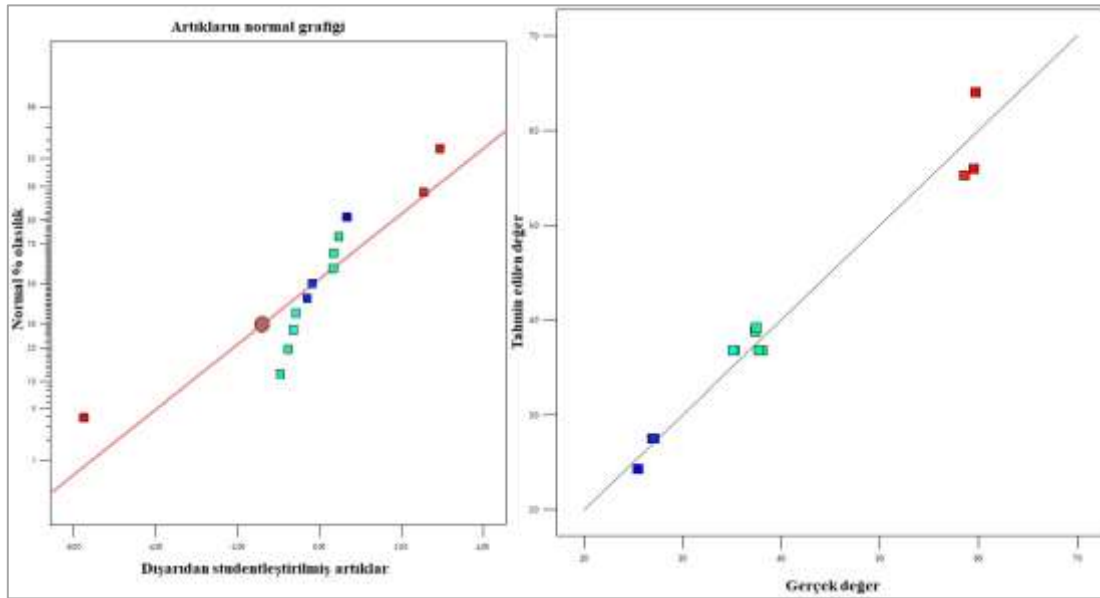
### 3.2.2 Yanıtlar için tahmini ve gerçek tanı grafikleri

Şekil 6 (a), 90 günlük basınç dayanımı modülünün olasılık grafiğini göstermektedir. Şekilden, veriler eşitlik çizgisi üzerine geldiği için regresyon modellerinin etkinliğini ortaya koyan, artık noktalar ile düz bir çizgi arasında yakın bir uyum gözlemlenmiştir. Şekil 6 (b), modelin uygunluğunu ve doğruluğunu değerlendirmek için kullanılan tahmini ve gerçek laboratuvar bulgularını göstermektedir. 45° çizgisi etrafındaki veri noktalarının simetrik dağılımına göre, rijitlik modülünün gerçek

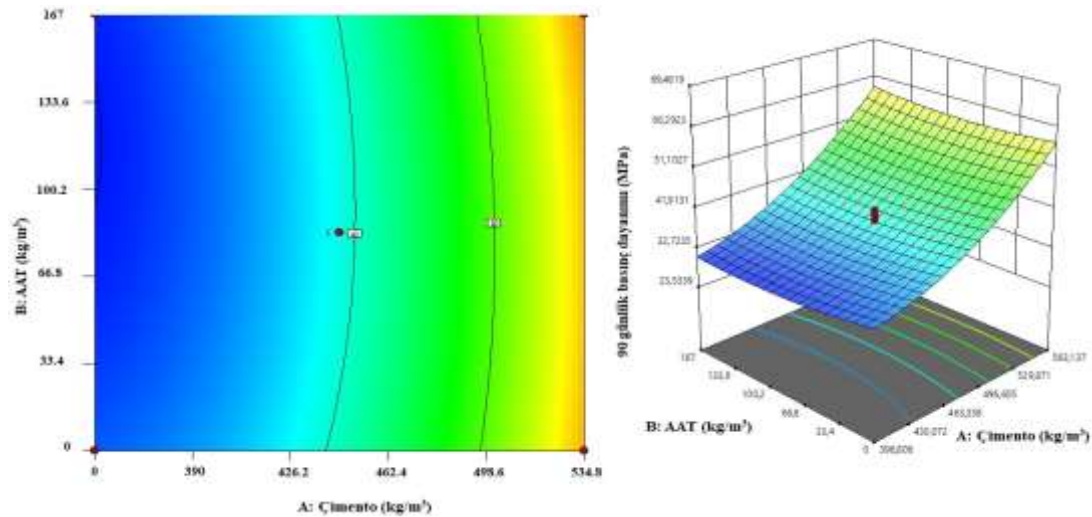
laboratuvar verileriyle eşleşme oranı yüksek olduğundan model tarafından doğru bir şekilde tahmin edilmiştir.

### 3.2.3 Sinerjik değişkenlerin basınç dayanımı yanıtı üzerindeki etkisi

Faktörler ve yanıtlar arasındaki etkileşimi göstermek ve girdi değişkenlerinin çıktı yanıtı üzerindeki etkisini açıklamak için MKD-YYM'den 2B ve 3B yanıt grafiği konturları oluşturulmuştur. Her model için faktörler (Çimento ve AAT oranı) X ve Y eksenlerine, tepki (90 günlük basınç dayanımı) Z eksenine çizilmiştir.



Şekil 6. Basınç dayanımı model yeterliliği için tanı grafikleri



Şekil 7. (a) AAT ve çimento miktarının 90 günlük basınç dayanımı üzerindeki uyarıcı etkisini gösteren 2-D YYM yüzeyi ve (b) 3-D YYM yüzeyi

Şekil 7 (a ve b), modelin 2B ve 3B yanıt grafiği konturunu göstermektedir ve girdi değişkenleri arasında büyük bir sinerjik etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Model kontur çizgileri, çimento oranı ile AAT oranı arasında

önemli bir etkileşim gösteren yarı eliptik formda bulunmuştur. Kontur grafiğinin rengi, maviden kırmızıya, daha düşükten yükseğe ve daha iyi etkileşim değeri anlamına gelen yanıt değerlerini yansıtmaktadır (Yaro et

al. 2022). Diğer bir ifadeyle grafiklerdeki maviden kırmızıya olan renk değişimi, daha önemli ve anlamlı bir yanıt değeri belirtmektedir (Yaro et al. 2021).

Yanıt yüzeyi çizimi, çimento dozajının AAT dozajına kıyasla 90 günlük basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur; çünkü 90 günlük basınç dayanımı değeri, AAT dozajı arttıkça azalırken, çimento dozajı ile marjinal olarak artmaktadır. Ayrıca, yanıt yüzeyi grafiğinde, en yüksek basınç dayanımı değerine sahip optimal çıktı alanı kırmızımsı-sarı bölge olarak belirtilmiştir. Yanıt yüzeyi grafiğinin canlı mavi bölgesi, basınç dayanımı değeri üzerinde minimum etkiye sahip bir alanı belirtirken, optimum basınç dayanımı bölgesinin yaklaşık 0-50 kg/m<sup>3</sup> AAT dozajında ve 515-530 kg/m<sup>3</sup> çimento dozajında olduğu gözlenmiştir. Basınç dayanımı değeri, çimento girdi değişken seviyelerinde daha yüksekti. Çimento esaslı karışımlarda daha az miktarlardaki ve silisli yapıya sahip andezit dozajının çimento ile ikamesinin bir sonucu olan daha yüksek çimento içeriğinin, karışımda daha fazla çimento reaktifinin (C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S ve C<sub>3</sub>A) bulunması sağlamış olmakta ve dolayısıyla daha fazla çimento hidrasyon ürününün (örn.C-S-H, CH) tetiklenmesi ile dayanım gelişimi desteklenmektedir (Çelikten ve Canbaz 2021). Genel olarak tepki yüzeyi grafiği, Şekil 7'de görüldüğü gibi AAT ikameli çimento esaslı karışımların basınç dayanımı değerinin çimento dozajına kıyasla AAT dozajı değişimlerine daha duyarlı olduğunu göstermiştir. AAT dozajı 0-167 kg/m<sup>3</sup> arasında olduğundan, basınç dayanımı değerleri önemli ölçüde azalmıştır. Bununla birlikte, daha düşük AAT dozajlarında, çimento dozajı, karışımların dayanımı üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olmuştur. AAT ikame oranının artması ile düşük dayanım elde edilmesi, AAT'nin puzolanik özelliğinin olmasına rağmen aktif CaO içeriğinin Portland çimentosu ve uçucu küle göre oldukça düşük olması ve bu nedenle bağlayıcılık özelliğinin yetersiz kalması ile ilişkilendirilmiştir (Bkz.Çizelge 1) (Özkan ve Ceylan 2022).

Çok amaçlı optimizasyonda, oluşturulan modelin girdi değerleri olan optimum AAT dozajı ve çimento dozajı, ortaya çıkan tahmin performansını doğrulamak için değerlendirilmeye tabi tutulmuştur. 0 (alt) ile 1 (ideal senaryo) arasındaki sınırlarla istenilirlik olarak adlandırılan ölçeksiz bir değer (d<sub>i</sub>), tahmin edilen reaksiyonu analiz ederek ve modelin alt ve üst sınırlarıyla karşılaştırılarak hesaplanır (Mohammed et al. 2018). Değişkenler ve yanıt davranışı için istenen hedefi belirtmek için her rampada bir nokta vardır. Önerilen optimal oranlar üç kez test edilmiş ve ortalama deney

bulguları kullanılmıştır. En uygun tahmin değerleri ile laboratuvar değerleri, hata oranını (hatanın yüzdesini) tahmin etmek için karşılaştırılmıştır. Model tahmin edilebilirliği, Denklem (2)'de gösterildiği gibi mutlak bağlı yüzde hatası (MBYH) kullanılarak değerlendirilmiş ve incelenmiştir.

$$\text{Mutlak Bağlı Yüzde Hatası (\%)} = \left| \frac{\text{deneysel değer} - \text{modele ait değer}}{\text{deneysel değer}} \right| * 100 \quad (2)$$

90 günlük basınç dayanımı için, Çizelge 8, optimizasyonun istenen amaçlarını ve sınırlarını gösterirken, Şekil 8, bağımsız faktörlerin optimal değerlerini ve maksimum tahmin edilebilir tepkileri göstermektedir. Bir başka optimizasyon doğrulama göstergesi olan Şekil 9 ise, 0.536 seviyesine sahip modelin 3 boyutlu istenilirliğini gösterirken, model tarafından optimum çimento ve AAT dozajının sırasıyla 523.53 kg/m<sup>3</sup> ve 167 kg/m<sup>3</sup> olduğu tahmin edilmiştir. 90 günlük basınç dayanımına ilişkin deneysel ve optimizasyon verileri arasındaki fark birbirine yakın olarak bulunmuştur (%4.04).

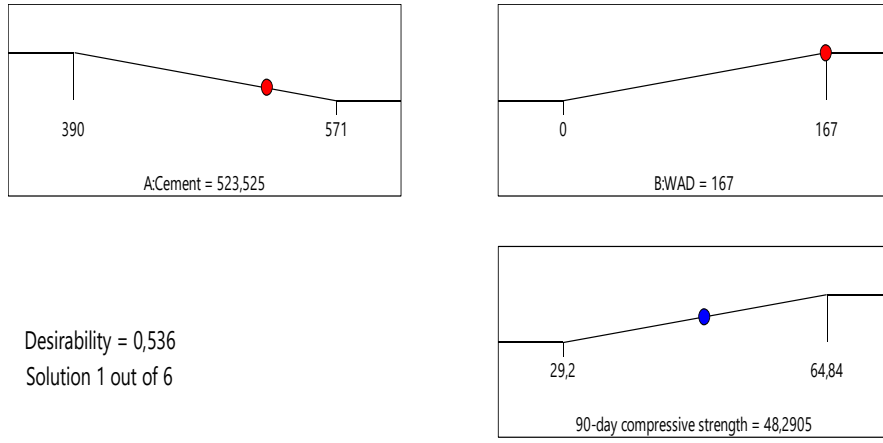
**Çizelge 8.** 90 günlük basınç dayanımı yanıt optimizasyon kısıtlamaları

Faktörler/Yanıtlar	Alt ve üst limitler	Hedef	Optimizasyon sonuçları	İstenilirlik
Çimento dozajı (kg/m <sup>3</sup> )	390-571	Azalt	523.52	0.536 (%53.6)
AAT dozajı (kg/m <sup>3</sup> )	0-167	Artır	167.00	
Basınç dayanımı (MPa) (Model)	29.2-64.84	Artır	48.29	
Basınç dayanımı (MPa) (Deneysel)			46.34	
Değişim (%)			4.04	

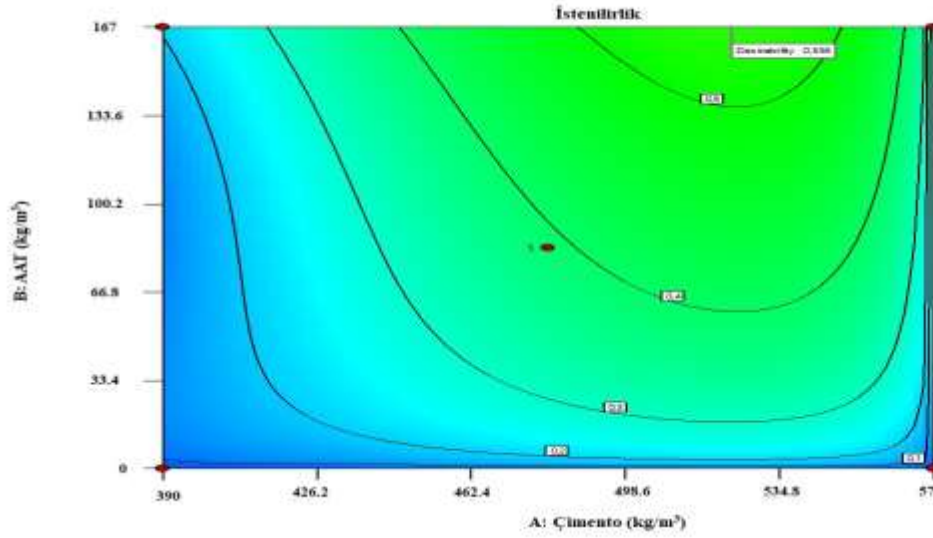
#### 4. Sonuçlar

Bu çalışma, basınç dayanımı tahmininde YJM'yi kullanarak AAT ikameli çimento esaslı kompozitler için çok amaçlı optimizasyonu gerçekleştirmek amacıyla yapılmıştır. Yapılan istatistiksel ve deneysel çalışmalar neticesinde, aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

Yanıt yüzeyi modellerini ve çok amaçlı optimizasyonu gerçekleştirmek için YJM'de çimento ve AAT tozu ikame oranları olmak üzere iki bağımsız değişken girdi faktörleri olarak kabul edilmiştir. Çimento esaslı kompozit numunelerin sertleşmiş özelliği olan 90 günlük basınç dayanımı tek bir yanıt olarak modellenmiş ve optimize edilmiştir.



Şekil 8. 90 günlük basınç dayanımı yanıt optimizasyonu için sayısal rampa



Şekil 9. 90 günlük basınç dayanımı yanıt optimizasyonu için istenirlik konturu

Yanıtların deneysel sonuçlarından olan bağımsız değişkenler (Çimento: A, AAT: B) arasındaki etkileşim düzeyine bağlı olarak, ikinci dereceden model, basınç dayanımını tahmin etmek için daha uygun bulunmuştur.

Yanıt modelleri, %95 güven aralığında (%5 anlamlılık düzeyi) ANOVA analizine tabi tutulmuş ve dikkate alınan yanıt için yaklaşık %95'lik bir belirleme katsayısı ( $R^2$ ) ile yüksek düzeyde anlamlılık sergilemiştir.

Model çizimleri (2B kontur ve 3B yanıt yüzeyi diyagramları), değişkenlerin varyasyonlarının ve bunların etkileşimlerinin yanıtlar üzerindeki etkisini görsel olarak göstermiştir. AAT ikame seviyelerindeki bir artışın, yanıt değerlerinde bir azalmaya yol açtığı, çimento ikame seviyelerinde ise bunun tersi bir durum olduğu gözlemlenmiştir.

Çok amaçlı optimizasyon, herhangi bir yanıtta ödün vermeden istenen basınç dayanımı özellikleri elde edebilen değişkenlerin optimal seviyelerini (Çimento:

523.53 kg/m<sup>3</sup>, AAT: 167 kg/m<sup>3</sup>) vermiştir. Modeller, yanıtların deneysel ve tahmin edilen değerleri arasında %5'ten daha az hata ile deneysel olarak doğrulanmıştır.

Sertleşmiş durumda çimento miktarındaki artış, 515-530 kg/m<sup>3</sup> arasındaki seviyelerde basınç mukavemeti artışı üzerine daha fazla etki yapmaktadır.

#### Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

#### Yazarlık Katkı Beyanı

Şükrü Özkan: Kaynaklar, Araştırma, Deney tasarımı, Deney, Yazma – orijinal taslak Görseleştirme, Yazma – orijinal taslak, Finans sağlama  
Hakan Ceylan: Araştırma, Fikir Sahibi, Doğrulama, Metodoloji, Finans sağlama

#### 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 dâhil edilmiştir.

## Teşekkür

Yazarlar, AAT temininden dolayı İstem andezit fonolit doğaltaş işleme fabrikasına teşekkür eder.

## Kaynaklar

- Abdulkadir, I., Mohammed, B. S., Liew, M. S., Wahab, M. M. A., 2021. Modelling and optimization of the mechanical properties of engineered cementitious composite containing crumb rubber pretreated with graphene oxide using response surface methodology. *Construction and Building Materials*, **310**, 125259. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125259>
- Adamu, M., Trabanpruek, P., Jongvivatsakul, P., Likitlersuang, S., Iwanami, M., 2021. Mechanical performance and optimization of high-volume fly ash concrete containing plastic wastes and graphene nanoplatelets using response surface methodology. *Construction and Building Materials*, **308**, 125085. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125085>
- Adesina, A., Das, S., 2021. Sustainable utilization of recycled asphalt as aggregates in engineered cementitious composites. *Construction and Building Materials*, **283**, 122727. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122727>
- Alyamac, K. E., Ghafari, E., Ince, R., 2017. Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method. *Journal of Cleaner Production*, **144**, 192–202. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.156>
- Alyousef, R., Ahmad, W., Ahmad, A., Aslam, F., Joyklad, P., Alabduljabbar, H., 2021. Potential use of recycled plastic and rubber aggregate in cementitious materials for sustainable construction: A review. *Journal of Cleaner Production*, **329**, 129736. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129736>
- Amani, A., Ramezani-pour, A. M., Palassi, M., 2021. Investigation on the sustainable use of electric arc furnace slag aggregates in eco-friendly alkali-activated low fineness slag concrete as a green construction composite. *Journal of Cleaner Production*, **307**, 127257. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127257>
- Ariöz, Ö., Yildirim, K., 2012. Türkiye’de çimento sektöründeki belirsizlikler ve Türk çimento sektörünün SWOT analizi. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, **32**, 173-190.
- ASTM C109 / C109M-20b, 2020. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens). West Conshohocken, Philadelphia, 1-12. [https://doi.org/10.1520/C0109\\_C0109M-21](https://doi.org/10.1520/C0109_C0109M-21)
- ASTM C618-19, 2019. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use. Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, Philadelphia, 1-5. <https://doi.org/10.1520/C0618-19>
- Ávalos-Rendón, T. L., Chelala, E. A. P., Mendoza Escobedo, C. J., Figueroa, I. A., Lara, V. H., Palacios-Romero, L. M., 2018. Synthesis of belite cements at low temperature from silica fume and natural commercial zeolite. *Materials Science and Engineering: B*, **229**, 79–85. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2017.12.020>
- BS EN 933-1:2012., 2012. *Tests for geometrical properties of aggregates - Determination of particle size distribution. Sieving method*. United States, 1-22. <https://doi.org/10.3403/30241873>
- Çelikten, S., Canbaz, M., 2021. Atık Andezit Ve Mermer Tozunun Çimento Harçlarının Dayanım Özelliklerine Etkisi. *dergipark.org.tr*, **29**, 43–48. <https://doi.org/10.31796/ogummf.709810>
- Çelikten, S., 2021. Mechanical and microstructural properties of waste andesite dust-based geopolymer mortars. *Advanced Powder Technology*, **32**, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2020.10.011>
- Danish, A., Mosaberpanah, M. A., Salim, M. U., Fediuk, R., Rashid, M. F., Waqas, R. M., 2021. Reusing marble and granite dust as cement replacement in cementitious composites: A review on sustainability benefits and critical challenges. *Journal of Building Engineering*, **44**, 102600. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102600>
- Davraz, M., Ceylan, H., Topçu, İ. B., Uygunoğlu, T., 2018. Pozzolanic effect of andesite waste powder on mechanical properties of high strength concrete. *Construction and Building Materials*, **165**, 494–503. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.043>
- Deng, Y., Yan, C., Zhang, J., Yin, L., Liu, S., Yan, Y., 2022. Preparation and mechanical characterization of engineered cementitious composites with high-volume fly ash and waste glass powder. *Journal of Cleaner Production*, **333**, 130222. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130222>
- Gao, D., Lv, M., Pang, Y., Tang, J., Zhang, Y., 2022. Property analysis and mixture design of high ductility cementitious composites with totally recycled fine aggregate based on target strength and strain capacity. *Journal of Cleaner Production*, 130492. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130492>
- Ghafourian, K., Kabirifar, K., Mahdiyar, A., Yazdani, M., Ismail, S., Tam, V. W. Y., 2021. A synthesis of express analytic hierarchy process (EAHP) and partial least squares-structural equations modeling (PLS-SEM) for sustainable construction and demolition waste management assessment: The case of Malaysia. *Recycling*, **6**(4), 73.

- <https://doi.org/10.3390/recycling6040073>
- Ghavami, S., Naseri, H., Jahanbakhsh, H., Moghadas Nejad, F., 2021. The impacts of nano-SiO<sub>2</sub> and silica fume on cement kiln dust treated soil as a sustainable cement-free stabilizer. *Construction and Building Materials*, **285**, 122918. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.12298>
- Hamidi, M., Kacimi, L., Cyr, M., Clastres, P., 2013. Evaluation and improvement of pozzolanic activity of andesite for its use in eco-efficient cement. *Construction and Building Materials*, **47**, 1268–1277. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.013>
- Kaliyavaradhan, S. K., Li, L., Ling, T. C., 2022. Response surface methodology for the optimization of CO<sub>2</sub> uptake using waste concrete powder. *Construction and Building Materials*, **340**, 127758. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127758>
- Kawabata, Y., Dunant, C., Yamada, K., Scrivener, K., 2019. Impact of temperature on expansive behavior of concrete with a highly reactive andesite due to the alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, **125**, 105888. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105888>
- Kocak, Y., Nas, S., 2014. The effect of using fly ash on the strength and hydration characteristics of blended cements. *Construction and Building Materials*, **73**, 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.048>
- Labbaci, Y., Labbaci, B., Abdelaziz, Y., Mekkaoui, A., Alouani, A., 2017. The use of the volcanic powders as supplementary cementitious materials for environmental-friendly durable concrete. *Construction and Building Materials*, **133**, 468–481. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.088>
- Li, V., 2002. Interface Tailoring for Strain-hardening PVA-ECC. *ACI Materials Journal*, **99**, 463-472. <https://doi.org/10.14359/12325>
- Lye, H., Bashar, M.S., Liew, M., Wahab, M.M.A., 2020. Bond behaviour of CFRP-strengthened ECC using Response Surface Methodology (RSM). *Case Studies in Construction materials*, **12**, e00327. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00327>
- Mindess, S., Young, J.F., Darwin, D. 2003. Concrete. Hoboken: Prentice Hall. 2nd ed., 1-644.
- Mirmozaffari, M., Yazdani, M., Boskabadi, A., Dolatsara, H. A., Kabirifar, K., Golilarz, 2020. A novel machine learning approach combined with optimization models for eco-efficiency evaluation. *Applied Sciences (Switzerland)*, **10(5)**, 1-31. <https://doi.org/10.3390/app10155210>
- Mohammed, B. S., Azmi, N. J., Abdullahi, M., 2011. Evaluation of rubbercrete based on ultrasonic pulse velocity and rebound hammer tests. *Construction and Building Materials*, **25**, 1388–1397. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.004>
- Mohammed, B. S., Khed, V. C., Nuruddin, M. F., 2018. Rubbercrete mixture optimization using response surface methodology. *Journal of Cleaner Production*, **171**, 1605–1621. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.102>
- Myers, R. H., Montgomery, D. C. and Anderson-Cook, M., 2016. Response surface methodology process and product optimization using designed experiments. John Wiley & Sons, Ltd, New York, 1-856.
- Özkan, Ş., Ceylan, H., 2022. The effects on mechanical properties of sustainable use of waste andesite dust as a partial substitution of cement in cementitious composites. *Journal of Building Engineering*, **58**, 104959. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104959>
- Pacheco-Torgal, F., Abdollahnejad, Z., Camões, A. F., Jamshidi, M., Ding, Y., 2012. Durability of alkali-activated binders: A clear advantage over Portland cement or an unproven issue? *Construction and Building Materials*, **30**, 400–405. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.017>
- Prošek, Z., Nežerka, V., Tesárek, P., 2020. Enhancing cementitious pastes with waste marble sludge. *Construction and Building Materials*, **255**, 119372. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119372>
- Quedou, P. G., Wirquin, E., Bokhoree, C., 2021. Sustainable concrete: Potency of sugarcane bagasse ash as a cementitious material in the construction industry. *Case Studies in Construction Materials*, **14**, e00545. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00545>
- Ray, S., Haque, M., Ahmed, T., Nahin, T. T., 2023. Comparison of artificial neural network (ANN) and response surface methodology (RSM) in predicting the compressive and splitting tensile strength of concrete prepared with glass waste and tin (Sn) can fiber. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, **35(3)**, 185-199. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.03.006>
- Samimi, K., Kamali-Bernard, S., Akbar Maghsoudi, A., Maghsoudi, M., Siad, H., 2017. Influence of pumice and zeolite on compressive strength, transport properties and resistance to chloride penetration of high strength self-compacting concretes. *Construction and Building Materials*, **151**, 292–311. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.071>
- Shahmansouri, A. A., Yazdani, M., Hosseini, M., Akbarzadeh Bengar, H., Farrokh Ghatte, H., 2022. The prediction analysis of compressive strength and electrical resistivity of environmentally friendly concrete incorporating natural zeolite using artificial neural network. *Construction and Building Materials*, **317**, 125876.

- <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125876>
- Shannag, M. J., Yeginobali, A., 1995. Properties of pastes, mortars and concretes containing natural pozzolan. *Cement and Concrete Research*, **25**, 647–657. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00053-F](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00053-F)
- Signorini, C., Nobili, A., 2022. Durability of fibre-reinforced cementitious composites (FRCC) including recycled synthetic fibres and rubber aggregates. *Applications in Engineering Science*, **9**, 100077. <https://doi.org/10.1016/j.apples.2021.100077>
- Sogancioglu, M., Yel, E., Yilmaz-Keskin, U. S., 2013. Utilization of andesite processing wastewater treatment sludge as admixture in concrete mix. *Construction and Building Materials*, **46**, 150–155. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.035>
- Thapa, V., Waldmann, D., 2021. Binary blended cement pastes and concrete using gravel wash mud (GWM) powders. *Construction and Building Materials*, **302**, 124225. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124225>
- TS EN 197-1, 2012. Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. Ankara, 1-40.
- Valente, M., Sambucci, M., Chougan, M., Ghaffar, S. H., 2022. Reducing the emission of climate-altering substances in cementitious materials: A comparison between alkali-activated materials and Portland cement-based composites incorporating recycled tire rubber. *Journal of Cleaner Production*, **333**, 130013. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130013>
- Yang, K. H., Song, J. K., Song, K. II, 2013. Assessment of CO<sub>2</sub> reduction of alkali-activated concrete. *Journal of Cleaner Production*, **39**, 265–272. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.001>
- Yaro, N. S. A., Napiyah, M. Bin, Sutanto, M. H., Usman, A., Saeed, S. M., 2021. Modeling and optimization of mixing parameters using response surface methodology and characterization of palm oil clinker fine modified bitumen. *Construction and Building Materials*, **298**, 123849. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123849>
- Yaro, N. S. A., Sutanto, M. H., Habib, N. Z., Napiyah, M., Usman, A., Muhammad, A., 2022. Comparison of Response Surface Methodology and Artificial Neural Network approach in predicting the performance and properties of palm oil clinker fine modified asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, **324**, 126618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126618>
- Yazdani, M., Kabirifar, K., Fathollahi-Fard, A. M., Mojtahedi, M., 2021a. Production scheduling of off-site prefabricated construction components considering sequence dependent due dates. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16285-0>
- Yazdani, M., Kabirifar, K., Frimpong, B. E., Shariati, M., Mirmozaffari, M., Boskabadi, A., 2021b. Improving construction and demolition waste collection service in an urban area using a simheuristic approach: A case study in Sydney, Australia. *Journal of Cleaner Production*, **280**, 124138. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124138>
- Zeyad, A. M., Khan, A. H., Tayeh, B. A., 2020. Durability and strength characteristics of high-strength concrete incorporated with volcanic pumice powder and polypropylene fibers. *Journal of Materials Research and Technology*, **9**, 806–818. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.021>
- Zhang, Z., Yang, F., Liu, J. C., Wang, S., 2020. Eco-friendly high strength, high ductility engineered cementitious composites (ECC) with substitution of fly ash by rice husk ash. *Cement and Concrete Research*, **137**, 106200. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106200>
- Zhou, Y., Xie, L., Kong, D., Peng, D., Zheng, T., 2022. Research on optimizing performance of desulfurization-gypsum-based composite cementitious materials based on response surface method. *Construction and Building Materials*, **341**, 127874. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127874>

#### İnternet kaynakları

- 1-Verimadenciliği, [http://www.stat.gen.tr/index.php?istek=sinif&dersid=is\\_t01&konuid=ver01&max=1](http://www.stat.gen.tr/index.php?istek=sinif&dersid=is_t01&konuid=ver01&max=1), (06.07.2023)





## Application of Monte Carlo Simulation Technique for Slopes Stabilized with Piles

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 26.04.2023

Kabul/Accepted: 30.01.2024

Yayımlandı/Published: 27.02.2024

### Kazıklarla Güçlendirilmiş Şevlerde Monte Carlo Simülasyon Yöntemi Uygulaması

Yeşim TUSKAN<sup>\*</sup>, Yusuf ERZİN

Manisa Celal Bayar University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Manisa, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

This paper describes a numerical study and simulation model of a reinforced slope by anti-slide piles. A two-dimensional finite element method (2D-FEM) were utilized to assess factor of safety (FS) regarding the arching effect of a severely damaged outer eastbound slope at Manisa-Izmir State Road (Turkey). Additionally, a reliability-based design method, Monte Carlo Simulation (MCS), was then used to develop a model to accurately predict the stability of reinforced slopes and the probability of failure for the reinforced slope during an earthquake. The knowledge of probability and statistical theory were used in deterministic studies to solve the proposed problem and to produce numerical solutions without any physical testing. To evaluate the estimation capacity of the generated MCS and FEM models, reliability index and probability of failure were computed. Finally, the computed indices make it clear that both constructed MCS and FEM were able to predict FS values of landslide quite efficiently.

**Anahtar Kelimeler:** Slope Stability; Monte Carlo Simulation; Reliability Assessment; Finite Element Method.

#### Abstract

Bu çalışmada, kazıklarla güçlendirilmiş bir şevin simülasyon modeli geliştirilmiştir. Manisa-Izmir Devlet Yolu (Türkiye) doğu kesiminde yer alan hasar görmüş bir şevin güvenlik sayısının (FS) kemerlenme etkisi göz önüne alınarak değerlendirilmesi için iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi (2D-FEM) kullanılmıştır. Ek olarak, güvenilirliğe dayalı bir tasarım yöntemi olan Monte Carlo Simülasyonu (MCS), deprem sırasında güçlendirilmiş şevlerin stabilitesini ve güçlendirilmiş şevlerin kayma olasılığını doğru bir şekilde tahmin etmek için kullanılmıştır. Olasılık ve istatistiksel teori bilgisi, önerilen problemi çözmek ve herhangi bir fiziksel test olmaksızın sayısal çözümler üretmek için deterministik çalışmalarda kullanılmaktadır. Geliştirilen MCS ve FEM modellerinin tahmin kapasitesini değerlendirmek için güvenilirlik indeksi ve yenilme olasılığı hesaplanmıştır. Son olarak, hesaplanan indisler hem geliştirilmiş MCS'nin hem de FEM'in heylanın FS değerlerini oldukça verimli bir şekilde tahmin edebildiğini açıkça ortaya koymaktadır.

**Keywords:** Şev Stabilitesi; Monte Carlo Simülasyonu; Güvenirlik Değerlendirmesi; Sonlu Elemanlar Yöntemi

#### 1. Introduction

The finite element method (FEM) is progressively utilized for preliminary design of geotechnical process (Li *et al.* 2013; Jiang *et al.* 2014; Mohammadi and Taiebat 2016, Dagli *et al.* 2018, Dagli *et al.* 2019). The FEM ordinarily utilized in practice is, while largely a deterministic method that does not proceed with the stochastic behavior of project variables (Cui and Sheng 2005). These substantial uncertainties with their imputation on performance and estimation of geotechnical design parameters with lack of essential in-situ information enforced the practice of geotechnical engineering. Due to these uncertainties, a deterministic study generating averaged values of the design variables is not performed successfully to model the system. Increasingly,

geotechnical engineers utilized probabilistic estimation to quantify their degree of uncertainty. Probabilistic techniques are not new to incorporate this uncertainty by geotechnical engineers (Wang *et al.* 2012; Saghafian *et al.* 2013; Caballero and Rahman 2014; Chen *et al.* 2016; Ching and Wang 2016; Yazdani and Kowsari 2017, Erzin and Tuskan 2017, Erzin and Tuskan 2019), because of the remarkable quantity of additional computational effort. These methods have appeared as a significant practice for geotechnical tasks (Wang *et al.* 2012; Caballero and Rahman 2014; Chen *et al.* 2016; Ching and Wang 2016; Erzin and Tuskan 2016, Yazdani and Kowsari 2017, Yildizel *et al.* 2017). In these tasks, geotechnical studies are characterized by complex soil behavior to model the real system. Therefore, probabilistic approaches that utilized more realistic physical aspects



are now achievable. The Monte Carlo simulation (MCS), one of the most powerful probabilistic methods, is utilized in various engineering optimization problems (Zhou et al. 2003; Wang et al. 2012; Yazdani and Kowsari 2017). Accordingly, for solving various geotechnical problems, these applications designate that the MCS is useful to obtain an optimal solution. Zeng and Liang (2002) used Mohr Coulomb failure criteria in two-dimensional FE model, in which the soil is assumed to be an elastic-perfectly plastic material to model drilled shafts as a rigid material. The load reduction factor is used to form the arching effect of the reinforced slope. Three-dimensional FE simulation was modeled by Yamin (2007) to evaluate a closed solution for calculating the FS of a reinforced slope. The FE analysis was carried out in the study of Al Bodour (2010) by incorporating the strength reduction methodology into the FE simulations of anti-slide piles. Joorabchi (2014) redefine the major parameters that control a single row of drilled shaft stabilized slope.

This paper presents a numerical and an analytical case of landslide formation in Manisa-Izmir State Road, Manisa, Turkey. The site investigations were also conducted as a part of the case study of anti-slide piles. The main objectives of this study are to generate the FEM model of the pile/slope system from site investigations and to compare the probability of failure obtained from MCS for the prediction of factor of safety (FS) of reinforced slope.

## 2. Case Study

Landslides resulting in extensive damage continue to be a primary problem in geotechnical engineering. Roadways in landslide area are menaced by enormous geotechnical hazards. To ensure the safety of the roadways against slope failure, several structural or non-structural methods such as retaining walls, drainage techniques, biotechnical protection, anti-slide piles are utilized to reinforce of the landslides (Li et al. 2013). This study presents a case study on geotechnical and geologic characterization of a landslide that occurred in a sandstone-clay stone slope. A severely damaged pavement of the outer eastbound slope of Manisa-Izmir State Road in Manisa, Turkey is stabilized by anti-slide piles. The application efficiency of the slope stabilizing piles on measures of displacement and forces acting on pile has been proven by finite element method (Li et al. 2007). Therefore, designing a row of piles to stabilize an unstable slope involves both geotechnical and structural engineering issues that need to be taken into consideration. The arching effect, through the load transfer factor, is derived from a semi-empirical

equation using a 2-dimensional finite element (2D-FE) parametric study. The load transfer factor is characterized as the ratio of the horizontal force at the pile-soil interface on the downslope side ( $P_{\text{down-slope}}$ ) to the soil-pile interface forces on the upslope side ( $P_{\text{up-slope}}$ ). The load transfer factor is stated mathematically as (Equations 1-3):

$$\eta = \frac{P_{\text{down-slope}}}{P_{\text{up-slope}}} \quad (1)$$

$$P_{\text{up-slope}} = \int_0^{L_p} \int_0^s \sigma_x dsdz \quad (2)$$

$$P_{\text{down-slope}} = \int_0^{L_p} \int_0^s \sigma_x^* dsdz \quad (3)$$

Where,  $\sigma_x$  is the horizontal soil stresses on the up-slope side of the pile and  $\sigma_x^*$  is the horizontal soil stresses on the down-slope side of the pile along top of the pile to the failure surface ( $L_p$ ) with distance between two adjacent pile ( $s$ ). A computer program in Matlab (MathWorks 2010) is then developed to incorporate the MCS mentioned for applications of in-situ experimental results validated by 2D-FE analysis. Furthermore, seismic displacement of the slope stabilized by one row of pile is computed using Stewart and Blake (Blake et al. 2003) method. The critical displacement is obviously selected to quantify the arching. The arching is extensively applied to the limit equilibrium process for the critical displacement that creates maximum load on pile ( $P_{\text{max}}$ ) by means of load transfer factor ( $\eta$ ) based on the 2D-FE modelling. The performance-based design according to geotechnical and structural issues are then presented to compute the factor of safety against sliding (FS) of the pile/slope system with a suitable displacement. The case study area is in Manisa-Izmir State Road near Izmir, Turkey. The failure extended from 27 m to the slope crest with an approximate total length of 80 m and a maximum width of 40 m and was in a thick layer of colluvial deposits which are irregularly present along the Zeytindagi valley (Figure 2).

Landslide mass thickness is 12 m according to 2D resistivity measurements. Starting on June 8, 2016, a steady substantial rainfall actualizes in western Manisa, primarily covering the whole area and causing severe landslide in the Manisa-Izmir State Road. On July 20, the damage of the retaining structure was initiated near the roadway at 2K+450 as depicted in Figure 3.

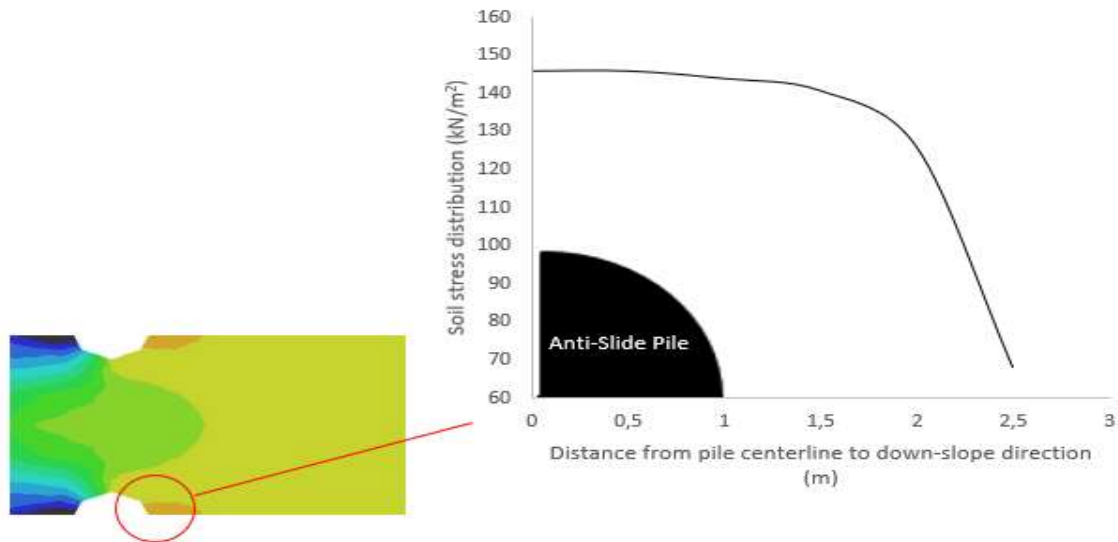


Figure 1. The variation of the horizontal soil stresses due to the soil arching effect

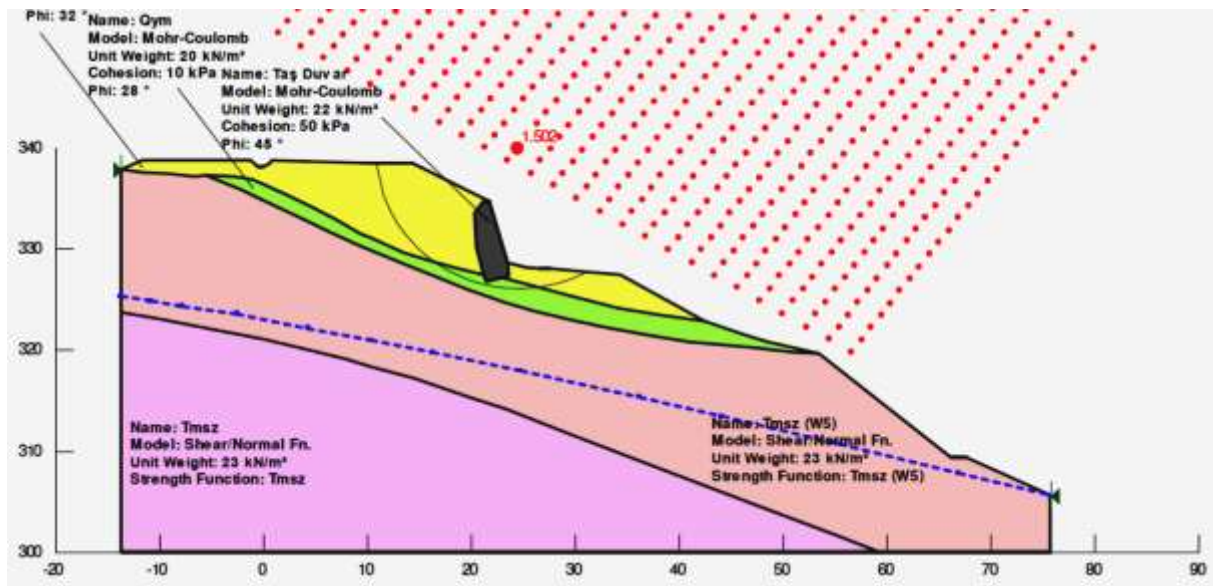


Figure 2. Landslide geometry

Additionally, two strain gages at each intermediate level were installed in the directions of up-slope and down-slope side. Also, two of the entire inclinometers were placed inside each anti-slide pile to measure the shaft tilt due to slope movement apart from the soil mass. In addition to these inclinometers, six in-place inclinometers were instrumented inside the soil mass to measure deflections at up-slope, down-slope and between the anti-slide piles. Four piezometers placed across the slope to monitor the ground water level. All instruments except the inclinometers were multiplexed with four 16-channel multiplexers. Additionally, current action velocity along this critical slip surface is 1mm/day according to Table 1. One of the important factors activating mass movements was intense surface water and groundwater movement in permeable layer. mm

along the slip surface over a period of approximately two-week indicating a near horizontal slip surface located at depth 10.70m to 11.80m. The main formations around the project area and its surroundings are Zeytindagi Formation (Tmsz) and Quarry (Qym) units (Figure 4). The stratigraphic of these formations, the lithological and structural properties are described below. The unit is named as Zeytindagi formation which starts with red colored conglomerate - sandstone at the base and continues with sandstone, claystone, shale, clayey limestone, limestone and, coal - peat intermediate levels. The other rock formations are sandstone, claystone, marl, shale, clayey limestone, volcanic fragments, schists, limestones, quartzites and, coal - peat intermediate levels. In sandstones, the grains were large sand, small pebbles and coarse silt size,

quartz, quartzite, chert, granite, feldspar. Slope stability analyses were performed on cross section B-B' oriented through the highest part of the landslide sliding mass. The results of slope monitoring show a maximum deflection up to 25 and metamorphic rock fragment. Among the highly fragile marls and clayey limestones, the coal levels in the form of bands form the usual appearance of the Zeytindagi Formation. Very smooth layouts are available. Layer thickness varies between 1-40 cm. The age of this unit was determined as early Miocene.

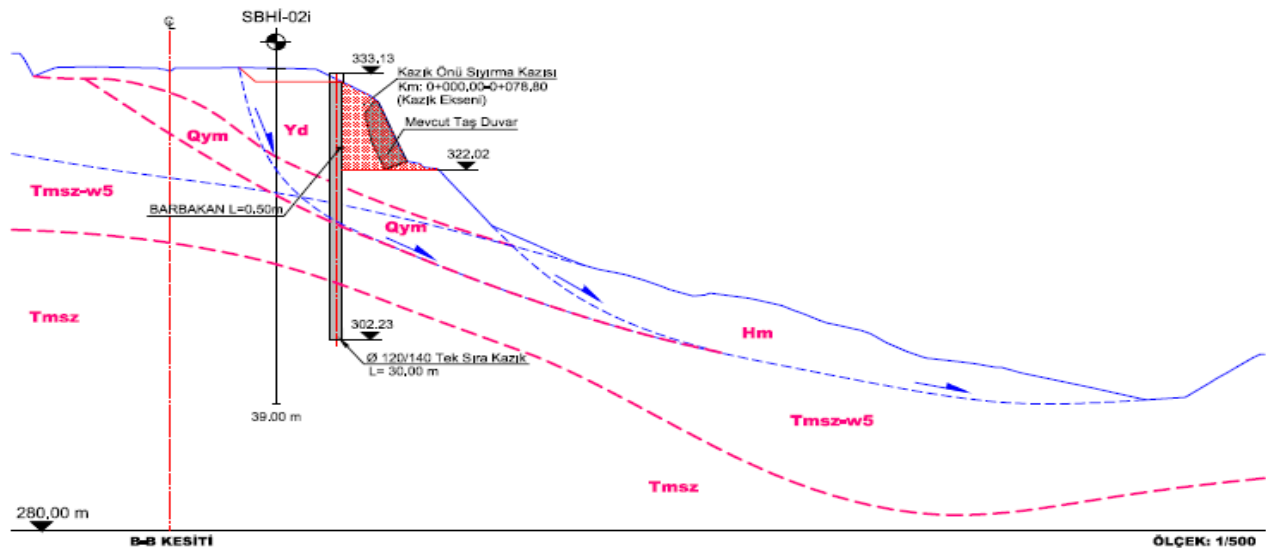
### 3. Material and Method

The Monte Carlo simulation method has been utilized by several geotechnical researchers as a powerful numerical technique useful for solving a variety of complex problems (Murthy 2000; Xiao et al. 2016). The knowledge of probability and statistical theory were

used in deterministic routines to solve the proposed problem and to produce numerical solutions without any physical testing (Nowak and Collins 2000)

**Table 1.** Inclinomometer Measurements of Boreholes

Borehole Number	Application Depth (m)	Measurement Period (day)	Sliding Depth (m)	Sliding Quantity (mm)	Movement Velocity (mm/day)
B-01	30.00	14	-	-	-
B-02	39.00	20	11.80	14.00	1.00
B-03	30.00	22	-	-	-
B-04a	39.00	22	10.70	13.55	1.00
B-04b	39.00	22	10.70	13.55	1.00
B-05	30.00	14	-	-	-
B-06	30.00	14	-	-	-



**Figure 4.** Cross-sectional view of landslide instrumentation

In addition, various error solutions of this technique have been identified, including measurement error, spatial variability error, statistical prediction error and conversion error. The measurement error is assumed to be the same and independent of the normal distribution. Observed error is not generally considered in the geotechnical reliability-based design (RBD) spatial variability error accounts for a trend in on-site or laboratory testing. They analyze residual errors, including the prediction of autocorrelation distance (Vanmarcke 1977).

Therewithal, conversion errors are related to the conversion of measured geotechnical parameters to parameters used in soil survey in addition, modelling error has been used to relate the field of prediction to real-world phenomena and ideal calculation models

(Kulhawy and Mayne 1990; U.S. EPA. 1997; Uzielli et al. 2006; Phoon 2008; Li et al. 2014; Li et al. 2016; Wang et al. 2016). The proposed pile / slope system consists of two main parts, including soil properties and pile parameters.

In this article, the pile related components are determined but uncertain parameters when compared to the soil properties due to the controllable structure in the pile system. A log-normal distribution is applied to the properties of the three soils during non-slip pile stabilizing slope. Recently, the Monte Carlo simulation, which is the most successful method of modelling anti-slide pile reinforced slope, has been developed using a randomly generated sample-based method with acceptance-rejection algorithm.

### 3.1. Development of Monte Carlo Simulation Model

In the estimation of the FS, Equation 4 has been developed and is an empirical equation with the arching effect using the empirical load transfer factor Formula as previously mentioned. This section describes how to apply the equation developed to simulate FS. In the model, all inputs;  $c$ ,  $\phi$ ,  $\psi$ ,  $\beta$ ,  $D$ ,  $s/D$  and  $\Omega$  are considered as continuous distributions. The inputs of parametric study used in MCS, and their corresponding distribution function are shown in Table.

**Table 2.** Input Data for Monte Carlo Simulation

Input Parameters	Minimum	Maximum	Function
$c$ (kN/m <sup>2</sup> )	12	48	Uniform
$\phi$ (°)	10	40	Uniform
$\beta$ (°)	25	45	Uniform
$\psi$	0.15	0.9	Uniform
$D$ (m)	0.6	2	Uniform
$s/D$	1	3	Uniform

In this research, a computer code was used as Monte Carlo simulator. The MCS analysis includes two sampling schemes, a Latin Hypercube sample, and a simple random sampling. The Latin Hypercube sampling was selected according to literature (U.S. EPA. 1997) 4000 simulations to generate the same accuracy level (Li et al. 2014) were utilized for all possible randomly selected combinations.

The MCS model is deeply affected by the relation between input variables. Therefore, to obtain an improved MCS model for FS simulation, the relation of the input variables was investigated and considered. (Presented in Table 3). As shown in Table 3, there is a relationship between friction angle, cohesion, slope gradient and pile parameters ( $s$  and  $s/D$ ). For this reason, existing formulas were used to calculate one of these as a function of other factors. Correlations shown in Table 3 were considered to simulate the pile stabilization cases.

**Table 3.** Correlation coefficient for MCS model inputs

	$c$	$\phi$	$\beta$	$\psi$	$D$	$s/D$
$c$	1					
$\phi$	0.031	1				
$\beta$	0.006	0.05	1			
$\psi$	0.004	-0.03	-0.02	1		
$D$	0.012	0.04	0.004	-0.045	1	
$s/D$	0.010	0.03	0.002	-0.036	0.85	1

The program comprises rank-order correlations with a significant level using correlation matrix among model inputs. The following steps were performed to

statistically estimate FS. Figure 5 shows the statistical summary of FS obtained with the MCS model. The minimum and maximum FS are 0.32 and 2.55 respectively. Also, the average value of FS was simulated as 1.4.

The probability of failure for the pile/slope system is calculated by utilizing the MCS method, as described as Equations 1 and 2. The probability of failure and the incorporated coefficient of variance (c.o.v.) are given in Equations 4 and 5, respectively.

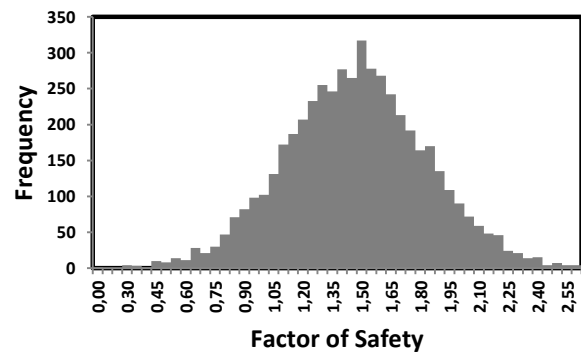
$$P_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i \left[ \frac{F_R - F_D + \Delta F_A}{F_D - \Delta F_A} < 0 \right] \quad (4)$$

$$\delta(P_f) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[ I_i \left[ \frac{F_R - F_D + \Delta F_A}{F_D - \Delta F_A} < 0 \right] - P_f \right]^2} / P_f \quad (5)$$

5

where  $P_f$  is the calculated probability of failure for the pile/slope system,  $\delta$  is the coefficient of variance (c.o.v.) of  $P_f$ ,  $N$  is the sample numbers. To obtain the estimated probability of failure, the randomly generated soil parameters can be inputted into the proposed Matlab program for Monte Carlo simulations. Also, the bias of load transfer factor  $\eta$  will be considered using Equation 6.

$$\eta = \delta \eta(c, \phi, \beta, D, s, \psi) \quad (6)$$



**Figure 5.** Distribution of the Factor of safety (FS) obtained by MCS model

In addition, Figure 3 shows the results of the measured FS and the predicted FS generated by semi empirical equation and 2D-FE model, and the simulated FS obtained by MCS model. Figure 6 shows that the FS was simulated with about 85% confidence. This indicates that the probability of a stable slope is 85%. A sensitivity analysis was also carried out in Table 4. Figure 7 shows the flow chart of Monte Carlo simulation. The Table 4 shows the sensitivity of FS results. The FS, in a descendent order, is sensitive to  $\phi$ ,  $\beta$ ,  $\psi$ ,  $c$ ,  $D$  and  $s/D$ .

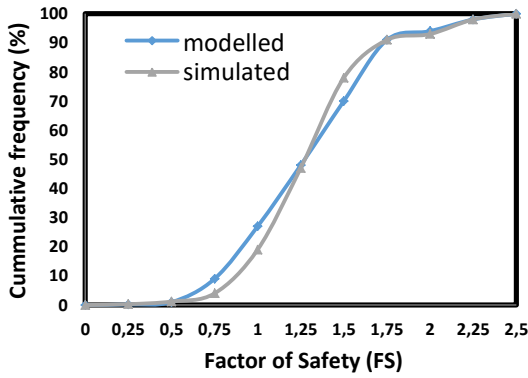


Figure 6. Modelled and simulated factor of safety results versus cumulative frequency (%)

Table 4. Sensitivity range of input variables due to correlation analysis

Variables	Correlation coefficient
c	+0.06 (4)
$\phi$	+0.64 (1)
$\beta$	-0.21 (6)
$\psi$	-0.45 (2)
D	+0.41 (3)
s/D	+0.35 (5)

As it can be seen, from the figure that the  $\phi$ , among others, is most effective between correlation coefficient to generate FS.

#### 4. Results and Discussion

A comparison for the probability of failure with or without pile installation, calculated by the parameters, namely, maximum force on pile  $P_{max} = 785$  kN and for location  $x = 26.5$  m is shown in Figure 8. This figure only shows 5.000 sample calculations. Clearly, after pile installation, the probability of failure of the slope has dramatically reduced from 6.40% to 3.08%, with corresponding reliability indices of 2.1 and 4.14, respectively. The piles at the location equal to 26.5 m are founded to be exposed to the largest net forces having higher internal moments and shears along the pile. Thus, six different combinations are selected from these considerations depicted in Figure 9.

The mean FS value simulated with MCS is 1.23, while the actual FS is 1.20.  $\psi$ ,  $\beta$  and s/D are in an indirect relationship with the FS, which means that any increase in these parameters causes a decrease in the FS. The slope is reinforced with a single row of anti-slide pile with a wide variety of pile geometry and soil properties (Table 2). The overall FEM results including FS and  $P_{max}$  are summarized in Table 5. Furthermore, the sensitivity analysis results demonstrated that the D and s/D among other variables, were the most effective two variables on the FS value.

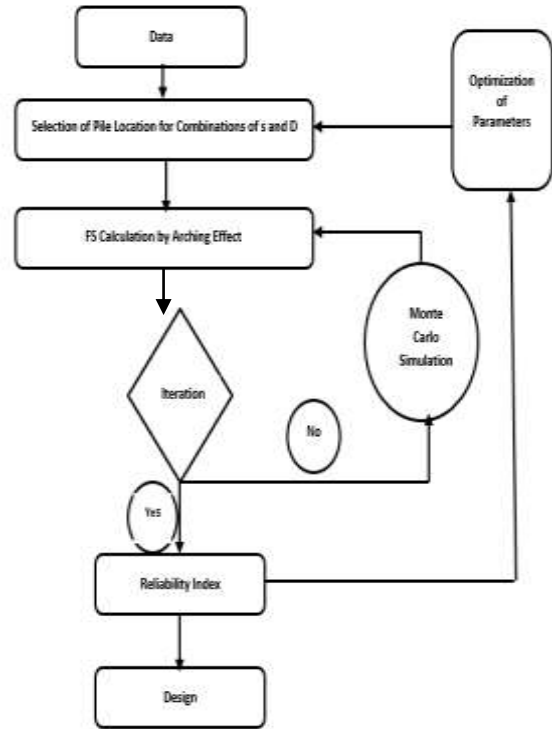


Figure 7. Flow Chart of Monte Carlo Simulation

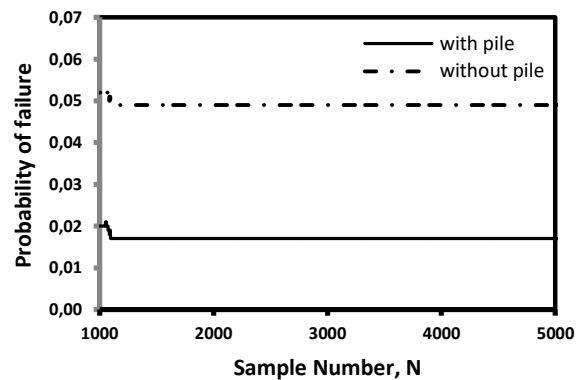


Figure 8. Comparison of Probability of failure considering with or without pile installation

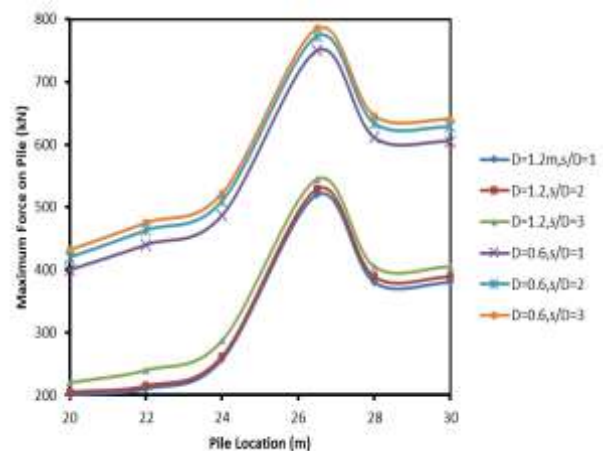


Figure 9. Maximum force –pile location relation of the system for different (s, D) combinations

**Table 5.** FEM results of slope reinforced with one row of anti-slide pile.

	c (kN/m <sup>2</sup> )	φ (°)	β (°)	ψ	D (m)	s/D	P <sub>max</sub> (kN)	FS
1	24	25	35	0.45	0.6	1	715	1.23
2	24	25	35	0.45	0.6	2	723	1.22
3	24	25	35	0.45	0.6	3	768	1.20
4	48	25	30	0.35	0.6	1	755	1.25
5	48	25	30	0.35	0.6	2	768	1.24
6	48	25	30	0.35	0.6	3	780	1.23
7	24	15	35	0.55	1.0	1	618	1.34
8	24	15	35	0.55	1.0	2	645	1.32
9	24	15	35	0.55	1.0	3	654	1.29
⋮								
64	12	25	35	0.35	1.2	1	498	1.45
65	12	25	35	0.35	1.2	2	516	1.43
66	12	25	35	0.35	1.2	3	525	1.41

## 5. Conclusion

In this study, the performance of the MCS and FEM models to predict the factor of safety (FS) has been investigated. For this purpose, a MCS was developed by using the large field experimental data. The FS values predicted from the MCS model was compared with the experimental values taken from the large-scale experimental study and FEM model developed. The results indicated that the predicted values from the MCS model matched the modelled values much better than those obtained from the FEM model.

Also, the nature of the problem suggests that the proposed model can be directly apply to developed conditions and should only be used for the specified parameters and ranges. Therefore, considering the MCS model's accuracy, the model can be utilized at the preliminary planning stage of the FS value without a need to perform any manual work. To evaluate the estimation capacity of the generated MCS and FEM models, reliability index and probability of failure were computed.

The computed indices make it clear that both constructed MCS and FEM were able to predict FS values of landslide quite efficiently and outperformed the FEM models. Thus, the developed MCS models can be used satisfactorily to predict the factor of safety (FS) of the slope/pile system.

### Declaration of Ethical Standards

The authors declare that they comply with all ethical standards.

### Credit Authorship Contribution Statement

Author 1: Resources, Investigation, Methodology, Formal analysis, Writing – original draft, Visualization

Author 2: Resources, Visualization

### 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.

### Data Availability

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

## 6. References

- Al Boudier, W., 2010. Development of Design and Analysis Method for Slope Stabilization Using Drilled Shafts. Ph.D. Dissertation, University of Akron, Ohio, 215.
- Blake, T.F., Hollingsworth, R.A. and Stewart, J.P., 2003. A Screen Analysis Procedure for Seismic Slope Stability, *Earthquake Spectra*, **19**(3),697–712.
- Caballero, W.L. and Rahman, A., 2014. Application of Monte Carlo simulation technique for flood estimation for two catchments in New South Wales, Australia, *Natural Hazards*, **74**(3), 1475–1488.
- Chen, Q., Wang, C. and Juang, C.H., 2016. Probabilistic and spatial assessment of liquefaction-induced settlements through multi-scale random field models, *Engineering Geology*, **211**, 135-149.
- Ching, J. and Wang, J.S., 2016. Application of the transitional Markov chain Monte Carlo algorithm to probabilistic site characterization, *Engineering Geology*, **203**, 151-167.
- Cui, L. and Sheng, D., 2005. Genetic algorithms in probabilistic finite element analysis of geotechnical problems, *Computers and Geotechnics*, **32**(8), 555-563.
- Dagli, B.Y., Tuskan, Y. and Gökkuş, Ü., 2018. Evaluation of offshore wind turbine tower dynamics with numerical analysis, *Advances in Civil Engineering*, 1-11.
- Dagli, B.Y., Uncu, D. and Tuskan, Y., 2019. Deniz Boru Hattı Dinamik Davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemi

- ile Analizi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **23**(2), 404-410.
- Erzin, Y. and Tuskan, Y., 2016. Prediction of Standard Penetration Test (SPT) Value in Izmir, Turkey using General Regression Neural Network. *International Conference on Agricultural, Civil and Environmental Engineering (ACEE-16) April*, 18-19.
- Erzin, Y. and Tuskan, Y., 2017. Prediction of standard penetration test (SPT) value in Izmir, Turkey using radial basis neural network, *Celal Bayar University Journal of Science*, **13**(2), 433-439.
- Erzin, Y. and Tuskan, Y., 2019. The use of neural networks for predicting the factor of safety of soil against liquefaction, *Scientia Iranica*, **26**(5), 2615-2623.
- Jiang, S.H., Li, D.Q., Zhang, L.M. and Zhou, C.B., 2014. Slope reliability analysis considering spatially variable shear strength parameters using a non-intrusive stochastic finite element method, *Engineering Geology*, **168**, 120-128.
- Kulhawy, F.H. and Mayne, P.W., 1990. Manual on estimating soil properties for foundation design, Electric Power Research Institute (EPRI) Palo Alto, CA (USA); Cornell Univ., Ithaca, NY (USA). Geotechnical Engineering Group, 25-36.
- Liang, R. and Zeng, S., 2002. Numerical study of soil arching mechanism in drilled shafts for slope stabilization, *Soils and Foundations*, **42**(2), 83-92.
- Liang, R.Y., Joorabchi, A.E. and Li, L., 2014. Analysis and design method for slope stabilization using a row of drilled shafts, *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering*, **140**(5), 1-12.
- Li, T.L., Long, J.H. and Li, X.S., 2007. Types of loess landslides and methods for their movement forecast, *Engineering Geology*, **15**(4), 500-506.
- Li, S., Zhao, H.B. and Ru, Z., 2013. Slope reliability analysis by updated support vector machine and Monte Carlo simulation, *Natural Hazards*, **65**(1), 707-722.
- Li, T.L., Wang, C.Y. and Li, P., 2013. Loess deposit and loess landslides on the Chinese loess plateau, *Progress of geo-disaster mitigation technology in Asia*, 235-261.
- Li, Z., Huang, H. and Xue, Y., 2014. Cut-slope versus shallow tunnel: Risk-based decision-making framework for alternative selection, *Engineering Geology*, **176**, 11-23.
- Li, J.H., Zhou, Y., Zhang, L.L., Tian, Y., Cassidy, M.J. and Zhang, L.M., 2016. Random finite element method for spud can foundations in spatially variable soils, *Engineering Geology*, **205**, 146-155.
- MathWorks, Neural Network Toolbox 7.0., 2010. MathWorks Announces Release 2010a of the MATLAB and Simulink Product Families, MathWorks Inc.
- Mohammadi, S. and Taiebat, H., 2016. Finite element simulation of an excavation-triggered landslide using large deformation theory, *Engineering Geology*, **205**, 62-72.
- Murthy, K., 2000. Monte Carlo: Basics, Monte Carlo: Basics. arXiv preprint cond-mat/0104215, Chapter, 9.
- Nowak, A. and Collins, K., 2000. Reliability of Structures First edition, McGraw Hill Higher Education, USA.
- Phoon, K.K., 2017. Role of reliability calculations in geotechnical design. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, **11**(1), 4-21.
- Saghafian, B., Golian, S., Elmi, M. and Akhtari, R., 2013. Monte Carlo analysis of the effect of spatial distribution of storms on prioritization of flood source areas, *Natural Hazards*, **66**(2), 1059-1071.
- U.S. EPA., 1997. Ecological risk assessment guidance for Superfund: process for designing and conducting ecological risk assessments, Interim Final. Washington, DC: Office of Solid Waste and Emergency Response. EPA.
- Uzielli, M., Lacasse, S., Nadim, F. and Lunne, T., 2006. Uncertainty-based Characterization of Troll Marine Clay, Characterization and Engineering Properties of Natural Soils, Eds. T. S. Tan, K. K. Phoon, D. W. Hight & S. Leroueil, Taylor & Francis, Leiden, **4**, 2753-2782.
- Vanmarcke, E.H., 1977. Probabilistic modeling of soil profiles, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, **103**(11), 1227-1246.
- Wang, J.P., Lin, C.W., Taheri, H. and Chan, W.S., 2012. Impact of fault parameter uncertainties on earthquake recurrence probability examined by Monte Carlo simulation an example in Central Taiwan, *Engineering Geology*, **126**, 67-74.

- Wang, X.G., Jia, Z.X., Chen, Z.Y. and Xu, Y., 2016. Determination of discontinuity persistent ratio by Monte-Carlo simulation and dynamic programming, *Engineering Geology*, **203**, 83-98.
- Xiao, J., Luo, Z., Martin II, J.R., Gong, W. and Wang, L., 2016. Probabilistic geotechnical analysis of energy piles in granular soils, *Engineering Geology*, **209**, 119–127.
- Yamin, M.M., 2007. Landslide stabilization using a single row of rock-socketed drilled shafts and analysis of laterally loaded shafts using shaft deflection data." Ph.D. Dissertation, University of Akron, Ohio, 335.
- Yazdani, A. and Kowsari, M., 2017. A probabilistic procedure for scenario-based seismic hazard maps of Greater Tehran, *Engineering Geology*, **218**, 162-172.
- Yildizel, S.A., Tuskan, Y. and Kaplan, G., 2017. Prediction of skid resistance value of glass fiber-reinforced tiling materials, *Advances in Civil Engineering*, 2017.
- Zhou, G., Esaki, T., Mitani, Y., Xie, M. and Mori, J., 2003. Spatial probabilistic modeling of slope failure using an integrated GIS Monte Carlo simulation approach, *Engineering Geology*, **68**, 373-386



## 7131 Çeliğinin Hassas Dökümünden Elde Edilen Döküm Atık Kumu Katılarak Şamot Refrakter Üretimi

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 14.04.2023

Kabul/Accepted: 11.01.2024

Yayımlandı/Published: 27.02.2024

### The Production of Chamotte Refractories by Incorporation of Foundry Waste Sand Obtained From Investment Casting of 7131 Steel

Tuba BAHTLI<sup>1\*</sup>, Veysel Murat BOSTANCI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Necmettin Erbakan Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 42100, Konya, Türkiye

<sup>2</sup> Necmettin Erbakan Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 42100, Konya, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

Alüminasilikat esaslı kalıplar hassas döküm proseslerinde kullanıldıktan sonra atık haline gelerek, geri dönüşüm yapılmadan birikmesi çevreye zarar vermekte ve sorun haline gelmektedir. Bu çalışmada, 7131 çeliğinin hassas dökümünden sonra oluşan hassas döküm atık kumu (PCWS-A) kullanılarak şamot refrakter malzemeler üretilmiştir. Üretilen şamot refrakter malzemelerin fiziksel, mekanik ve termal şok özellikleri belirlenmiş, malzemelerinin XRD (X-ışını kırınım yöntemi) ve SEM (taramalı elektron mikroskopu) analizleri yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre termal şok testi öncesi ve sonrası PCWS-A kullanılarak üretilen şamot refrakter malzemelerin mekanik ve termal özelliklerinin iyileştirildiği ve dolayısıyla hassas döküm atık kumları ile şamot refrakter tuğla üretiminin performans, maliyet ve çevre açısından avantajlar sağlayacağı öngörülmüştür. Sağlanacak bu avantajlarda, kullanılan PCWS-A içerisinde refrakter malzemelerin mekanik özelliklerine katkı sağladığı bilinen zirkonun bulunmasının etkili olduğu düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Şamot; Hassas döküm; Refrakter; Atık.

#### Abstract

Alumina Silicate based molds become waste after being used in precision casting processes, and their accumulation without recycling harms the environment and becomes a problem. In this study, fireclay refractory materials were produced by using precision casting waste sand (PCWS-A) formed after precision casting of 7131 steel. The physical, mechanical and thermal shock properties of the produced chamotte refractory materials were determined, and XRD (X-ray diffraction method) and SEM (scanning electron microscope) analyzes of the materials were made. According to the results obtained, it was predicted that the mechanical and thermal properties of fireclay refractory materials produced using PCWS-A before and after the thermal shock test were improved, and therefore, the production of chamotte refractory bricks with investment casting waste sands would provide advantages in terms of performance, cost and environment. It is thought that the presence of zircon, which is known to contribute to the mechanical properties of refractory materials, in the PCWS-A used is effective in these advantages

**Keywords:** Chamotte; Investment casting; Refractory; Waste.

#### 1. Giriş

Hassas döküm tekniği, doğruluk, çok yönlülük, bütünlük ve metalurjik sınırlamalar olmaksızın temel faydaları nedeniyle yüksek kaliteli ve karmaşık geometrilere sahip metalik parçaların üretiminde muazzam avantajlara sahiptir (Kanyo vd. 2020, Jones ve Yuan 2003, Körber vd. 2021). Seramik kabuğun mekanik ve fiziksel özelliklerini, döküm işleminde karmaşık mekanik harekete dayanacak ve ardından farklı döküm alaşımları için benzersiz gereksinimleri karşılayacak şekilde optimize etmek esastır (Pattnaik vd. 2012, Mishra ve Ranjana 2010). Örneğin, kabuğun yüksek ham mukavemeti, mum alma işlemi sırasında zarar görmeden kolayca işlemek için arzu edilir ve kabuğun yüksek sinterlenmiş mukavemeti, dökme eriyiğinin stresini taşımaya yardımcı olur, ayrıca

metalurjik kusurların oluşmasını önlemek adına iyi geçirgenlik ve ısı transferi faydalıdır (Kanyo vd. 2020). Genel olarak, kabuğun fazladan katlarının eklenmesi, kabuğun karmaşık strese dayanma ve dökümlerin aşırı deformasyonunu önleme yeteneğini geliştirmek için etkili bir yaklaşımdır (Yuan ve Jones 2003).

Hammaddede sürekli artan maliyet ve talep, kullanılmış seramik malzemelerin refrakter sektöründe alternatif bir hammadde olarak geri dönüşümünü zorunlu kılmaktadır (Hossain ve Roy 2020). Ateş kili, yüksek termal şok direnci, yüksek refrakterlik ve yüksek korozyon direnci özellikleri nedeniyle inşaat endüstrisinde en umut verici ve popüler olarak kullanılan yalıtım ve yapı malzemelerinden biridir (Javed vd. 2020). %50-60 silika ve %18-44 alümina içerir (Lingling vd. 2005).

Çoğu ülkede hükümet, madenlerin aşırı kazılması nedeniyle madenlerini sınırlama talimatı vermiştir. Maden sektörlerinde büyük talep yaratmaktadır (Reijnders 2007). Sanayiciler ve bilimsel uzmanlar, endüstriyel atıkların refrakter tuğla, beton, plastik, demir üretimi vb. gibi çeşitli endüstriyel uygulamalar için ikame malzeme olarak yeniden kullanılmasına yönelik birçok araştırma türünü ortaya koymuştur (Samadi vd. 2020). Bu ikame inşaat sektöründe hammadde maliyetini düşürür ve atık olarak kabul edilen malzemeyi yeniden kullanır (Sahu ve Singh 2017, Kazmi vd. 2018).

Türkiye’de çoğunlukla makina, havacılık, enerji, medikal, otomotiv ve gıda sektörlerine üretimler hassas döküm ile yapılmaktadır. Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği (TOBB) Döküm Sanayi Sektör Meclisi-2020 Hassas Döküm Raporu ile Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği (TÜDÖKSAD)’nin 2021 yılı sektör raporunda, 2016’da dünyada 1,8 milyon ton hassas döküm üretimi yapıldığı ve 2023’te üretimin 2,43 milyon tona ulaşacağı belirtilmiştir (İnt. Kyn. 1).

Literatürde atık döküm kumları ile ilgili çalışmalar incelendiğinde; atık döküm kumlarının portland çimento betonunda %30’a kadar kullanımının, özellikleri olumsuz yönde etkilemediği tespit edilmiştir (Torres 2017, Siddique ve Singh 2011) atık döküm kumunun beton özelliklerine etkisini incelemiş ve elde ettikleri basınç ve kopma dayanımı, elastisite modülü, donma çözülme direnci ve büzülme değerleri sonuçlarına göre döküm kumunun beton yapımında kullanılabilirliğinin uygun olduğunu belirtmiştir.

Gedik tarafından yapılan çalışmada atık döküm kumlarının karayolu dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılarak klasik yol malzemeleriyle ekonomik olarak karşılaştırılmıştır (Gedik 2008). Vitrikiye

ve seramik sektöründe de kullanımı üzerine çalışmalar yapılmış olup olumlu sonuçlar elde edilmiştir (Bragança vd. 2006, Lin vd. 2017).

Xiang ve ark. tarafından yapılan çalışmada, zirkon çıkarımı sonrası elde edilen atık kum kullanılmış, mikro yapıyı ve fiziksel özellikleri incelemek için ağırlıkça %10 polivinilalkol (PVA) çözeltisi ile numuneler hazırlanmış; 1300-1550 °C’de ısıtılma tabii tutulan atık kum örneklerinin mikroyapısal gelişimi incelenmiştir. Çalışmada, atık kumun 1450 °C’nin altında uygun stabilite göstermesiyle refrakterde potansiyel kullanımı olabileceği, 1500 °C veya daha yüksek sıcaklıklarda işlem gördüğünde atık kumda dikkate değer değişikliklerin örneğin zirkon ayrışması ve 1550 °C üzerinde kristobalitin erimesi sonucu yoğunluk düşmesi gibi etkilerin oluşabileceği, bu sebeple atık kumun izolasyon malzemesinde kullanımı üzerinde odaklanılmasının uygun olacağı sonuçlarına ulaşılmıştır (Xiang vd. 2019).

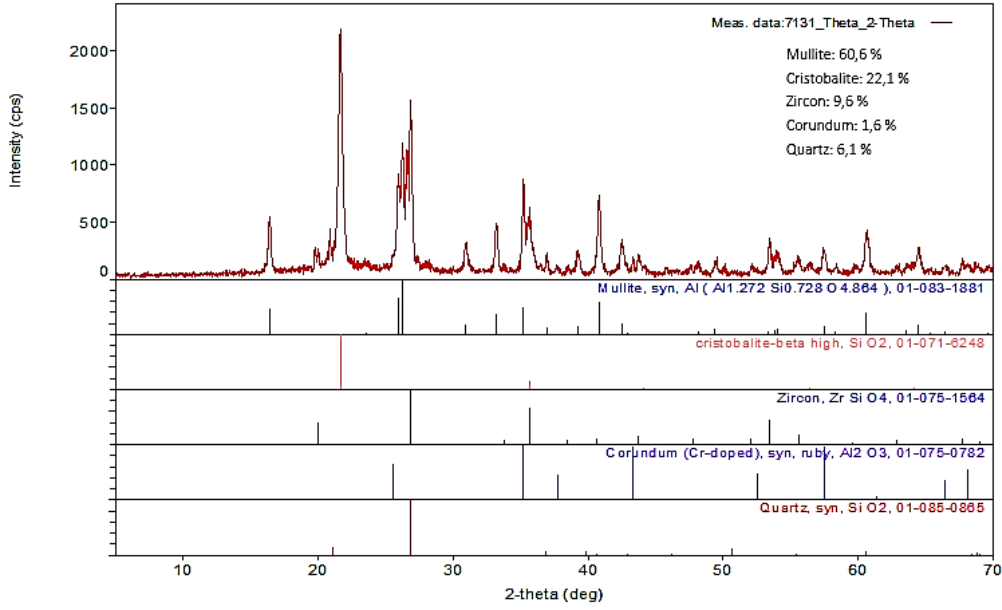
Literatürde hassas döküm atık kumlarının geri kazanımına yönelik çalışmalar sınırlı olup bu çalışmada atık bertarafı için hassas döküm atık kumlarının şamot refrakter üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

Şamot, boksit ve 7131 çeliğinin hassas dökümünden sonra oluşan atık kumuna (PCWS-A) ait XRF (RİGAKU ZSX Primus) analiz sonuçları Çizelge 1’de verilmiştir. Ağırlıklı olarak Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve SiO<sub>2</sub>’den oluşan hammaddelerde safsızlıkların miktarı da maksimum %3 civarındadır. Atık malzeme içerisinde de %6 seviyesinde ZrO<sub>2</sub> varlığı görülmektedir.

**Çizelge 1.** Atık kumu ve hammaddelere ait XRF analiz sonuçları.

	7131	Şamot 1-3mm	Şamot 0-1mm	Şamot Toz	Boksit 1-3mm
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35,59	33,67	28,53	33,63	71,81
SiO <sub>2</sub>	53,29	61,48	66,82	59,96	22,99
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,52	1,66	1,54	2,46	2,09
TiO <sub>2</sub>	2,18	2,84	2,52	2,99	2,80
CaO	0,25	0,35	0,59	0,96	0,31
<b>ZrO<sub>2</sub></b>	<b>6,14</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
Na <sub>2</sub> O	0,39	0,00	0,00	0,00	0,00
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00
K <sub>2</sub> O	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00
HfO <sub>2</sub>	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00
MnO	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00



Şekil 1. Hassas döküm atık kumuna ait XRD analizi.

Çizelge 2. Şamot refrakter tuğla üretimi için kompozisyon reçeteleri.

	1-3 mm Şamot (%)	0-1 mm Şamot (%)	-63 µm Şamot (%)	1-3 mm Boksit (%)	-63 µm PCWS-A (%)	Bağlama Kili (%)	Totanin (%)
R	20	15	20	35	0	10	3
X5	20	15	15	35	5	10	3
X10	20	15	10	35	10	10	3
X20	20	15	0	35	20	10	3

XRD (Panalytical empyrean) analiz sonuçlarında (Şekil 1) atık malzeme içerisinde bulunan fazlar görülmektedir. Rietveld analizi sonrası mevcut fazların %60,6'sı müllit ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ), %6,1'i kuvars ( $SiO_2$ ), %22,1'i kristobalit ( $SiO_2$ ), %9,6'sı zirkon ( $ZrSiO_4$ ) ve %1,6'sının korundum ( $Al_2O_3$ ) fazı olduğu tespit edilmiştir. Hassas döküm kumu içinde olan fazların Şamot (Alüminasilikat) yapısına uygun olacağı göz önüne alınarak hem atık geri kazanımı, hem zirkon ile refrakter özelliklerinin iyileştirilmesi, hem de şamot hammadde miktarının bir kısmının atık kumdan sağlanması ile üretim maliyetinin azaltılması amacıyla şamot refrakterler içerisinde farklı oranlarda hassas atık kumları kullanılmıştır (Çizelge 2). Çizelge 2'de belirtilen kompozisyonlar (X5: %5 katkı, X10: %10 katkı ve X20: %20 katkı) Necmettin Erbakan Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği bölümü laboratuvarında karışımı gerçekleştirildikten sonra Hürsan marka preste 25 bar (40 MPa) basınç uygulanarak: i)  $125 \text{ cm}^3$  kare prizma, ii) 35 bar (40 MPa) basınç uygulanarak 25 mm x 25 mm x 150 mm ebatlarında çubuk şeklinde refrakter malzemeler olarak şekillendirilmiştir.

Şekillendirilen malzemeler MSE Marka ATM\_EL\_V1700\_12\_(CH) model yüksek sıcaklık fırını içerisinde  $5^\circ\text{C}/\text{dk}$ 'lık ısıtma hızı kullanılarak, 4 saat süre

ile  $1250^\circ\text{C}$ 'de sinterlenmiştir. Sinterleme işlemi sonrası malzemelerin yoğunluk ve açık gözenek testleri BS 7131 standardında Arşimet terazisi ile gerçekleştirilmiştir. Numuneler düzeneğe yerleştirilerek su içerisindeki ağırlıkları ( $W_b$ ), sudan çıkarılan numunelerin yüzeyi kâğıt mendil ile silinerek yağ ağırlıkları ( $W_c$ ), son aşama olarak numuneler etüvde kurutulduktan sonra kuru ağırlıkları hassas terazide tartılarak belirlenmiştir ( $W_a$ ). Görünür porozite (%) ve yığınsal (bulk) yoğunluk değerleri görünür porozite ve yoğunluk denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır (British Standart, 1989). Formülde dsu suyun yoğunluğudur.

$$\text{Görünür Porozite (\%)} = [(W_c - W_a) / (W_c - W_b)] \times 100$$

$$\text{Yığınsal (Bulk) Yoğunluk} = [dsu \times W_a / (W_c - W_b)]$$

Mekanik testlerden soğuk basma mukavemeti testi ASTM C133 ve 3 nokta eğme testi ASTM C1161-90 standartlarında gerçekleştirilmiştir. Mekanik testlerle malzemelerin mukavemet, tokluk, elastik modül değerleri incelenmiştir. Daha sonra malzemelerin ısı şoka dirençlerini belirlemek adına ısı şok testi uygulanmıştır. Üretilen malzemelerin mikroyapı analizleri ve kırık yüzey incelemeleri taramalı elektron mikroskobu

(Hitachi – SU 1510) ile ve faz analizleri de XRD (Panalytical Empyrean) ile gerçekleştirilmiştir.

### 3. Bulgular

#### 3.1. Fiziksel testlere ait sonuçlar

Arşimet düzeneği yapılarak fiziksel testleri gerçekleştirilen malzemelere ait %açık gözenek ve yoğunluk grafikleri Şekil 2'de gösterilmiştir. %5 ve %10 katkılı malzemelerin yoğunluk değerleri katkısız malzemeden yüksek olup, katkı miktarı %20 olduğunda, yoğunluk değeri katkısız malzemeye göre azalmaktadır. Zirkon varlığı yoğunlaşmayı artırmış ve böylece mekanik özelliklerin artmasında önemli bir faktör olarak kabul edilen gözenekliliği önemli ölçüde azaltmıştır (Aksel 2003).

Toz haline getirilen hassas döküm atık kumu ile gözeneklerin dolması ve içerisinde daha yoğun olan zirkon mineralinin ( $4,7 \text{ g/cm}^3$ ) refraktere katılması ile % açık gözenek değerlerinin azaldığı ve yoğunluğun arttığı ancak hassas döküm atık kumunun artması ile mikroçatlak miktarının ve gözeneklerin artması, farklı sinterlenme davranışlarına bağlı olarak atık kum ile refrakter tanelerin ara yüzeylerinde oluşan zayıf bağlanmalar sebebi ile yoğunluğun azaldığı düşünülmüştür (Bahtlı ve Bostancı 2020).

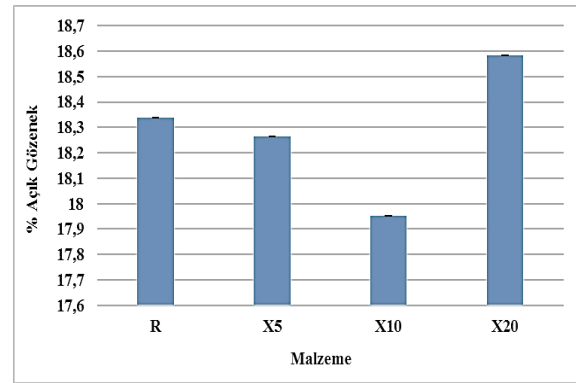
Refrakterlerde zirkon ilavesi ile ilgili çalışmalara bakıldığında, zirkon ilavesi ile hazırlanan numunelerin yoğunluk değerlerinin artan zirkon ilavesiyle, zirkonun ana yapıdan daha yoğun olması sebebiyle ( $d_{\text{zirkon}}:4,7 \text{ g/cm}^3$ ) arttığı gözlemlenmiştir (Ceylantekin ve Aksel 2010, Meng vd. 2016). Şamot refraktere zirkon ilavesinin, zirkon mineralinin şamottan daha yoğun olmasından dolayı yoğunlukta artışa sebep olduğu belirlenmiştir (Xiang vd. 2016).

#### 3.2. Mekanik testlere ait sonuçlar

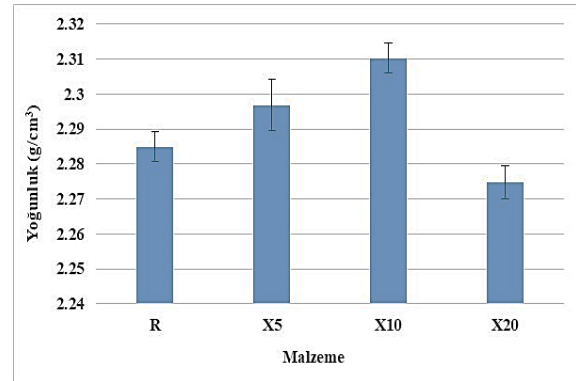
Üretimi gerçekleştirilen malzemelere ait soğuk basma mukavemeti (SBM) testine ait grafik Şekil 3'te gösterilmiştir. Soğuk basma mukavemeti sonuçlarına göre, ağırlıkça %5 ve %10 oranlarında PCWS-A içeren şamot malzemelerinin soğuk basma mukavemet değerleri katkısız malzemeden daha yüksek iken %20 PCWS-A ilavesi ile üretilen şamot refrakterlerin SBM değerinde bir miktar düşüş gözlemlenmiştir. Benzer sonuçlar yoğunluk tayininde de elde edilmiştir. Yoğunluk artışı ile SBM değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Yoğunluk

değerinin SBM üzerine etkili olduğu belirlenmiştir.

Zirkon ilavesinin yoğunluğu artırdığı ve açık gözeneği düşürdüğü gözlemlenmiştir. Artan zirkon ilavesinin soğuk basma mukavemetini de artırdığı gözlemlenmiştir (Meng vd. 2016). Refrakterlerde bağlayıcı faz için kullanılacak hammaddelerde alkali, toprak alkali oksitlerin ve demir oksit içeren bileşiklerin ( $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) mümkün oldukça düşük seviyede olması arzu edilir. Bu tip oksitlerin miktarının yüksek olması yük altında refrakterlik, yüksek sıcaklıkta eğme mukavemeti (Hot-MOR) gibi yüksek sıcaklık refrakterlik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir (Başpınar 2005).

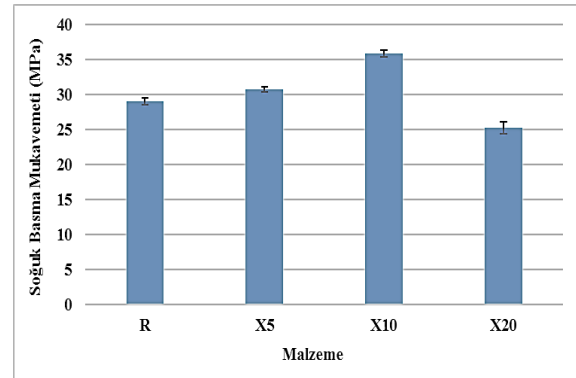


(a)



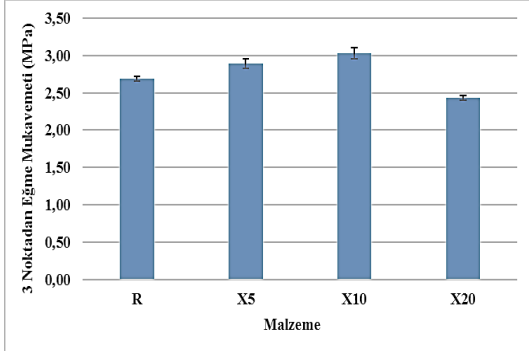
(b)

Şekil 2. Katkısız ve PCWS-A kullanılarak üretilen şamot refrakter kompozisyonlara ait a) % açık gözenek, b) yoğunluk grafiği.



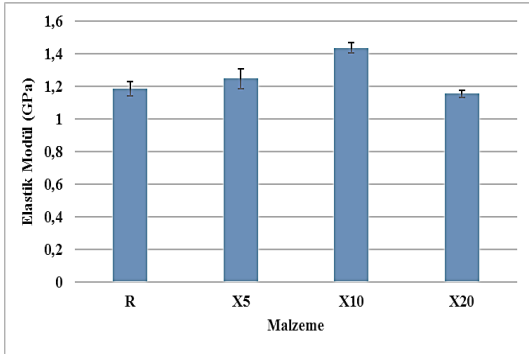
Şekil 3. Katkısız ve PCWS-A kullanılarak üretilen kompozisyonlara ait soğuk basma mukavemeti grafiği.

Şekil 4 ve Şekil 5'te üretilen malzemelerin 3 nokta eğme, elastik modül ve tokluk grafikleri verilmiştir. %5 ve %10 oranlarında PCWS-A ilavesi ile üretilen şamot refrakterler için zirkon ilavesi ile yoğunluk ve mukavemet artmıştır. Ayrıca zirkon tanelerinin varlığı ile tokluk ve elastik modülü değerleri de artmıştır.

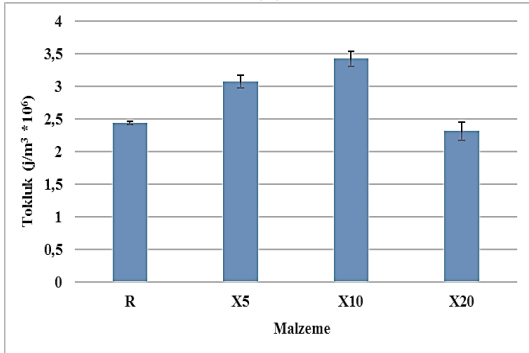


Şekil 4. Katkısız ve PCWS-A kullanılarak üretilen kompozisyonlara ait 3 nokta eğme mukavemeti grafiği.

Zirkonya-müllit kompozitlerinin müllite göre daha iyi korozyon direncine, mukavemete ve tokluğa sahip olduğunu ve bu kompozitlerin özellikle cam fırınlarında kullanılan önemli seramik malzemeler olduğu bildirilmiştir (Biswas ve Chaudhuri 1999). Malzemenin bağ mukavemetinin artmasının mekanik özellikler üzerine etkili olduğu; ancak daha yüksek oranda PCWS-A ilavesi ile gözenek miktarı ve mikroçatlakların artması ve bağ mukavemetinin de azalması ile mekanik özelliklerin azaldığı düşünülmüştür.



(a)

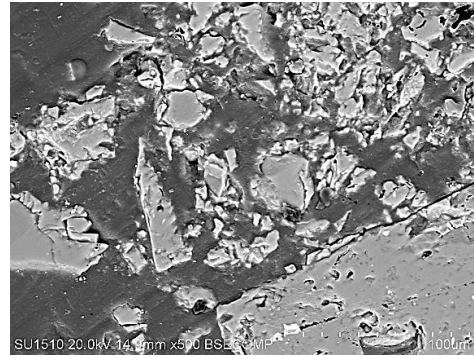


(b)

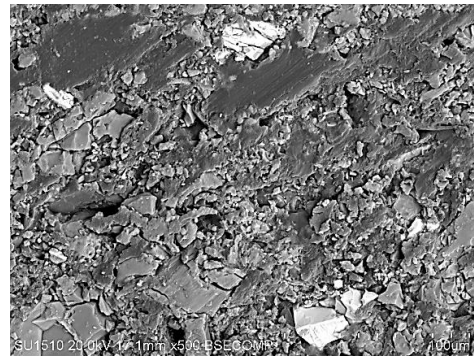
Şekil 5. Katkısız ve PCWS-A kullanılarak üretilen kompozisyonlara ait Elastik modül ve Tokluk grafiği.

### 3.3. İç yapı incelemeleri

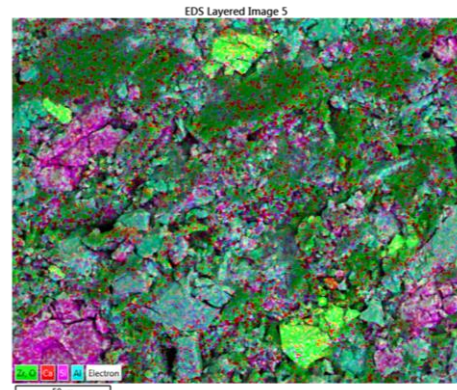
Şekil 6'da malzemelerin mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Şekil 7.c'de yapı içerisindeki zirkon sarı renkle gösterilmiştir. PCWS-A katkılı refrakter malzemeye ait mikroyapı görüntüsü incelendiğinde referans malzemeye göre daha küçük tanelerden oluştuğu görülmektedir. Referans malzemeye göre düşük tane boyutu, zirkon varlığı ile toklaşmanın yanı sıra mikroçatlakların ve gözeneklerin varlığının toklukta artışa sebep olduğu ve bu sebepten referans malzemeye göre daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu düşünülmektedir. Ancak atık girdisi arttıkça bu durumun çatlak ilerlemesini engellemek yerine daha büyük çatlaklara sebep olduğu malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerini olumsuz etkilediği düşünülmektedir.



(a)



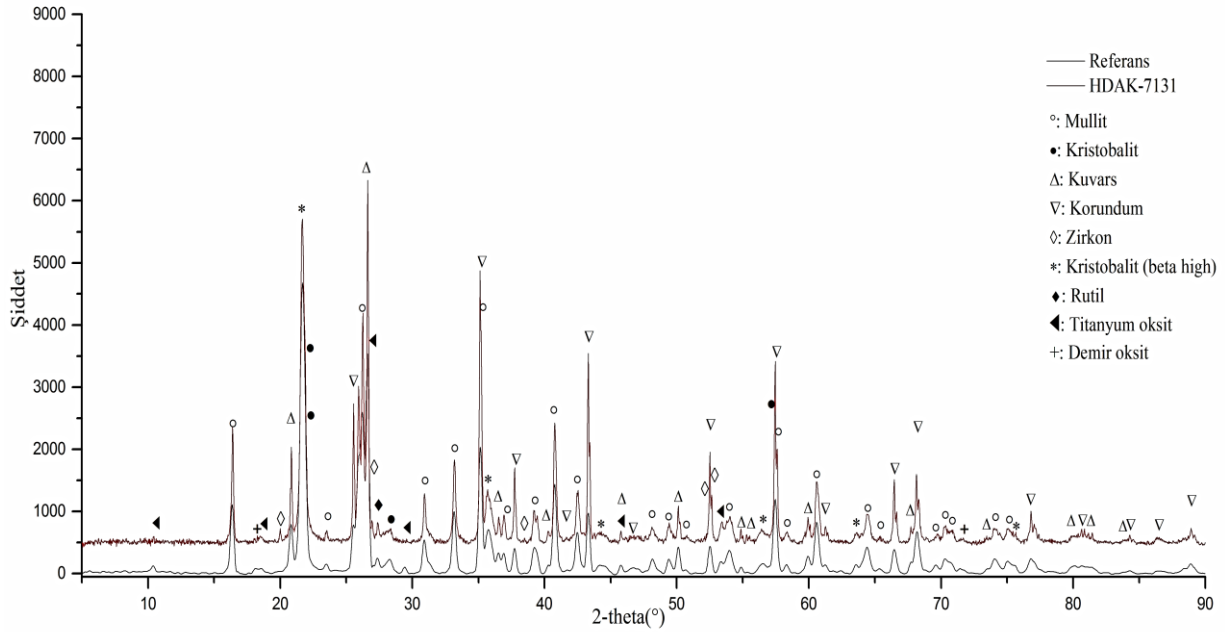
(b)



(c)

Şekil 6. a) Referans, b) %10 PCWS-A katkılı kompozisyonlara ait mikroyapı analizleri ve c) %10 PCWS-A kompozisyonuna ait mikroyapı haritalaması.





Şekil 7. Katkısız ve PCWS-A katkılı malzemeye ait XRD grafiği.

Şekil 7’de ki XRD analizleri incelendiğinde üretilen katkısız malzeme içeriğinde müllit ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ), kristobalit ( $SiO_2$ ), kuvars ( $SiO_2$ ), korundum ( $Al_2O_3$ ), titanyum dioksit ( $TiO_2$ ) ve demir oksit ( $Fe_2O_3$ ) fazlarının olduğu görülmüştür. Katkılı malzemeler incelendiğinde ise müllit ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ), kristobalit ( $SiO_2$ ), kuvars ( $SiO_2$ ), korundum ( $Al_2O_3$ ), zirkon ( $ZrSiO_4$ ), beta kristobalit ( $\beta-SiO_2$ ), demir oksit ( $Fe_2O_3$ ) ve rutil ( $TiO_2$ ) fazlarının olduğu görülmektedir. Hassas döküm kumu atıklarından kaynaklanan yeni bir faz oluşumuna rastlanmamıştır. Yapılan Rietveld analizi sonrası sonuçlar Çizelge 3’te gösterilmiştir.

Çizelge 3. XRD - Rietveld analizi sonuçları

Faz	Referans (%)	7131 (%)
Müllit	40,5	46,6
Kristobalit	4,4	4
Kuvars	10,7	10,3
Korundum	31,2	23
Zirkon	-	0,3
Kristobalit ( $\beta$ )	13	15,4
Rutil	-	0,3
Titanyum dioksit	-	0,1
Demir oksit	0,2	-

### 3.5. Isıl Şok Testine Ait Sonuçlar

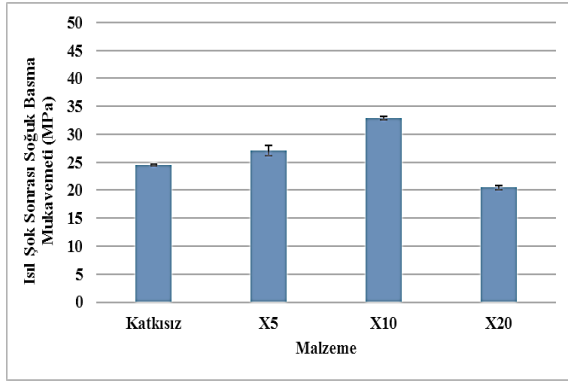
Isıl şok testi sonrası elde edilen grafikler Şekil 8’de gösterilmiştir. SBM ve 3 nokta eğme testlerinin sonuçları incelendiğinde genel olarak mukavemet düşüşü meydana gelmiştir. Bu duruma malzemenin içinde

bulunan çatlaklara ısıl şok sonrası meydana gelen yeni çatlakların meydana gelmesi sebep olarak gösterilebilir. Mukavemet oranı ısıl şok sonrası mukavemetin ne kadar korunduğunu göstermektedir. Mukavemet oranı; ısıl şok sonrası mukavemet değerlerinin, ısıl şok öncesi başlangıç değerlerine bölünmesiyle ifade edilmektedir. Soğuk basma testi mukavemet oranlarının genel olarak katkısız malzemenin değerine yakın olduğu görülmektedir. Şekil 9’da mukavemet oran grafikleri gösterilmiştir.

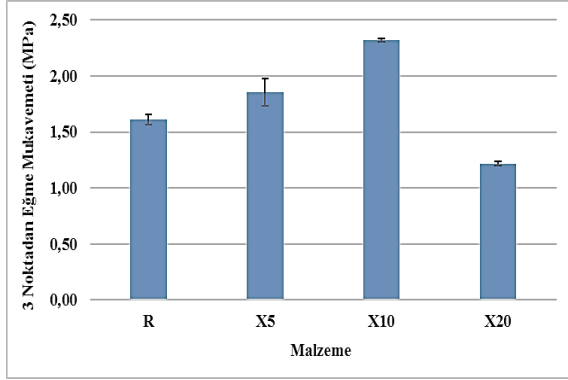
Zirkonun ısıl şoka direnci ve şok sonrası mikroçatlakların çatlak köprülenmesi ile enerjiyi absorbe etmesi mukavemet oranındaki artmaya sebep olarak açıklanabilir. 3 nokta eğme mukavemet oranı incelendiğinde ise %20 katkı kullanıldığında, katkısızdan düşük çıkarken genel olarak %5 ve %10 katkılı refrakterlerde katkısızdan yüksek çıkmaktadır. Zirkon içeriğinin hem tokluğa hem de ısıl şok direncinde etkin olduğu görülmüştür.

### 3.4. Kırık Yüzey SEM Analizine Ait Sonuçlar

Katkısız malzemeye ait kırık yüzey analizi görüntüsü Şekil 10’da gösterilmiştir. Isıl şok öncesi ve sonrası genel olarak küçük tanelerde taneler arası, büyük tanelerde ise tane içi kırılmalar gözlenmiştir. PCWS-A katkılı malzemeye ait kırık yüzey görüntüsü Şekil 11’de gösterilmiştir. Referans malzemeye göre daha küçük tane yapısına sahip olduğu görülmektedir. Şok öncesi küçük tanelerde taneler arası kırılmalar gözlenirken, ısıl şok sonrasında kırılmaların genel olarak tane içi kırılma tipinde olduğu gözlenmiştir.

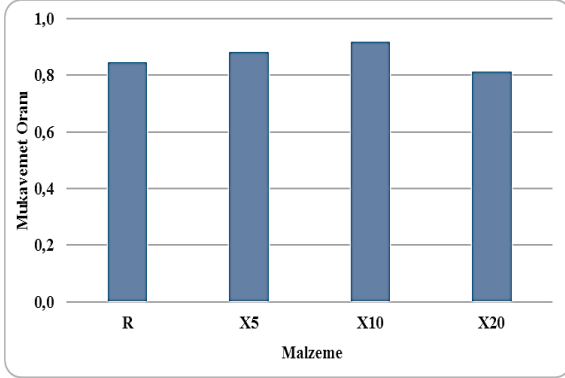


(a)

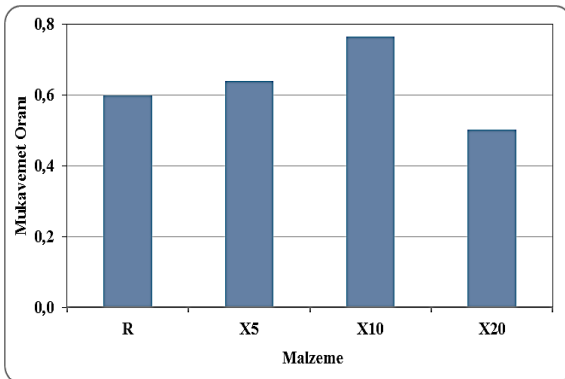


(b)

**Şekil 8.** Katkısız ve PCWS-A kullanılarak üretilen kompozisyonlara ait ısıl şok sonrası a) SBM ve b) 3 nokta eğme testleri sonucu elde edilen mukavemet grafikleri

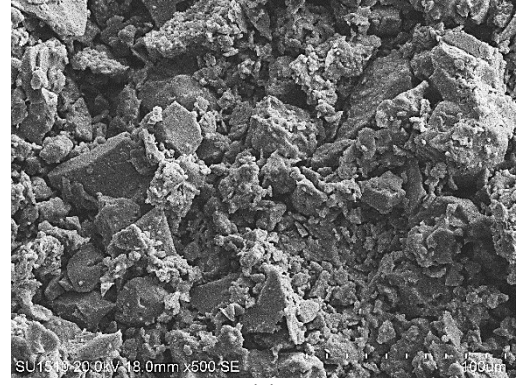


(a)

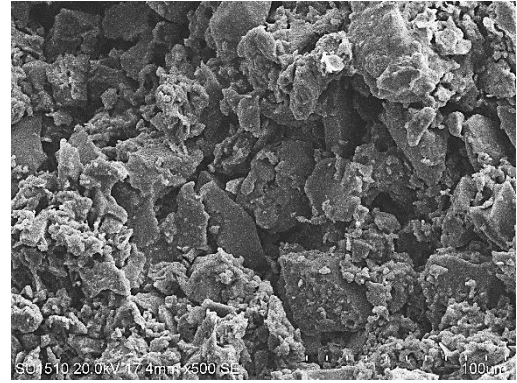


(b)

**Şekil 9.** Katkısız ve PCWS-A kullanılarak üretilen kompozisyonlara ait a) SBM ve b) 3 nokta eğme testleri sonucu elde edilen mukavemet oranı grafikleri

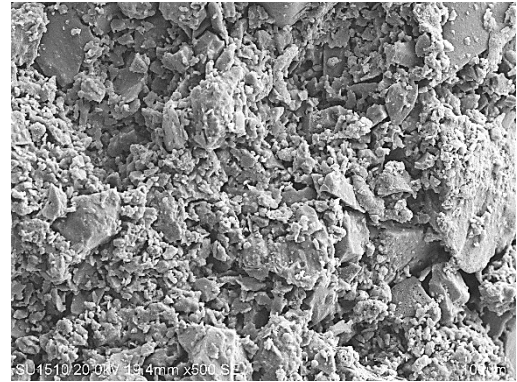


(a)

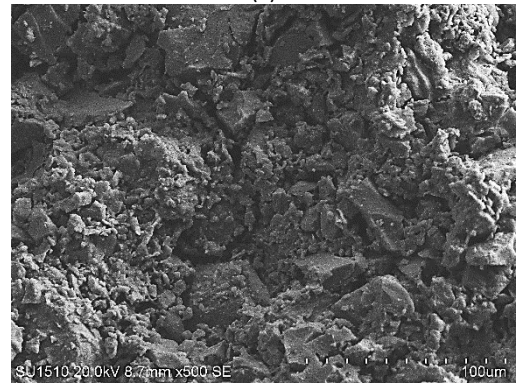


(b)

**Şekil 10.** Katkısız üretilen kompozisyonlara ait kırık yüzey analiz görüntüleri a) ısıl şok öncesi ve b) ısıl şok sonrası.



(a)



(b)

**Şekil 11.** %10 PCWS-A katkılı üretilen kompozisyonlara ait kırık yüzey analiz görüntüleri a) ısıl şok öncesi ve b) ısıl şok sonrası.

Tane içi ve taneler arası çatlakların bir arada bulunması, daha küçük tane boyutu, mikroçatlak oluşumu ve zirkon içeriği, termal şok testi sonrası mekanik özellikleri ve PCWS-A katkıları ile üretilen refrakterlerin termal şok dirençlerini etkileyen temel parametrelerdir (Bahtlı ve Bostancı 2019).

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Çevresel bir problem haline gelen ve depolama problemi yaşanan hassas döküm atık kumlarının tekrar kullanımına yönelik yapılan bu çalışma kapsamında hem şamot refrakter üretiminde hammadde girdisi olarak kullanımı için maliyet düşüşüne sebebiyet verecek hem de içerisinde barındırdığı zirkon mineralinin değerlendirilmesi ve bu mineralin mukavemette artışa sebebiyet vermesi bu atık malzemenin kullanımının tüm bu faktörlere faydalı olacağı söylenebilir.

Özellikle %10 katkılı malzemenin gösterdiği mukavemet artışı referansa göre SBM'de yaklaşık %23, 3 nokta eğmede ise yaklaşık %12 değerindedir. Tokluk değerleri incelendiğinde özellikle %10 katkılı malzemede yaklaşık %40 oranında artış meydana gelmiştir. Bu sonuçlar göz önüne alındığında atık malzemenin şamot refrakterlerde kullanımının olumlu sonuçlar verdiği söylenebilir.

Mikroyapı analizleri incelendiğinde zirkon varlığı ile toklaşmanın yanı sıra mikroçatlakların ve gözeneklerin varlığının da toklukta artışa sebep olduğu ve bu sebepten referans malzemeye göre daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu düşünülmektedir. Isıl şok analizi sonrası yapılan kırık yüzey analizinde atık içeren malzemenin referans malzemeye göre daha küçük tane boyutlu olduğu ve şok öncesi küçük tanelerde taneler arası kırılmalar gözlenirken, ısıl şok sonrasında kırılmaların genel olarak tane içi kırılma tipinde olduğu gözlenmiştir.

Yapılan çalışma sonucunda; 7131 kodlu çelik dökümü sonrası atık haline gelen hassas döküm kumu %5 ve %10 oranında kullanıldığında, katkısız şamot refrakter tuğlasına göre daha yüksek yoğunluk, mukavemet değerleri, tokluk, ısıl şok sonrası mukavemet oranı ve dolayısı ile daha iyi ısıl şok direncine sahip refrakterlerin üretildiği belirlenmiştir.

#### Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

#### Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Araştırma, Fikir Sahibi, Proje Yöneticisi, Kaynaklar, Yazma

Yazar 2: Kaynaklar, Araştırma, Deney tasarımı, Deneyleme, Karakterizasyon, 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

Aksel, C., 2003. Mechanical properties and thermal shock behaviour of alumina-mullite-zirconia and alumina-mullite refractory materials by slip casting. *Ceramics International*, **29**, 311-316, [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(02\)00139-6](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(02)00139-6).

In Annual Book of ASTM Standards 7 (2021) Standard Test Methods for Cold Crushing Strength and Modulus of Rupture of Refractories, Designation: ASTM C133-9, <https://doi.org/10.1520/C0133-97R21>.

In Annual Book of ASTM Standards (1991). Standard Test Methods for flexural strength of advanced ceramics at ambient temperature, Designation: C1161-90, <https://doi.org/10.1520/C1161-18R23>.

Bahtlı, T. and Bostancı, V.M., 2020. Effect of precision casting sand waste of 4140 steel on the sintering and densification behaviour of chamotte refractories. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **142**, 2385–2390, <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09956-6>.

Bahtlı, T. and Bostancı, V.M., 2019. Paslanmaz çeliklerin hassas döküm kumu atıklarının katılmasıyla üretilen beyaz ergimiş alümina refrakterlerinin mekanik özellikleri ve termal şok dayanımları. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **19** (Special issue), 440–446.

Başpınar, M.S., 2005. Müllit refrakterlerde bağlayıcı fazın optimizasyonu. Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 202.

Biswas, N. and Chaudhuri, S., 1999. Comparative study of zirconia-mullite and alumina-zirconia composites. *Bulletin of Materials Science*, **22**, 37-47, <https://doi.org/10.1007/BF02745674>.

Bragança, S.R., Vicenzi, J., Guerino, K., Bergmann, C.P., 2006. Recycling of iron foundry sand and glass waste as raw material for production of whiteware. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, **24**, 60–66, <https://doi.org/10.1177/0734242X06061155>.



- British Standard. (1989). British standard testing of engineering ceramics BS 7134 British Standards Institution.
- Ceylantekin, R. and Aksel, C., 2010. MgO-Spinel kompozit refrakterlere ZrSiO<sub>4</sub> ilavesinin korozyon davranışına etkisi. *Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi A- Uygulamalı Bilimler ve Mühendislik*, **11**, 103-104.
- Gedik, A., 2008. Atık döküm kumlarının karayolu malzemesi olarak kullanımı, Yüksek lisans tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 147.
- Hossain, S.S. and Roy, P.K., 2020. Sustainable ceramics derived from solid wastes: a review. *Journal of Asian Ceramic Societies*, **8**, 984-1009, <https://doi.org/10.1080/21870764.2020.1815348>.
- Javed, U., Khushnood, R.A., Memon, S.A., Jalal, F.E. and Zafar, M.S., 2020. Sustainable incorporation of lime-bentonite clay composite for production of eco-friendly bricks. *Journal of Cleaner Production*, **263**, 121469, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121469>.
- Jones, S. and C. Yuan, 2003. Advances in shell moulding for investment casting. *Journal of Materials Processing Technology*, **135**, 258-265, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00907-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00907-X).
- Kanyo, J.E., Schafföner, S., Uwanyuze, R.S. and K.S. Leary, 2020. An overview of ceramic molds for investment casting of nickel superalloys. *Journal of the European Ceramic Society*, **40**, 4955-4973, <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.07.013>.
- Kazmi, S.M.S., Munir, M.J., Patnaikuni, I., Wu, Y.-F. and Fawad, U., 2018. Thermal performance enhancement of eco-friendly bricks incorporating agro-wastes. *Energy and Buildings*, **158**, 1117-1129, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.056>.
- Körber, S., Völkl, R. and Glatzel, U., 2021. 3D printed polymer positive models for the investment casting of extremely thin-walled single crystals. *Journal of Materials Processing Technology*, **293**, 117095, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117095>.
- Lin, D.-F., Luo, H.-L., Lin, K.-L., Liu, Z.-K., 2017. Effects of waste glass and waste foundry sand additions on reclaimed tiles containing sewage sludge ash. *Environmental Technology*, **38**, 1679-1688, <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1296891>.
- Lingling, X., Wei, G., Tao, W. and Nanru, Y., 2005. Study on fired bricks with replacing clay by fly ash in high volume ratio. *Construction and Building Materials*, **19**, 243-247, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.05.017>.
- Meng, W., Ma, C., Ge, T. and Zhong, X., 2016. Effect of zircon addition on the physical properties and coatability adherence of MgO-2CaO-SiO<sub>2</sub>-3CaO-SiO<sub>2</sub> refractory materials. *Ceramics International*, **42**, 9032-9037, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.02.140>.
- Mishra, S. and Ranjana, R., 2010. Reverse solidification path methodology for dewaxing ceramic shells in investment casting process. *Materials and Manufacturing Processes*, **25**, 1385-1388, <https://doi.org/10.1080/10426914.2010.496125>.
- Pattnaik, S., Karunakar, D.B. and Jha, P.K., 2012. Developments in investment casting process-a review. *Journal of Materials Processing Technology*, **212**, 2332-2348, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.06.003>.
- Reijnders, L., (2007). Cleaner phosphogypsum, coal combustion ashes and waste incineration ashes for application in building materials: a review. *Building and Environment*, **42**, 1036-1042, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.09.016>.
- Sahu, M.K. and Singh, L., 2017. Critical review on types of bricks type 13: wood ash bricks. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, **5**, 80-83.
- Samadi, M., Huseien, G.F. Mohammadhosseini, H., Lee, H.S., Abdul Shukor Lim, N.H., Tahir, M.M. and Alyousef, R., 2020. Waste ceramic as low cost and eco-friendly materials in the production of sustainable mortars. *Journal of Cleaner Production*, **266**, 121825, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121825>.
- Siddique, R., Singh, G., 2011. Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing. *Resources, Conservation and Recycling*, **55**, 885-892, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.05.001>.
- Torres, A., Bartlett, L., Pilgrim, C., 2017. Effect of foundry waste on the mechanical properties of Portland Cement Concrete. *Construction and Building Materials*, **135**, 674-681, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.028>.
- Xiang, R.F., Li, Y.B., Li, S.J., Ma, X.Y., Li, Y.W. and Sang, S.B., 2016. Effect of zircon content on the microstructure and physical properties of chamotte refractories. *Key Engineering Materials*, **697**, 604-607, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.697.604>.

Xianga, R., Li, Y., Li, S., Xue, Z., He, Z., Ouyang, S., Xu, N., 2019. The potential usage of waste foundrys and from investment casting in refractory industry. *Journal of Cleaner Production*, **211**, 1322-1327, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.280>.

Yuan, C. and Jones, S., 2003. Investigation of fibre modified ceramic moulds for investment casting. *Journal of the European Ceramic Society*, **23**, 399-407, [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(02\)00153-X](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(02)00153-X).

#### **İnternet Kaynakları**

1-<https://tudoksad.org.tr/turkiye-hassas-dokumde-avrupa-nin-yeni-adresi-oldu> (28.09.2023)



## Analyzing Bornova Plain's Basin Structure Using Density Parameter

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 09.06.2023

Kabul/Accepted: 21.01.2024

Yayımlandı/Published: 27.02.2024

### Bornova Ovası'nın Havza Yapısının Yoğunluk Parametresi Kullanılarak Analizi

Yaprak ÖZDAĞ<sup>1\*</sup>, Oya ANKAYA PAMUKÇU<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Department of Geophysics Engineering, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Dokuz Eylül University, İzmir, 35390, Türkiye

<sup>2</sup>Department of Geophysics Engineering, Engineering Faculty, Dokuz Eylül University, İzmir, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Abstract

Due to the tectonic regime it has been subjected to under the influence of Western Anatolia, the area contains numerous sedimentary basin structures. The study area, located within the province of İzmir, is a region where a significant number of historical and instrumental earthquakes have occurred due to its tectonic structure. The Bornova Plain, located east of the inner Gulf of İzmir, is highly susceptible to earthquakes due to dense urbanization. This was clearly observed during the Samos earthquake on October 30, 2020. In this study, a microgravity field survey was conducted in a larger area than previous studies to better characterize the basin effect of the plain and obtain a high-resolution dataset representing a wide area. The necessary measurement point distribution was performed with a variable sampling interval of approximately 200-1000 meters, resulting in a microgravity dataset of 458 points. By taking 1 profile section from the residual Bouguer gravity map created for the Bornova Plain, inverse solution modeling was performed. The density values obtained from the inverse solution modeling were compared with the densities calculated from seismic velocities obtained through the spatial autocorrelation (SPAC) method conducted in the study area. A high consistency was observed between the density values obtained from the two different methods compared.

**Anahtar Kelimeler:** Bornova Basin; Gravity; SPAC; Density; Velocity.

#### Öz

Batı Anadolu etkisinde kaldığı açılma rejimi nedeniyle birçok sedimanter havza yapısı içerir. Çalışma alanını içeren İzmir ili tektonik yapısından dolayı tarihsel ve aletsel dönemde çok sayıda depremin gerçekleştiği bir bölgedir. İzmir iç körfezinin doğusunda yer alan Bornova Ovası üzerinde bulunan yoğun yapılaşma nedeniyle yüksek bir deprem riskine sahiptir. Bu durum 30 Ekim 2020'de gerçekleşen Samos depremi ile açık bir şekilde gözlenmiştir. Bu çalışma kapsamında geçmiş çalışmalarından daha büyük bir alanda mikrogravite saha çalışması gerçekleştirilerek ovanın havza etkisini daha iyi nitelenebilecek, çözünürlüğü yüksek ve geniş bir alanı temsil edecek şekilde bir veri seti elde edilmiştir. Bu kapsamda gerekli ölçüm nokta dağılımı yaklaşık 200-1000 m'lik değişken bir örnekleme aralığı ile yapılmış olup toplam 458 noktalık bir mikrogravite veri seti oluşturulmuştur. Bu çalışma kapsamında Bornova Ovası için oluşturulan rezidüel Bouguer gravite haritası üzerinden 1 profil kesiti alınarak, ters çözüm modellemesi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen ters çözüm modelleme sonucu yoğunluk değerleri ile çalışma alanında gerçekleştirilen derin uzaysal özilişki yönteminden (SPAC) elde edilen sismik hızlardan hesaplanan yoğunluklar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırılan 2 farklı yöntem ile elde edilen yoğunluk değerleri arasında yüksek bir uyum gözlenmiştir.

**Keywords:** Bornova Havzası; Gravite; SPAC; Yoğunluk; Hız.

#### 1. Introduction

The Bornova Plain has been studied by various researchers in terms of natural disasters due to its basin structure and rapid urbanization over the past 50 years. Akgün et al. (2013a) evaluated the data obtained from previous studies (microgravity, borehole seismic surveys, SPAC, etc.) for the Bornova Plain and observed that the engineering bedrock ( $V_s > 760$  m/s) depth is approximately 400 meters in the coastal areas. Another study conducted specifically for the Bornova Plain is by Özdağ et al. (2015), where calculations of dynamic amplification factor distribution were performed using

the microtremor method. The results of this study indicate that the dominant vibration period of the ground in the coastal areas of the Bornova Plain ranges up to 5 seconds, and the dynamic ground amplification factor can reach up to 3.5 times. It was concluded that the seismic bedrock ( $V_s > 3000$  m/s) interface is located at an average depth of 1500 meters. Following these studies, Pamuk et al. (2017 and 2018) conducted studies in the plain, where a selected area of 6x10 km was modeled in 2D using microgravity and SPAC methods on 7 profiles with a strike direction. By interpolating these profiles, a 3D model was created, revealing the overall basin structure of the Bornova Plain. The common point

of all these studies is that the deep alluvial deposits in the Bornova Plain, under the influence of dynamic forces (earthquakes), can negatively affect urbanization due to changes in the amplitude and frequency content of the resulting earthquake. The deep soil boreholes conducted in the Bornova Plain after the studies by Pamuk et al. (2017 and 2018) highlighted the need for updating the models obtained from these studies. In this study, a high-resolution microgravity dataset was obtained for the Bornova Plain, and a modeling study was conducted by applying inverse solution modeling on a profile section obtained from the Bouguer anomaly map resulting from corrections applied to this dataset. The density values obtained from the model were compared with the density values calculated from the spatial autocorrelation (SPAC) method based on S-wave velocity models given in Özdağ's study (2022).

## 2. Study Area

The Bornova Plain is a basin located within an area bounded by the Yamanlar Elevation to the north, the Nif Elevation to the south, Kemalpaşa to the east, and the Gulf of Izmir to the west.

The Bornova Complex Unit constitutes the bedrock of the Bornova Plain. Due to intense deformation resulting from tectonic activities, a high degree of structural change has been observed compared to earlier times (Erdoğan, 1990). The streams flowing from the northern and southern elevations of Bornova deposit their coarse load as alluvial fans in the foothills and spread the low-energy fine sediment load over the plain (Kayan, 2000). Additionally, Holocene coastal developments, similar to those observed along the entire Western Anatolian coast, have been observed in the coastal areas of Bornova. Therefore, a coastal strip has formed as an extension of the plain located behind the delta on the Bornova coast (Kayan, 2000). In particular, data from deep drilling conducted by the State Hydraulic Works (DSİ) in the Bornova Basin provide evidence of the presence of likely Plio-Pleistocene sediments beneath the Holocene fill, with a total thickness of these deposits reported to exceed 200 meters (Karadaş, 2014). Additionally, the basin is bounded by the Karşıyaka Fault Zone to the north and the Izmir Fault Zone to the south.

## 2. Materials and Methods

Gravity method is considered a useful geophysical method in terms of cost and practicality. This method is based on the principle that the density of rocks that make up the Earth's crust decreases or increases at any

point, known as the natural source potential field method. Microgravity refers to anomaly measurements in gravity surveys that are smaller than 0.1 mGal. The development of this method initially involved calculations for the average density and mass of the Earth. The foundation of the gravity method is based on density differences between rocks with generally low and uniform density variations, resulting in small and smooth gravity anomalies. The small scale of these variations necessitates highly sensitive gravity measurements. Due to the heterogeneous structure of the Earth, the gravity acceleration is not constant over the entire surface of the Earth. The magnitude of gravity acceleration is primarily influenced by five factors: latitude, elevation, topography, Earth's oscillations, and density variations in the subsurface. Therefore, various corrections need to be applied to gravity measurements to remove unwanted components. Common corrections applied to gravity data obtained on land include drift correction, topographic correction, and Bouguer correction.

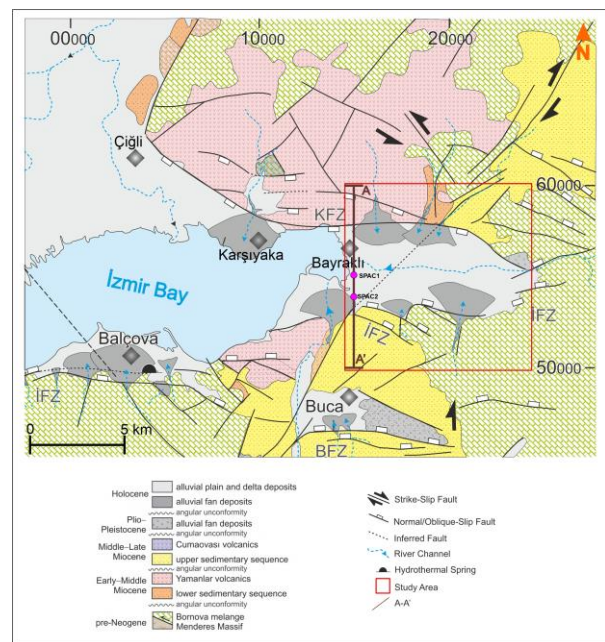
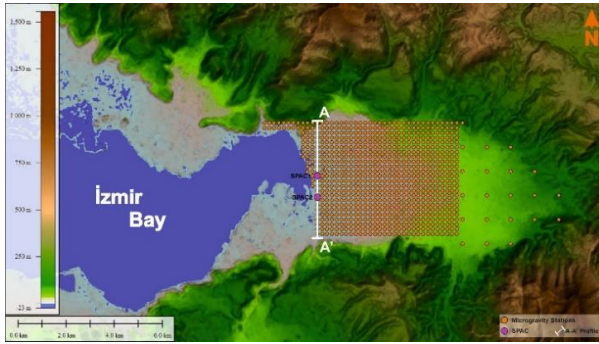


Figure 1. Geological map of study area (Modified from Uzel et al. (2012))

## 3. Results

In previous studies for the Bornova Basin, microgravity field surveys were conducted within an approximate area of 60 km<sup>2</sup> with a measurement interval of 1 km (Pamuk et al., 2017 and 2018). In this study, in addition to the existing measurements, an additional area of approximately 21 km<sup>2</sup> was surveyed, resulting in a total of 458 points with a sampling interval of 200-1000 m to better characterize the basin's influence on the plain.

The field surveys were conducted using a Scintrex CG-5 Autograv gravimeter with 3 repetitions and a measurement duration of 60 seconds. Corrections including drift correction, topographic correction, and Bouguer correction were applied to the obtained dataset using a 1st-degree polynomial equation. For topographic data, SRTM data with a sampling interval of 30 m was used (Figure 2).



**Figure 2.** Study Area SRTM Topographic Map with Microgravity Measurement Points.

$$gB = gobs \pm dgL + 0.3086 \Delta h - (0.04191\rho)\Delta h + dgT \quad (1)$$

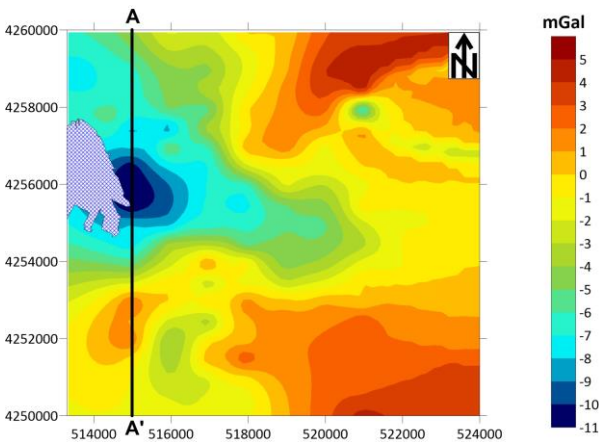
dgL: Latitude correction

dgT: Topography correction

0.3086 Δh: Free-air correction

(0.04191ρ)Δh: Bouguer correction

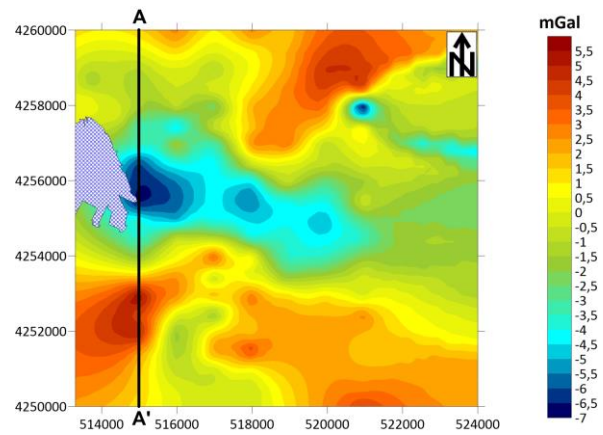
After obtaining the complete Bouguer data (Figure 3), regional residual separation processes were performed using WingLink software.



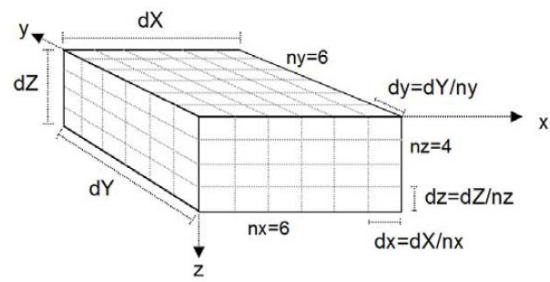
**Figure 3.** Study Area Complete Bouguer Map

After applying a 4th-degree polynomial trend to the complete Bouguer data, the residual Bouguer anomaly map was obtained (Figure 4).

Modeling stages were performed using the Grablox V1.6b software provided in the study by Pirttijavi (2008). The software is capable of calculating the synthetic gravity anomaly of a three-dimensional block model (direct solution) as well as calculating the 3D density model of a known area from gravity anomaly data (inverse solution). As shown in Figure 5, the software divides a 3D volume into blocks and performs calculations, allowing for increased resolution by determining the block sizes.



**Figure 4.** Study Area Residual Bouguer Anomaly Map



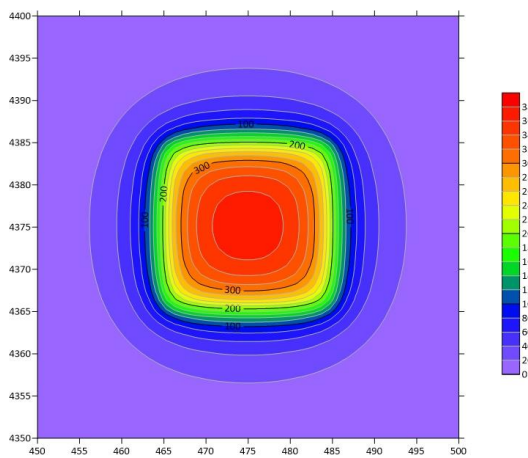
**Figure 5.** 3D Block Study

The working principle of the software can be summarized as follows: In the first stage of the inverse solution, gravity anomaly values for a known field are defined in the program. Then, the expected density values within a certain range are defined to create a limited initial model. Subsequently, the solution is obtained using Singular Value Decomposition (adaptive damping) (Van Loan 1976, Stewart 1993, Baker 2005) and Occam's Principles (minimizing model roughness



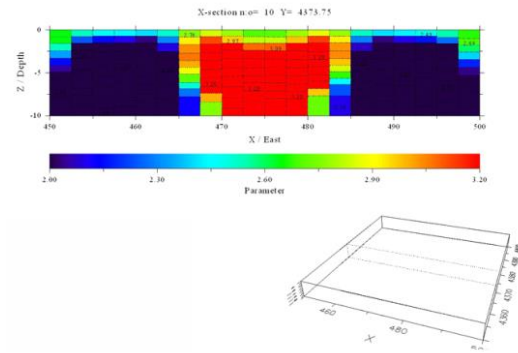
and inconsistency) (Constable et al. 1987, Chen et al. 2017).

After deciding to use the Grablox software for modeling, it was decided to evaluate the success of the inverse solution by calculating the gravity anomaly of a simple cube model with specific dimensions and density (direct solution) using the program. For this purpose, a rectangular prism with dimensions of approximately 10x10 km in the x-y plane and extending from 1 km depth to 5 km depth with a density of 3 g/cm<sup>3</sup> (Figure 6) was subjected to the direct solution process using the Potensoft software (Arisoy and Dikmen 2011), and the gravity anomaly map of the corresponding structure was calculated (Figure 7) within a 50x50 km area.



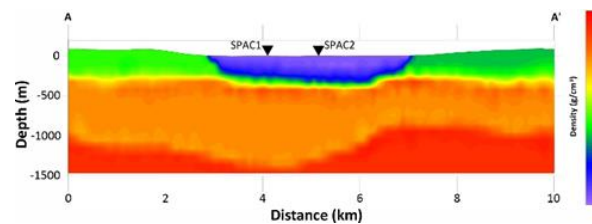
**Figure 7.** Gravity anomaly map generated using the Potensoft program for the structure in the form of a rectangular prism.

After performing the straight inversion modeling as shown in Figures 6 and 7, various inverse solution processes were applied using the GRABLOX 1.6b program to investigate its solution capacity (Figure 8). This allowed the reliability of the software to be assessed for modeling real field data. Despite some scatter due to the sharpness of the modeled structure on both sides of the structure, it was observed that the software successfully determined the density and geometric shape of the modeled prism with high accuracy.



**Figure 8.** Cross-section of the 3D model created through inverse solution processes in GRABLOX 1.6b program.

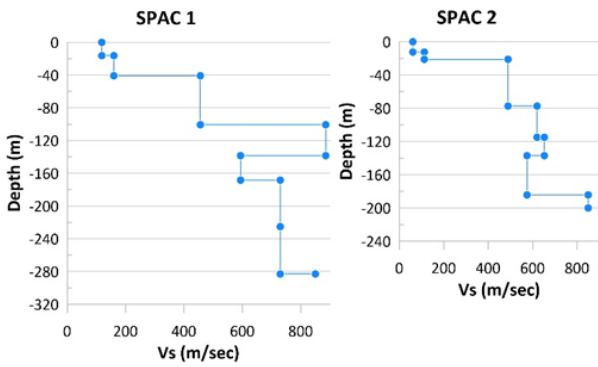
During the data modeling stage, the residual Bouguer gravity map provided in Figure 4 was inputted into the software to obtain a high-resolution model. Calculations were performed with a cell size of 200x200 m. Previous studies (Pamuk et al., 2018; Özdağ, 2022) in the study area were taken into account, and density values ranging from 1.6 to 3 g/cm<sup>3</sup> were defined as input parameters. The resulting data were visualized by gridding the calculated values using Surfer software, and a 2D subsurface density model for the A-A' profile was obtained, as shown in Figure 9.



**Figure 9.** 2D subsurface density model for the A-A' profile.

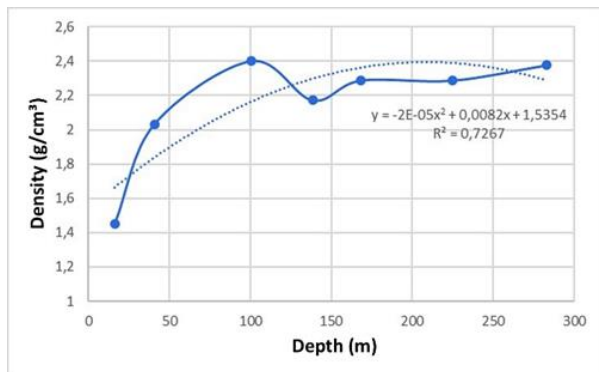
The density values obtained from the empirical relationship (Equation 2) (Keçeli 2009) using the S-wave velocities derived from the spatial correlation method data (Figure 1 and 2) in Özdağ's study (2022) were utilized for density comparison. The density values obtained through this approach are presented in Figure 11, 12, 13, and 14.

$$\rho = 0,44 \times Vs(0,25) \quad (2)$$

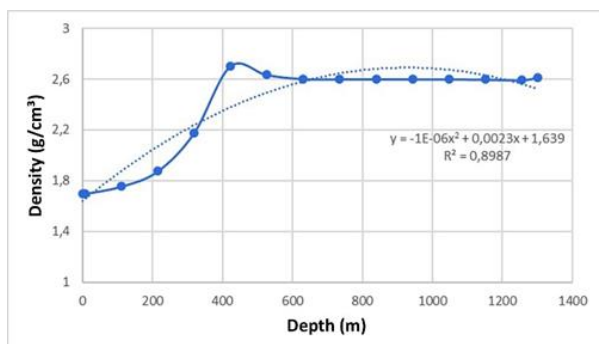


**Figure 10.** Depth Variation of S-Wave Velocity for SPAC 1 and SPAC 2 Points from Özdağ's study (2022)

The correlation coefficient is a statistical measure that quantifies the degree of relationship between two variables. This measure indicates a linear relationship between the variables and determines how much they vary together. The correlation coefficient takes a value between -1 and 1. A value of -1 indicates a perfect negative correlation, while 1 indicates a perfect positive correlation. A value of 0 indicates no relationship between the two variables. The correlation coefficient is an important tool for data analysis and understanding, and as a result, it is widely used by researchers and decision-makers (Asuero et al., 2006; Taylor, 1990; Ratner, 2009; Mukaka, 2012).



**Figure 11.** The calculated density values for SPAC 1 point.



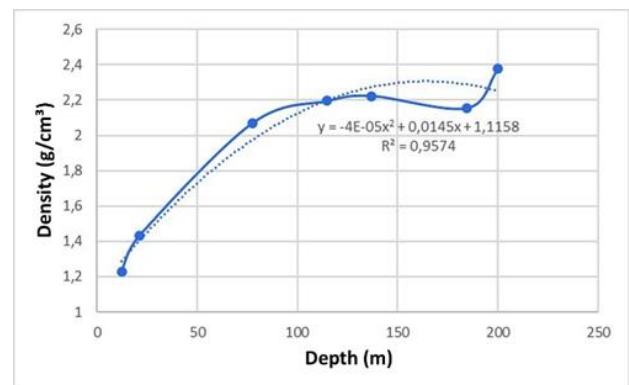
**Figure 12.** The density values along the A-A' profile for the SPAC 1 point.

From this perspective, density values were calculated based on the S-wave velocities obtained from SPAC measurements at two points up to an average depth of 300 meters. The density values were calculated using two empirical equations derived from the correlations between S-wave velocities and depth, as described in Figures 11 and 13. Additionally, cross-sections were taken from the 2D density model obtained through the inverse modeling techniques shown in Figure 9, and density values were similarly calculated as a function of depth, as depicted in Figures 12 and 14.

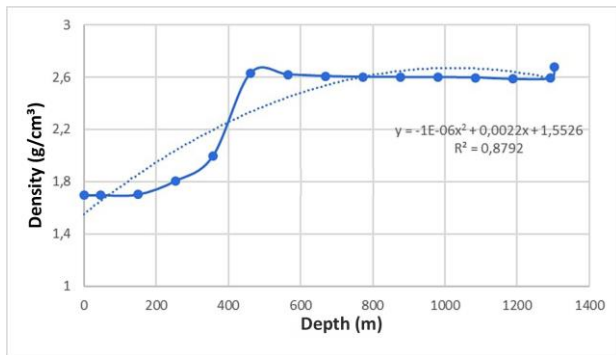
The main objective here is to make a comparative interpretation using microgravity density models that provide 2D and deeper information (depending on the length of the profile) in relation to the 1D and limited density models derived from SPAC measurements, and to examine the reliability of the results between the two methods as a function of depth, considering the correlation coefficients.

In the first step, the relationship between the calculated density values from SPAC 1 and SPAC 2 data for the depth range of 200-300 meters is presented in Figures 11 and 13. In the second step, the relationship between the density values obtained from microgravity measurements up to an average depth of 1400 meters at the points corresponding to the A-A' profile is calculated, as shown in Figures 12 and 14.

The calculations were performed using a second-degree polynomial function, which was found to be the most suitable trend function for the field data. The correlation coefficients were determined as 0.7267, 0.8987, 0.9574, and 0.8792, respectively.



**Figure 13.** The calculated density values for SPAC 2 point.



**Figure 14.** The density values along the A-A' profile for the SPAC 2 point.

#### 4. Discussions and Conclusions

In the study area located around the İzmir Bay, where in-situ geophysical methods were applied, the previous studies conducted using P and S wave velocities and density parameters (Akgün et al., 2013a; Akgün et al., 2013b; Özdağ et al., 2015; Pamuk et al., 2017; Pamuk et al., 2018; Özdağ et al., 2020; Özdağ and Gönenç, 2020) provide information about the subsurface layers. The expected thickness of the soil layers in the Bornova Plain is estimated to be around 300-350 m. In this study, the Modified Spatial Autocorrelation Method (MSPAC) applied by Özdağ in 2022 was used to obtain the S-wave velocities. Density values were calculated using the obtained S-wave velocities and depth information, and trend functions were calculated for each point by comparing them with the density model obtained from the inverse solution of the Bouguer gravity anomaly data. For the reliability test of the inverse solution algorithm, the anomaly created by a prism structure was calculated using flat solution methods and compared with the results obtained from the inverse solution algorithm. The comparison showed that the density and geometric parameters were successfully determined by the inverse solution algorithm. In the next step, regional residual separation was performed on the field data, and the residual Bouguer gravity anomaly was subjected to inverse solution. The density values calculated in the range of 1.65-2.85 g/cm<sup>3</sup> were found to be consistent with the previous studies conducted in the study area. Based on the inverse solution results, density distribution along the A-A' profile was calculated, and the density values obtained from the SPAC measurements given in Özdağ (2022) study were statistically analyzed. The calculated correlation coefficients indicate a compatibility of approximately 72% to 95% between the SPAC and microgravity density models in the study area. This approach demonstrates the usefulness of both methods in depth-controlled

analysis and provides insights into the estimation of deeper parameters. In light of these results, it is recommended to further investigate the mutual data validation through detailed statistical comparison studies in terms of data reliability. Also, The Bouguer correction process is more effective when obtaining Bouguer gravity anomalies, using the value of the crust density at the most suitable atmosphere-crust interface representing the region. Using the elevation values of the study area, reducing the topographic effects on Free Air Gravity anomaly data for various crustal density values can be achieved. Obtaining simple Bouguer Gravity anomalies for each applied density value and calculating their fractal dimensions will allow the calculation of higher resolution anomaly maps and, consequently, models (Erbe et al., 2020). When the results of the A-A' profile are examined, the observed concave base topography geometry is capable of focusing seismic waves on the surface. However, the SPAC study results do not present a homogeneous structure with depth for the S-wave velocities. Considering all these data and the damage caused by the 2020 Samos Earthquake (Çetin et al., 2022; Nuhuğlu et al., 2021), it is necessary to model the Bornova Plain in 3D at high resolutions and perform basin effect simulations based on this modeling.

#### Declaration of Ethical Standards

Authors declare that they adhere to all ethical standards.

#### Credit Authorship Contribution Statement

Author 1: Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Investigation, Writing-original draft

Author 2: Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Investigation, Writing-review and editing, Supervision, Project administration

#### Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no conflicts of interest concerning the content of this article.

#### Data Availability

All data created or analyzed during this study has been included in this published article.

#### Acknowledgment

The authors would like to thank Dokuz Eylül University Department of Scientific Research Projects 2021.KB.FEN.028 for some part of the microgravity data used in this study. Also, this study includes a part of Yaprak ÖZDAĞ's PhD Thesis at the Dokuz Eylül University The Graduate School of Natural and Applied Sciences Department of Geophysics Engineering.



## 5. References

- Akgün, M., Gönenç, T., Pamukçu, O., Özyalın, Ş., Özdağ, Ö.C. (2013a). Mühendislik Ana Kayasının Belirlenmesine Yönelik Jeofizik Yöntemlerin Bütünleşik Yorumu: İzmir Yeni Kent Merkezi Uygulamaları. *Jeofizik Dergisi*, **26**(2), 67-80.  
<https://doi.org/13.b02/jeofizik-1304-12>
- Akgün, M., Gönenç, T., Pamukçu, O. ve Özyalın, Ş. (2013b). Investigation of the relationship between ground and engineering bedrock at northern part of the Gulf of İzmir by borehole data supported geophysical Works. *Journal of Earth System Science*, **123**, 545-564  
<https://doi.org/10.1007/s12040-014-0414-3>
- Arisoy, M. Ö., Dikmen, Ü. (2011). Potensoft: MATLAB-based software for potential field data processing, modeling and mapping. *Computers & Geosciences*, **37**(7), 935-942.  
<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.02.008>
- Asuero, A. G., Sayago, A., González, A. G. (2006). The correlation coefficient: An overview. *Critical reviews in analytical chemistry*, **36**(1), 41-59.  
<https://doi.org/10.1080/10408340500526766>
- Baker, K. (2005). Singular value decomposition tutorial. *The Ohio State University*, 4-24.
- Chen, W. Y., Li, H., Xue, G. Q., Chen, K., & Zhong, H. S. (2017). 1d Occam Inversion Of Sotem Data And its Application To 3d Models. *Chinese Journal Of Geophysics*, **60**(9), 3667-3676.  
<https://doi.org/10.6038/cjg20170930>
- Constable, S. C., Parker, R. L., & Constable, C. G. (1987). Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, **52**(3), 289-300.  
<https://doi.org/10.1190/1.1442303>
- Çetin, K. O., Altun, S., Askan, A., Akgün, M., Sezer, A., Kincal, C., ... & Karaali, E. (2022). The site effects in İzmir Bay of October 30 2020, M7. 0 Samos earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **152**, 107051.  
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.107051>
- Erbek, E., Öksüm, E., & Dolmaz, M.N. (2020). Orta Anadolu Bölgesi Atmosfer-Kabuk Ara Yüzeyi Kabuk Yoğunluğunun Fraktal Boyutlar İle Belirlenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, **8**(3), 703-711.  
<https://doi.org/10.21923/jesd.717021>
- Erdoğan, B. (1990). İzmir-Ankara Zonu'nun İzmir ile Seferihisar arasındaki bölgede stratigrafik özellikleri ve tektonik evrimi. *TPJP Bülteni*, 1-20.
- Karadaş, A. (2014). Holocene Palaeogeographies and Coastline Changes of the Bornova Plain (İzmir). *Ege Coğrafya Dergisi*, **23**(2), 36-52.
- Kayan, İ. (2000). İzmir çevresinin morfotektonik birimleri ve alüvyonal Jeomorfolojisi, *Batı Anadolu Depremelliği Sempozyumu*, 103, 1-3
- Keçeli, A. (2009). Uygulamalı Jeofizik, TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası Eğitim Yayınları 9, 479.
- Li, X., & Chouteau, M. (1999). On density derived from borehole gravity. *The Log Analyst*, 40(01).  
<https://doi.org/SPWLA-1999-v40n1a3>
- Mukaka, M. M. (2012). A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. *Malawi medical journal*, **24**(3), 69-71.
- Nuhoğlu, A., Erener, M. F., Hızal, Ç., Kincal, C., Erdoğan, D. Ş., Özdağ, Ö. C., Sezer, A. (2021). A reconnaissance study in İzmir (Bornova Plain) affected by October 30, 2020 Samos earthquake. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, **63**, 102465.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102465>
- Özdağ, Ö. C., Gönenç, T., Akgün, M. (2015). Dynamic amplification factor concept of soil layers: a case study in İzmir (Western Anatolia). *Arabian Journal of Geosciences*, **8**, 10093-10104.  
<https://doi.org/10.1007/s12517-015-1881-9>
- Özdağ, Ö. C., Gönenç, T. (2020). Modeling stratigraphic structure of Menemen Plain-Izmir/Turkey by microgravity, passive seismic methods and examining its behavior under earthquake effect. *Journal of Applied Geophysics*, **182**, 104175.  
<https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104175>
- Özdağ, Ö., Akgün, M., Gönenç, T. (2020). Determining bedrock of the northern part of İzmir Bay, western Anatolia, using a combination of microtremor, ESPAC, VES, and microgravity methods. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, **61**(4).  
<https://doi.org/10.4430/bgta0313>
- Özdağ, Ö.C., (2022). Earthquake Based In-Situ Design Spectrum Creation by Using Geophysical Methods: İzmir Bay and Surrounding Area Example. PhD Thesis, Dokuz Eylül University, The School of Natural and Applied Sciences, Türkiye, 117 (In Turkish).

- Pamuk, E., Akgün, M., Özdağ, Ö. C., Gönenç, T. (2017). 2D soil and engineering-seismic bedrock modeling of eastern part of Izmir inner bay/Turkey. *Journal of Applied Geophysics*, **137**, 104-117.  
<https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.12.016>
- Pamuk, E., Gönenç, T., Özdağ, Ö. C., & Akgün, M. (2018). 3D bedrock structure of Bornova plain and its surroundings (Izmir/western Turkey). *Pure and Applied Geophysics*, **175**, 325-340.  
<https://doi.org/10.1007/s00024-017-1681-0>
- Pirttijavi M. (2008). User's Guide to Version Grablox 1,6b: Gravity Interpretation and Modelling Software based on a 3-D Block Model, *Department of Physics Universitas of Oulu Finland*. 3-57
- Ratner, B. (2009). The correlation coefficient: Its values range between+ 1/- 1, or do they?. *Journal of targeting, measurement and analysis for marketing*, **17**(2), 139-142.  
<https://doi.org/10.1057/jt.2009.5>
- Stewart, G. W. (1993). On the early history of the singular value decomposition. *SIAM review*, **35**(4), 551-566.  
<https://doi.org/10.1137/1035134>
- Taylor, R. (1990). Interpretation of the correlation coefficient: a basic review. *Journal of diagnostic medical sonography*, **6**(1), 35-39.  
<https://doi.org/10.1177/875647939000600106>
- Uzel, B., Sözbilir, H., Özkaymak, Ç. (2012). Neotectonic evolution of an actively growing superimposed basin in western Anatolia: The inner bay of Izmir, Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, **21**(4), 439-471.  
<https://doi.org/10.3906/yer-0910-11>
- Van Loan, C. F. (1976). Generalizing the singular value decomposition. *SIAM Journal on numerical Analysis*, **13**(1), 76-83.  
<https://doi.org/10.1137/0713009>



## Şuhut (Afyonkarahisar) Batısındaki Alterasyon Zonlarının Mineralojik ve Jeokimyasal Özellikleri

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 07.07.2023

Kabul/Accepted: 25.01.2024

Yayımlandı/Published: 27.02.2024

### Mineralogical and Geochemical Properties of Alteration Zones in the Western Şuhut (Afyonkarahisar)

Raziye ÖZ<sup>1</sup>, Ahmet YILDIZ<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Afyonkarahisar, Türkiye

<sup>2</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

Bu çalışmada, Şuhut ilçesi (Afyonkarahisar) batısındaki volkanik ve metamorfik kayalardaki alterasyon zonlarının mineraloji, petrografisi ve jeokimyası araştırılmıştır. İnceleme alanının temelini Paleozoik yaşlı metamorfik kayalar oluşturmaktadır. Temel kayaların üzerine Orta Miyosen yaşlı volkanosedimanter ve volkanik kayalar gelmiştir. Alterasyona uğramış kayaların mineralojik-petrografik ve jeokimyasal özelliklerinin belirlenmesi için inceleme alanındaki alterasyon zonlarından örnekler alınmıştır. Toplam alkali-silis (TAS) diyagramında örneklerin büyük bir bölümünün trakiandezitik bileşim sunduğu belirlenmiştir. Çaltepe dolomitleri ve bunların ayrışma ürünleri ise adlandırma grafiklerine göre M-15 ve M-19 nolu örnekler dolomit-kireçtaşı geçiş zonunda, M-13, M-14, M-17 ve M-20 nolu örnekler ise dolomitik bileşimde oldukları sonucuna varılmıştır. Volkanik kayaların kondrite göre normalize nadir toprak element grafiğinde hafif nadir toprak elementleri (HNTE) zenginleşmiş, ortaç (ONTE) ve ağır nadir toprak elementleri (ANTE) ise kayba uğradığı görülmüştür. M-11 ve M-25 nolu örneklerde Ni, Cu, Pb, ve Zn konsantrasyonlarının köken kayaca göre yaklaşık elli kat artış gözlenmesi hidrotermal alterasyonun etkisini işaret etmektedir. Taze/az ayrışmış dolomitlerin normalize edilmiş ana element içeriklerine göre alterasyon süresince maksimum SiO<sub>2</sub> zenginleşmesi ve P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> kaybı gerçekleşmiştir. Köken kayaca göre normalize edilmiş eser element değişimlerinde, U ve Zr maksimum kayba uğramış, Rb, Sr ve Co en fazla zenginleşmiştir. Dolomitlerin alterasyona uğraması sonucunda Hafif Nadir Toprak Elementleri (LREE) Ağır Nadir Toprak Elementleri (HREE)'ne göre daha fazla mobilize olmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Alterasyon; Mineraloji; Petrografi; Jeokimya; Şuhut; Afyonkarahisar

#### Abstract

The mineralogy, petrography and geochemistry of the alteration zones in the volcanic and metamorphic rocks in the west of Şuhut district (Afyonkarahisar) were investigated in this study. Paleozoic aged metamorphic rocks form the basis of the study area. Middle Miocene volcano-sedimentary and volcanic rocks overlie the basement rocks. The altered rocks were sampling for determining the mineralogical-petrographical and geochemical properties. It was determined that all samples except M-10 exhibit trachyandesitic composition on the total alkali-silica (TAS) diagram. According to the discrimination diagrams of Çaltepe dolomite and their alteration products, M-15 ve M-19 were plotted in dolomite-limestone transition zone, M-13, M-14, M-17 and M-20 also show dolomitic composition. In the rare earth element graph of the volcanic rock samples normalized to chondrite, light rare earth elements (HREE) were enriched, while intermediate (ONTE) and heavy rare earth elements (ANTE) were lost. The increase in Ni, Cu, Pb, and Zn concentrations up to 50 times in M-11 and M-25 compared to the parent rock indicates the effect of hydrothermal alteration. Maximum SiO<sub>2</sub> enrichment and P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> loss occurred based on the normalized main element contents of fresh/less weathered dolomites. According to the normalized trace element changes with respect to the host rock, U and Zr lost maximum, on the other hand Rb, Sr and Co enriched the most. As a result of the alteration of the dolomites, Light Rare Earth Elements (LREE) are more mobilize than Heavy Rare Earth Elements (HREE).

**Keywords:** Alteration; Mineralogy; Petrography; Geochemistry; Şuhut; Afyonkarahisar

#### 1. Giriş/Introduction

Madencilik faaliyetleri ülkelerin teknolojik olarak gelişmelerinde önemli bir paya sahiptirler. Madencilik çalışmalarının yoğun olarak gözlemlendiği ve bunun sonucu

olarak yeraltı kaynaklarını ekonomiye kazandıran ülkeler diğer ülkelere göre hem ekonomik ve hem de toplum refahı açısından daha ileri bir konumda bulunmaktadır. İnceleme alanını da içine alan geniş bir bölgedeki volkanizmanın jeolojisi, petrografisi ve

petrolojisi üzerine yapılmış çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Afyonkarahisar ilindeki volkanizma, Afrika levhasının, Avrasya levhası altına dalması ve bunun sonucu olarak okyanusal basenin kapanması sonucu oluşmuştur (Şengör vd. 1984; Yılmaz vd. 2000; Işık vd. 2004; Ring and Collins 2005; Çemen e al., 2006; Prelevic et al., 2012). Orta Miyosen zamanında volkanizma çok aşamalı potasik ve ultrapotasik alkali volkaniklerin ardalanması şeklinde kendini göstermektedir. Bölgede yapılan çalışmalarda volkanizma ürünlerinin yaklaşık 550 km<sup>2</sup>'lik bir alanda yayılım sunduğu ve volkanizmanın stratovolkan şeklinde gözlemlendiği belirtilmiştir (Keller and Villari, 1972; Keller, 1983; Akal 2003; Aydar et al., 2003; 2008; Akal et al., 2013). Alterasyon gerek yüzey sularının ve gerekse hidrotermal eriyiklerin etkisiyle kayalarda meydana gelen mineralojik-petrografik, jeokimyasal ve fiziksel değişimine neden olmaktadır. Alterasyon süresince kayaç oluşturan bazı elementler taşınarak ortamdaki uzaklaşırken, bazı elementler ise yerinde zenginleşmektedir. Alterasyon sonucu ortaya çıkan değişimler alterasyonun ortamsal koşulları hakkında bilgi vermesinin yanı sıra, bazı değerli minerallerin zenginleşerek, yeni maden yatakları oluşumunu sağlamaktadır. Çalışmada Şuhut (Afyonkarahisar) ilçesinin batısındaki Akyuva, Koçyatağı, Çakırözü, Karlık ve Ağzıkara köyleri arasında kalan bölgedeki volkanik ve metamorfik kayalardaki alterasyon ürünlerinin mineraloji, petrografisi ve jeokimyasal bileşiminin belirlenmesi amaçlanmıştır.

## 2. Analitik Yöntemler

İnceleme alanı, Afyonkarahisar ilinin 25 km güneyinde, Şuhut ilçesinin batısında yer almakta olup, Şuhut'a yaklaşık 8 km uzaklıktadır. İnceleme alanına yakın yerleşim birimleri Şuhut ilçe merkeziyle Akyuva, Koçyatağı, Çakırözü, Karlık ve Ağzıkara köyleridir. İnceleme alanındaki volkanik ve metamorfik kayalardaki alterasyon zonlarından detayları jeoloji bölümünde verilen örnekler alınarak polarizan mikroskop, x-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskop (SEM) ve jeokimyasal analizler yapılmıştır.

Polarizan mikroskop çalışmaları Leica DM2500P model polarizan mikroskopta yürütülmüştür. Taramalı elektron mikroskop (SEM) incelemeleri LEO VP-1431 model SEM mikroskobunda yapılmıştır. X-ışınları kırınımı (XRD) çalışmaları Shimadzu XRD-6000 model X-ışını difraktometre cihazı (Ni filtreli, CuK $\alpha$  radyasyonlu) kullanılarak yapılmıştır. Majör oksit analizleri RIGAKU / ZSX PRIMUS 2 model dalgaboyu dağılımlı x-ışını

fluorensans (XRF) cihazı ile, iz ve nadir toprak element analizleri ise ICP-MS cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

## 3. Jeoloji ve Örneklem

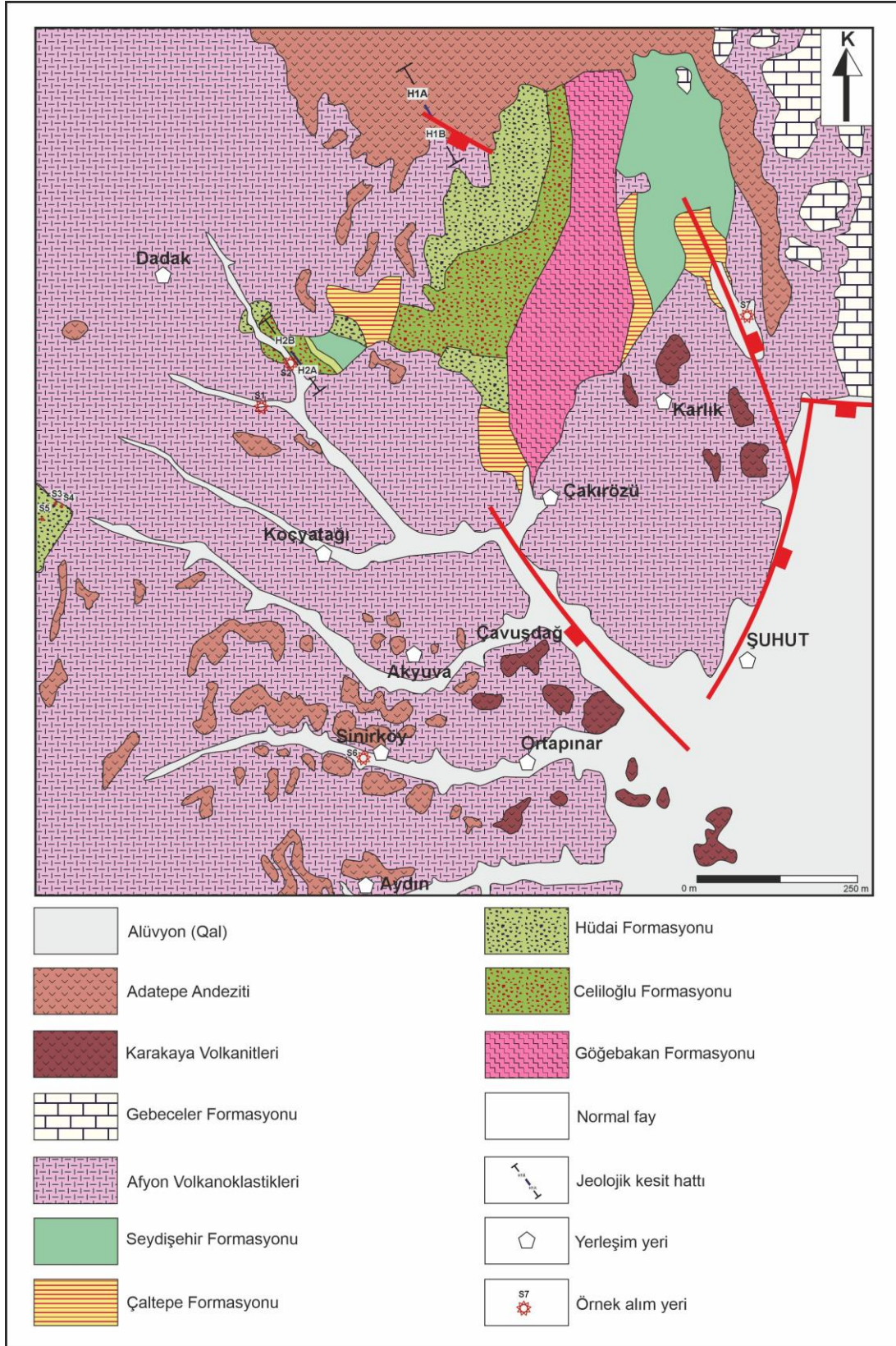
### 3.1. İnceleme Alanının Jeolojisi

İnceleme alanının temelinde Paleozoyik yaşlı birimler bulunmaktadır. Temel birimler Göğebakan formasyonu, Erken Celiloğlu formasyonu, Hüdai kuvarsitleri, Çaltepe formasyonu ve Seydişehir formasyonu ile temsil edilmektedir (Şekil 1). Temel birimlerin üzerine uyumsuz olarak Senozoyik dönemine ait volkanik ve sedimanter birimler gelmektedir. Söz konusu birimler Orta Miyosen yaşlı Afyon volkanoklastikleri, Gebeceler formasyonu, Orta Miyosen yaşlı Karakaya volkanitleri ile Kuvaterner yaşlı alüvyonlardan oluşmaktadır (Metin vd., 1987; Özgül vd., 1991; Öcal ve Göktaş, 2011; Öcal vd. 2011).

### 3.2 Alterasyon Zonlarının Jeolojisi

Proje alanındaki volkanik ve metamorfik kayalar içinde gözlenen alterasyon zonlarının oluşumuyla bunların mineralojik-petrografik ve jeokimyasal özelliklerinin belirlenmesi için (1): Çakırözü ve (2): Koçyatağı-Dadak olmak üzere iki bölgede çalışılmıştır (Çizelge 1; Şekil 2-3). **Çakırözü lokasyonu**, Çakırözü köyünün yaklaşık 6.5 km kuzeyinde yer almaktadır. Bölgede yaygın olarak Karakaya volkanitlerinin üyesi olan Adatepe andezitleri gözlenmektedir. Traki-andezit ve andezitik bileşimli lavlarla az oranda piroklastiklerden oluşan birim KD-GB doğrultulu tektonik hat boyunca alterasyona uğramıştır. Alterasyon birimin rengini griden krem, açık sarı ve sarımsı kırmızıya dönüştürmüş, çatlak ve kırıklar boyunca breşleşme, küresel ayrışma ve soğan kabuğu şeklinde alterasyon yapıları oluşmuştur. Alterasyon derecesinin düşük olduğu bölümlerde killeşmeler yaygındır. Metalik getirimlerin yoğun olduğu alanlarda renk sarımsı kırmızı ve kahverengiye dönüşmüş olup, bu bölümlerde sülfürlü demir ve demir-mangan getirimleri gözlenmiştir. Ayrıca yer yer koyu renkli opak mineral oluşumlarına rastlanmıştır. H1A-H1B olarak kodlanan ve 50m mostra genişliğine sahip kesit boyunca 7 örnek alınmıştır (Şekil 2).

**Koçyatağı ve Dadak lokasyonu**, Koçyatağı ve Dadak köyleri arasında yer almaktadır. Bölgede Afyon volkanoklastikleriyle Çaltepe formasyonunun dolomitleri dokanak yapmaktadır. Sarımsı turuncu ve kahve renkli olan dolomitler, K53D doğrultulu kırık hatları boyunca ayrılmış, yine benzer kırık hatları boyunca yer yer demir ve manganca zengin metalik getirimler olmuştur. Şekil 3'te verilen jeolojik kesit boyunca örneklem yapılmıştır.

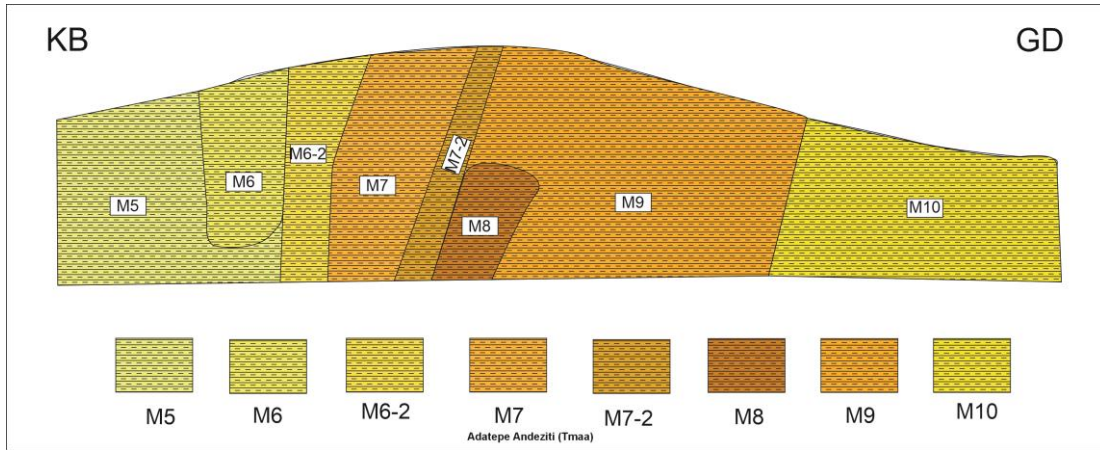


Şekil 1. Çalışma sahasının jeoloji haritası (Öcal vd. 2011'den değiştirilerek alınmıştır).

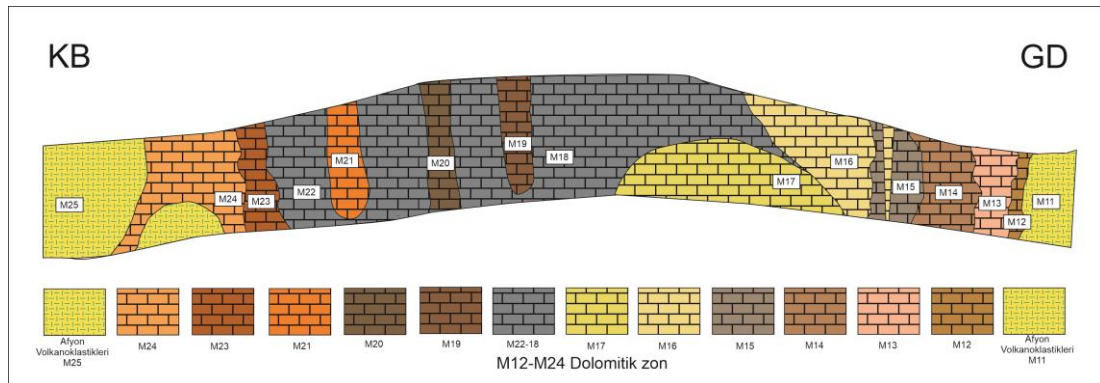


Çizelge 1. Jeolojik kesitler boyunca alınan örneklerin litolojik özellikleri.

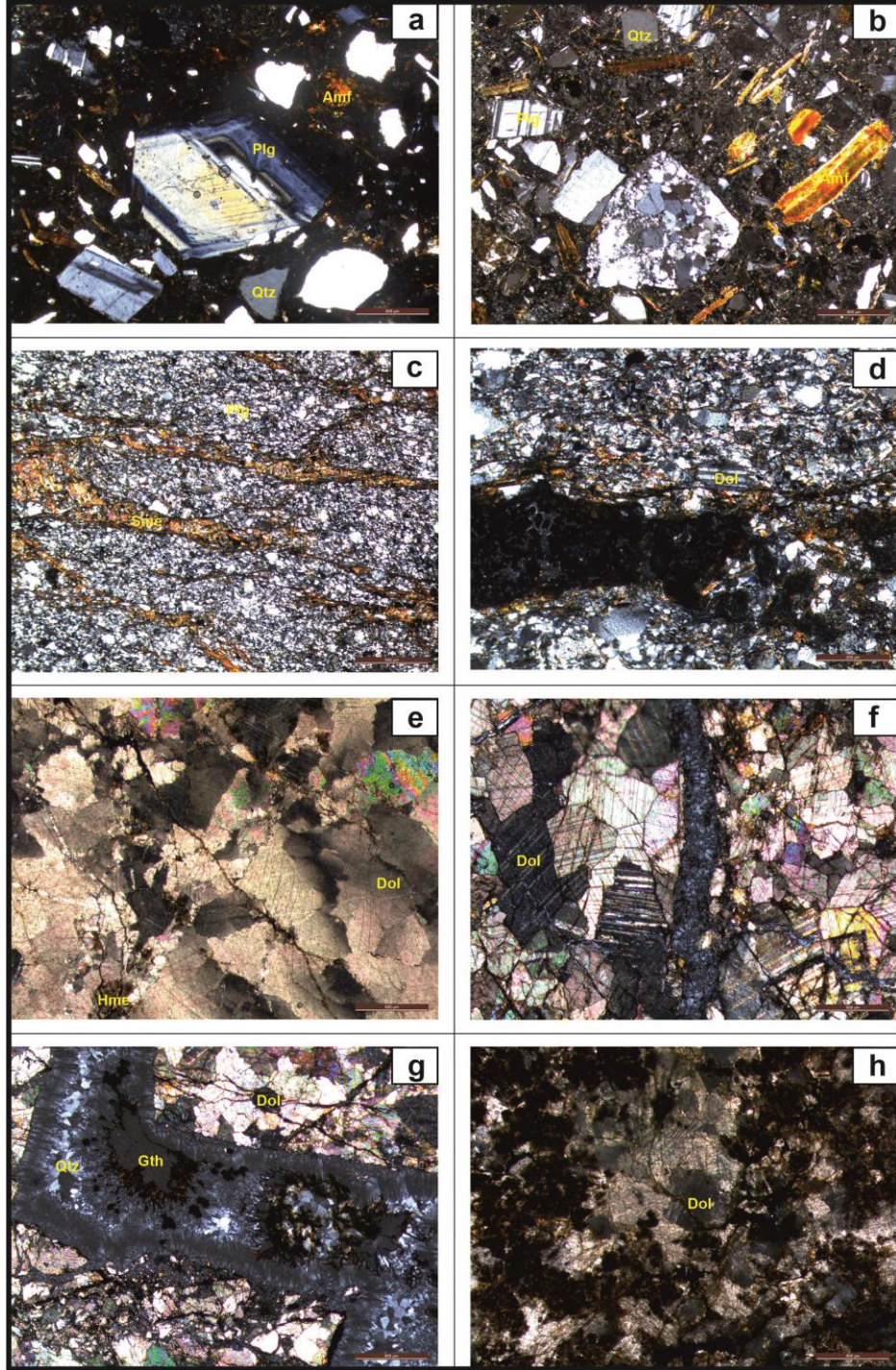
Örnek Kodu	Litolojik Özellikler
M-5	Krem renkli, kısmen ayrılmış piroklastikler içindeki lav blokları
M-6	Kremsi-beyaz renkli, tamamen ayrılmış, 1m genişliğe sahip, düzeyde 4m kalınlığı olan lav blokları
M6-2	K50D uzanımlı ° kırık hatları boyunca oluşmuş killeşmiş alterasyon zonu
M-7	Kahverengi-turuncumsu renkli, lavlar içindeki alterasyon zonu
M7-2	Kırmızı renkli, demir bakımından zengin, yer yer küresel ayrışma gösterdiği alterasyon zonu
M-8	Siyah-yeşil renkli mineral içeren küresel alterasyon zonu
M-9	Turuncu-kahverengi renkli lav bloklarında sarı-krem renkli kilce zengin küresel alterasyon zonu
M-10	Bölgedeki alterasyonun ana kayacı özelliğindedir. Gri renkli piroklastik ve lav bloklarından oluşur.
M-11	Gri renkli, kısmen ayrılmış volkanoklastikler
M-12	Sarımsı-kırmızı renkli limonitik- opalize silis zonu
M-13	Sarımsı-açık kahverengi, içerisinde mangan bantları barındıran dolomitik kireçtaşı
M-14	Açık kahve renkli, metalik elementlerce zengin alterasyon zonu
M-15	Koyu kahve renkli, metalik elementlerce zengin ayrılmış kireçtaşı
M-16	Açık kahve, turuncu renkli limonitik zon
M-17	Sarımsı-açık kahverengi, içerisinde mangan bantları barındıran dolomitik kireçtaşı
M-18	Ağsal mangan bantları ve metalik mineraller içeren dolomitik kireçtaşı
M-19	Kırmızımsı kahve renkli, silisifiye özellikte ikincil karbonat mineralleri içeren ayrılmış kireçtaşı
M-20	Kırmızımsı kahve renkli, silisifiye, ikincil karbonat mineralleri içeren ayrılmış ince taneli kireçtaşı
M-21	K40D uzanımlı tektonik hat boyunca oluşmuş sarımsı-kırmızı renkli limonitik zon.
M-22	Ayrılmamış dolomitik kireçtaşı, ince taneli kristalli ve koyu gri renklidir
M-23	Kırmızımsı-kahverengi dolomitik kireçtaşlarının ayrılmış halinin alterasyonu
M-24	Turuncu renkli limonitik zon
M-25	Gri renkli, kısmen ayrılmış volkanoklastikler



Şekil 2. Çakırözü lokasyonunda K50B doğrultulu jeolojik kesiti (H1A-H1B) boyunca gözlenen alterasyon zonları (ölçeksiz).



Şekil 3. Koçyatağı-Dadak lokasyonunda K40B doğrultulu jeolojik kesiti (H2A-H2B) boyunca gözlenen alterasyon zonları (ölçeksiz).



Şekil 4. Adatepe andezitleri ve Çaltepe dolomitlerinin polarizan mikroskop resimleri (Dol:dolomit, amf:amfibol, hme:hematit, gth:götit, qtz:kuvars, plg:plajiyoklas, sme:simektit).

#### 4. Bulgular ve Tartışma

##### 4.1 Mineraloji ve Petrografi

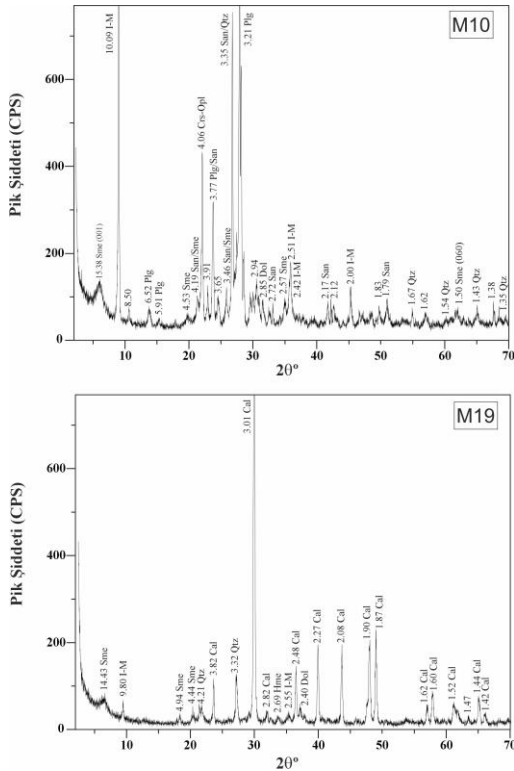
Polarizan mikroskop çalışmaları alterasyon ve ikincil mineral oluşumlarının gözlemlendiği Adatepe andezitleriyle Çaltepe dolomitleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Adatepe andezitlerinde volkanik camdan oluşan matris içindeki fenokristalleri plajiyoklas, sanidin, amfibol, biyotit ve kuvars mineralleri oluşturmaktadır. Plajiyoklas

mineralleri öz şekillidir. Zonlanma ve basit ikizlenme göstermektedir (Şekil 4a;b). Ayrıca alterasyona bağlı olarak ikincil mineral şeklinde killeşmeler ve dolomit mineraline de rastlanmıştır. Kristallenme derecesine göre hipokristalin, kristallerin birbirleriyle olan ortak ilişkilerine göre porfirik doku gösterir (Şekil 4a;b). Çaltepe dolomitlerinde ana mineral dolomittir. Dolomitlerde ince taneli, özşekilsiz, polisentetik ikizlenme ve mükemmel derecede dilinimlenme



görülmektedir (Şekil 4c-f). Tektonizmaya bağlı olarak oluşan kırık ve çatlaklar ile dilinimler boyunca ikincil olarak koyu renkli mineral (Fe+Mn) ve kuvars oluşumları görülmektedir (Şekil 4c;d). Kuvars mineralleri ışınal morfolojidedir. Kristal büyüklüklerine göre heteroblastik doku ve mineral şekline göre grift dokuya sahiptir (Şekil 4).

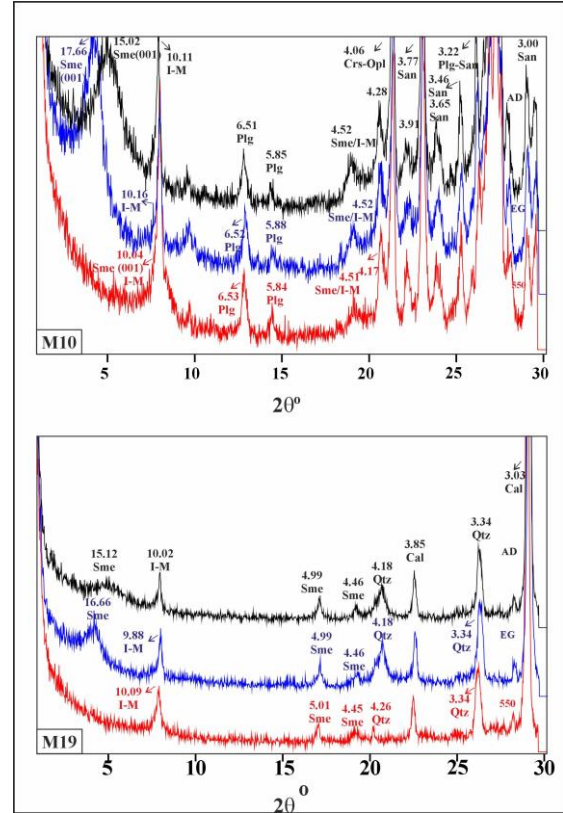
Çakırözü ve Dadak-Koçyatağı bölgelerine ait örneklerin x-ışınları difraktometresi (XRD) grafikleri Şekil 5'te verilmiştir. Çakırözü bölgesine ait Adatepe andezitleri ve bunların ayrışma ürünlerinin x-ışınları kırınımı (XRD) analizinde plajiolklas (Plg), sanidin (San), kristobalit/opal-CT (Crs-Opl) ve kuvars (Qtz)'ın en önemli kayaç yapıcı mineraller olduğu görülmüştür (Şekil 5). Kayaçlardaki başlıca alterasyon minerallerini simektit (Sme) ve illit-mika (I-M) oluşturmaktadır. Ayrıca dolomit ayrılmış örneklerde düşük oranlarda oluşan diğer ikincil mineraldir. Dadak-Koçyatağı bölgesindeki taze/az ayrılmış dolomitlerde en önemli mineral dolomittir (Dol). Bunun yanı sıra örneklerde düşük oranlarda kalsit (Cal), kuvars (Qtz), hematit (Hme), götit (Gth) ve tridimit (Trd) minerallerine de rastlanmıştır.



Şekil 5. M-10 ve M-19 kodlu örneklerin tüm kayaç XRD grafikleri.

Sediman örnekleri büyük oranda kuvars (Qtz), sanidin (San), plajiolklas (Plg), kristobalit/opal-CT (Crs-Opl), tridimit (Trd), illit-mika (I-M) ve amfibol (Amp) minerallerinden oluşmaktadır.

Çakırözü ve Dadak-Koçyatağı bölgelerindeki örneklerde gözlenen kil minerallerini birbirinden ayırt edebilmek için tüm kaya XRD grafiklerinde kil minerali tespit edilen örnekler üzerinde detay kil mineralojine yönelik XRD çalışmaları gerçekleştirilmiştir (Şekil 6).

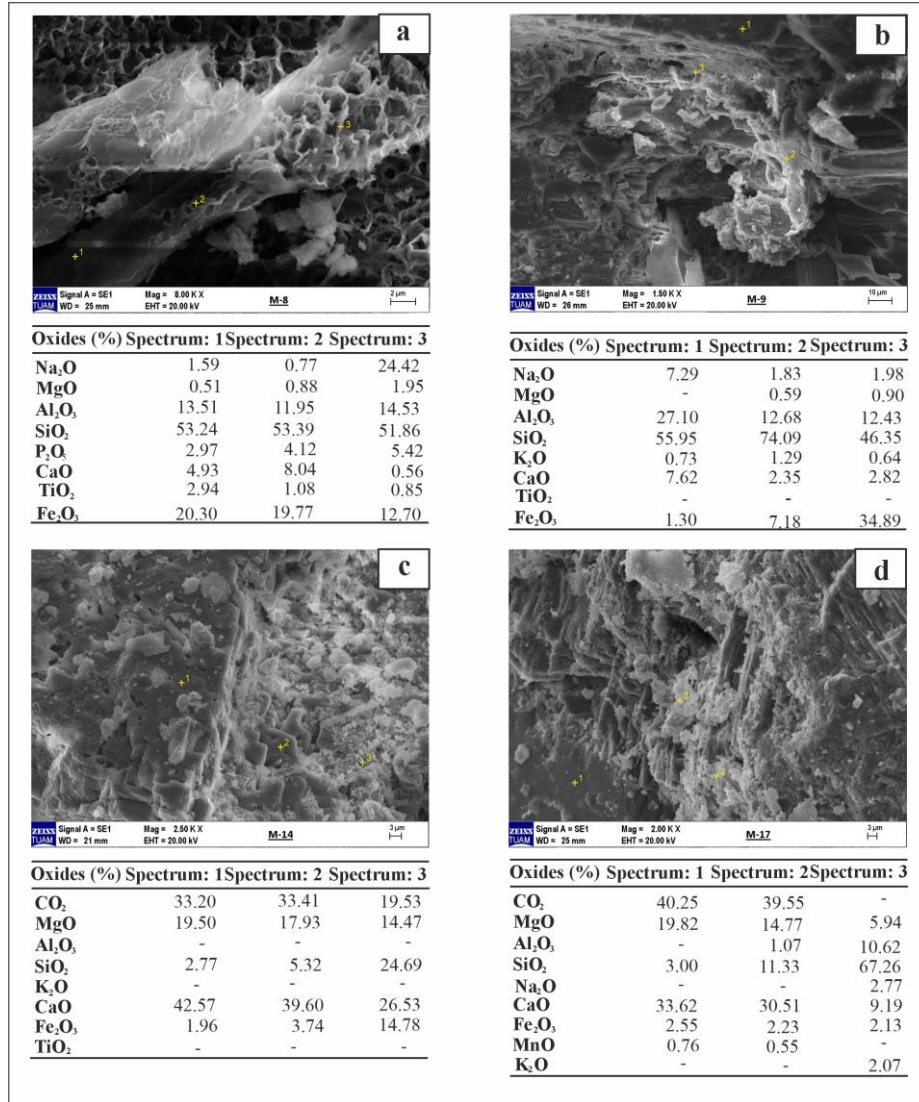


Şekil 6. M-10 ve M-19 kodlu örneklerin kil boyutu XRD grafikleri. (AD): Havada kurutulmuş, (EG): Etilen glikol ile muamele, (550): 550 °C'de fırınlanmış.

Her 2 bölgedeki volkanik kayaçlarda belirlenen en önemli kil minerali olan simektite ait  $d(001)$  değeri havada kurutulmuş örneklerde (AD) 14.48-15.44 Å arasında değişmektedir. Bu değer etilen glikollü çekimlerde (EG) 16.66-18.09Å'e genişlemiş ve 550°C'de fırınlama işlemi sonucunda ise 9.93-10.11Å'e kıaldığı belirlenmiştir.

Etilen glikol muamelesi simektit minerallerinin c-eksen boyunu uzatmakta ve bunun sonucu olarak  $d(001)$  değerleri yükselmektedir. 550 °C sıcaklıktaki ısıl işlem nedeniyle kristal kafesteki suyun bünyeden uzaklaşması ve kristal yapının bozulması sonucunda c-eksen boyları kısalarak  $d(001)$  değerleri azalmaktadır (Brown and Brindley, 1980).

Taramalı elektron mikroskop (SEM) incelemelerinde Çakırözü bölgesi andezitlerinin altere ürünlerinde volkan camı (Vc), plajiolklas (Plg) ve biyotit (Bio) kristallerinde alterasyon izleri gözlenmiştir. Buna bağlı olarak söz konusu kristaller yapraksı morfolojide simektit (Sme) minerallerine dönüşmüştür (Şekil 7 a,b).



Şekil 7. Alterasyona uğramış örneklerin SEM görüntüleri ve EDX verileri

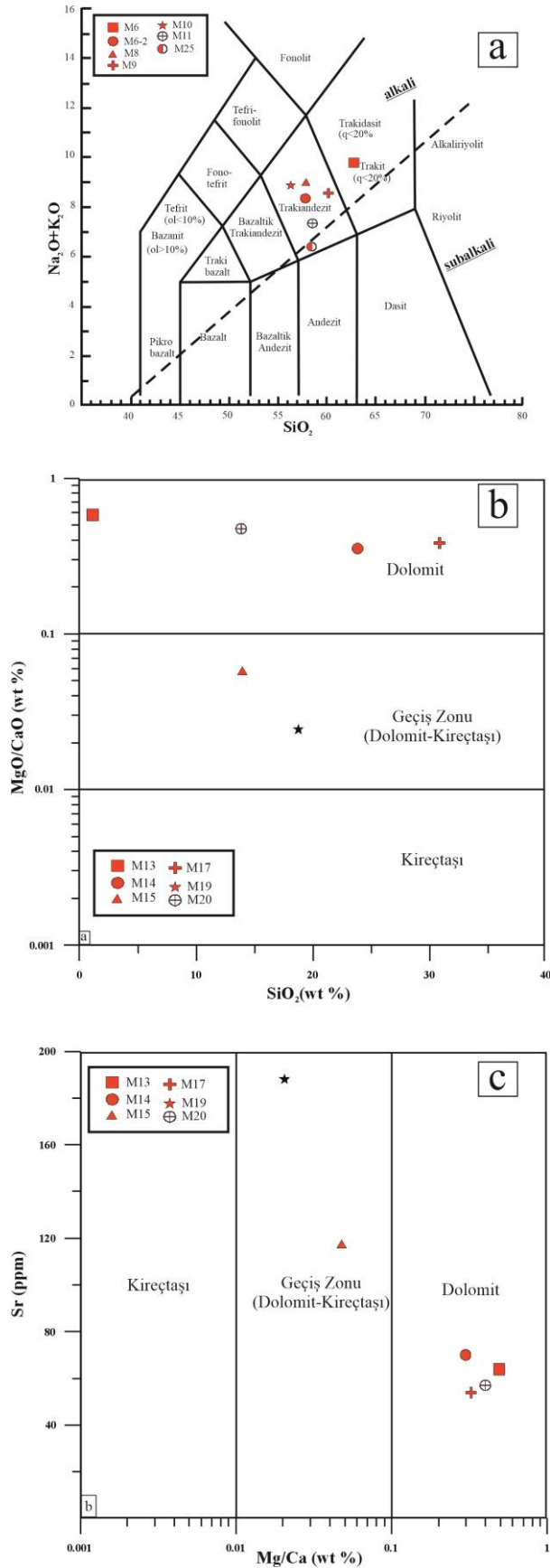
Gerek volkan camı ve gerekse plajoklasın alterasyonu boyunca Na<sub>2</sub>O, CaO kaybı uğrarken, MgO zenginleşmesi göze çarpmaktadır. Dadak-Koçyatağı bölgesine ait alterasyona uğramış örneklerde dolomit (Dol) minerallerinin çatlak ve kristal düzlemleri boyunca ikincil element zenginleşmeleri gözlenmiştir. Alterasyon ve ikincil mineral oluşumları CaO ve MgO elementlerinin kaybını, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O ve MnO elementlerinin zenginleşmesini sağlamıştır (Şekil 7 c,d).

#### 4.2 Jeokimya

Volkanik kayalarla bunların ayrışma ürünlerinin kimyasal analiz sonuçları Le Bas vd. (1986) tarafından geliştirilen Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> diyagramına yerleştirilmiştir (Şekil 7a). Buna göre M-10 dışındaki örneklerin trakiandezitik bileşim sunduğu belirlenmiştir. M-10 örneği ise trakitik bileşimlidir (Şekil 8 a). Le Bas vd. (1986) tarafından geliştirilen Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> diyagramına göre volkanikler trakitik-trakiandezit bileşimde olduğu belirlenmiştir.

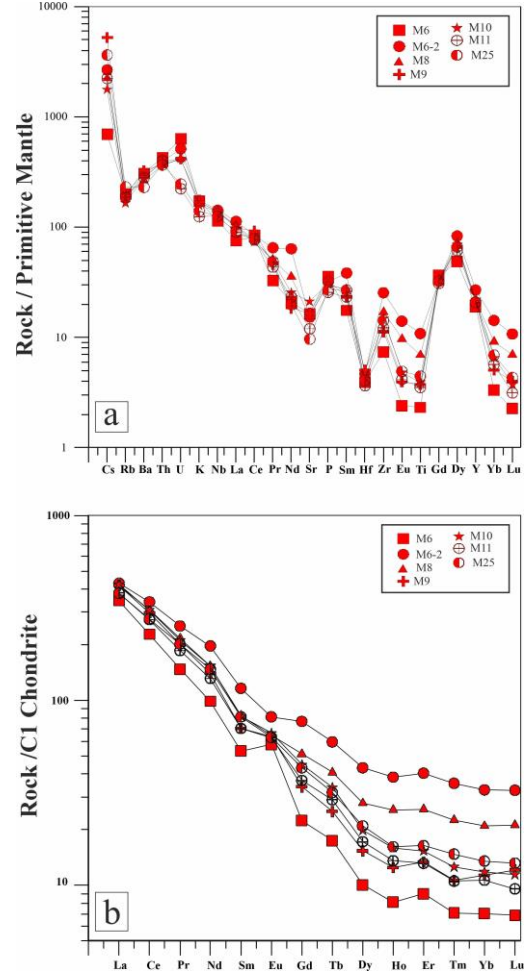
Koçyatağı-Dadak bölgesi örneklerinin Melezhik et al. (2008) tarafından geliştirilen diyagrama göre M15 ve M19 nolu örneklerin geçiş zonu (Dolomit-Kireçtaşı), diğer örnekler ise dolomitik bileşimdedir (Şekil 8 b;c).

İnceleme alanındaki volkanik kayaların iz element verileri N- tipi MORB'a göre normalize edilmiştir. Buna göre, büyük iyon yarıçaplı litofil elementler (LILE) olan Rb, Sr ve Ba ile Hf, Eu, Ti, Yb ve Lu N-MORB'a göre büyük oranda fakirleşirken, U, P, Sm, Zr, Gd ve Dy ise zenginleşmiştir. N-MORB'a göre meydana gelen zenginleşme dalma batma zonu zenginleşmesi veya kabuksal kirlenmeyi işaret etmektedir (Şekil 9a). Örneklerin kondrite göre normalize nadir toprak element değerleri incelendiğinde, hafif nadir toprak elementleri (HNTE) zenginleşirken, ortaç (ONTE) ve ağır nadir toprak elementlerinin (ANTE) kayba uğradığı gözlenmiştir. Nadir toprak elementlerdeki bu hareketlilik taze örneklerle göre ayrılmış volkaniklerde dereceli olarak değişim göstermektedir (Şekil 9b).



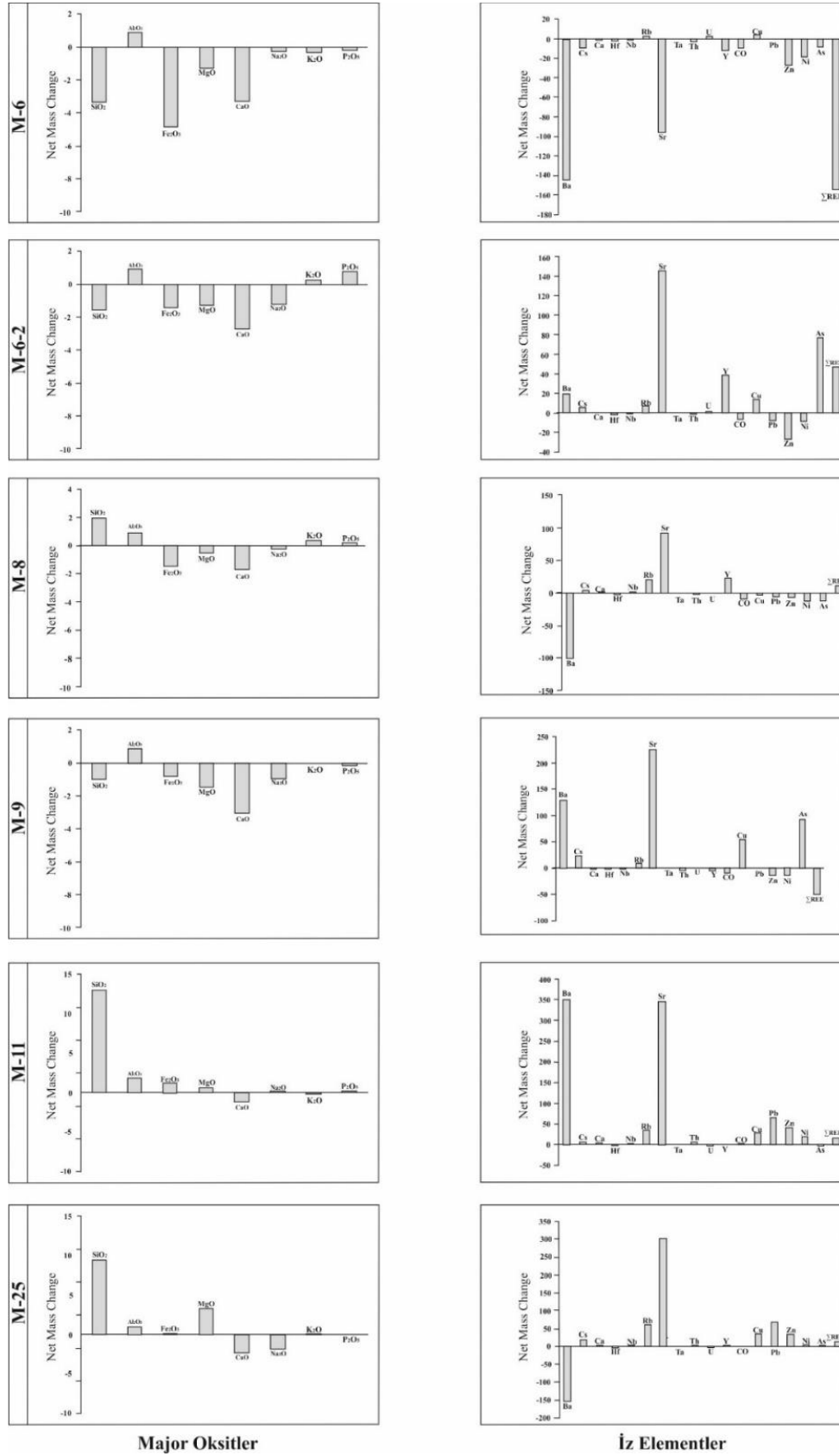
Şekil 8. (a): Volkanik kayalarla bunların ayrışma ürünlerinin Le Bas vd. (1986) tarafından geliştirilen Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> diyagramına göre adlandırılması, Çaltepe dolomitleri ve bunların ayrışma ürünlerinin Melezhik et al. (2008) tarafından geliştirilen (b): MgO/CaO & SiO<sub>2</sub> ve (c): Sr & Mg/Ca adlandırma grafiğinde gösterimi.

Volkanik kayalarda alterasyon süresince element hareketliliğinin belirlenmesi için yapılan çalışmalarda ana kayaca göre alterasyon süresince örneklerin Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve K<sub>2</sub>O konsantrasyonunda artış, diğer taraftan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O'da kayıplar gözlenmiştir. SiO<sub>2</sub> M-6, M-6-2 ve M-9 numaralı örneklerde azalmış, buna karşın M-8, M-11 ve M-25 numaralı örneklerde ise zenginleşmiştir (Şekil 10).



Şekil 9. (a): Volkanik kayaların iz element dağılım diyagramı (Normalize Sun and McDonough (1989)'a göre yapılmıştır), (b): Volkanik kayaların kondrite göre normalize edilmiş nadir toprak element grafiği (Analiz sonuçları Sun and McDonough (1989)'a göre normalize edilmiştir.)

Ayrılmış örneklerde gözlenen simektitlerde element zenginleşmesi; alterasyon sırasında yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemede biriken elementlerin zenginleşmesi, iyon değişimi veya adsorpsiyon olaylarına bağlı olarak meydana gelir (Christidis 1998, Yalçın ve Gümüşer, 2000; Yıldız ve Kuşcu 2004). Ayrılmış örneklerde köken kayaca göre üç kattan fazla element zenginleşmesi adsorpsiyon veya soğurma, iyon değişimi veya sisteme dışarıdan katılan malzemelerin sedimantasyonu olaylarıyla ilişkili olarak oluşmaktadır (Zielinski 1982). Simektitlerdeki element kaybı ise açık sistem özümleme veya çözünebilir iyon ve bileşiklerin ortamdaki taşınması nedeniyledir.



Şekil 10. Volkanik kayaların alterasyon süresince ana (gr) ve iz (ppm) elementlerinin kütle değişimleri.

## 5. Sonuçlar

Proje kapsamında elde edilen jeolojik, mineralojik-petrografik ve jeokimyasal analiz sonuçlarına göre proje alanında metalik elementlerin konsantrasyonlarındaki artışların hidrotermal bir süreci işaret etmektedir. Gerek volkanik kayalarda ve gerekse dolomitik kayalardaki alterasyon zonlarında elementlerin sahadaki yayılımları ve bolluk dereceleri bölgedeki alterasyonun hidrotermal süreçlerin etkisiyle oluştuğunu desteklemektedir.

### Etik Standartlar Bildirgesi/ Declaration of Ethical Standards

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

### Yazarlık Katkı Beyanı/ Credit Authorship Contribution Statement

Yazar 1: Arazi çalışmalarının yürütülmesi, Analizlerin yapılması ve sonuçların yorumlanması, Araştırma, Makale yazımı

Yazar 2: Proje yönetimi, Arazi ve laboratuvar çalışmalarının takibi, sonuçların değerlendirilmesi ve yorumlanması, Makale yazımı, İnceleme ve düzenleme, Danışmanlık

### 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 çalışma AKÜ-BAP tarafından 21.FEN.BİL.33 numaralı proje ile desteklenmiştir. Yazarlar verdiği destek nedeniyle Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederler.

## 5. Kaynaklar

Akal, C., 2003. Mineralogy and geochemistry of melilite leucites, Balıkcıhisar, Afyon, Turkey. *Turkish Journal of Earth Science*, **12**, 215-239.

Akal, C., 2008. K-richterite-olivine-phlogopite-diopside-sanidine lamproites from the Afyon volcanic province, Turkey. *Geological Magazine*, **145**, 570-585.  
<https://www.doi.org/10.1017/s0016756808004536>

Akal, C., Helvacı, C., Prelevic, D. and Van den Bogaard, P., 2013. High-K volcanism in the Afyon region, western Turkey: from Si-oversaturated to Si-undersaturated volcanism. *International Journal Science*, **102**, 435-453  
<https://www.doi.org/10.1007/s00531-012-0809-9>

Akaryalı, E. ve Tüysüz, N., 2013. Arzular (Gümüşhane, KD-TÜRKİYE) epitermal altın cevherleşme sahasındaki

hidrotermal alterasyonlar ve kütle değişim hesaplamaları, *GÜFBED*, **3(2)**, 49-76.

Aydar, E., Bayhan, H. and Gourgaud, A., 2003. The lamprophyres of Afyon stratovolcano, western Anatolia, Turkey: description and genesis. *Comptes Rendus Geoscience*, **335**, 279-288.

[https://www.doi.org/10.1016/S1631-0713\(03\)00049-X](https://www.doi.org/10.1016/S1631-0713(03)00049-X)

Besang, C., Eckhart, F.J., Harre, W., Kreuzer, H. and Muller, P., 1977. Radiometrische Altersbestimmungen an neogenen Eruptivgesteinen der Türkei. *Geologisches Jahrbuch*, **25**, 3-36.

Blumenthal, M., 1947. Geology of Taurus Mountains at the hinterland of Seydişehir-Beyşehir: *MTA Publ., ser. D*, **2**, Ankara.

Brown, G. and Brindley, G. W. 1980. X-ray diffraction procedures for clay mineral identification. (eds: G. W. Brindley and G. Brown), Crystal structure of clay minerals and their X-ray identification. *Mineralogical Society Monograph No. 5*, 305-360.  
<https://www.doi.org/10.1180/mono-5.5>

Çemen, I., Catlos, E.J., Göğüş, O. and Özerdem, C., 2006. Post-collisional extensional tectonics and exhumation of the Menderes Massif in the Western Anatolia Extended Terrane, Turkey. In: Dilek, Y (ed) Postcollisional tectonics and magmatism in the Eastern Mediterranean Region: GSA's Special Publication, 409, 353-379.  
[https://www.doi.org/10.1130/2006.2409\(18\)](https://www.doi.org/10.1130/2006.2409(18))

Çevikbaş, A., Ercan, T. and Metin, S., 1988. Geology and regional distribution of Neogene volcanics between Afyon-Şuhut, *METU Journal of Pure and Applied Sciences*, **21**, 1-3: 479-499.

Christidis G., 1998. Physical and chemical properties of some bentonite deposits of Kimolos Island, Greece. *Applied Clay Science*, **13**, 79-98.  
[https://www.doi.org/10.1016/S0169-1317\(98\)00023-4](https://www.doi.org/10.1016/S0169-1317(98)00023-4)

Çoban, H. and Flower, M.F.J., 2007. Late Pliocene lamproites from Bucak, Isparta (southwestern Turkey): Implications for mantle 'wedge' evolution during Africa-Anatolian plate convergence. *Journal of Asian Earth Sciences*, **29**, 160-176.  
<https://www.doi.org/10.1016/j.jseaes.2006.06.006>

Glondy, J. and Hetzel, R., 2007. Precise U-Pb ages of syn-extensional Miocene intrusions in the central Menderes Massif, western Turkey. *Geological Magazine*, **144**, 235-246.  
<https://www.doi.org/10.1017/S0016756806003025>

- Işık V, Tekeli O. and Seyitoğlu G, 2004, The 40Ar/39Ar age of extensional ductile deformation and granitoid intrusion in the northern Menderes core complex: implications for the initiation of extensional tectonics in western Turkey. *Journal of Asian Earth Science*, **23**, 555-566.  
<https://www.doi.org/10.1016/j.jseaes.2003.09.001>
- Keller, J. and Villari, L., 1972. Rhyolitic ignimbrites in the region of Afyon-Central Anatolia, *Bulletin of Volcanology*, **36**, 342–358.  
<https://www.doi.org/10.1007/BF02596876>
- Keller, J., 1983. Potassic lavas in the orogenic volcanism of the Mediterranean area, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **18**, 321-335.  
[https://www.doi.org/10.1016/0377-0273\(83\)90014-8](https://www.doi.org/10.1016/0377-0273(83)90014-8)
- Le Bas, M.J. and Le Maitre, R.W, Streckeisen, A., Zanettin, B., 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, **27**, 745–750.  
<https://www.doi.org/10.1093/petrology/27.3.745>
- Melezhik, V.A., Bingen, B., Fallick, A.E., Gorokhov, I.M., Kuznetsov, A.B., Sandstad, J.S., Solli, A., Bjerkgård, T., Henderson, I., Boyd, R., Jamal, D. and Moniz, A., 2008. Isotope chemostratigraphy of marbles in northeastern Mozambique: apparent depositional ages and tectonostratigraphic implications. *Precambrian Research*, **162**, 540-558.  
<https://www.doi.org/10.1016/j.precamres.2007.11.002>
- Metin, S., Genç, Ş. ve Bulut, V., 1987. Afyon ve Dolayının Jeolojisi, M.T.A. Gen. Müd., Proje No: 8107, 74, Ankara.
- Öcal, H., Turhan, N. ve Göktaş, F., 2011. “1:100 000 ölçekli jeoloji haritaları Afyon-K25 paftası”, MTA Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Daire Başkanlığı, Rapor No:159, Ankara.
- Öcal, H. ve Göktaş, F., 2011. “1:100 000 ölçekli jeoloji haritaları Afyon-K24 paftası”, MTA Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Daire Başkanlığı, Rapor No: 158, Ankara.
- Özgül, N., Bölükbaşı, S., Alkan, H., Öztaş, Y., 1991. Sultan Dağları – Sandıklı – Homa Akdağı yöresinin jeolojisi. TPAO raporu, No: 3028, 321s.
- Prelevic, D., Akal, C., Foley, S.F., Romer, R.L., Stracke, A. and Van Den Bogaard, P., 2012. Ultrapotassic mafic rocks as geochemical proxies for postcollisional mantle dynamics of lithosphere: the case of SW Anatolia-Turkey. *Journal of Petrology*, **53**, 1019-1055.  
<https://www.doi.org/10.1093/petrology/egs008>
- Ring, U. and Collins, A.S., 2005. U-Pb SIMS dating of synkinematic granites: timing of core-complex formation in the northern Anatolide belt of western Turkey. *Journal of the Geological Society*, **162**, 289-298.  
<https://www.doi.org/10.1144/0016-764904-016>
- Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes, (Magmatism in Ocean Basins, Editörler: Saunders, A.D, Norry M.J.). Geological Society of London Special Publication, **42**: 313-345.  
<https://www.doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Şengör, A.M.C., Satır, M., Akkök, R., 1984. Timing of tectonics events in the Menderes Massif, western Turkey: implications for tectonic evolution and evidence for Pan-African basement in Turkey. *Tectonics*, **3**, 693-707.  
<https://www.doi.org/10.1029/TC003i007p00693>
- Yalçın, H. and Gümüşer, G., 2000. Mineralogic and geochemical characteristics of Late Cretaceous bentonite deposits at the north of Kelkit valley, Northern Turkey. *Clay Minerals*, **35**, 807-825.  
<https://www.doi.org/10.1180/000985500547250>
- Yıldız, A. and Kuscü, M., 2004. Origin of Başören (Kütahya, W-Turkey) bentonite deposits. *Clay Minerals*, **39**, 219-231.  
<https://www.doi.org/10.1180/0009855043920132>
- Yılmaz, Y., Genç, C., Gurer, F., Bozcu, M., Yılmaz, K., Karacık, Z., Altunkaynak, S., Elmas, A., 2000. When did the west Doğan-Külahcı vd. 161 tern Anatolian grabens begin to develop? In: Bozkurt, E., Winchester, J. A. and Piper, J. D.A. (eds). Tectonics and Magmatism in Turkey and the Surrounding Area. Geological Society, London, Special Publications, **173**, 353-384.  
<https://www.doi.org/10.1144/GSL.SP.2000.173.01.17>
- Zielinski, R.A., 1982. The mobility of uranium and other elements during alteration of rhyolite ash to montmorillonite: A case study in the Troublesome Formation, Colorado, U.S.A., *Chemical Geology*, **35**, 185-204.  
[https://www.doi.org/10.1016/0009-2541\(82\)90001](https://www.doi.org/10.1016/0009-2541(82)90001)





## Bolvadin Asismik Yüzey Deformasyonlarının Yerleşim Alanlarına Etkilerinin İncelenmesi





\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 19.10.2023

Kabul/Accepted: 17.01.2024

Yayımlandı/Published: 27.02.2024

### Investigation of the Effects of Bolvadin Aseismic Surface Deformations on Residential Areas

Çağlar ÖZKAYMAK<sup>1,5</sup> , İbrahim TIRYAKIOĞLU<sup>2,5</sup> , Veli BAŞARAN<sup>3\*</sup> , Mehmet BULDAN<sup>4</sup> 

<sup>1</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye

<sup>2</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye

<sup>3</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye

<sup>4</sup> İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü, Afyonkarahisar, Türkiye

<sup>5</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, Deprem Uygulama ve Araştırma Merkezi (DUAM) Müdürlüğü, Afyonkarahisar, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

Batı Anadolu Genişleme Bölgesi (BAGB) içerisinde kenarları diri faylar ile kontrol edilen grabenlerin kenarlarında, son zamanlarda yıkıcı deprem olmaksızın bazı yüzey deformasyonları meydana gelmektedir. Bu deformasyonlardan biri de Afyon-Akşehir Grabeni (AAG) içerisinde yer alan Afyonkarahisar Bolvadin ilçe merkezinde gerçekleşmektedir. Bolvadin ilçesi ve yakın çevresinde yer alan Bolvadin Fayı üzerinde 03 Şubat 2002 Çay Depremleri (Mw:6.0 ve 6.3) sonrasında meydana gelen ve gelişmekte olan Asismik Yüzey Deformasyonları (AYD), üzerlerinde yer alan kentsel mühendislik yapılarına ve altyapı sistemlerine belirgin zararlar vermekte, yapıları afetlere karşı zayıflatmakta ve ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Bu çalışmada, Bolvadin yerleşim alanının altından geçen Bolvadin Fayı'na ait kollar "yüzey faylanması tehlikesi kuşağı oluşturma kriterleri" açısından değerlendirilmiştir. Bunun için üzerinde daha önce hendek tabanlı paleosismoloji çalışmaları gerçekleştirilmiş olan fay üzerindeki deformasyon zonunun geometrisi, uzunluğu ve genişliği imar planlarına esas olacak ölçekte (1/5000, 1/2000 ve 1/1000) haritalanmıştır. Yapılan saha çalışmalarına göre günümüzde 8 parça halinde imara esas ölçekte haritalanan deformasyonların Bolvadin yerleşim alanı içerisindeki toplam uzunluğu yaklaşık 7 km'dir. Deformasyon kolları üzerinde kalan ve bir kısmı ağır bir kısmı hafif hasarlı olarak bu deformasyonlardan doğrudan etkilenen yaklaşık 100 yapı gözlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Asismik yüzey deformasyonları, Yüzey faylanma tehlike kuşağı, Yatay konum belirsizliği, Güvenlik mesafesi, Fay sakinim bandı

#### Abstract

Recently, some surface deformations without destructive earthquakes have been occurring along the grabens in the West Anatolian Extensional Province (WAEP). One of these deformations occurs in the Afyonkarahisar Bolvadin district center, located within the Afyon-Akşehir Graben (AAG). Asismic Surface Deformations (ASD) occurring and developing on the Bolvadin Fault in the Bolvadin district and its vicinity after the February 3, 2002 Çay Earthquakes (Mw: 6.0 and 6.3) cause serious damage to urban buildings and infrastructures, weaken them against natural disasters and considerable economic impact. In this study, the splays of Bolvadin Fault cutting the Bolvadin urban area are evaluated in terms of the surface faulting hazard overlay criteria. To do this, geometry, length and width zone of the active faults on which trench-based paleoseismological studies have been carried out before, have been mapped in scale of 1/5000, 1/2.000 and 1/1.000. According to the field studies, the total length of the surface deformations mapped in 8 parts on the Bolvadin settlement area is approximately 7 km. Approximately 100 structures have been directly affected by these deformations, with some experiencing severe damage while others have suffered minor damage along the deformation splays.

**Keywords:** Asismic surface deformations, Surface fault hazard zone, Horizontal position uncertainty, Safety distance, Fault avoidance band

#### 1. Giriş

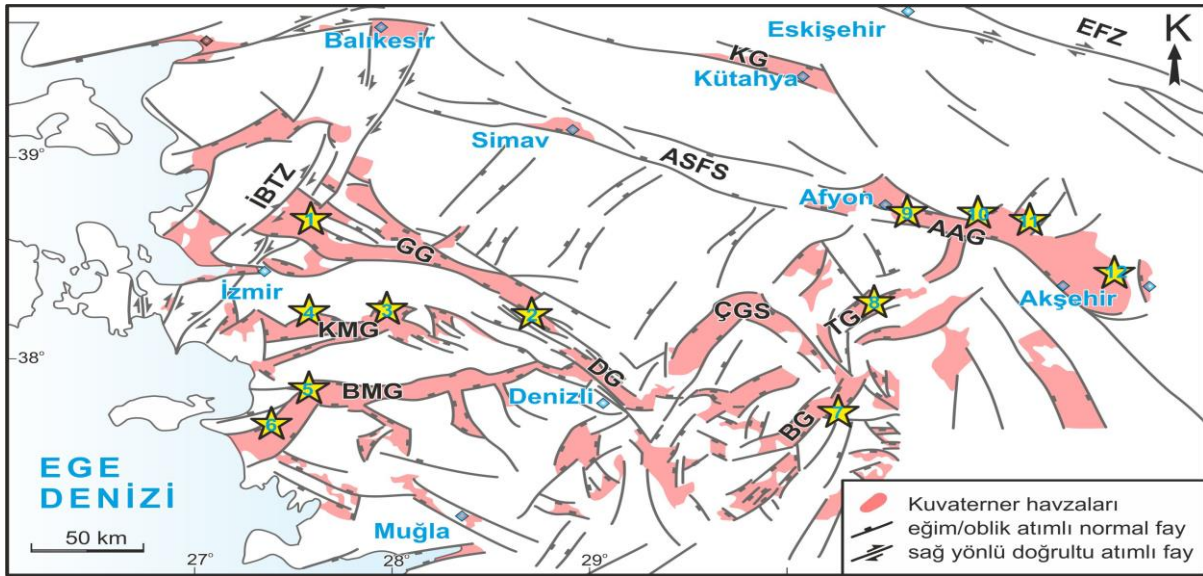
Asismik yüzey deformasyonları (AYD), yüzey altındaki konsolide olmayan sedimanların sıkışmasına bağlı olarak gelişen oturma ilişkili deformasyonlar şeklinde tanımlanır (Holzer, 1984; Pewe, 1990; Koca vd., 2011; Hernández-

Madrigal et al., 2014; Özkaymak vd., 2017). Bu deformasyonların nedeni genellikle yeraltı su seviyelerinin zamana bağlı olarak düşmesi olarak belirtilmektedir. Genelde yüzey yarıkları ve/veya yüzey faylanması şeklinde gelişmektedir. Deformasyonlar



nedeniyle yerleşim alanlarında bulunan insan yapısı yer altında bulunan (su/doğalgaz, kanalizasyon vb.) sistemler ile binalar, karayolu, demiryolu vb. yüzeyde bulunan tesislerde hasarlar oluşmaktadır. Deformasyonlar nedeniyle meydana gelen yüzey yarıkları gerilme ilişkili olup genellikle yarık düzlemine dik yönlü gelişmektedir. Yüzey faylanmaları ise, o bölgede daha önceden var olan faylar boyunca meydana gelirler (Van Siclen, 1967; Holzer, 1980, Özkaymak vd. 2017). AYD meydana gelen bölgelerde yapılan bazı hidrojeolojik çalışmalar, bölgede yer alan fayların yeraltı suları için bir bariyer niteliğinde olduğu; özellikle normal fayların her iki bloğundaki su seviyelerinin fayın ayırdığı bloklarda değişiklik gösterdiği saptanmıştır (Holzer, 1978, Pankratz ve diğ., 1978; Koca ve diğ., 2011, Özkaymak vd. 2017). Benzer şekilde genellikle fayların her iki bloğundaki oturmaları denetleyen kayaç litolojisi aynı değildir ve bu alanlarda farklı yaşa/dayanıma sahip kayaç topluluklarının tektonik olarak yan yana gelmesi beklenir. Aktif grabenlerin yoğun olarak görüldüğü Batı Anadolu Genişleme

Bölgesinde (BAGB) konsolide olmamış, genç alüvyal, fluvial, gölsel çökellerin ve bu çökelleri denetleyen diri normal faylar baskındır. Bu nedenle AYD gelişimi bakımından uygun alanlarından birisidir. BAGB içerisinde bulunan, Karaağaçlı-Yeniköy (1), Sarıgöl-Manisa (2), Gediz Grabeni; Ödemiş (3), Bayındır (4), Küçük Menderes Grabeni; Germencik (5), Söke (6), Büyük Menderes Grabeni; Yassıgüme (7), Burdur Grabeni; Doğanlı (8), Tatarlı Grabeni; Askeri Havaalanı (9), Bolvadin (10), Yeni Karabağ (11) ve Tuzlukçu (12), Afyon-Akşehir Grabeni bölgelerinde AYD varlığı birçok çalışmada gösterilmiştir (Gürsoy vd., 1997; Demirtaş vd., 2008; Koca vd., 2011; Özkaymak vd., 2014, 2015, 2017 ve 2023). Parantez içerisindeki numaralar Şekil 1 de AYD konumlarını göstermektedir. Bu alanlardan birisi olan Sarıgöl (Manisa) yerleşim alanı, 1969 depreminin (M:6.8) yüzey kırığı oluşturduğu Gediz Grabeni'nin güneydoğu ucunda, grabenin güney kenar faylarından birisi olan Sarıgöl Fayı üzerinde yer alır (Şekil 1).



**Şekil 1.** Batı Anadolu Genişleme Bölgesi'nin (BAGB) ana neotektonik yapılarını ve aktif havzalarını gösteren basitleştirilmiş harita (Emre vd., 2011; Özkaymak, 2015 ve Özkaymak vd., 2017'den düzenlenmiştir). Sarı dolgu yıldızlar, AYD lokasyonlarını göstermektedir. Kısaltmalar, İBTZ: İzmir Balıkesir Transfer Zonu, ASFS: Akşehir Simav Fay Sistemi, EFZ: Eskişehir Fay Zonu, GG: Gediz Grabeni, KMG: Küçük Menderes Grabeni, BMG: Büyük Menderes Grabeni, DG: Denizli Grabeni, ÇGS : Çivril Graben Sistemi, BG: Burdur Grabeni, TG: tatarlı Grabeni, AAG: Afyon Akşehir Grabeni, KG: Kütahya Grabeni.

Çalışma alanı olan Akşehir-Simav Fay Sistemi'nin (ASFS) güneydoğu devamında yer alan Afyon-Akşehir Grabeni (AAG) içerisinde 4 farklı lokasyonda AYD gelişimi gözlenmektedir. Bolvadin yerleşim alanı (Afyonkarahisar) içerisinde 03 Şubat 2002 Çay Depremleri (Mw:6.0 ve 6.3) sonrasında gelişmeye başlayan asismik yüzey deformasyonları üzerinde gerçekleştirilen paleosismolojik hendek çalışmaları bu asismik yüzey deformasyonlarının, Bolvadin fayının önceki yüzey kırıkları üzerinde geliştiğine işaret etmektedir (Özkaymak

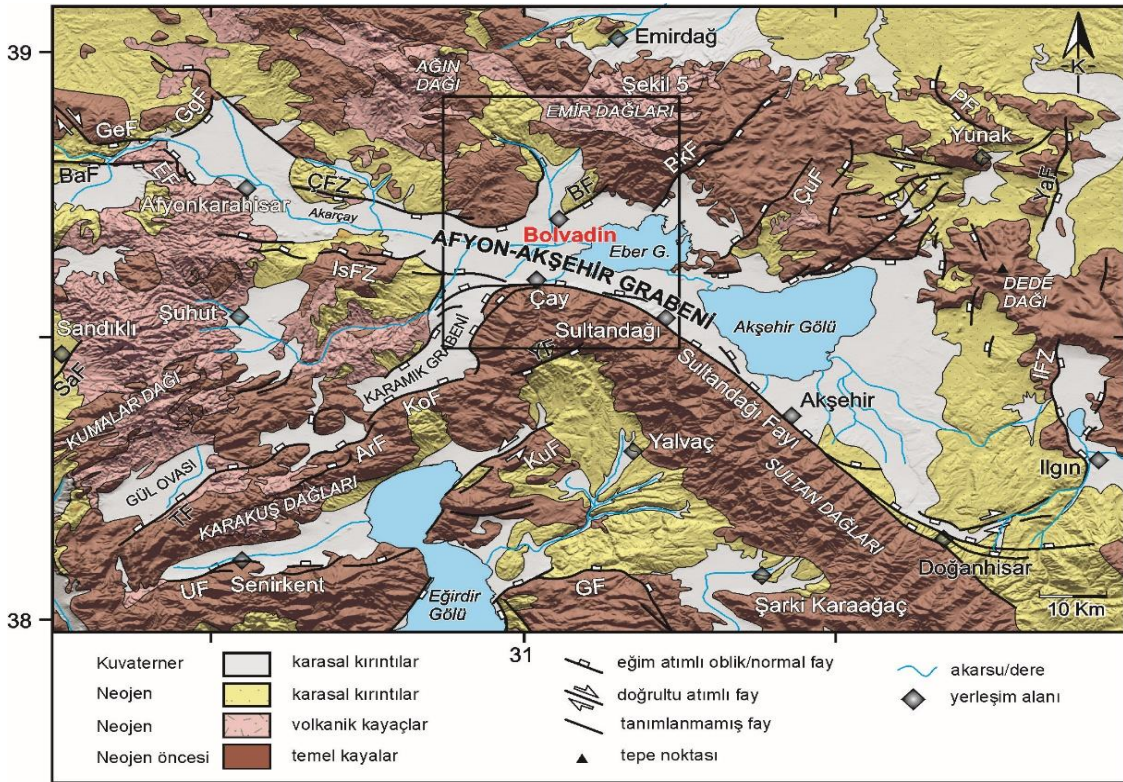
vd., 2019; Elmacı vd., 2022). Bu çalışmada, Bolvadin (Afyonkarahisar) Yerleşim Alanı ve Yakın Çevresinde Yer alan Bolvadin Fayı üzerinde 03 Şubat 2002 Çay Depremleri (Mw:6.0 ve 6.3) sonrasında gelişmeye başlayan ve halen gelişmekte olan Asismik Yüzey Deformasyonları (AYD) jeolojik, jeomorfolojik ve jeodezik yöntemler kullanılarak "yüzey faylanması tehlikesi kuşağı oluşturma kriterleri" açısından değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, yüzey deformasyonlarının üzerinde kalan yapı stoğu incelenmiştir.

## 2. Bölgenin Tektonik Yapısı ve Depremselliği

Batı Anadolu Genişleme Bölgesi içerisinde yer alan ve bu bölgedeki en önemli sismojenik kuşaklardan birisi olan çerisinde KB-GD gidişli çok sayıda aktif fay zonları bulunmaktadır. ASFS, doğuda Ilgın, batıda ise Bigadiç ile sınırlandırılan yaklaşık 400 km uzunluğunda, KB-GD uzanımlı neotektonik bir yapıdır (Koçyigit, 1984; Koçyigit and Özacar 2003; Koçyigit and Deveci 2007; Emre vd., 2011; Gürboğa, 2013; Özkaymak vd., 2017; 2019; 2020). Sistemin batısı Simav Fay Sistemi (SFS), doğusu ise AAG olarak isimlendirilmektedir. SFS, Batı Anadolu Graben Sistemi ile Kuzeybatı Anadolu Geçiş Zonu arasındaki tektonik blok sınırını temsil etmektedir. AAG ise, iç Isparta Açısı ile Dış Isparta Açısı blokları arasındaki tektonik blok sınırını oluşturmaktadır. 2011 yılında güncellenen Türkiye Diri Fay Haritası'na göre SFS 205 km uzunluğundadır (Emre vd., 2011; 2018; Duman vd., 2018). ASFS'nin güneydoğu kesiminde yer alan Afyon

doğusunda, grabenin kuzey kenarında, Çobanlar Fay Zonu (ÇFZ), Bolvadin Fayı (BF), Büyük Karabağ Fayı(BkF), Çukurcak Fayı(ÇuF), Yunak Fay Zonu (YFZ) ile grabenin güney kenarını oluşturan Sultandağı Fayı ve Işıklar Fay Zonu yer almaktadır (Şekil 2). Bununla birlikte bölgede Balmahmut Fayı (BaF), Gazlıgöl Fayı (GgF), Erkmen Fayı (EF), Işıklar Fay Zonu (IsFZ), Piribeyli Fayı (PF), Yavaşlı Fayı (YaF), Ilgın Fay Zonu (IFZ), Yarıkkaya Fayı (YF), Kumdanlı Fayı (KuF), Gecek Fayı (GeF), Gelendost Fayı (GF), Koçbeyli Fayı (KoF), Arızlı Fayı (ArF), Uluborlu Fayı (UF), Tatarlı Fayı (TF), Sandıklı Fayı (SaF) yer almaktadır (Şekil 2-3).

Bölgede son olarak 3 Şubat 2002 tarihinde yüze kırığı oluşturan yıkıcı depremler meydana gelmiştir. Bu depremler Çay'ın batısında 30 cm'e varan düşey yer değiştirmeye sahip yaklaşık 26 km uzunluğunda yüze kırığı oluşturmuştur (Emre vd., 2003; Özden vd., 2002; Akyüz vd., 2006; Yürür vd., 2003).



Şekil 2. Afyon-Akşehir Grabeni ve yakın çevresinin jeoloji haritası (Emre vd., 2011, Turan, 2002 ve Özkaymak vd., 2017'den düzenlenmiştir)

## 3. Materyal ve Metot

### 3.1 Yüze deformasyonların geometrik özelliklerinin belirlenmesi

Bolvadin ilçe merkezindeki asismik yüze deformasyonlarının incelenmesi ve takibi için yüze deformasyonlarının izlenmesi amacıyla nivelman ve GNSS çalışmaları gerçekleştirilmiştir. 115Y296 nolu

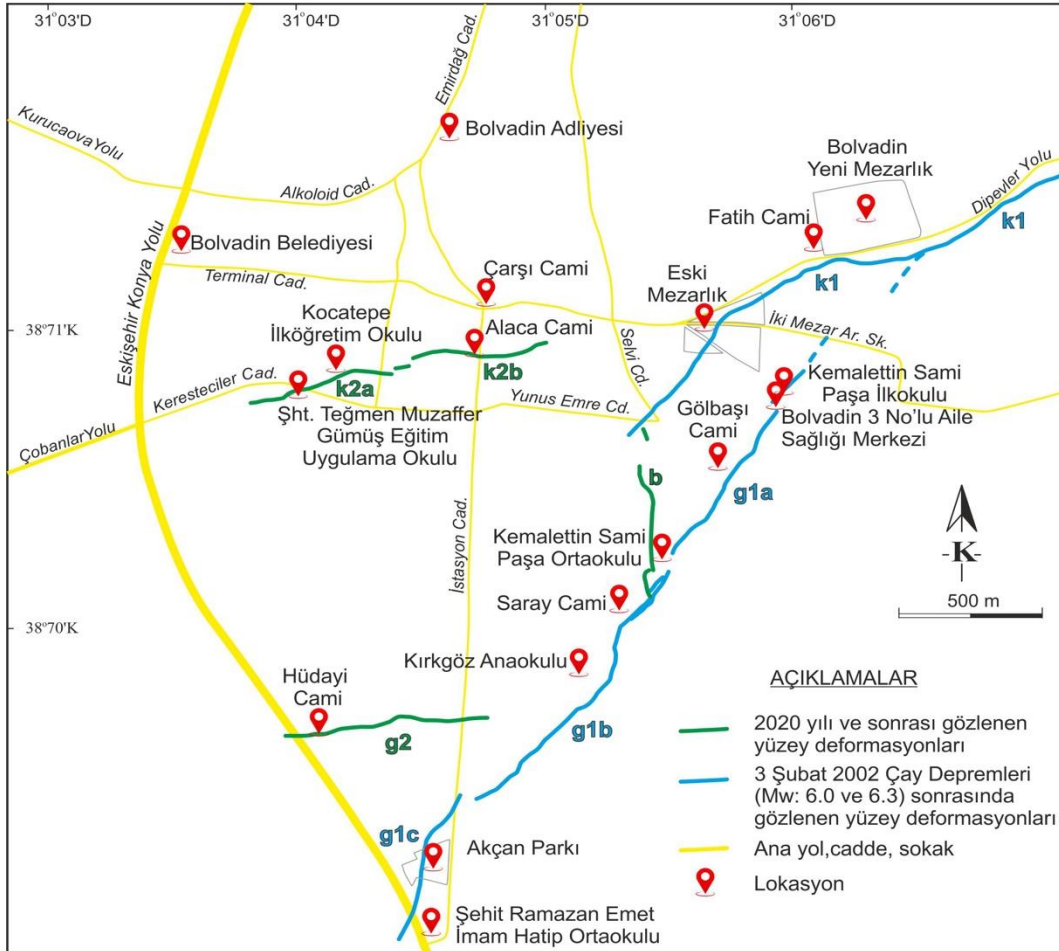
TÜBİTAK Projesi kapsamında ilk olarak gözle görülen yüze deformasyonları haritalanmış ve bölgeyi kapsayan 1 sabit GNSS istasyonu ve nivelman ağı kurulmuştur. Ayrıca AKU BAPK 20.FEN.BİL.22 nolu proje kapsamında 2 adet daha Sabit GNSS istasyonu kurulmuştur. Nivelman çalışmaları için 2016 yılında nivelman hatlarının tesisi gerçekleştirilmiş. İlk ölçü 2016 yılında olmak üzere 2020 yılına kadar 5 kampanya daha nivelman ölçüsü





alanında yaklaşık KD-GB doğrultusu boyunca belirgin izler oluşturmuştur. Bu izler, Bolvadin yerleşim alanında kuzeydoğuda Bolvadin yeni mezarlığı ile batıda Çobanlar yolu, güneybatıda ise Akçan Parkı arasında, yüzeyde çizgisel gidişli yarık ve çatlaklar, çökmeler, dairesel çukurlar, düşey yönde yer değiştirmeler, binalarda çatlak ve yarıklar şeklinde takip edilebilmektedir. Proje

kapsamında haritalanan bu deformasyon kollarının doğrultuları, geometrik yapıları, deformasyon tipleri ve miktarlarına yönelik saha ölçümleri yapılmıştır (Şekil 6-8). Çizelge 1’de imara esas ölçekte haritalanan bu asismik yüzey deformasyonlarının saha gözlemleri ile tanımlamaları ve geometrik özellikleri sunulmuştur.



Şekil 5. Bolvadin yerleşim alanı içerisinde haritalanan yüzey deformasyonlarının yüzey geometrileri ve konumlarını gösteren harita.



Şekil 6. K1 kolunun yüzeyde oluşturduğu deformasyonlara ait saha fotoğrafları.





Şekil 7. K2 deformasyon koluna ait saha fotoğrafları.



Şekil 8. G1 deformasyon koluna ait saha fotoğrafları.

Çizelge 1. Bolvadin yerleşim alanında haritalanan yüzeY deformasyonlarının geometrik özellikleri.

Deformasyon kolu ismi	Uzunluk	Genel Doğrultu	Düşey yer değıştirme		AYD tipi
			Düşen blok		
k	1	1978 m	K40-60°D	güneydoğu	YüzeY faylanması
	2a	518 m	K70-80°D	güneydoğu	YüzeY faylanması
	2b	540 m	K70-80°D	güneydoğu	YüzeY faylanması
b	-	512 m	KG	doğu	YüzeY faylanması
g	1a	965 m	K35°D	güneydoğu	YüzeY faylanması
	1b	1095 m	K35-45°D	güneydoğu	YüzeY faylanması
	1c	557 m	K25°D	güneydoğu	YüzeY faylanması
	2	705 m	K85°D	güneydoğu	YüzeY faylanması
<b>Toplam</b>		6870 m			

### 3.2 Deformasyonların yüzeY faylanması tehlikesi kuşaağı oluşturma kriterleri açısından değeriendirilmesi

YüzeY deformasyonlarının tanımlanması ve geometrik özellikleri, YüzeY Faylanma Tehlike Kuşaağı (YFTK) ve Fay Sakınım Bandının (FSB) oluşturulması ve yüzeY deformasyonlarının üzerinde yer alan yapı stoğu belirlemek yapılan GNSS ölçüleri Bolvadin Belediyesi imar müdürlüğünden temin edilen imar planları üzerine işlenmiştir (Şekil 9).

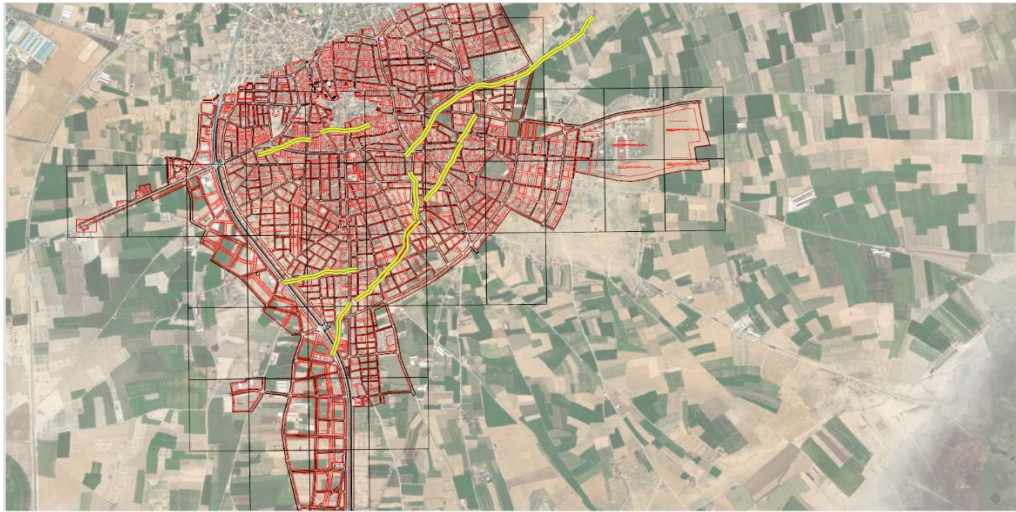
NETCAD ortamına aktarılan yüzeY deformasyonları üzerinde daha sonra YFTK ve FSB oluşturma işlemlerine geçilmiştir. YFTK ve FSB için ulusal mevzuata yansımamış, yasal kurallar henüz oluşturulmamıştır. Dolayısı ile bu çalışmada YFTK ve FSB oluşturma kriterleri, Türkiye Mühendis ve Mimarlar Odası Birliğı

Jeoloji Mühendisleri Odası tarafından 2017 yılında yayınlanan “Planlama ve Yapılaşma Açısından YüzeY Faylanması Tehlikesinin Değeriendirilmesi Kılavuzu” (Nurlu, 2017) ile Sözbilir vd. (2018) tarafından yayınlanan “Criteria for Surface Rupture Microzonation of Active Faults for Earthquake Hazards in Urban Areas” başlıklı kılavuzlar kullanılarak oluşturulmuştur. YFTK, bir diri fay üzerinde yüzeY kırığı oluşturan deprem meydana geldiğinde, yüzeYdeki kırılmaya bağılı olarak yapılarda (alt-üst yapılarda) gelişen hasarı azaltmak için oluşturulur. Bu kuşak sınırları içerisinde planlama ve yapılaşma açısından bazı kısıtlamalar konulması ve/veya önlemler alınması gerektiğini belirtmek için oluşturulur (Nurlu, 2017). Fayın türüne bağılı olarak gelişen deformasyon zonu “YüzeY Faylanması Tehlike Kuşaağını” ifade eder. YüzeY faylanması deformasyon kuşaağının

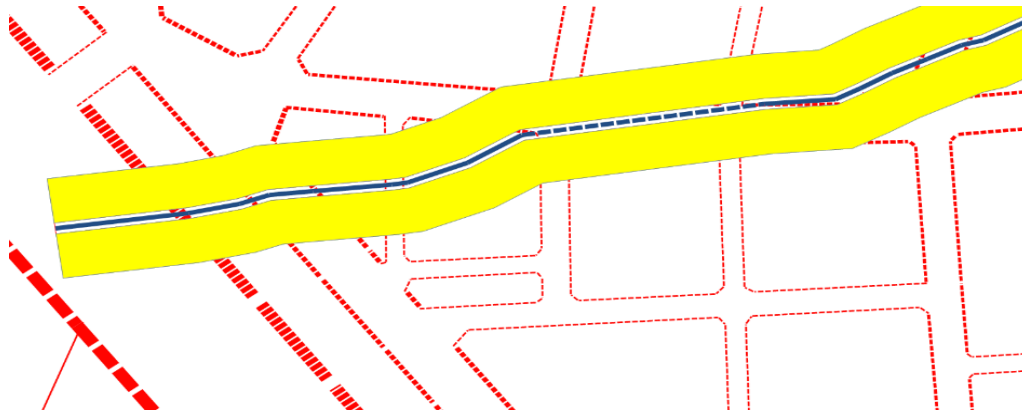
genişliği aynı fay boyunca farklı lokasyonlarda değişkenlik gösterebilir. Doğal olarak iyi tanımlanmış faylar civarında daha dar, saçılmış fay izleri civarında daha geniş ve kesin olmayan fayların civarında ise çok daha geniş tehlike kuşakları oluşturulmaktadır.

Bu çalışmada oluşturulan YFTK, İmara esas ölçekte haritalanan Deformasyon Zonunun kendisidir. Bolvadin’de yüze deformasyonu morfolojik olarak belirgin izler sunduğundan dolayı, deformasyon zonu iyi tanımlanmış ve genel olarak dar bir zonu temsil etmektedir. Bu zon çizgisel tek gidiş sunduğu alanlarda minimum 5 metre genişlikte yüze deformasyonu sunmaktadır. Bazı alanlarda birden fazla kola

ayrılan/çatallanan/saçaklanan yüze deformasyon alanının genişliği GNSS ile hassas bir şekilde belirlenmiş ve haritaya yansıtılmıştır. Yapılan ölçümler, YFTK’nın maksimum genişlik sunduğu alanda 20 metre olarak ölçülmüştür. FSB, YFTK’nın her iki tarafında bırakılması gereken Yatay (Yersel) Konum Belirsizliği (YKB) ve Güvenlik Mesafesi (GM)’nden oluşmaktadır. Bu çalışmada yüze deformasyonlarının lokasyonları net olarak belirlendiği ve haritalandığından dolayı YKB dikkate alınmamıştır. Güvenlik mesafesi ise standartlara uygun şekilde 20 metre olarak kabul edilmiştir (Kerr vd., 2003, Nurlu, 2017, Sözbilir vd., 2018) (Şekil 10).



Şekil 9. 1/1000 İmar Planına işlenmiş yüze deformasyonları.



Şekil 10. YFTK ve FSB gösterimi. Mavi düz çizgiler yüze deformasyonlarını göstermektedir.

### 3.3 Yüze deformasyonlarının üzerinde kalan yapı stoğu

Yapılarda, sismik aktiviteler ana hasar nedeni olmakla birlikte zemine bağlı parametreler (temel oturması vb.) ve yapısal kusurlar da (uygulama hataları, malzeme vb.) yapının kullanım ömrü boyunca hasara sebep olan başlıca faktörlerdir. Betonarme ve yığma yapılarda hasarlar taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan elemanlarda meydana gelebilir. Yığma yapılar gevrek taşıyıcı elemanlardan oluşmaktadır ve dayanımları betonarme

yapılara nazaran daha düşüktür. Bu sebeple yığma yapılarda yüze deformasyonları nedeniyle oluşan hasarların gözlem ile tespiti betonarme yapılara göre daha kolaydır.

Bolvadin yerleşim alanı içerisinde kalan yapı stoğu ağırlıklı olarak; betonarme binalar, tuğla yığma binalar, taş yığma binalar ve kerpiç yığma binalardan oluşmaktadır. Yapı türlerinin dağılımı mahallelere göre değişiklik göstermektedir. Yüze deformasyon zonu



içerisinde kalan hasar almış/almamış tüm binalar yerinde gözlem ile tespit edilmiş ve haritalanmıştır. Hasar almış binalarda hasar sebebinin yüze deformasyonları nedeniyle oluştuğunun belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu sebeple, bina çevre duvarlarındaki bölgesel kırılmaların, yol, kaldırım, tretuvar veya bahçede meydana gelen kırılmaların yapı içinde çizgisel olarak devam ediyor olması yüze deformasyonları yapıdaki çatlakların temel sebebi olduğunu desteklemektedir. Bu çatlaklar sıva ve duvar çatlağı şeklinde kendini göstermektedir. Özellikle yığma yapılarda duvarların taşıyıcı elemanlar olması nedeniyle bu elemanlarda oluşan çatlaklar yığma yapılarda kapasite azalışına sebep olmaktadır. Betonarme yapılarda ise yüze deformasyonları ile uyumlu olarak genelde cephe duvarlarında ve iç duvarlarda çatlama tespit edilmiştir. İlerleyen süreçlerde bu çatlaklar taşıyıcı elemanlarda da oluşabilir. Ancak, taşıyıcı elemanlarında hasar olan betonarme yapılar da mevcuttur.

Zamana bağlı olarak devam eden bu deformasyon neticesinde bazı yapıların onarım geçirdiği görülmüştür. Yapı sahipleri ile yapılan görüşmelerde genel olarak bu binalarda onarımın sürekli tekrarlandığı ifade edilmiştir.

Yapıların yanı sıra bina çevre duvarlarında, yollarda, kaldırımlarda ve tretuvarlarda hasarlar mevcuttur. Bununla birlikte, Bolvadin Belediyesi ve Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından deformasyon zonu üzerinde kalan asfalt yolların tamiratları da sürekli yapılmaktadır. Deformasyon zonu içerisinde deprem sonrası kullanımı gereken kamu binaları da yer almaktadır. Kamu binaları; okullar, sağlık ocağı, camiler, trafo binası, parklar olarak sayılabilir. Yüzeysel deformasyondan doğrudan etkilenen yaklaşık yapı sayıları Çizelge 2’de, yüze deformasyonlarının meydana getirdiği hasarlar ise Şekil 11’de verilmiştir.

**Çizelge 2.** Yüzeysel deformasyondan doğrudan etkilenen yaklaşık yapı sayıları

Yüze Deformasyonları	Yaklaşık Bina Sayısı
k1	25
k2a	12
k2b	19
g1a	21
g1b	6
g1c	3
g2	9
b	5
<b>Toplam</b>	<b>100</b>



**Şekil 11.** Asismik yüze deformasyonlarının meydana getirdiği hasarlar, a) Betonarme yapı hasarları, b) Yığma yapı hasarları, c) Çevre duvarı hasarları, d) Yol hasarları, e) Kamusal yapı hasarları, f) Bahçe hasarları



#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, Bolvadin (Afyonkarahisar) Yerleşim Alanı ve Yakın Çevresinde Yer alan Bolvadin Fayı üzerinde 03 Şubat 2002 Çay Depremleri (Mw:6.0 ve 6.3) sonrasında gelişen ve gelişmekte olan Asismik Yüzeý Deformasyonları İmara esas (1/5.000, 1/2.000 ve 1/1.000) ölçekte haritalanmış, deformasyon zonunun geometrisi, uzunluğu ve genişliğinin belirlenmiş, Deformasyonların yüzeý faylanması tehlikesi kuşağı oluşturma kriterleri açısından değerlendirilmesi yapılmış, FSB içerisinde hasar almış/almamış tüm binalar yerinde gözlem ile tespit edilmiştir. Yüzeý deformasyonlarının imar planı üzerine işlenmesi için 276 Adet nokta ITRF96 koordinat sisteminde 2005.0 epoğunda gerçekleştirilmiştir. NETCAD ortamına aktarılan veriler ile YFTK ve FSB haritaları imara esas olarak dijital olarak oluşturulmuştur. Deformasyonlar, Bolvadin yerleşim alanında, kuzeydoğuda Bolvadin yeni mezarlığı ile batıda Çobanlar yolu, güneybatıda ise Akçan Parkı arasında, yüzeýde çizgisel gidişli yarık ve çatlaklar, çökmeler, dairesel çukurlar, düşey yönde yer değiştirmeler, binalarda çatlak ve yarıklar şeklinde belirgindir ve yüzeýde takip edilebilmektedir.

Haritalama çalışmaları, deformasyonların Bolvadin yerleşim alanı içerisinde uzunlukları 512 metre ile 1978 metre arasında değişen 4 ana kol (7 parçalı) (k1, k2, g1, g2 kolları) ile kuzey ve güney kolları birbirlerine bağlayan 1 adet bağlantı kolundan oluştuğuna işaret etmektedir. Yapılan çalışmalar, Bolvadin yerleşim alanı içerisinde bugüne kadar varlığı bilinmeyen, olasılıkla 2020 yılı sonrasında yüzeý izi belirgin hale gelen 3 yeni deformasyon kolunun varlığını ortaya çıkarmıştır. Bolvadin yerleşim alanı dışarısındaki deformasyonlar ile beraber bölgedeki toplam AYD uzunluğu yaklaşık 13 km civarındadır.

Bolvadin yerleşim alanı içerisinde deformasyon zonu (Yüzeý Faylanması Tehlike Kuşağı) üzerinde kalan ve bir kısmı ağır bir kısmı hafif hasarlı olarak bu deformasyonlardan doğrudan etkilenen yaklaşık 100 yapı gözlenmiştir. Zon içerisinde, bazıları deprem sonrası kullanımı gereken okullar, sağlık ocağı, camiler, trafo binası gibi kamu binaları da yer almaktadır. Gelecek yıllarda Afyonkarahisar ve yakın civarda meydana gelebilecek olası yıkıcı bir depremin Bolvadin Yerleşim Merkezindeki olası risklerini minimuma indirilebilmesi için, bu çalışma kapsamında imara esas ölçekte hazırlanan haritada kırmızı ile gösterilen Yüzeý Faylanması Tehlike Kuşağı alanının Afete Maruz Bölge ilan edilmesi, bu alanın yapılaşmaya kapatılması ve bu

kuşak içerisinde yer alarak deformasyona maruz kalan tüm yapıların afet riski olmayan alanlara taşınması konusunda çalışmalar yürütülmesi gerekmektedir. Bununla beraber güvenlik mesafesi (fay sakınım bandı) içerisindeki hasar almamış olan binaların her yıl düzenli olarak takiplerinin sağlanması gerekmektedir.

#### Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

#### Yazarlık Katkı Beyanı

Çağlar Özkaymak: Kaynaklar, araştırma, çalışma, yorumlama, yazma/inceleme ve düzenleme, görselleştirme.

İbrahim Tiryakioğlu: Kaynaklar, araştırma, çalışma, yorumlama, yazma/orijinal taslak, görselleştirme.

Veli Başaran: Araştırma, çalışma, yorumlama, yazma/inceleme ve düzenleme, görselleştirme.

Mehmet Buldan: Stratejik destek.

#### 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 araştırma Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 16.KARİYER.167, 14.MUH.01 ve 12.TEMATİK.02 numaralı projeler kapsamında desteklenmiştir.

#### 5. Kaynaklar

- Akyüz, S., Uçarkuş, G., Şatır, D., Dikbaş, A. ve Kozacı, Ö., 2006. 3 Şubat 2002 Çay depreminde meydana gelen yüzeý kırığı üzerinde paleosismolojik araştırmalar. *Yerbilimleri* **27**(1): 41-52.
- Demirtaş, R., Ercan, S., Demir, B. ve Aktan, M., 2008. Ege Çöküntü Bölgesi'nde Alüvyal Havzalarda Son 20 Yılda Oluşmuş Yüzeý Deformasyonlarının Oluşum Mekanizması. *ATAG 12 Bildiri Özleri Kitabı*, 42-44.
- Duman, T.Y., Çan, T., Emre, Ö., Kadrioğlu, F.T., Başarır Baştürk, N., et al, (2018). Seismotectonic database of Turkey. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **16** (8): 3277-3316.  
<https://doi.org/10.1007/s10518-016-9965-9>
- Elmacı, H., Özaksoy, V., Ozan Avcı, H., Kara, M., Özmen, S., 2022. Afyon-Akşehir Grabeninin Sisteminin Kuzey Kenarını Sınırlayan Fayların Paleosismolojik Özellikleri (Çobanlar ve Bolvadin Fayları), *GB Türkiye. ATAG-25. Çalıştay Bildiri Özleri Kitabı*, s.56.
- Emre, Ö., Duman, T.Y., Doğan, A., Özalp, S., Tokay, F. and Kuşcu, İ., 2003. Surface Faulting Associated with the Sultandağı Earthquake (Mw 6.5) of 3 February 2002, Southwestern Turkey. *Seismological Research Letters*, **74** (4), 382-392.

- Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Olgun, Ş and Elmacı, H., 2011a. Active Fault Map of Turkey (Scale 1:250,000), General Directorate of Mineral Research and Exploration Special Publication Series, Afyon (NJ 36-5) Quadrangle, serial number: 16. Ankara, Turkey: MTA.
- Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Olgun, Ş. and Elmacı, H., 2011b. Active Fault Map of Turkey (Scale 1:250,000), General Directorate of Mineral Research and Exploration Special Publication Series, Iğın (NJ 36-6) Quadrangle, serial number: 21. Ankara, Turkey: MTA.
- Emre, Ö., Özalp, S. and Duman, T.Y., 2011c. Active Fault Map of Turkey (Scale 1:250,000), General Directorate of Mineral Research and Exploration Special Publication Series, Uşak (NJ 35-8) Quadrangle, serial number: 11. Ankara, Turkey: MTA.
- Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Şaroğlu, F., Olgun, Ş. vd. (2018). Active fault database of Turkey. Bulletin of Earthquake Engineering, **16** (8): 3229-3275. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-0041-2>
- Gürboğa, Ş., 2013. 28 March 1970 Gediz earthquake fault, western Turkey: palaeoseismology and tectonic significance. International Geology Review, **55**/10, 1191–1201. <https://doi.org/10.1080/00206814.2013.771420>
- Gürlek, E., 2023. Farklı jeodezik yöntemlerle Bolvadin'deki yüzey deformasyonlarının izlenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 142s.
- Gürsoy, H., Temiz, H., Tatar, O. ve Barka, A., 1997. Gediz grabeni güney kenarındaki güncel deformasyon verileri. II. İzmir ve Çevresinin Jeoteknik ve Deprem Sorunları Sempozyumu, Bildiri Özetleri, İzmir, Turkey. pp 14 (in Turkish).
- Hernández-Madrigal, V. M., Muñoz-Jauregui, J. A., Garduño-Monroy, V. H, Flores-Lázaro, N. and Figueroa-Miranda, S., 2014. Depreciation factor equation to evaluate the economic losses from ground failure due to subsidence related to groundwater withdrawal. Natural Science, **6** (3), 108-113. <https://doi.org/10.4236/ns.2014.63015>
- Holzer, T.L., 1978. Results and Interpretation of Exploratory Drilling Near the Picacho Fault, South-Central Arizona: U.S. Geological Survey Open- File Report 78-1016, 17 p.
- Holzer, T.L., 1980. Faulting Caused by Ground-Water Level Declines, San Joaquin Valley, California. Water Resources Research, **16** (6), 1065- 1070.
- Holzer, T.L., 1984. Ground failure induced by groundwater withdrawal from unconsolidated sediment. In: Holzer Holzer, T.H., Ed., Man- Induced Land Subsidence, VI. Geological Society of America. Reviews in Engineering Geology, Colorado, 67-105.
- Kerr, J., Nathan, S., Van Dissen, R., Webb, P., Brunson, D., & King, A., 2003. Planning for development of land on or close to active faults. Wellington: Ministry for the Environment.
- Koca, M. Y., Sözbilir, H. ve Uzel, B., 2011. Sarıgöl Fay Zonu Boyunca Meydana Gelen Deformasyonların Nedenleri Üzerine bir araştırma. Jeoloji Mühendisliği Dergisi, **35** (2), 151-173.
- Koçyiğit, A., 1984. Güneybatı Türkiye ve yakın dolayında levha içi yeni tektonik gelişim. Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, **27**, 1, 1- 15.
- Koçyiğit, A. ve Özacar, A. 2003. Extensional neotectonic regime through the NE edge of outer Isparta Angle, SW Turkey: new field and seismic data. Turkish Journal of Earth Sciences, **12**, 67–90.
- Koçyiğit, A. ve Deveci, Ş., 2007. A N-S-trending Active Extensional Structure, the Şuhut (Afyon) Graben: Commencement Age of the Extensional Neotectonic Period in the Isparta Angle, SW Turkey. Turkish Journal of Earth Sciences, **16**, p.391-416.
- Nurlu, M., 2017. Planlama ve Yapılaşma Açısından Yüzey Faylanması Tehlikesinin Değerlendirilmesi Kılavuzu, TMMOB JMO yayını, yayın no: 134. 105s.
- Özden, S., Kavak, K.Ş., Koçbulut, F., Över, S. and Temiz, H., 2002. 3 Şubat 2002 Çay (Afyon) depremleri. Türkiye Jeoloji Bülteni, **45**, 49-56.
- 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. <https://doi.org/10.1080/09853111.2014.957504>
- Özkaymak, Ç., Yıldız, A., Sarıkaya, H., Başaran, C. ve Dumlupınar, İ., et al, 2014. Bolvadin Fayı boyunca meydana gelen yüzey deformasyonları, Batı Anadolu-Türkiye. 18th Meeting of Active Tectonic Research Group; Muğla, Turkey. pp. 52.
- Özkaymak, Ç., Sözbilir, H., Tiryakioğlu, İ. ve Baybura, T., 2017. Bolvadin'de (Afyon-Akşehir Grabeni, Afyon) Gözlenen Yüzey Deformasyonlarının Jeolojik, Jeomorfolojik ve Jeodezik Analizi. Türkiye Jeoloji Bülteni, **60**, 169-188.
- Özkaymak, Ç., Sözbilir, H., Geçievi, M.O. and Tiryakioğlu, İ., 2019. Late Holocene coseismic rupture and aseismic creep on the Bolvadin Fault, Afyon Akşehir Graben, Western Anatolia. Turkish Journal of Earth Science, **28**, 787-804. <https://doi.org/10.3906/yer-1906-13>
- Özkaymak, Ç. and Sözbilir, H., 2020. Structural Evidence For Extensional Domain-Type Geothermal Play In Western Anatolia: A Case Study From Afyon-Akşehir Graben. Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering, **20** (4), 693-702.

- <https://doi.org/10.35414/akufemubid.704433>
- Özkaymak, Ç., Sözbilir, H., Tiryakiođlu, İ., 2023. Batı Anadolu'da Günümüzde Gelişen Asismik Yüzeý Deformasyonlarının Özellikleri ve Kökeni. Cumhuriyetimizin 100. Yılında Yerbilimleri Kolokiyumu "Batı Anadolu", 26-28 Ekim, İZTO Ana Toplantı Salonu, İzmir.
- Pankratz, L. W., Ackermann, H. D., and Jachens, R. C., 1978. Results and Interpretation of Geophysical Studies Near the Picacho Fault, South-Central Arizona: U.S. Geological Survey Open-File Report, **78-1106**, 17 p.
- Pewe, 1990. Land subsidence and earth-fissure formation caused by groundwater withdrawal in Arizona; A review. Groundwater Geomorphology The role of subsurface water in Earth-surface processes and Landforms, edited by Charles G. Higgins, Donald Robert Coates, Geological Society of America pub. p.252.
- Sözbilir, H., Özkaymak, Ç., Uzel, B., Sümer, Ö., 2018. Criteria for Surface Rupture Microzonation of Active Faults for Earthquake Hazards in Urban Areas, In: Ceryan, N., (ed), Handbook of Research on Trends and Digital Advances in Engineering Geology, IGI Global book series Advances in Civil and Industrial Engineering (ACIE), USA, p 187-230.
- Tiryakioğlu, İ., Özkaymak, Ç., Yaçın, M., Baybura, T., Yılmaz, M., Uğur, M.A., Yiğit C.O., Dindar, A.A., Poyraz, F., Uysal, M., Sözbilir, H., Gülal, E., 2017. Akşehir Simav Fay Sistemindeki Güncel Tektonik Hareketlerinin İzlenmesi: Nivelman Çalışmaları, 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 11-13 Ekim, Eskişehir, Türkiye.
- Tiryakioğlu, İ., Yiğit C.O., Özkaymak, Ç., Baybura, T., Yılmaz, M., Uğur, M.A., Yalçın. M.A., Poyraz, F., Sözbilir, H., Gülal, E., 2019. Active Surface Deformations Detected By Precise Levelling Surveys In The Afyon-Akşehir Graben, Western Anatolia, Turkey. *Geofizika*, **36**, 1, 33–52.  
<https://doi.org/10.15233/gfz.2019.36.4>
- Tiryakioğlu, İ., Çalışkan, K., Yiğit, C.O. Hastaoğlu, K.O., Poyraz, F., Baybura, T., Gürlek, E., 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, *Annal Of Geophysics*, **65**.  
<https://doi.org/10.4401/ag-8784>
- Turan, N., 2002. Geological map of Turkey in 1:500.000 scale: Ankara sheet. Publication of Mineral Research and Explantion Direction of Turkey (MTA), Ankara.
- Van Siclen, D. C., 1967. The Houston Fault Problem, in Proceedings, American Institute of Professional Geologists, Texas Section, Annual Meeting, 3rd, Dallas, p. 9-31.
- Yürür, T., Köse, O., Demirbağ, H., Özkaymak, Ç. and Selçuk, L., 2003. Could the coseismic fractures of a lake ice reflect the earthquake mechanism? (Afyon Earthquakes of 02.03.2002. Central Anatolia, Turkey). *Geodynamica Acta*, **16**, 83-87.



## A Study on the Production of Riblet Patterns Providing Micro-scale Flow Control through FDM-type 3D Printers

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 19.04.2023

Kabul/Accepted: 04.01.2024

Yayımlandı/Published: 27.02.2024

### FDM-tipi 3 Boyutlu Yazıcılar ile Mikro Ölçekte Akış Kontrolü Sağlayabilen Riblet Desenlerinin Üretimine Yönelik bir Çalışma

Volkan KORKUT<sup>1\*</sup>, Hürrem AKBİYİK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, Adana, Turkey

<sup>2</sup>Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Department of Aerospace Engineering, Adana, Turkey

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

Bu çalışma, havacılık ve uzay teknolojilerinde kritik öneme sahip olan akış karakterizasyonu uygulamalarına pratik bir alternatif olarak Fused Deposition Modelling (FDM)-tipi eklemeli imalat yöntemini araştırmaktadır. Literatürde, yüksek bütçe gerektiren FDM cihazlarıyla, yüksek boyutsal tutarlılıkta parça imalatı yapılabilmesi üzerine önemli çalışmalar mevcut olmasıyla birlikte; daha erişilebilir, pratik ve esnek bir kullanım imkanı sunan açık-kaynaklı cihazlar ile milimetre-altı riblet geometrileri üretiminin detayları üzerine yürütülmüş araştırmaların sayısı kısıtlıdır. Bu bağlamda çalışmada, mekanik ve yazılımsal olarak modifiye edilebilen bir yazıcı kullanılmış olup, kanat yapısını temsil eden plakalar üzerine, birbirine paralel riblet desenleri üretilmiştir. Ribletler üzerinde mikroskopik inceleme ve ölçümler gerçekleştirilerek, karşılaşılan sorunların çözümüne yönelik araştırmalar yapılmıştır. Gözlemler doğrultusunda, ilk etapta, nozzle-table mesafesi ve nozzle daireselliği gibi donanımsal unsurların homojen bir malzeme ekstrüzyonu açısından önem taşıdığı açığa çıkarılmıştır. Mekanik faktörlerin yanı sıra, yazılımsal olarak belirlenen çizgi genişliği ve akış oranı parametrelerinin, riblet boyutları üzerinde belirleyici birer etken olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle açık-kaynak konseptine dayalı cihazlarda bu parametrelerin kalibrasyonuna yönelik çözümler içeren deneylerin sonucunda; sırasıyla riblet genişliği, ribletler-arası boşluk mesafesi ve riblet yüksekliği olacak şekilde, hata miktarı en fazla %1,83, %1,33 ve %0,19 gibi yüksek doğrulukta riblet profilleri elde edilebilmiştir. Sonuçta, yaygın kullanılan, düşük maliyetli ve modifiye edilebilir yapıdaki FDM cihazlarıyla, bu boyutlarda ve doğrulukta riblet üretimi yapılabilmesine dair bulgular sunulmuştur. Akış kontrolü ve yüzey modifikasyonları alanlarında kullanılan riblet yapılarının havacılık ve uzay endüstrisindeki önemi göz önünde bulundurulduğunda bu çalışma, araştırma-geliştirme faaliyetlerinde kullanılabilecek daha karmaşık yüzey profillerinin, kısa sürelerde, pratik ve efektif bir şekilde üretilebilmesi için kritik bilgileri literatüre kazandırmayı amaçlamaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** FDM, 3d yazıcı, Akış kontrol, Riblet, Kanat yüzeyi

#### Abstract

This study explores the Fused Deposition Modeling (FDM) additive manufacturing method as a practical alternative for flow characterization applications critical in aerospace technology. While there are significant studies in the literature on high-budget FDM devices for manufacturing high-dimensional consistency parts, research focusing on sub-millimeter riblet geometries using more accessible, practical, and flexible open-source devices remains limited. In this study, a printer that can be mechanically and programmatically modified was used to create parallel riblet patterns resembling wing structures on plates. Microscopic examinations and measurements were conducted on these riblets to address encountered issues. Observations revealed that hardware elements such as nozzle-table distance and nozzle circularity are crucial for homogeneous material extrusion. Additionally, it was observed that software-defined parameters like line width and flow rate significantly affect riblet dimensions. Particularly in experiments involving calibration of these parameters in open-source concept devices, riblet width, inter-riblet spacing, and riblet height were achieved with a high accuracy error rate of up to 1.83%, 1.33%, and 0.19%, respectively. Consequently, this study demonstrated the feasibility of producing riblets in this size and precision using widely available, cost-effective, and customizable FDM devices. Considering the significance of riblet structures in aerospace industries for flow control and surface modifications, this research aims to provide critical insights for the practical and effective production of more complex surface profiles in research and development activities.

**Keywords:** FDM, 3d printing, Flow control, Riblet, Airfoil surface

## **1. Introduction**

Flow control has critical importance in terms of aerospace and aeronautical engineering technologies. The flow field can be manipulated by either the overall wing geometry or by modifying the airfoil's surface. It has been observed that riblet patterns created on the wing surface provide significant benefits in critical areas such as controlling the flow direction, delaying flow separation, and reducing drag. Furthermore, there are important studies indicating that microscale riblet patterns improve flow characterization.

In the study conducted by Walsh and Weinstein (1978), it was noted that achieving a 10% reduction in drag on an aircraft body could result in annual savings of hundreds of millions of dollars from flights. It was additionally suggested that this reduction could be achieved by implementing riblet structures with various shapes, including rectangular, V-shaped, or razor-blade profiles. The enhancement in flow performance was attributed to variations in riblet height and spacing, which were adjusted according to changes in the riblets' cross-section. Subsequently, it was suggested that not only conventional shapes but also bio-inspired riblet models, such as surfaces mimicking shark skin textures, could effectively reduce surface drag by up to 8% (Walsh 1983). Dai et al. (2019) further explored the impact of shark-skin-like riblets on flow characteristics, employing additive manufacturing techniques to replicate the texture of shark skin. Riblet arrays were manufactured with different orientation angles on a substrate to investigate their impact on variations in fluid drag. Despite the limited information available regarding the device configuration and printing process, the study demonstrated that the orientation of the riblet array significantly influences flow characteristics. This finding opens avenues for future studies to investigate different riblet placement angles on surfaces. In another study conducted by Bechert and Bartenwerfer (1989), the investigation focused on the location, orientation, and geometry of riblets within flow boundaries. The riblets were designed as grooves, and subsequently, the orientation angle of these grooves in a specific area at the flow outlet section was increased compared to the rest of the boundary layer. The geometrical design and varying orientation within the same flow boundary resulted in a significant drag reduction of around 10%, thereby enhancing the overall flow performance. The aforementioned studies represent some of the earliest examples demonstrating comprehensive tests and measurements regarding riblets' geometry,

encompassing both primitive and bio-inspired specific shapes. Moreover, the design of riblet arrays, which involves the spacing between riblets (including individual riblet sizes) and the orientation angle(s) of the riblet array, underwent thorough examination. A common observation across these studies is the substantial enhancement in flow performance achievable through modifications in riblet design and its placement within flow boundaries. At this point, various methods to produce surface patterns of desired dimensions and geometries on which the flow will occur, have become a major research topic in the literature. In this context, the issue of how different riblet designs can be manufactured in real life has become a major research topic spanning from the past to the present day, and its significance has been increasingly recognized as also subjected in this study.

In recent times, a range of microscale riblet manufacturing techniques have proven to be effective. For instance, Bechert et al. (1997) employed precision milling to produce small riblets in trapezoidal and triangular shapes on a plexiglass surface. They reported that the manufactured riblets were sufficiently small and the results were qualified due to the precision of the CNC milling machine. However, it was noted that it took nearly two weeks to prepare one successful sample. This was attributed to the material characteristics, which are limited to being machined at low material removal rates, as well as to the machine hardware that requires low-speed stepper motors, thus extending processing times. In the end, drag-reducing surfaces were successfully obtained, but due to the low production capacity, only a few models could be tested. Likewise, in the study by Chen et al. (2013) aiming for the same objective, microscale riblets were produced through successive machining and casting methods. To begin, a master with microchannels was created using an ultra-precise lathe. Subsequently, a polymer resin was poured onto this master and cured. The solidified layer was then machined once more to attain the desired depth of the riblet geometries. Finally, the processed material was separated from the master and subjected to tests. Consequently, herringbone-type riblets with over 95% dimensional consistency were successfully produced. However, the high installation/operation cost of the extremely precise devices used, as well as the chemical-based processes requiring multiple stages such as molding and curing, are limiting factors in terms of flow control studies. In addition, processes based on material removal such as turning and milling (Walsh and

Lindermann 1984, Denkena et al. 2010), or plastic deformation such as rolling (Hirt and Thome 2007), require expensive machinery and cutting/shaping tools. Another method involves the production of highly precise riblet patterns using lithographic processes employing various solvents and etchants (Marentic and Morris 1992, Bixler and Bhushan 2013, Jung and Bhushan 2010, Brennan et al. 2010). Nonetheless, these processes entail time-consuming steps like curing and heating, and may carry potential risks of contamination, harmful gas emissions, and exposure to UV light.

In the mentioned studies, high-precision riblet geometries have been produced using mechanical and/or chemical processing methods based on chip removal. However, it has been observed that almost all of these studies necessitate multiple process steps, demanding considerable time and effort to complete the procedures. Furthermore, it has been noted that high-cost chip removal devices with micrometer precision capabilities and the necessary electronic components for their monitoring are crucially required in almost all these endeavors. Additionally, harmful solvents and gas emissions used in chemical processes are found to be limiting factors in riblet production. In the quest to minimize these barriers, a next-generation production technique known as Fused Deposition Modeling (FDM), also referred to as 3D printing, offers promising advantages. One of the foremost advantages is the utilization of only the required amount of material without material waste, unlike traditional chip removal methods (Gibson et al. 2010). Moreover, the availability of a variety of materials suitable for FDM production, such as Polylactic Acid (PLA), enables environmentally friendly and non-hazardous production, promoting environmental sustainability (Sin et al. 2012). Furthermore, the direct transfer and fabrication of digitally prepared models to the device dramatically reduce process steps compared to traditional methods (Vyavahare et al. 2020).

FDM systems enabling the efficient production of functional parts can be utilized in various domains such as rapid tooling, architectural modeling, and in-place repairing (Huang et al., 2013; Rayna et al., 2016). Moreover, they facilitate the production of components catering to the aerospace industry, which often involves highly complex geometries (Zaman et al., 2019; Hossain et al., 2014; Guduru et al., 2020). However, significant engineering effort is required to produce parts with high geometric consistency. This is due to the multitude of

process (printing) parameters, such as layer thickness, line width, build orientation, printing speed, nozzle diameter, and temperature, which need to be harmonized (Dey and Yodo 2019). Moreover, the FDM device's motion accuracy, extrusion rate, layer-to-bed distance, and nozzle circularity must meet adequate precision requirements, and if not, various modifications and calibration processes are necessary (Geng et al. 2019, Tymrak et al. 2014).

Especially when producing micro-scale structures through open-source and custom-built FDM devices, a more detailed consideration of these factors is necessary. The same conditions apply for the production of micrometer-sized riblet structures via the FDM method, which is an effective surface modification technique in the aerospace and aeronautical fields. The lack of sufficient studies in the literature regarding criteria for producing riblets through the FDM method, capable of providing distinct flow characterization, motivates this study. In this context, a series of experiments have been conducted with the aim of effectively adapting the FDM method, which offers advantages of shorter production periods, lower budgets, minimum material consumption, and high dimensional consistency, to riblet fabrication. The objective of this study is to provide critical information regarding the production of riblet structures through 3D printers, which can be effectively used in various research and development activities.

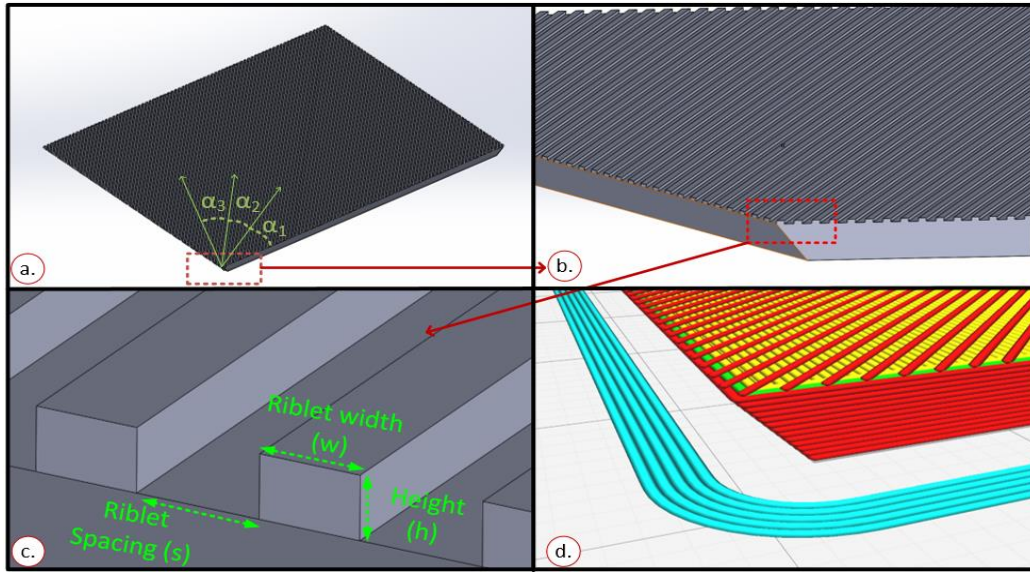
## **2. Material and Methods**

In this section, a series of tests were conducted in order to examine the producibility of the micro-scale riblets and grooves by using an open-source, custom-built FDM device.

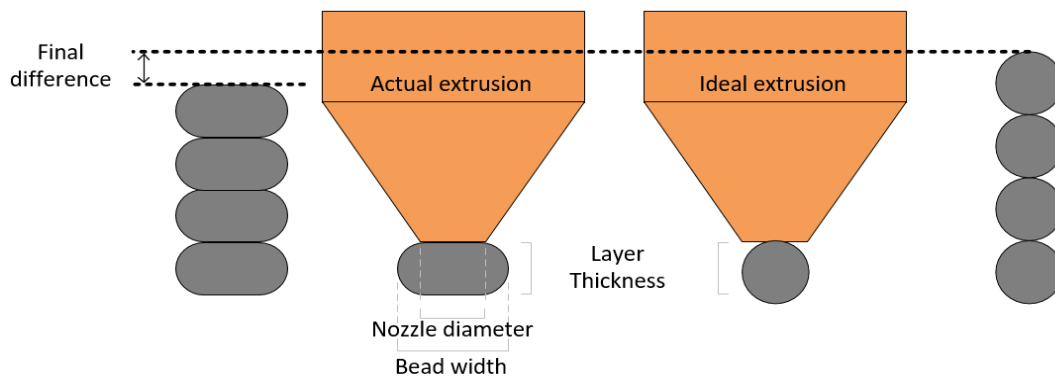
Firstly, the CAD model of ribletted flat surfaces was designed in the digital environment. Representing the wing, the dimensions of both the flat surfaces and the riblets were planned to be within the limits of hardware and the built size of the device. In the Figure 1, images of the flat plates having a riblets and grooves on the top surface is represented. Regarding the printing process, it is necessary to ensure the minimum scale that the device is capable of. This is because common 3D printing processes may suffer from deformations such as under or over-extrusion, uneven deposition, and structural problems in the extrusion hardware (Gordeev et al. 2018). These factors significantly affect the print quality. Fortunately, there are numerous guides and



troubleshooting instructions available owing to open-source communities (Int. Ref. 1-3).



**Figure 1.** Flat plates a. Isometric view of the plates in CAD software. b) Magnified image of plate. c) Description of the riblet dimensions. d) Image of the plates in the slicer software



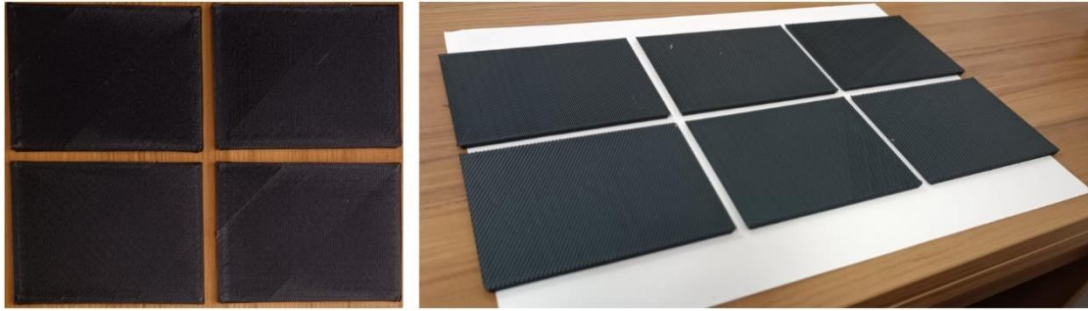
**Figure 2.** Comparison between the actual and ideal deposition heights

However, further investigation is required to identify possible issues when working at a sub-millimeter level. Examining the extrusion conditions can serve as a starting point to assess the device's capabilities.

When considering the extrusion conditions, parameters such as the flow rate, motion accuracy in all axes, and the roundness of the nozzle orifice play a significant role in determining the final quality of the part. In the Figure 2, the comparison between the ideal and actual deposition conditions is represented. It is an expected result that the deposition height in deposited material to be slightly less than the digital model height. The reason can be attributed to the shear strength reduction in the polymer materials when they are heated up to the semi-molten phase (Bhalodi et al. 2019). At this condition, the softened material tends to be squeezed between bottom surface of the nozzle outlet and the deposition platform. As a result, the extruded bead cannot find enough time

to regain its circular shape and cools down in a near elliptical profile.

In macro-scale ( $\geq$  millimeters) printing processes, this dimensional error may be overlooked, but it is still a subject that needs to be addressed in micro-scale deposition processes. It is important to at least reveal the amount of height variation in the final product. Only in this way, micro-fabrication processes performed by FDM devices can be successful. The fact that the difference between the digital value and the actual elevation obtained can also be affected by factors such as electromechanical noise and other variables caused by friction in various areas should also be taken into consideration (Korkut and Yavuz 2020). In Table 1, printing parameters of the plates are given. In the following Figure 3, six printed samples having various riblet patterns are represented.



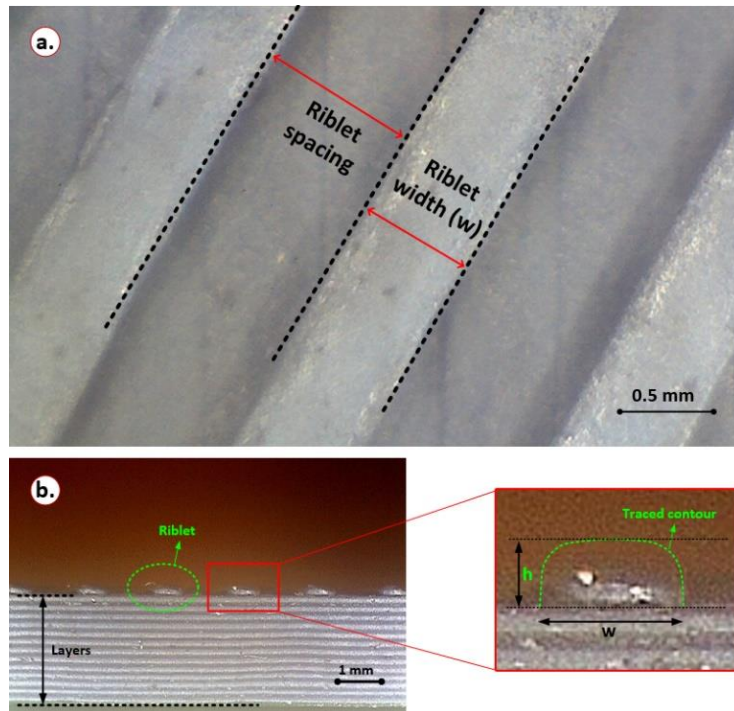
**Figure 3.** Initially printed pre-testing sample plates (left), The image of selected plates (right)

**Table 1.** The printing parameters of the plates and riblets

Printing Parameters	Value	Unit
Line (road) width:	0.4	mm
Layer (riblet) height:	0.2	mm
Number of layers:	13	
Nozzle diameter:	0.4	mm
Bed temperature:	65	°C
Nozzle temperature:	205	°C
Base material	PLA	
Print speed:	60	mm/s
Riblet orientation (angle):	30° / 60°	

As a result of production, photographs of different regions of the models have been taken through a digital microscope. Measurements were made on the captured photographs using ImageJ software, and comparisons were made between digital and actual dimensions. The microscopic examinations of the produced samples and their corresponding regions in the real samples as

indicated in the digital model (Figure 1) are presented in Figure 4. Polylactic Acid (PLA) was selected as the printing material, and the slicing was set with a line width of 0.4 mm. In addition, the total thickness of the plate was set to 2.6 mm with a unit layer thickness of 0.2 mm, and the nozzle and print bed temperatures were configured as 205 °C and 65 °C, respectively. The sample production was carried out in two separate sessions. In the first stage, the quality of the obtained sample was evaluated in general. At this stage, some factors that are likely to be encountered during the printing process were examined. These include prominent surface defects, extrusion errors, circularity distortions in the nozzle's orifices, issues commonly encountered in mass-manufactured nozzles.

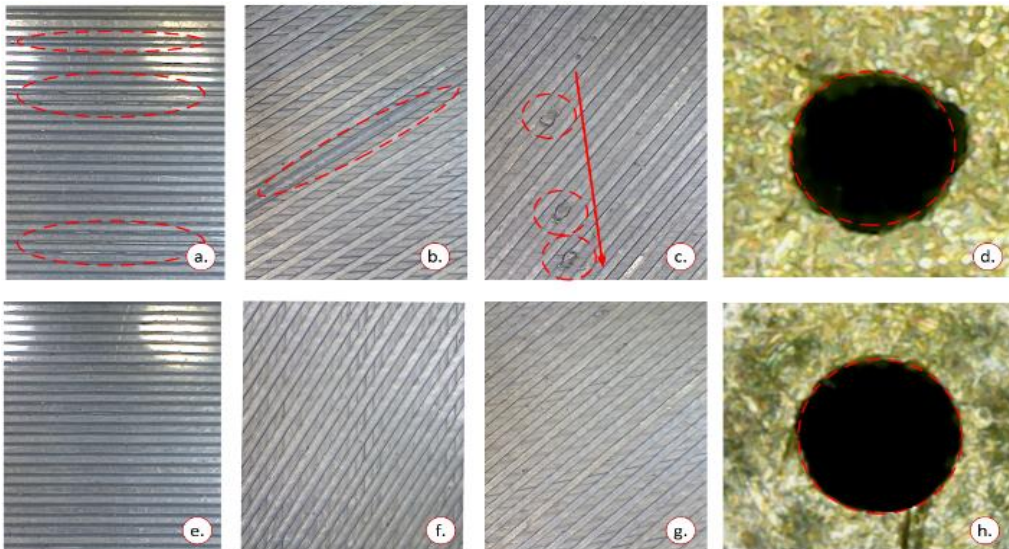


**Figure 4.a.** Top view of the microscopic photoshoot of a sample **b.** The front view of the same sample, (Riblet height:  $h$ , width:  $w$ ) the primary subject. The results were evaluated using microscopic images and image processing software.

**3. Results and Discussion**

In the first step of the experimental study, two samples were produced with riblet orientation angles of 30 and 60 degrees, respectively. When these samples were examined under a microscope, various problems were observed in material deposition. In Figure 5(a), it was observed that the lines within the regions highlighted in red were thinner than expected, indicating under-extrusion errors. Similarly, over-extrusion marks were found at different points on the samples as shown in (b). It should be noted that over-extrusion affects both the line thickness and the height of the material. Hence, it was observed that as the nozzle finished one layer and transitioned to the next, friction occurred with the upper surface of the preceding layer, leading to the deformations visible in (c). The fact that the radius of the deformed area was very close to the diameter of the nozzle's bottom surface serves as evidence that the

mentioned situation occurred. It was concluded that the mentioned problems were hardware-related since they occurred at specific points rather than overall. Therefore, the orifice, which is the most important region that determines the extrusion form, was subjected to microscopic examination. As a result of the examination, significant distortions in the circularity of the current nozzle were detected, and it was replaced with another nozzle (h) that had a sufficiently smooth circularity (d). After the replacement process, two more samples were produced under the same printing conditions and examined under a microscope. As a result of the upgrade, it was observed that the aforementioned problems were significantly eliminated (e, f, g). After resolving the problem in the orifice region, the second stage of the experiments was initiated. In this stage, 6 samples were produced and the dimensional consistency of the riblets on the samples were examined.



**Figure 5.a.** Under-extrusion regions, **b.** over-extrusion region, **c.** drag marks occurred during the nozzle travel, **d.** distorted roundness, **(e, f, g.)** images taken from the equivalent regions of the primary samples, **h.** orifice with a good roundness.

**Table 2.** The dimensional properties of the riblets on the surface of the sample printed in the 2nd stage

Sample No.	Riblet Angle (°)	Riblet Width, w (mm)	w-Error (%):	w-Std. Dev.	Riblet Spacing, s (mm)	s-Error (%)	s-Std. Dev.	Riblet Height, h (mm)	h-Std. Dev.
1	60	0.437	9.25	0.008	0.442	11.60	0.015	0.252	0.005
2	60	0.423	5.83	0.017	1.105	10.50	0.011	0.248	0.003
3	30	0.422	5.42	0.019	0.470	6.00	0.003	0.251	0.016
4	60	0.419	4.67	0.022	0.479	4.20	0.003	0.254	0.232
5	30	0.417	4.25	0.013	0.970	2.97	0.033	0.254	0.011
6	60	0.407	1.83	0.010	0.507	1.33	0.010	0.256	0.190

Each measurement was calculated as the average of 3 different measurements from random locations of the samples, and standard deviations and error

measurements were made based on these measurements. As each dimension presented a standard deviation below 2% for the width, 3.5% for the spacing,



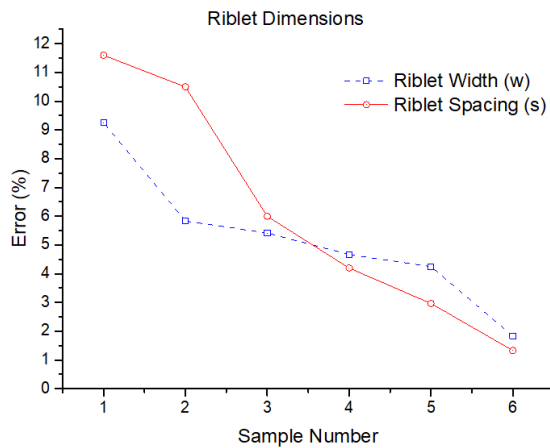
and 3% for the height, it was interpreted that the problem was not caused by the hardware itself, but rather by the flow rates specified in the slicer software. Therefore, in every session of sample manufacturing, flow rate parameter was re-adjusted based on the repetitive calibration process provided in the Equation 1 (Korkut and Yavuz 2020);

$$\text{Required flow rate value} = \left( \frac{\text{Line width value}}{\text{Measured line width}} \right) \times (\text{Flow rate in slicer}) \quad (1)$$

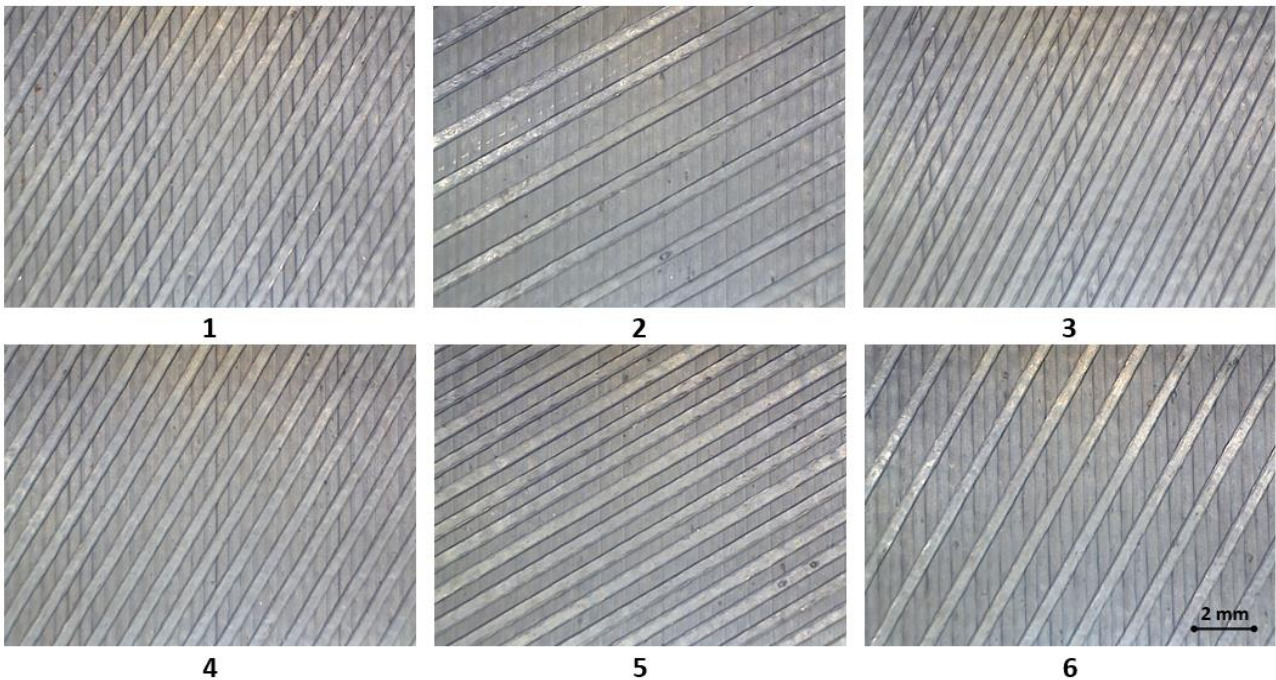
Implementing the flow rate calibration based on Equation 1 significantly enhanced the accuracy of the width of extruded lines per unit of time. The graph illustrating the reduced error values is provided in Table 2 and visualized in Figure 6. The definitions of the measured dimensions can be referenced in Figure 4.

As the chart suggests, calibrating an open-source, custom-built device can be game-changing in terms of improving dimensional accuracy in the prints. That is, a reduction from near 12% to 1% can be achieved only by adjusting a simple but effective flow-rate parameter as can be derived from the Figure 6. In relation to the riblet width (w), the average measured extruded line widths in the final specimen (#6) were 0.407 mm, with the lowest error value of 1.83%. Despite the gradual adjustment of the flow-rate parameter, the measured line widths were

slightly greater than the nozzle diameter (0.4 mm). This issue can be attributed to the tendency of the softened lines deposited on the build platform to swell due to the compressive forces exerted by the nozzle tip, as illustrated in Figure 2. Geng et al. (2019) discussed a correlation between deviation in line width and the principle of mass conservation, indicating that the mass of the entering filament into the extruder must equal the mass of the exiting (deposited) lines. Considering this principle and accounting for the compressive forces of the nozzle tip, it can be inferred that the lines are slightly compressed from the lateral regions, resulting in an expansion of the width size.



**Figure 6.** Gradual decrease in the amount of dimensional error measured in the riblet dimensions.



**Figure 7.** Microscopic images of the successfully printed riblets and channels

In the examinations of the riblet heights found in the second layer of the plate, average riblet height was measured to be 0.256 mm which is slightly higher than the value (0.2 mm) defined in the slicer software. This can be attributed to the fact that no other layer was deposited after the final layer containing riblets. In other words, since the nozzle does not pass over the same point again after completing a riblet, the semi-molten material tends to regain its cylindrical shape due to the dominance of surface tension over viscous stresses, thus forming a cylindrical groove. In actuality, each riblet line is deposited individually without direct contact with adjacent lines. Due to the absence of bonding between the riblets, the surface energy of the extrudate causes the line profile to reform into a more circular shape, resulting in a slight increase in the height of the lines. This phenomenon aligns with findings from the studies conducted by Bhalodi et al. (2019) and Frankel (1945).

As mentioned earlier, this phenomenon is usually negligible at macro levels. Nonetheless, it is crucial to closely consider this occurrence and adjust the top layer parameters accordingly. This involves implementing a series of calibration methods, such as flow rate calibration, to achieve the desired sizes in microscale fabrication operations.

Another noteworthy detail is the observation that alterations in orientation angle and riblet spacing do not notably compromise the dimensional precision in the riblet sizes as the final outcome. In Figure 7, the sections of the samples produced as a result of both hardware and software improvements are presented. In the images, it can be observed that significant errors related to extrusion have been eliminated. Furthermore, based on Table 2 and Figure 6, it has been concluded that dimensional errors can be gradually reduced to an ignorable level. At this point, critical findings regarding the micro-scale fabrication with FDM printers have been obtained.

This situation holds particular importance for studies within the aerospace field. One reason for this is the commercial nature of devices used for similar purposes, as highlighted in studies by Dai et al. (2019), Bhushan and Caspers (2017), Uriondo et al. (2015), where these devices are noted to be either unsuitable for necessary modifications or costly. In contrast, as indicated in sources such as Pearce (2012, 2014), and Tymrak et al. (2014), custom-built devices available at significantly lower costs can be easily modified in terms of both hardware and software. Furthermore, while open-source FDM devices enable the production of high-quality parts, the number of studies conducted for small geometries

applicable in aerospace research and flow control applications appears limited. This study may serve as a bridge between these two extremes.

#### **4. Conclusion and Future Studies**

In this study, the production of riblets, which is critically important in flow control and drag reduction efforts in the aerospace industry, has been investigated using FDM type additive manufacturing device. The findings provide compelling evidence that open-source devices are capable of performing this production. Notably, it was observed that in open-source and custom-built devices, careful consideration of the distance between the nozzle tip and built platform, as well as the circularity of the orifice, is crucial as these factors substantially impact print quality. In addition, flow-rate calibration has been identified as a critical printing parameter that depends on the precision of both the device and the printed part sizes. This can be associated with the decreasing error rate due to sequential adjustments made before each sample.

Besides, it has been revealed that if all mechanical components responsible for axial movements and the extrusion process, along with digital parameters, are properly calibrated, the riblet spacing and orientation angle do not significantly affect print quality. In cases where similar production processes for surface modifications are required, this finding is crucial in demonstrating that these two parameters can be freely experimented with various combinations in different studies.

To conclude, this study aimed to contribute critical findings to the literature on riblet production that can be realized through open-source 3D printers, rather than requiring expensive devices and processes. In the future studies, it is planned to produce riblets of different sizes and shapes, and to experimentally test the flow control and drag reduction capabilities of ribletted surfaces.

#### **Declaration of Ethical Standards**

The authors declare that they comply with all ethical standards.

#### **Credit Authorship Contribution Statement**

Author 1: Resources, Research, Experiments, Visualization, Writing

Author 2: Research, Experiments, Analysis, Writing

#### **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.

## Acknowledgement

This research article was supported by the laboratories of Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Faculty of Engineering, Mechanical Engineering Department and Faculty of Aeronautics and Astronautics, Department of Aerospace Engineering.

## References

- Bechert, D. W., Bruse, M., Hage, W., Van Der Hoeven, J. G. T. and Hoppe, G., 1997. Experiments on drag-reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry. *Journal of Fluid Mechanics*, **338**, 59–87.  
<https://www.doi.org/10.1017/S0022112096004673>
- Bechert, D., and Bartenwerfer, M., 1989. The Viscous Flow on Surfaces with Longitudinal Ribs. *Journal of Fluid Mechanics*, **206**, 105–129.  
<https://www.doi.org/10.1017/S0022112089002247>
- Bhalodi, D., Zalavadiya, K., and Gurralla, P. K., 2019. Influence of temperature on polymer parts manufactured by fused deposition modeling process. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, **41(3)**, 113.  
<https://doi.org/10.1007/s40430-019-1616-z>
- Bhushan, B., Caspers, M., 2017. An overview of additive manufacturing (3D printing) for microfabrication. *Microsystem Technologies*, **23**, 1117–1124.  
<https://doi.org/10.1007/s00542-017-3342-8>
- Bixler, G. D. and Bhushan, B., 2013. Fluid drag reduction with shark-skin riblet inspired microstructured surfaces. *Advanced Functional Materials*, **23(36)**, 4507–4528.  
<https://doi.org/10.1002/adfm.201203683>
- Brennan A. B., Baney R. H., Carman M. I., Estes T. G., Feinberg A. W., Wilson L. H., Schumacher J. F., 2010. Surface Topographies for Non-Toxic Bioadhesion Control. United States Patent no. 7, 650, 848.
- Chen, H., Rao, F., Shang, X., Zhang, D., and Hagiwara, I., 2013. Biomimetic drag reduction study on herringbone riblets of bird feather. *Journal of Bionic Engineering*, **10(3)**, 341–349.  
[https://doi.org/10.1016/S1672-6529\(13\)60229-2](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(13)60229-2)
- Dai, W., Alkahtani, M., Hemmer, P. R., and Liang, H., 2019. Drag-reduction of 3D printed shark-skin-like surfaces. *Friction*, **7(6)**, 603–612.  
<https://doi.org/10.1007/s40544-018-0246-2>
- Denkena B., Kohler J., Wang B., 2010. Manufacturing of functional riblet structures by profile grinding. *Cirp Journal of Manufacturing Science and Technology*, **3**, 14.  
<https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2010.08.001>
- Dey, A., and Yodo, N., 2019. A systematic survey of FDM process parameter optimization and their influence on part characteristics. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, MDPI Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **3(3)**, 64.  
<https://doi.org/10.3390/jmmp3030064>
- Frenkel J., 1945. Viscous flow of crystalline bodies under the action of surface tension. *Journal of Physics*, **9**, 385–395.
- Geng, P, Zhao, J., Wu, W., Ye, W., Wang, Y., Wang, S., Zhang, S., 2019. Effects of extrusion speed and printing speed on the 3D printing stability of extruded PEEK filament. *Journal of Manufacturing Process*, **37**, 266–273.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.11.023>
- Gibson, I., Rosen, D. and Stucker, B., 2010. Additive manufacturing technologies, 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, SE, Springer, New York, NY, 107-112.
- Gordeev, E. G., Galushko, A. S., and Ananikov, V. P., 2018. Improvement of quality of 3D printed objects by elimination of microscopic structural defects in fused deposition modeling. *PLoS ONE*, **13(6)**, e0198370.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198370>
- Guduru, K. K., and Srinivasu, G., 2020. Effect of post treatment on tensile properties of carbon reinforced PLA composite by 3D printing. *In Materials Today: Proceedings*, **33**, 5403–5407.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.128>
- Hirt G., Thome M., 2007. Large area rolling of functional metallic micro structures. *Production Engineering*, **1**, 351-356.  
<https://doi.org/10.1007/s11740-007-0067-z>
- Hossain, M. S., Espalin, D., Ramos, J., Perez, M. and Wicker, R. 2014. Improved Mechanical Properties of Fused Deposition Modeling-Manufactured Parts Through Build Parameter Modifications. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, **136(6)**, 061002.  
<https://doi.org/10.1115/1.4028538>
- Huang, S., Liu, P., Mokasdar, A., and Hou, L., 2013. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **67**, 1191–1203.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-012-4558-8>



- Jung, Y. C. and Bhushan, B., 2010. Biomimetic structures for fluid drag reduction in laminar and turbulent flows. *Journal of Physics Condensed Matter*, **22(3)**, 035104.  
<https://www.doi.org/10.1088/0953-8984/22/3/035104>
- Korkut V. and Yavuz H., 2020. Enhancing the tensile properties with minimal mass variation by revealing the effects of parameters in fused filament fabrication process, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, **42(10)**, 525.  
<https://doi.org/10.1007/s40430-020-02610-0>
- Marentic F. J., Morris T. L., 1992. Drag reduction article, United States Patent no. 5, 133, 516.
- Pearce, J. M., 2012. Building research equipment with free, open-source hardware, *Science*, **337**, 6100, 1303–1304.  
<https://doi.org/10.1126/science.1228183>
- Pearce, J. M., 2014. Open-Source Lab: How to Build Your Own Hardware and Reduce Research Costs, *Elsevier*, New York, USA, 1-5.
- Rayna, T., and Striukova, L., 2016. From rapid prototyping to home fabrication: how 3D printing is changing business model innovation. *Technological Forecasting and Social Change*, **102**, 214–224.  
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.07.023>
- Sin, L. T., 2012. *Polylactic Acid: PLA Biopolymer Technology and Applications*, William Andrew, Boston, MA, USA. 57-66.
- Tymrak, B., Kreiger, M. And Pearce, J., 2014. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. *Materials and Design* **58**, 242–246.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.038>
- Uriondo, A., Esperon-Miguez, M. and Perinpanayagam, S. 2015. The present and future of additive manufacturing in the aerospace sector: A review of important aspects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, **229(11)**, 2132–2147.  
<https://doi.org/10.1177/0954410014568797>
- Vyavahare, S., Teraiya, S., Panghal, D. and Kumar, S., 2020. Fused deposition modelling: a review, *Rapid Prototyping Journal*, Emerald Group Holdings Ltd., **26(1)**, 176-201.  
<https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2019-0106>
- Walsh M. J. and Lindemann A. M., 1984. Optimization and application of riblets for turbulent drag reduction. *22nd Aerospace Sciences Meeting*, Reno, NV, American Institute of Aeronautics and Astronautics Meeting Papers, New York.  
<https://doi.org/10.2514/6.1984-347>
- Walsh M. J., 1983. Riblets as a viscous drag reduction technique. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, **21(4)**, 485–486.
- Walsh, M.J. and Weinstein, L.M., 1978. Drag and Heat Transfer on Surfaces with Small Longitudinal Fins. *11th Fluid and Plasma Dynamics Conference*, American Institute of Aeronautics and Astronautics Meeting Papers, New York, 1161.  
<https://doi.org/10.2514/6.1978-1161>
- Zaman, U. K., Boesch, E., Siadat, A., Rivette, M. and Baqai, A. A. 2019. Impact of fused deposition modeling (FDM) process parameters on strength of built parts using Taguchi’s design of experiments. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **101(5–8)**, 1215–1226.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-018-3014-6>

#### Internet References

- 1- AI-powered developer platform.  
<https://github.com/>, (17.04.2023)
- 2- Simplify3D, Print Quality Troubleshooting Guide.  
<https://www.simplify3d.com/resources/print-quality-troubleshooting/>, (17.04.2023)
- 3- DeRuvo, J., 2019. Simplify3D Troubleshooting: Common Questions Answered.  
<https://all3dp.com/2/simplify3d-troubleshooting-the-most-common-questions-answered/>, (17.04.2023)

## Farklı Kimyasal Yöntemlerle Kaplanmış Çelik Plakaların Farklı Yapıştırma Kalınlıklarda Tek Bindirmeli Birleştirme Yöntemiyle Birleştirilen Numunelerin Yorulma Analizleri Sonuçlarının Wöhler Eğrilerinde Karşılaştırılması

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 27.04.2023

Kabul/Accepted: 07.01.2024

Yayımlandı/Published: 27.02.2024

### Comparison of Fatigue Analysis Results of Steel Plates Coated with Different Chemical Methods and Samples Joined by Single Lap Joining Method at Different Bonding Thicknesses in Wohler Curves

Celalettin Baykara<sup>\*</sup> 

Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

18. yy. ikinci yarısında başlayan endüstri devriminden günümüze kadar yaşanan teknolojik gelişmeler içinde malzeme teknolojisinin günden güne gelişmesiyle bu malzemelerin birleştirme yöntemleri de geliştirilmektedir. Bu yöntemlerden biri de son 40 yıldır gelişme gösteren yapıştırıcı kimyasalların başarıyla kullanıldığı yapıştırma metodudur. Özellikle günümüzde otomotiv firmalarının araçlarının ağırlıklarını hafifletirme eğilimi arttığı için farklı türdeki ve düşük yoğunluktaki malzemelerin birleştirilmesinde alternatif olarak yapıştırıcı elemanın kullanıldığı Kimyasal Birleştirme Metodu hemen hemen her sektörde başarıyla kullanılmaktadır. Bu çalışmada, otomotiv sektöründe sac kaplamada sıklıkla kullanılan DC01A soğuk haddelenmiş çelik malzemenin doğal yüzeyine ilaveten astar boya ve kataforez kaplama olarak farklı kimyasal kaplama metotları uygulanmış olup, poliüretan bazlı bir yapıştırıcı elemanı ile farklı kalınlıklarda çelik numuneler birleştirilmiştir. Bu çalışmanın amacı, yapıştırıcı ile birleştirilen iki çelik malzemenin yapıştırıcı elemanın hangi kalınlıkta ve hangi kaplama metodunun yüzeyinde güçlü ve esnek bir bağ oluşturduğunu araştırmaktır. Araştırma metodu olarak numunelere yorulma testleri uygulanmıştır. Yorulma testi sonucunda 3 mm yapıştırıcı kalınlığındaki kataforez kaplı numune 0,05 MPA gerilimde sonsuz ömre sahip olurken, diğer numuneler ömür testinde başarısız olmuştur. Yorulma testleri sonucunda elde edilen Gerilim (S) ve Çevirim (N) verileriyle Wöhler eğrileri oluşturularak sonuçlar değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, uygulanan testler sonuçlarında 3 mm.'ye kadar yapıştırma kalınlığında ve kataforez kaplı numuneler, astar boyalı numunelere göre daha iyi yapışma performansı sağlandığı tespit edilmiştir. Yüzeyinde kaplama olmayan numunelerin birleştirilmesinde yeterli dayanım elde edilememiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yapıştırma tekniği; Tek bindirmeli yapıştırıcı bağlantı; Yorulma analizi; Kataforez kaplama; Astar boya.

#### Abstract

In the second half of 18th century As material technology develops day by day within the technological developments that have occurred since the industrial revolution that started, the joining methods of these materials are also being developed. One of these methods is the bonding method in which adhesive chemicals, which have been developed over the last 4 decades, are successfully used. Especially today, as the tendency of automotive companies to reducing the weight of their vehicles increases, the Chemical Joining Method, in which the adhesive element is used as an alternative for the joining of different types and low density materials, is used successfully in almost every industrial sector. In this study, in addition to the natural surface DC01A cold-rolled steel material, which is frequently used in sheet metal coating in the automotive industry, different chemical coating methods such as primer paint and cathododesis coating were applied, and samples of different thicknesses had been joined with a polyurethane-based adhesive element. The aim of this study is to investigate the thickness and coating method of the adhesive element of two steel materials joined with adhesive to create a strong and flexible bond on the surface. As a research method, fatigue tests were applied to the samples. The results were evaluated by creating Wöhler curves with the Stress (S) and Cycle (N) data obtained as a result of the fatigue tests. As a result of the fatigue test, the cathododesis coated sample with 3 mm adhesive thickness had infinite life at 0.05 MPA tension, while the other samples failed in the life test. As a result, as a result of the applied tests, it was determined that cathododesis coated samples with a bonding thickness of up to 3 mm provided better adhesion performance than primer painted samples. Sufficient strength could not be achieved when joining pieces without coating on their surfaces without any coating on the surface were failed

**Keywords:** Adhesive bonding technique; Single lap joint; Fatigue analysis; Cathododesis coating; Primer painting

## 1. Giriş

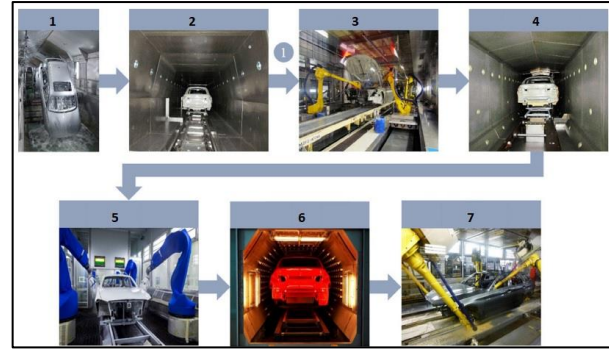
Günümüzde otomobil üreticileri ürünlerinin CO<sub>2</sub> salınımı, araç performanslarının müşteri istek ve ihtiyaçlarını kapsamaları için belli standartlar çerçevesinde uyulması gereken kanuni kısıtlardan dolayı daha hafif araç üretmek için düşük yoğunluğa sahip farklı tür malzemelerin birleştirilmesi zorunluluğunda kalmışlardır. Otomobil üreticileri, bu zorlukları aşmak ve rakiplerinden bir adım önde olmak istemeleri için küresel koşulları göz önünde bulunduran, rekabetçi, yenilikçi, müşterinin isteğini karşılayıp onu memnun edecek ürünler üretmek zorundadırlar (Baykara, 2023). Bu araştırmada, bir otomobil fabrikasındaki boya hattında çelik malzemeden üretilmiş bir otomobil karoserinin yüzeyine uygulanan kataforez kaplama ve astar boya üzerine yapıştırıcı metodu ile başka bir çelik malzemenin farklı kalınlıklarda yapıştırılarak hangi yüzeyde ve hangi kalınlıkta en mukavemetli yapıştırma mukavemeti elde edileceği araştırılmaktadır. Bu nedenle, kataforez kaplama, astar boyama ve yapıştırıcı metodu olmak üzere üç temel konu ele alınacaktır.

İlk konu olan kataforez kaplama, otomotiv üreticileri tarafından 1960'lardan beri karmaşık şekillere sahip metal yüzeylerin korozyona karşı koruyucu bir tabaka oluşturmasında yaygın olarak kullanılan bir kaplama teknolojisidir. Dünya çapında üretilen tüm araba karoserlerinin %98'inden fazla kataforez kaplama metodu kullanılmaktadır (Varisli ve Kaykaç 2016). Bu işlemler kısaca Çinko-Fosfatlama ve Elektro-kaplama olarak özetlenebilir (Tez, Kaykaç 2022).

Bir otomobil boya hattında Şekil 1'de gösterildiği gibi kataforez kaplama ve boyama işlemleri sırasıyla 1. Ön arıtma / Katodik daldırma kaplama, 2. Katodik daldırma kaplama-kurutucu, 3. Sızdırmazlık, 4. Sızdırmazlık kurutucusu, 5. Boyama işlemi, 6. Boya - kurutucu, 7. Boşluk koruması olmak üzere toplam yedi ana işlem adımından oluşmaktadır. (Grätzla et al., 2019). Ön arıtma işlemi, fosforik asitler nedeniyle çok şiddetli kimyasal etkiyi oluşturur. 190 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda, katodik daldırma boyama işlemi kurutucuda uygulanmaktadır. Böylelikle araç karoserisine kataforez kaplama yapılır, daha sonra metaller arasında kalabilecek boşluklara karşı, su, nem, kimyasal, gaz geçişini önlenmesi ve gözenekli yapısıyla titreşimleri emerek ses yalıtımını sağlaması için sızdırmazlık işlemi uygulanır (Tez, Paşa 2006). Bu işlemler sonrasında astar boya ve son kat boya uygulamasına geçilir.

İkinci önemli konu boya işlemidir. Boya işlemi de genel anlamda 1. Astar boya, 2. Ara kat boya, 3. Son kat boya

olmak üzere üç temel işlemden oluşur. Son kat boyadan sonra vernikleme işlemi yapılır. Boyanın uygulanacağı yüzeye ilk uygulanan pigmentli kaplama türüne astar boya adı verilir. Astar boyanın önemi; Yüzeye iyi yapışma sağlaması, olumsuz dış etkenlerin boya yapısının zamanla yüzeyden ayrılmasına direnç göstermesi, metal yüzeyleri pastan koruması, boya yapısının diğer katlarıyla uyumlu esneklikte olması, üzerine uygulanacak katların pürüzsüz görüntü vermesi olarak ifade edilebilir.



Şekil 1. Bir otomobil boyahanesinin işlem sırası.

Otomotiv sektöründe metal malzemeleri korozyon direncini arttırmak yönelik uygulanan kataforez işleminde yüksek performanslı epoksi, polyester ve üretan reçineler kullanılır. Kataforez kaplama 17-22  $\mu\text{m}$  kalınlıkları arasında uygulanır. Astar boya uygulamasında ise polyester, melamin, baryum sülfat ( $\text{BaSO}_4$ ) yer alır ve 30-50  $\mu\text{m}$  kalınlıkları arasında uygulanır (Alsoufi et al. 2017).

En son önemli konu olan birleştirme metodu olarak yapıştırıcı tekniğinin kullanılmasıdır. Yaklaşık son yüzyılda, parçaların birleştirilmesinde kullanılan civatasomun, vida, tek veya çift taraflı perçin gibi mekanik birleştirmelerde kullanılan bu tip elemanlar iş parçaları üzerinde delik açılması söz konusudur. İş parçasında açılan delikten dolayı uygulanan yük karşısında oluşturacağı gerilim homojen olarak dağılmayacak ve parçayı zayıflatacaktır (Sadowski and Golewski 2014, Golewski et al. 2021). Kaynak metoduyla yapılan birleştirmelerde ise yüksek ısıdan dolayı iş parçalarının kaynak bölgesinde yüksek ısıdan dolayı termal gerilimlerin olması ve parça geometrisinde çarpılmalar meydana gelecektir (Ertaş et al. 2008, Sadowski et al. 2014, Wiğckowski et al. 2019). Ayrıca kaynak metoduyla birleştirilecek parçaların aynı tür olması gerekmektedir. Bu kısıtlayıcı nedenlerden dolayı farklı bir birleştirme metodunun kullanılmasının gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Yapıştırıcı metodu, günümüzde hemen hemen her sektörde yıllardır başarıyla kullanılmaktadır.

Yapıştırıcı elementi, yapıştırılacak iki iş parçasının yapıştırılacak yüzeyleri üzerine sıvı veya yarı sıvı formda bir yapıştırıcı yerleştirerek birbirini birleştirebilen, ayrılmaya karşı direnç gösterebilen ve güçlü bir bağlantı elde edilebilmesini sağlayan bir kimyasal eleman olarak tanımlanmıştır. Yapıştırıcı ile birleştirilen parçalarda homojen bir gerilim dağılımı sağlamakla birlikte farklı malzeme türlerinin birbirleriyle birleştirilmesinde kullanılan kimyasal bir ara yüz elemanıdır. Yapıştırıcı metodunu geleneksel birleştirme teknolojisi ile karşılaştırıldığında, özellikle çok ince ve hassas parçaların birleşim yerlerindeki bozulmaların önlenmesi, heterojen bağlantıların üretilebilmesi, birleştirilecek parçaların üzerine delme işleminin olmaması, cıvata ve vida gibi ilave mekanik birleştirici elemanlarının gerektirmemesi, parça üzerinde kaynak izleri oluşturmaması, ısıdan dolayı çarpılma meydana gelmemesi ve yapının toplam ağırlığın azaltılması gibi birçok avantaj sağlar. Yapıştırıcı metodunda birincil görevi aynı veya farklı tür malzemelerin birleştirilmesini sağladığı gibi, ikincil görev olarak, titreşimleri sönmüleyerek birleştirmenin yorulma ömrünü artırır; Ayrıca, korozyonu ve sızdırmazlığı önleyen bir dolgu elemanı olarak da kullanılabilir (Braga, 2015). Bu avantajların yanında, yapıştırma metodunda düşük ve yüksek sıcaklıklara karşı direnç göstermemesi, raf ömrünün sınırlı olması, soyulma, kesme ve yarıma gibi kuvvetlere karşı mukavemet sağlaması için ilave olarak yüzey hazırlama işlemlerini gerektirmesi dezavantaj olarak değerlendirilir (Maggiore, 2020). Yapıştırma işleminden önce yapıştırılacak yüzey ön hazırlık işlemlerinin yapılması her ne kadar zaman ve işçilik olarak maliyet oluşturmaya karşın, yüksek mukavemet ve uzun süreli dayanıklılık sağlayan en önemli faktörler arasındadır (Clearfield et al. 1990; Davis 2003).

Günümüzde, yapıştırıcı bağlantılarının sağladığı birçok avantajlar nedeniyle endüstrinin her alanında uygulanmaktadır. Bu endüstriler arasında, makale konusunu da oluşturan otomotiv endüstrisinde birleştirme ve sızdırmazlık elemanı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Watson et al. 2019, Tan et al. 2021, Burchardt et al. 2018). Geleneksel araç gövde yapılarının birleştirilmesinde esas olarak metaller için geliştirilmiş bir bağlantı tasarımı olan cıvata ve perçin kullanılarak birleştirilmektedir. Bu durumda aracın yapısal ağırlığı arttırmaktadır. Gelişen malzeme teknolojisi nedeniyle ürünlerde kullanılan çelik, alüminyum ve kompozit gibi farklı tür malzemeler kullanılmaya başlanması nedeniyle bu malzemelerin birbirleriyle birleştirilmesinde yapıştırıcı metodu öne çıkmaktadır. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılar, düşük

ağırlık, düşük maliyet ve gelişmiş hasar toleransı nedeniyle mekanik bağlantılara alternatif olarak kullanılması giderek artmaktadır (Jakubinek et al. 2015, Kupski and de Freitas 2021). Elektrikli ileten yapıştırıcılar sayesinde elektrik ve elektronik endüstrisinde başarıyla kullanılmaktadır. Elektrikli ve elektronik ekipman pazarında yapıştırıcılar, mekanik bağlantı elemanları, sert lehimleme, kaynaklama, lehimleme gibi termal birleştirme yöntemleriyle rekabet etmektedir (Ebnesajjad 2011, Yang et al.2013, Wu et al. 2014, Kwon et al. 2018). Yapıştırıcı metodu denizcilik uygulamaları ve gemi inşaatında (Baur, 2004, Davies, 2018), Ayakkabı sektöründe (Paiva et al. 2015) başarıyla kullanılmaktadır. İnşaat yapı sektöründe sıklıkla kullanılan metal ve inorganik levha gibi farklı türde malzemelerin sökülme sürecinde birbirinden ayrılması çok zordur ve daha sonra bu tür malzemeler geri dönüştürülemez veya tekrar kullanılamaz duruma gelmektedir. Son zamanlarda “sökülebilir yapıştırıcı” olarak adlandırılan yeni nesil yapıştırıcıların kullanılmasıyla birleştirilen bu tür malzemelere hasar vermeden sökülmesi sağlanmıştır (Ishikawa et al 2005). Diş hekimliğinde (Frassetto et al. 2016, Hartz et al. 2021). Cerrahide ve tıpta (Duarte et al. 2012, Traian and Chirila, 2022). Özellikle gıda sektöründe bakteriye karşı itinayla uygulanan paketleme ve etiketleme sektöründe (Wang et al. 2019, Al-Moghazy et al. 2020) yapıştırma metodunun başarıyla uygulandığı görülmektedir.

Yapıştırıcı bağ kuvveti, yapıştırılacak malzemenin ve yapışkan elementin mekanik ve kimyasal özelliklerine bağlıdır. Bu nedenle, endüstriyel uygulamalarda maksimum mukavemet elde etmek için yapıştırma bölgesinin dayanımını artırılmasına yönelik önemli parametreler vardır. (Banea et al. 2016). Bu parametrelerin en başında yapıştırılacak iş parçasının yüzeyinde pürüzlülük oluşturmaktır. Yüzey pürüzlülüğü, zımpara, taşlama veya kumlama işlemleriyle oluşturulup yapıştırıcı ile iş parçası arasında mekanik kilitleme meydana getirir (Budhe et al. 2015). Ayrıca oluşturulan yüzey pürüzlülüğü sonucunda iş parçası yüzeyi üç boyutlu olarak derinlik meydana getirir ve yapıştırma alanını artırır. Korana plazma metoduyla plastik ve kauçuk gibi malzemelerin yüzeyinde oluşturulacak termal katman oluşturulması (Goudardzi and Khedma 2015), tek bindirmeli, çift bindirmeli gibi çeşitli geometrik yapılarda birleştirme metodunun kullanılması yapıştırıcı bağlantılarda mukavemet sağlamaktadır. Birçok araştırmacı deneysel çalışmalarında daha çabuk sonuç elde etmek için tek bindirmeli birleştirmeler üzerinde çalışmayı tercih etmektedirler (Zhao et al. 2009). Güçlü ve dayanıklı bir yapışma bağı sağlanması için

yapıştırılacak iş parçasının ve yapıştırıcının kalınlığı (Zhao et al. 2011; Bamberg et al. 2018, Sahin and Akpınar 2021), yapıştırıcı hat uzunluğu (Lees 1987, Ferreira et al. 2002, Reis et al. 2005), yapıştırıcı elemanın soyulma gerilimini elimine edecek uç formunun belli bir açıyla şekillendirilmesi (Wang et al. 2000; Reza et al., 2014), yapıştırıcının türü (Nunes et al., 2015) ve yapıştırılacak malzemelerin yüzey temizliği önemli diğer parametrelerdir. Bu nedenle, yapıştırma işlemi öncesinde asidik ve alkalın banyo işlemleriyle yapıştırılacak yüzey üzerindeki yağ, kir gibi istenmeyen maddeler arındırılması gereklidir (Adams et al. 1997, Rudawska 2019). Bu nedenle, yapıştırılacak iş parçalarının özelliklerine göre uygun yüzey ön işlemlerinin seçimi önemli bir rol oynar (Maressa et al. 2015, Rotella et al. 2016, Williams et al. 2014).

Belirtilen literatür ışığında, bu makalede bir otomobil fabrikasının boya hattında araç karoserlerine uygulanan kataforez ve astar boya uygulanmış farklı yüzey kaplamalarına sahip olan metal numuneler, farklı yapıştırıcı kalınlıklarıyla birbirlerine birleştirilerek yorulma analizine tabi tutulmuştur. Amaç, en iyi yapışma mukavemeti sağlayan yüzey kaplaması ve yapıştırma kalınlığının tespit edilmesidir. Araştırma metodu olarak yorulma testi seçilmiştir. Test sonucunda, Gerilim-Çevirim değerleriyle oluşturulan Wöhler eğrilerini yorumlanarak en iyi yapışma yüzey kaplaması ve yapıştırıcı kalınlığı araştırılmıştır. Araştırma sonucunda, kataforez kaplama metodu, yapıştırılacak yüzeylerde alternatif bir yüzey hazırlığı olabileceği tespit edilmiştir. ANSYS programı ile yapılan numerik çalışma sonucu da bu çalışmada elde edilen deneysel çalışma sonuçlarını desteklemektedir (Baykara et al. 2023). Çelik malzemeler için yapıştırma tekniğinde kataforez kaplı yüzeylerin yapıştırma metodunda yüksek performans sağladığı için bu araştırma ile gelecekteki bilimsel çalışmalara ışık tutacağı beklenmektedir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Deneyde kullanılan malzemeler

Bu çalışmada, temel malzeme olarak otomotiv sektöründe araç gövdesinin dış saclamasında pres yardımıyla kolaylıkla şekillendirilebilen DC01A (ISO 1,0330) alaşımsız çelik plakalar kullanılmıştır. Bu çelik türüne ait kimyasal kompozisyonu Çizelge 1’de, mekanik özellikleri Çizelge 2’de gösterilmiştir (Int Kyn. 1).

Yapıştırıcı elemanı, otomotiv montajında yaygın olarak kullanılan ve Çizelge 3’de teknik özellikleri gösterilen

poliüretan bazlı tek bileşenli Sika 252 kullanılmıştır (Int Kyn. 2). Poliüretan bazlı yapıştırıcılar, suyun izosiyonat gruplarını içeren bir katkı maddesinin reaksiyonu neticesinde oluşurlar. Silikonlarda olduğu gibi, havadaki nemde bulunan su molekülünün yapıştırıcı elemanı içine nüfuz ederek yapıştırıcı bağlarının oluşturulmasını sağlar. Bunun sonucunda silikonlar ile aynı kürlenme meydana gelmesine karşın ürün açığa çıkmaz. Yapıştırıcının kürlenme hızı ortamın bağıl nemine bağlıdır.

**Çizelge 1.** DC01A soğuk çekilmiş çeliğinin kimyasal kompozisyon bilgileri

Cmax	Pmax	Smax	Mnmax	Simax	Timax
% 0,12	% 0,045	% 0,045	% 0,6	-	% 0,30

**Çizelge 2.** DC01A soğuk çekilmiş çeliğinin mekanik özellikleri

DC01A	
Akma Mukavemeti; Re (N/mm <sup>2</sup> )	280
Çekme Mukavemeti; Rm (N/mm <sup>2</sup> )	270-410
Uzama; Lo=80 mm (%)	28

**Çizelge 3.** Sikaflex – 252 yapıştırıcı özellikleri

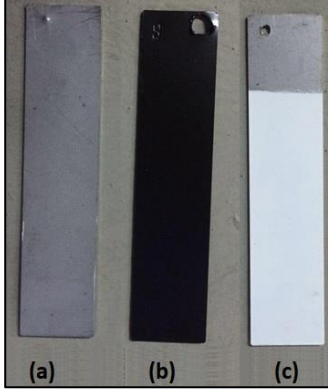
SIKA 252	
Kimyasal Yapısı	1-bileşenli poliüretan
Kürlenme Mekanizması	Nem ile kürlenir
Uygulama Sıcaklığı	10-35 ° C
Kabuk Bağlama Süresi	40 dakika
Açık Kalma Zamanı	35 dakika
Shore A Sertliği	50
Çekme Mukavemeti	3 MPa
Kopma Anında Uzama	% 400
Yırtılma Direnci	7 N/mm
Çekme-Kesme Mukavemeti	2,5 MPa

Sikaflex 252, poliüretan bazlı, havadaki nem ile kürlenme ve dinamik yükleri sönmüleme yeteneğine sahip bir yapıştırma elemanıdır. Bu tür yapıştırıcılar metal, plastik, cam gibi birçok farklı yüzeye çok kuvvetli bir şekilde yapışarak uzun ömürlü ve dayanıklı bir birleştirme sağlayabilirler. Poliakrilik hızlı yapıştırıcıların aksine titreşimlere ve yorulma yüklerine karşı rijit ve kırılğan olmayacak kadar elastik, diğer solvent bazlı yapıştırıcıların aksine en düşük değerdeki yüklere karşı bile akma eğilimi göstermeyecek kadar sert ve sağlam özelliklere sahiptir.

### 2.2. Deney numunelerinin hazırlanması

EN 10130: 2006 Avrupa standardına uygun DC01A çelik numuneler, kalınlığı 0,8 mm, eni 25 mm ve uzunluğu 110 mm boyutlarında kesildi, birbirlerine yapıştırılmadan önce 60 adet numune Şekil 2.a’da görüldüğü gibi hiçbir kimyasal kaplama veya boya uygulanmadan bırakıldı, diğer 60 adet numune ise Şekil 3.b’de görüldüğü gibi

otomotiv karoserisine boya hattında uygulanan işlemlerden biri olan  $20\ \mu\text{m}$  kalınlığında katoferez kaplama uygulandı, en son 60 adet numune ise Şekil 3.c'de görüldüğü gibi  $30\ \mu\text{m}$  kalınlığında astar boya uygulandı.



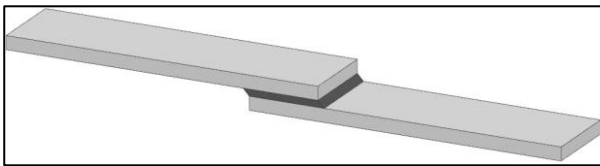
**Şekil 2.** Deney numunelerinin kimyasal yüzey kaplama işlemleri (a): Yüzeyde hiçbir kaplama yok, (b): Yüzey kataforez kaplama, (c) Yüzey astar boya kaplama

60 adet olarak hazırlanan test numuneleri Çizelge 4'de gösterildiği gibi her kalınlıkta ve her yüzey özelliklerine göre beş çift olmak üzere gruplandırılmıştır.

**Çizelge 4.** Deney numunelerinin farklı yapıştırıcı kalınlıklarında birleştirilerek gruplandırılması

Yapıştırıcı Kalınlıkları (mm)	Yüzey İşlemsiz Numuneler (çift)	Yüzey İşlemsiz Numuneler (çift)	Yüzey İşlemsiz Numuneler (çift)
1	5	5	5
2	5	5	5
3	5	5	5
4	5	5	5
5	5	5	5
6	5	5	5

Her gruptaki test numuneleri, TS EN ISO 9664, 1995 standardına uygun olarak Şekil 3'de gösterildiği gibi farklı kalınlıklarda birbirlerine yapıştırma metodu kullanılarak birleştirildi. Test numunelerini birleştirme tipi olarak daha çabuk deforme olması için tek bindirme birleştirme tekniği tercih edilmiştir.

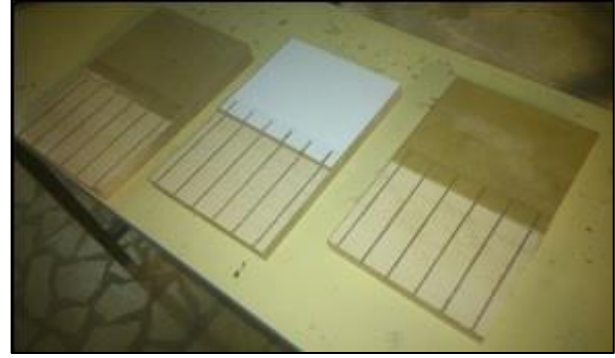


**Şekil 3.** Yüzeyine kimyasal işlem (Kataforez veya Astar boya) uygulanmış test numunelerinin yapıştırıcı yöntemiyle birleştirilmesi

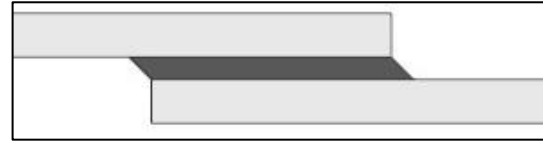
Deney sırasında, Şekil 4'de görüldüğü gibi farklı yapıştırıcı kalınlıklarını sağlamak amacıyla kalıpların üst tablalarının

yüksekliği 1, 2, 3, 4, 5, 6 mm kalınlıklarında ayarlanabilir duralit malzemeden tasarlanan özel bir kalıp üzerinde yapıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Numunelerin soyulma etkisini azaltmak için Şekil 5'de görüldüğü gibi yapıştırma bölgesinin uç kısımları  $45^\circ$  eğimli hale getirildi. Bu sayede keskin kenarlı bir yapının çevrim sırasında yük uygulandığında, hızlı kopmalar önlenir ve çevrim ömrü uzatılır.



**Şekil 4.** Yapıştırıcı işleminde kullanılan kalıp



**Şekil 5.** Yapıştırıcı elementin soyulma gerilimine karşı uç formunun şekillendirilmesi

Yapıştırıcı, karakteristik olarak her ne kadar ortam neminde kürlense de 5 ve 6 mm. gibi yapıştırıcı kalınlıklarında, yapıştırıcı elementinin her bölgesinde homojen bir kürlenme sağlaması gerekir. Poliüretan yapılı yapıştırıcılar sıcaklık artışı ile daha hızlı kürlendiğinden çok kalın yapıştırma kalınlıklarına sahip numunelerin daha hızlı ve homojen kürlenmesi için ilave olarak 1.5 saat sürede ve  $50^\circ\text{C}$  sıcaklıkta gösterilen Proteherm 130/45 fırınında kürlenme işlemi uygulanmıştır. Kürlenme sırasında ortam nemi sağlamak için bir miktar su bulunan bir kap dahil edilmiştir (Int. Kyn. 3).

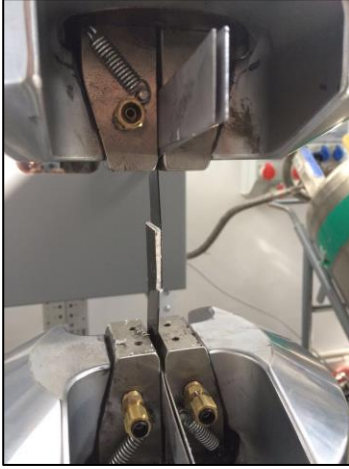
### 2.3. Yorulma Deney Aşamaları ve Yöntemleri

Yapıştırma metoduyla birleştirilen numuneler TS EN ISO 9664, 1995 yorulma testi standartlarında belirtilen yorulma test prosedürleri kullanılmıştır. Testler sonucunda S-N (Wöhler) eğrilerinde elde edilen sonuçlar hazırlanan grup bazında belirlenen parametrelere göre karşılaştırılmıştır. Yorulma testinde, MTS Landmark 100 kN kapasiteli servo hidrolik test cihazı kullanılmıştır. Testler esnasında standartlara uygun olarak  $23^\circ\text{C}$  ortam sıcaklığı ve % 50 ortam nemi cihaz tarafından sağlandı.



### 2.3.1. Numunelerin Yorulma Cihazına Bağlanması

Numuneler cihazın çenelerine z eksen yönünde dikey olarak bağlanmıştır. Şekil 6'da görüldüğü gibi numunenin yapısından kaynaklanan eksen kayıklığı ve bunun sonucunda oluşan burkulma momentinin engellenmesi için çene ile numune arasına yapıştırıcı kalınlığı kadar giyotinle kesilmiş lama olarak adlandırılan metal parça konulmuştur. Bu işlemin amacı merkez noktayı ortak eksen üzerine çekmektir. Her yeni numunenin cihaza bağlanmasından önce cihaza bir önceki testten kaynaklanan kaymaların giderilmesi için kalibrasyon yapılmıştır.



Şekil 6. Numunelerin yorulma cihazına bağlanması

### 2.3.2. Yorulma analizi test deney parametreleri

#### 2.3.2.1. Uygulama gerilimi

Deneyde uygulanacak gerilim değeri, yorulma testinde en temel ve belirleyici parametresidir. Deney esnasında test numunelerinin yapısal formu değişip hasara uğrayacağından ve kısa zamanda deforme olmaması için deney cihazının çevrim esnasında çekme işlemini tamamladıktan sonra numuneyi serbest bırakıp tekrar çekecek şekilde yükleme oranı tek yönlü ( $R = 0,1$ ) değişken bir dinamik yük uygulandı. Yüklerin eşik değeri olarak her test grubundan birer adet numune çekme testine tabi tutuldu ve gözlemlenen çekme dayanımının %50'si yükün eşik değeri olarak kabul edildi. Bu eşik değerden başlanarak diğer numunelerde 0,05 – 0,1 – 0,15 – 0,20, 0,30, 0,35 ve 0,45 MPa eşik değerindeki gerilim uygulanarak çevrim ömürlerindeki değişimler gözlemlendi.

#### 2.3.2.2. Frekans

Standartlarda verilen verilere cihaz sıcaklık dengesini sağlasa da, 60 Hz. ve üzeri frekanslarda yapıştırıcının iç yapısında oluşan ısı etkisi nedeniyle birleştirmenin

kimyasal yapısında değişikliklerin olabileceği ve yorulma ömrünün azalabileceği görüldü. Testler için optimum frekans değeri 5Hz. Olmasına rağmen numunelerin boyutu ve birleştirme şekli ve yapıştırıcının elastikliğinden dolayı yer değiştirmenin yüksek boyutlarda olabileceği düşünüldü ve bunun üzerine yük frekansı 1Hz. olarak belirlendi. Belirlenen bu frekans değerlerinde test numunelerinde herhangi bir sıcaklık değişimi saptanmadı.

#### 2.3.2.3. Çevresel ortam koşulları

Yorulma kavramı, sadece mekanik durumlardan değil, ortamdaki diğer değişkenlerden de etkilenir. Ortam sıcaklığı, bu değişkenlerin en etkili olanıdır. Sıcaklık ile birlikte yapıştırıcının bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri değişir. Buna bağlı olarak birleştirmenin stabilizesini sağlayan temel etmen olan adezyon ve kohezyon bağ kuvvetleri de bu durumdan etkilenebilir. Bu etkinin pozitif veya negatif yönde olması yapıştırıcının özelliğine bağlıdır. Sıcaklığın sebep olduğu başka bir etki de nemli ortamda çalışan bir sistemin sıcaklık artışı ile korozyona uğrama riskinin olmasıdır. Bu etkiler, aynı zamanda sadece yapıştırıcının değil, yapıştırılan malzemenin de bu koşullardan etkilenmesi mümkündür. Bu tür etkilerin hepsi yorulma gerilmelerinin değişimini ve ömrünü etkiler. Bu çalışmada yapılan testlerde TS EN ISO 9664, 1995 yorulma testi standartlarına göre ortam sıcaklığının  $23 \pm 5$  °C olması sağlandı.

### 2.4. Yorulma test metodu

Yorulma testlerinin yorumlanmasında en kullanışlı yöntem olarak S-N (Wöhler) eğrileri kullanıldı. Düşey ekseninde numuneye uygulanan yük miktarı ve yatay ekseninde ise malzemenin kopmasına kadar geçen süredeki dayandığı çevrim sayısı kullanıldı. Bu iki parametrenin kesişim noktaları birleştirilerek grafiklerde sonsuz ömür değerleri belirlendi. Deney numunesi değişmez bir ortalama gerilme  $\sigma_M$  ile yüklendikten sonra, değişken yüklenme ile belirli bir genlik gerilmesiyle yüklendi. Bu arada deney numunesini kopartan çevrim sayısı olan N değeri, bir sayıcı ile saptandı. Deneyden deneye genlik gerilme değeri küçültülerek, test numunesini kopartan yükleme sayısı büyütüldü. Böylece elde edilen malzemenin mukavemet değeri olarak tanımlanan devamlı mukavemet değeri olan  $\sigma_D$  belirlendi. Burada elde edilen değerlerden gerilmeler sınırı Y eksenine, yüklemeler sayısı X eksenine konulursa S-N ya da diğer adıyla Wöhler eğri diyagramı elde edildi. Bu eğrilere göre numunelerin ortalama

gerilmelere karşı dayandığı yorulma çevrim ömürlerini ve sonsuz ömre karşı gelen gerilmenin tespit edilmesi sağlandı.

### 3. Bulgular

DC01A çelik malzeme kullanarak yapıştırma metodu ile birleştirilen numuneler üzerinde yapılan yorulma testleri sonucunda ele edilen bulgular aşağıdaki gibi açıklanmıştır.

#### 3.1. Yapıştırma metoduyla birleştirilen numunelerin yorulma analizi

Yapıştırma metodunda daha önce bahsedildiği gibi üç farklı grupta yorulma analizi yapılmıştır. Bu gruplar aşağıda ifade edilmiştir.

- Metil numune yüzeyine hiçbir kaplama veya boya işlemi uygulanmayan ve 1-6 mm arasında yapıştırma kalınlıklarıyla birleştirilen grup
- Metil numune yüzeyine 20  $\mu\text{m}$  kalınlığında katarforez kaplama uygulanmış ve 1-6 mm arasında yapıştırma kalınlıklarıyla birleştirilen grup
- Metil numune yüzeyine 30  $\mu\text{m}$  kalınlığında astar boya kaplama uygulanmış ve 1-6 mm arasında yapıştırma kalınlıklarıyla birleştirilen grup.

Yukarda belirtilen üç grubu kapsayan yorulma analizi iki parametre üzerinde incelenmiştir.

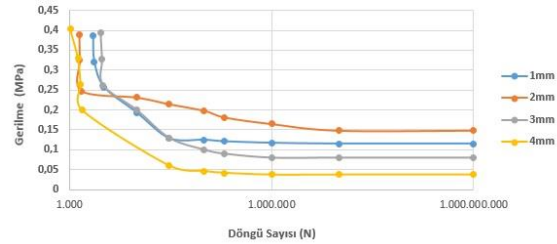
- Yüzey kaplamasına bağlı yorulma analizi sonuçları
- Yapıştırma kalınlıklarına bağlı yorulma analizi sonuçları

#### 3.1.1. Yüzey kaplamasına bağlı yorulma analizi sonuçları

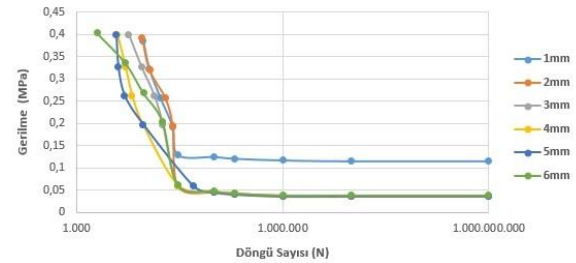
Birinci grup olan, numune yüzeylerine katarforez kaplama veya astar boya gibi hiçbir kimyasal kaplama olmayan ve 1-6 mm arası yapıştırma kalınlığıyla birleştirilen numunelerin yorulma analiz verileri Şekil 7’de gösterilmektedir.

Şekil 9’da görüldüğü gibi, yüzeyi herhangi bir kimyasal yöntemle kaplanmamış ve boyanmamış plakalarda 1 mm-4 mm kalınlığındaki yapıştırıcıya kadar olan S-N eğrisini içermektedir. 5 ve 6 mm kalınlıklardaki numuneler ilk döngülerde kopmuştur. Bu durum yapıştırıcı kalınlığının artırılmasında yapıştırıcı elementinin daha mukavemetli olmadığı sonucu çıkmıştır. Deneysel verilere göre 3 mm kalınlığındaki yapıştırıcının maksimum gerilme koşullarında daha uzun bir yaşam döngüsüne sahip olduğu görülmektedir.

İkinci grup olan, numune yüzeyine 20  $\mu\text{m}$  kalınlığında katarforez kaplama uygulanmış ve 1-6 mm arası yapıştırma kalınlığıyla birleştirilen numunelerin yorulma analiz verileri Şekil 8’de gösterilmektedir.



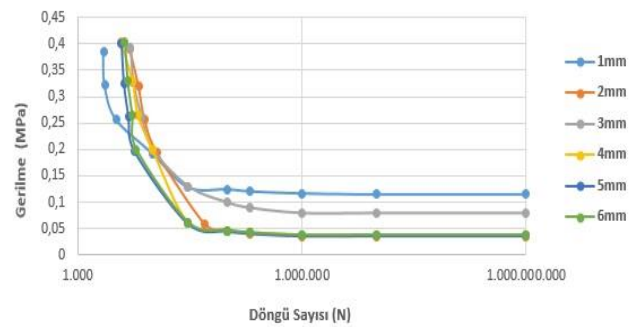
Şekil 7. Yüzeyinde herhangi bir kimyasal kaplama veya boya işlemi uygulanmayan numunelerin S-N eğrisi



Şekil 8. Yüzeyi katarforez kaplama işlemi uygulanmış numunelerin S-N eğrisi

Şekil 10’da görüldüğü üzere, en kalın yapıştırıcı kalınlığı olan 6mm yapıştırıcı kalınlığındaki numunelerde, deneye göre maksimum gerilme koşulunda en düşük yorulma ömrüne sahiptir. Daha sonraki yorulma ömrü düşük yapıştırma kalınlıkları 5mm, 4mm, olarak takip etmektedir.

Üçüncü grup olan numune yüzeyine 30  $\mu\text{m}$  kalınlığında astar boya uygulanmış ve 1-6 mm arası yapıştırma kalınlığıyla birleştirilen numunelerin yorulma analiz verileri Şekil 9’da gösterilmektedir.

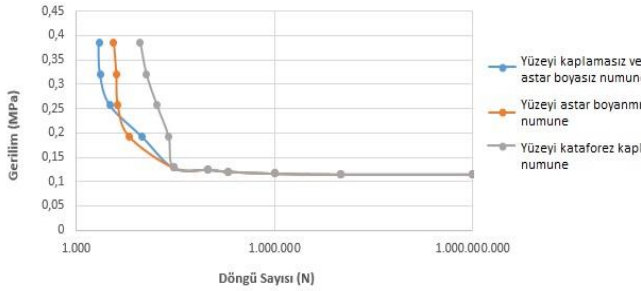


Şekil 9. Yüzeyi astarla boya işlemi uygulanmış numunelerin S-N eğrisi

3 mm kalınlığındaki yapıştırıcı ve astarlanmış yüzeye yapıştırılan 2 mm kalınlığındaki yapıştırıcılar, deney sonuçlarına göre maksimum gerilme noktasında diğerlerine göre en yüksek yorulma ömrü değerine sahiptir. İkinci en yüksek gerilim koşulunda, 2 mm kalınlığındaki yapıştırıcı daha uzun bir yorulma ömrü sergiler. 1 mm kalınlığındaki yapıştırıcı, deneye göre maksimum stres koşulunda en düşük yorulma ömrü göstermektedir.

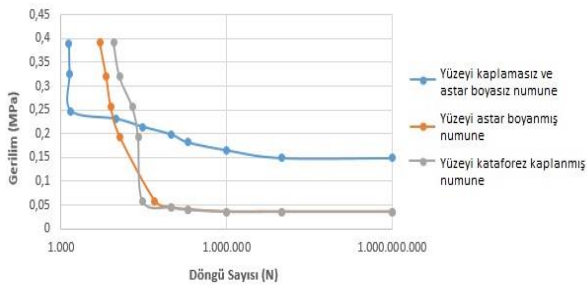
### 3.1.2. Yapıştırma kalınlıklarına göre yorulma analizi sonuçları

Bu bölümde alternatif olarak, her üç grupta 1-6 mm yapıştırma kalınlıklarındaki numunelerin yapıştırma kalınları baz alarak irdelenmiştir. Şekil 10'da görüldüğü gibi 1 mm kalınlığındaki yapıştırıcı numunelerde, yüzeyi kateforez uygulanmış numunelerin en iyi yorulma ömrüne sahip olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 10. Her üç gruptaki numuneler için ortak olarak 1 mm yapıştırıcı kalınlığındaki birleştirmelerin S-N eğrisi

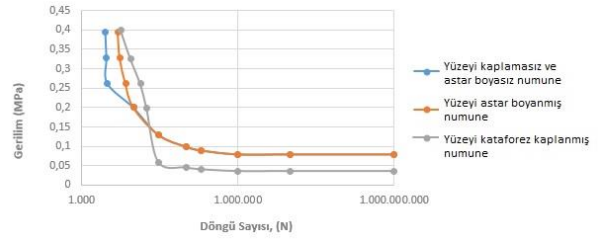
Şekil 11'de görüldüğü gibi 2 mm kalınlığındaki yapışkan kalınlığındaki numunelerde de kateforez kaplı numuneler, daha sonra da astar boya uygulanmış numunelerde en yüksek yorulma ömrüne sahip olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 11. Her üç gruptaki numuneler için ortak olarak 2 mm yapıştırıcı kalınlığındaki birleştirmelerin S-N eğrisi

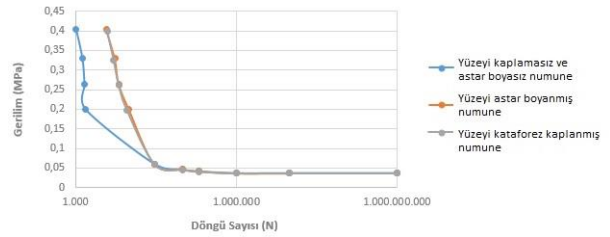
Şekil 12'de görüldüğü gibi 3 mm kalınlığındaki yapışkan kalınlığındaki numunelerde de kateforez kaplı numuneler en yüksek yorulma ömrüne sahip olduğu

gözlemlenmiştir, daha sonra da astar boya uygulanmış numunelerde gözlemlenmiştir.



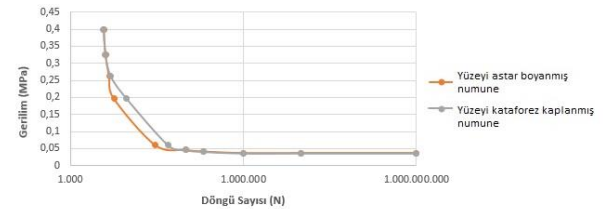
Şekil 12. Her üç gruptaki numuneler için ortak olarak 3 mm yapıştırıcı kalınlığındaki birleştirmelerin S-N eğrisi

Şekil 13'de görüldüğü gibi 4 mm kalınlığındaki yapışkan kalınlığındaki numunelerde de kateforez kaplama ve yüzeyi astar boyanmış numunelerde en yüksek yorulma ömrüne sahip olduğu gözlemlenmiştir. Her ikisinde de yorulma ömürleri birbirlerine yakın çıkmıştır.



Şekil 13. Her üç gruptaki numuneler için ortak olarak 4 mm yapıştırıcı kalınlığındaki birleştirmelerin S-N eğrisi

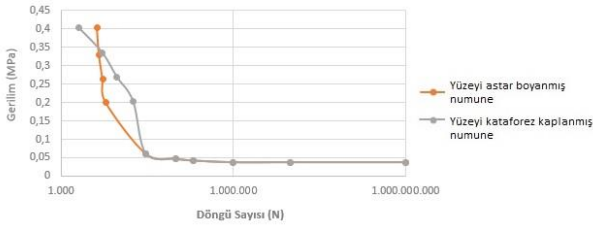
Şekil 14'de görüldüğü gibi 5 mm kalınlığındaki yapışkan kalınlığındaki numunelerde de kateforez kaplama ve yüzeyi astar boyanmış numunelerde en yüksek yorulma ömrüne sahip olduğu gözlemlenmiştir. Her ikisinde de yorulma ömürleri birbirlerine yakın çıkmıştır.



Şekil 14. Her üç gruptaki numuneler için ortak olarak 5 mm yapıştırıcı kalınlığındaki birleştirmelerin S-N eğrisi

Şekil 15'de görüldüğü gibi 6 mm kalınlığındaki yapışkan kalınlığındaki numunelerde de kateforez kaplama ve yüzeyi astar boyanmış numunelerde en yüksek yorulma ömrüne sahip olduğu gözlemlenmiştir. Kateforez kaplamalı numuneler az da olsa yüzeyi boyanmış numunelerden daha iyi olduğu tespit edilmiştir.

Yüzeyinde hiçbir işlem yapılmamış numuneler en başarısız birleştirmeler olduğu belirlenmiştir.



Şekil 15. Her üç gruptaki numuneler için ortak olarak 6 mm yapıştırıcı kalınlığındaki birleştirmelerin S-N eğrisi

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, geleneksel olarak kullanılan birleştirme metodlarından olan civata, somun, vida gibi mekanik birleştirme (Banea, 2009; Wang, 2023) ve kaynak gibi termal termal olmayan kaynak yöntemleri de var birleştirme (Nonnenmann, 2022) yöntemlerine alternatif olarak çeşitli endüstri alanlarda yaygın bir şekilde kullanılan yapıştırıcı metodu çalışılmıştır. Çelik malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan yapıştırıcı metodu yapıştırıcı metodu yerine 'kimyasal yapıştırma' kullanılarak yapılan birleştirme' kullanılmalıdır. Günümüz endüstrisinde farklı uygulama alanlarında hızla artmakta olduğu gözlemlenmektedir (Nuhoğlu, 2023). Bu yüzden, bu çalışmada, yapıştırıcı metoduyla farklı yapıştırma kalınlıklarında birleştirilen, farklı yüzey kaplamalarına sahip çelik malzemelerin yorulma direnci sonrasında S-N (Wöhler) eğrilerinden (Andaloussi, 2022) elde edilen ömür değerleri birbirleri arasında kıyaslama yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında, kullanılan yapıştırıcı metodunun yapışma performansının artırılması ve yapıştırma işlemi öncesi yapıştırılacak malzemelerin yüzeyinde kuvvetli bir yapışma bağı oluşturmak için uygulanan mevcut yüzey hazırlama yöntemlerine ek olarak kateforez kaplama metodu alternatif bir yüzey ön hazırlığı olarak kullanılmıştır.

Endüstride ve bilimsel araştırmalarda yapıştırma işlemi öncesinde üzerinde yoğunlaşılacak üç temel yüzey hazırlığı sınıflandırması vardır. Birincisi, mekanik yüzey hazırlıklarıdır. Yapıştırma işlemleri öncesinde zımparalama, taşlama, kumlama, fırçalama gibi yapışma yüzeyini aşındıracak mekanik işlemlerin uygulanmasıyla, yapıştırılacak malzeme yüzeyini iki boyuttan üç boyuta çıkarılarak malzeme yüzeyine derinlik ve yükseklik oluşturulması için uygulanan yüzey pürüzlülüğü işlemidir (Akshay, 2017; Bowen, 2019). Bu işlem, yapıştırılacak yüzey alanının boyutlarını değiştirmeden, yapıştırılacak bölgenin yüzey alanını arttıracak ve mekanik kilitlemeye neden olmaktadır. Bu tür uygulamaların yapıştırma

mukavemetine sağladığı yüksek etkileri birçok araştırmacı tarafından ortaya başarılı bir şekilde ortaya koymuştur.

İkinci önemli yüzey hazırlığı fiziksel yüzey hazırlıklarıdır. Bu tür yüzey hazırlıklarına alev, plazma işlemleri ve korona deşarj gibi yüksek enerjili yüklere maruz bırakılan yüzey ön işlemlerdir (Komagata, 2020; Zanet, 2022; Takeda, 2019). Bu konuda da birçok araştırmacı farklı parametrelerde yapışma mukavemetini araştırdığı görülmüştür.

Üçüncü önemli yüzey hazırlığı kimyasal ön hazırlıklardır. Bu işlemlere asit ile aşındırma (Riesgo, 2023), yüzey kaplama (Nasresfahani, 2023), ve yapışma yüzeyini yağdan, tozda ve diğer yabancı maddeleri çeşitli çözücülerle temizlenmesidir (Tian, 2021). Yapıştırılacak bölge yüzeyinde uygulanan bu tür kimyasal ön hazırlıklar malzeme ile yapışkan elementi arasında ara yüz oluşturarak yüzey enerjilerinin artırılması, yapıştırıcı elementinin akma özelliğinin artırılması sonucunda yapıştırıcı moleküllerinin yapıştırılacak malzeme yüzeyini daha geniş alanda ıslatabilme kabiliyeti yükselttilerek adhezyon kuvvetinin oluşturmasını sağlayacak çalışmaları da birçok araştırmacıların odaklandığı temel konulardır.

Endüstriyel uygulama alanları üzerinde odaklanılan bu yüzey hazırlıklarına ilaveten bu çalışmada özellikle çelik malzemeden oluşan otomotiv araç karoserisini korozyondan koruma amaçlı karoser yüzeyine uygulanan kateforez kaplama üzerinde herhangi bir yapıştırma uygulamasına rastlanmamıştır. Bu çalışmayla bir otomobil fabrikasının boya hattında uygulanan kateforez ve astar boya uygulamaları sonrası yapıştırıcı performansı işleminin de uygulanabilir olduğu ve yüzeyi kateforez uygulanan numunelerde 3 mm yapışma kalınlıklarında birleştirilen malzemelerin yapıştırma performansının, yüzeyi astar boya uygulanmış numunelerden daha başarılı bir yapışma yüzey performansı sağladığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç karşısında, kimyasal ön hazırlık kapsamında yapışma yüzeylerinin kateforez kaplama ile de mümkün olabileceği kanıtlanmıştır. Böylelikle, otomotiv endüstrisinde yapıştırma işlemlerinin kateforez kaplama sonrası uygulanmasında daha başarılı bir sonuç vereceği tespit edilmiştir. Sonuç olarak, araçların hafifletilmesi için araç gövdesi üzerinde kullanılacak daha hafif malzemelerin kateforez uygulama sonrası yapıştırma işlemlerinin yapılması daha verimli olacağı düşünülmektedir. Bunun sonucunda daha hafif araçlar üretilerek çevreye verilen CO2 emisyon salınımı azalması,

araç performanslarının artırılması, elektrikli araçlarda menzilin artması gibi olumlu etkilerin oluşturulmasında yapılacak bilimsel çalışmalara ışık tutacaktır. Bu çalışma ışığında, çelik malzemeden farklı malzemeler üzerinde çalışılması, yukarıda belirtilen yüzey ön hazırlıkların birkaç metodu aynı anda kombine olarak uygulanarak çalışılması veya epoksi bazlı gibi farklı yapıştırıcı türleri kullanılarak diğer araştırmacılar için bir fikir oluşturacaktır.

#### Etik Standartlar Bildirgesi

Yazar tüm etik standartlara uyduklarını beyan eder.

#### Yazarlık Katkı Beyanı

Celalettin Baykara: Kaynaklar, Araştırma, Deney, Yazma-oriijinal taslak Görselleştirme, Analiz.

#### 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, T.C. Karabük Üniversitesi bilimsel araştırma projeleri (BAP) koordinatörlüğü kapsamında, KBÜ-BAP-151-DS-041 numaralı, hızlı destek projesi olarak desteklenmiştir. Ayrıca, yazar, çelik malzeme tedarikinde Hyundai Assan Otomotiv Sanayi A.Ş.'ye, yapıştırıcı tedarikinde Sika Türkiye'ye, ve gözlemlerin bir bölümünde beraber yol aldığı Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği öğrencilerinden Ali Mert İLMENÖZ, Göksel KULA, Kamil AKDOĞAN, Onur ATAMAN'a ve proje onayında katkısı bulunanlara, makalenin olgunlaşmasına katkı koyan hakem ve editörlere, desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

#### 5. Kaynaklar

- Adams, R.D., Comyn, J., Wake, W.C., 1997. Structural Adhesive Joints in Engineering, 2nd ed.; Chapman & Hall: pp. 244–265.
- Al-Moghazy, M., Mahmoud, M., and Nada, A. A. 2020. *Fabrication of cellulose-based adhesive composite as an active packaging material to extend the shelf life of cheese*. International Journal of Biological Macromolecules, **160**, pp.264-275.
- Alsoufi, M. , Bawazeer, T. , Alhazmi, M. and Azam, S., 2017. *The Effect of Detergents on the Appearance of Automotive Clearcoat Systems Studied in an Outdoor*

*Weathering Test*. Materials Sciences and Applications, **8**, 521-536.

- Andaloussi H.A., Mouton, L., Ahmad, A.S., Errotahabere, X., Mougin, S.M., Paboeuf, S., 2022. *Fatigue of adhesive bonding: World first fatigue S-N curve for FPSO application*. Procedia Structural Integrity, **38**, 238–250.
- Bamberg, P. A. M. G. P., Reisgen, U., Schiebahn, A., Barbosa, J. D. V., Marx, B., and Coelho, R. S., 2018. *Digital Image Correlation Analysis Of The Effects Of The Overlap Length, Adhesive Thickness And Adherends Yield Strength Over Similar And Dissimilar Joints Of High Strength Steel And Aluminum Alloys*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **83**, 69–75.
- Banea, M. D., Barros, S. de.Budhe, S., Ghumatkar, A., Sekhar, R., 2016. *Influence of Adherend Surface Roughness on the Adhesive Bond Strength*. Latin American Journal of Solids and Structures, **13(13)**, 2356–2370.
- Banea, M.D., da Silva, L.F.M., 2009. *Adhesively bonded joints in composite materials: an overview*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications, **223 (1)**, 1-18.
- Baur, P., Casari, P., Choqueuse, D., Davies, P. Roy, A., 2004. *Structural mechanical testing of a full-size adhesively bonded motorboat*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, **218(4)**, 259–265.
- Baykara, C., 2023. *Effect of single-lap joint different adhesive thickness on fatigue strength of metals with different surface coatings*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, **237 (17)**, 1– 18.
- Baykara, C., Teke, I.T, Ertas, A.H, 2023. *Effects of the single-lap joint on fatigue strength of metals with different surface coatings: a numerical solution*. TransSiberia, **402**, 11011.
- Bowen, L., Anand, N., Hossein, A., Soheil, S., 2019. *Analyzing effects of surface roughness, voids, and particle-matrix interfacial bonding on the failure response of a heterogeneous adhesive*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, **346**, 410-439.

- Braga D.F.O., De Sousa L.M.C, Infante V., Da Silva L.F.M., Moreira P.M.G.P., 2015. *Aluminium friction stir weldbonding*. Procedia Engineering, **114**, 223–31.
- Budhe, S., Ghumatkar, A., Birajdar, N., Banea, M.D., 2015. *Effect of surface roughness using different adherend materials on the adhesive bond strength*. Applied Adhesion Science, **3**, 1-10.
- Burchardt, B., Dilger, K., Frauenhofer, M., 2018. Handbook of Adhesion Technology, L.F.M. da Silva, A. Ochsner, R.D. Adams (Eds.), second ed., Springer, pp. 1333–1366.
- Clearfield H.M, McNamara D.K, Davis G.D., 1990. Surface preparation of metals. Brinson HF (ed) Handbook on engineered materials: adhesives and sealants, vol 3. ASM International, Metals Park, p 259.
- Davies P, Marine industry, 2018. Hand- book of Adhesion Technology , L.F.M. da Silva, A. Ochsner, R.D. Adams (Eds.), second ed., Springer, pp. 1391–1418.
- Davis, G.D., 2003. Handbook of adhesive technology, Mittal KL, Pizzi A (eds), CRC Press, p. 273.
- Duarte, A.P., Coelho, J.F., Bordado, J.C. , Cidade, M.T. Gil, M.H. , 2012. *Surgical adhesives: systematic review of the main types and development forecast*. Progress in Polymer Science, **37(8)**, 1031–1050.
- Ebnesajjad S., 2011. Handbook of adhesives and surface preparation. Sina Ebnesajjad, (ed) William Andrew, p. 259–300.
- Ertas, A. H., Yilmaz, Y. & Baykara, C., 2008. *An investigation of the effect of the gap values between the overlap portions of the spot-welded pieces on fatigue life*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, **222 (6)**, 881-890.
- Ferreira, J.A.M., Reis, P.N.B., Costa, J.D.M. and Richardson, M.O.W., 2002. *Fatigue Behaviour of Composite Adhesive Lap Joints*. Composites Science and Technology, **62(10- 11)**, 1373–1379.
- Frassetto, A., Breschi, L., Turco, G., Marchesi, G., Di Lenarda, R., Tay, F. R and Cadenaro, M. 2016. *Mechanisms of degradation of the hybrid layer in adhesive dentistry and therapeutic agents to improve bond durability—A literature review*. Dental Materials, **32(2)**, e41–e53.
- Ghumatkar, A., Sekhar, R., Budhe, S., 2017. *Experimental study on different adherend surface roughness on the adhesive bond strength*. Materials Today: Proceedings, **4(8)**, 7801–7809.
- Golewski, P., Nowicki, M. T., Sadowski, T., Pietras, D., 2021. *Bending degradation of thinwalled box beams made of aluminum omega profile and GFRP panel connected by mechanical fasteners*. Composite Structure, **282**, 115111.
- Goudarzi, R.H., Khedmati, M.R., 2015. *An experimental investigation of static load capacity of AL-GFRP adhesively bonded single lap and double butt lap joints*. Latin American Journal of Solids and Structures, **12**, 183-1594.
- Grätzla, T, Van Dijkstra, Y., Schramm, N., et.al., 2019. *Influence of the automotive paint shop on mechanical properties of continuous fibre-reinforced thermoplastics*. Composite Structures, **208**, 557-565.
- Hartz, J. J., Zeig, T., Attin, T., and Wegehaupt, F. J., 2021. *Adhesive application before hydrofluoric acid etching during repair procedure in dentistry*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **111**, 102960.
- Ishikawa, H., Seto, K., Shimotuma, S., Kishi, N., & Sato, C. 2005. *Bond strength and debonding behavior of elastomer and emulsion-type dismantlable adhesives used for building materials*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **25(3)**, 193–199.
- Jakubinek, M. B., Ashrafi, B., Zhang, Y., Martinez-Rubi, Y., Kingston, C. T., Johnston, A. and Simard, B. 2015. *Single-walled carbon nanotube–epoxy composites for structural and conductive aerospace adhesives*. Composites Part B: Engineering, **69**, 87–93.
- Kaykaç, N.G., 2022. Investigation of Process Parameters on Properties of Epoxy Based Cathaphoretic Coatings, (The Degree of Doctor of Philosophy), The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, 172.
- Kupski, J., Teixeira de Freitas, S., 2021. *Design of adhesively bonded lap joints with laminated CFRP adherends: Review, challenges and new opportunities for aerospace structures*. Composite Structures, **268**, 113923.
- Kwon, Y.T, Kim, Y.S., Lee, Y. , Kwon, S., Lim, M., Lee, Y., Kwon, S., Song, Y., Choa, Y.H and Yeo, W.H. , 2018. *Ultrahigh conductivity and superior interfacial adhesion of a nanostructured, photonic-sintered copper membrane for printed flexible hybrid*



- electronics. ACS Applied Materials and Interfaces, **10**, 44071–44079.
- Lees, W.A., 1987. Stress Distribution in-Bonded Joints: *An Exploration within a Mathematical Model*. International Journal of Materials and Product Technology, **2(2)**, 168–181.
- Maggiore, S., Pedemonte, M., Bazurro, A., Stagnaro, P., Utzeri, R., & Luciano, G., 2020. *Characterization of the effect of an epoxy adhesive in hybrid FSW-bonding aluminium-steel joints for naval application*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **103**, 102702.
- Nasresfahani, M.R., Asghari, S., 2023. *Review of nondestructive methods for evaluating adhesive bonding on anodized coatings*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **127**, 103491.
- Nonnenman, T, Beygi, R, Carbas, R.J.C, M.D. Banea, da Silva, L.F.M., Öchsner, A, 2022. *Synergetic effect of adhesive bonding and welding on fracture load in hybrid joints*. Journal of Advanced Joining Processes, **6**, 100122.
- Nuhoglu, K., Aktas, E, Tanoglu, M., Martin S., İplikçi, H., Barışık, M., Yeke, M., Türkdogan, C., Esenoglu, G., Dehneliler, S, İriş M.E., 2023. *Analysis of adhesively bonded joints of laser surface treated composite primary components of aircraft structures*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **126**, 103456.
- Nunes, S.L.S., Campilho, R.D.S.G., da Silva, F.J.G., de Sousa, C.C.R.G., Fernandes T.A.B., Banea M.D., da Silva, L.F.M., 2016. *Comparative failure assessment of single and double lap joints with varying adhesive system*. Journal of Adhesion, **92(7-9)**, 610-634.
- Paiva, R.M.M. , Marques, E.A.S., da Silva, L.F.M., Antonio, C.A.C., Aran-Ais, F., 2015. *Adhesives in the footwear industry*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, **203(2)**, 357–374.
- Paşa, Ç., (2006). Otomotivde boyama teknolojisi ve boya kurutma fırınının ekserji analizi, (Yüksek Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 131
- Reis, P.N.B., Antunes, F.J.V. and Ferreira, J.A.M., 2005. *Influence of Superposition length on Mechanical Resistance of Single-Lap Adhesive Joints*. Composite Structures, **67(1)**, 125–133.
- Reza, A., Shishesaz, M., Tahan, K.N., 2014. *The Effect of Viscoelasticity on Creep Behavior of Double-Lap Adhesively Bonded Joints*. Latin American Journal of Solids and Structures, **11**, 35-50.
- Riesgo, B.V.P., Rodrigues, C.S., Nascimento, L.P, May, L.G, 2023. *Effect of hydrofluoric acid concentration and etching time on the adhesive and mechanical behavior of glass-ceramics: A systematic review and meta-analysis*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **121**, 103303.
- Rudawska, A., 2019. *Surface Treatment in Bonding Technology*; Academic Press Elsevier, pp. 47–59.
- Sadowski, T., Golewski, P. 2014. *Effect of Tolerance in the Fitting of Rivets in the Holes of Double Lap Joints Subjected to Uniaxial Tension*. Key Engineering Materials, **607**, 49–54.
- Sadowski, T., Kneć, M., and Golewski, P., 2014. *Fatigue Response of the Hybrid Joints Obtained by Hot Spot Welding and Bonding Techniques*. Key Engineering Materials, **601**, 25–28.
- Sahin, R., & Akpınar, S., 2021. *The effects of adherend thickness on the fatigue strength of adhesively bonded single-lap joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **107**, 102845.
- Takeda, T., Yasuoka, T., Hoshi, H., Sugimoto, S., Iwahori, Y., 2019. *Effectiveness of Flame-based Surface Treatment for Adhesive Bonding of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Matrix Composites*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, **119**, 30–37.
- Tan, W., Na, J., Wang, G., Xu, Q., Shen, H., Mu, W., 2021. *The effects of service temperature on the fatigue behavior of a polyurethane adhesive joint*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **107**, 102819.
- Tian, F., Jett, K., Flaughner, R., Arora, S., Bergeron, B., Shen, Y., and Tay, F. 2021. *Effects of dentine surface cleaning on bonding of a self-etch adhesive to root canal sealer-contaminated dentine*. Journal of Dentistry, **112**, 103766.
- Traian V. Chirila, 2022. *Surgical adhesives based on silk fibroin: A critical account of past and current research*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **114**, 103109.
- TS EN ISO 9664, 1995. Yapıştırıcılar-Çekme kaymasına maruz yapısal yapıştırıcılarda yorulma özellikleri-Deney metotları. TSE, Ankara,17

- Varisli, D., Kaykac, N.G., 2012. *COx free Hydrogen Production over Cobalt Incorporated Silicate Structured Mesoporous Catalysts*. Applied Catalysis B: Environmental, **127**, 389–398.
- Varisli, D., Kaykac, N.G., 2016. *Hydrogen from ammonia over cobalt incorporated silicate structured catalysts prepared using different cobalt salts*. International journal of hydrogen energy, **41**, 5955-5968.
- Wang, C., Yusufu, D., and Mills, A. 2019. *A smart adhesive “consume within” (CW) indicator for food packaging*. Food Packaging and Shelf Life, **22**, 100395.
- Wang, C.H. and Rose, L. R. F., 2000. *Compact Solutions for the Corner Singularity in Bonded Lap Joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **20(2)**, 145–54.
- Wang, D., Li, Y., Zou, T., Fu, J., Liu, Z., 2023. *Increasing strength and fracture toughness of carbon fibre-reinforced plastic adhesively bonded joints by combining peel-ply and oxygen plasma treatments*. Applied Surface Science, **612**, 155768.
- Watson, B., Nandwani, Y., Worswick M.J. and Cronin, D.S., 2019. *Metallic multi-material adhesive joint testing and modeling for vehicle lightweighting*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **95**, 102421.
- Wiğckowski, W., Lacki, P., Adamus, J., 2019. *Examinations of steel overlap joints obtained using the friction stir welding technology*. Archives Metallurgy and Materials. **64**, 393–399.
- Wu, H., Chiang, S. W., Lin, W., Yang, C., Li, Z., Liu, J., Wong, C. P., 2014. *Towards Practical Application of Paper based Printed Circuits: Capillarity Effectively Enhances Conductivity of the Thermoplastic Electrically Conductive Adhesives*. Scientific Reports, **4(1)**, 6275.
- Yang, C., Wong, C. P., and Yuen, M. M. F., 2013. *Printed electrically conductive composites: conductive filler designs and surface engineering*. Journal of Materials Chemistry C, **1(26)**, 4052.
- Yuya, K., Ikeda, H.; Fujio, Y., Nagamatsu, Y., Shimizu, H., 2020. *Surface modification of feldspar porcelain by corona discharge and its effect on bonding to resin cement with silane coupling agent*. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, **105**, 103708.
- Zanet, A., Salvo, M, Caselegno, V., 2022. *Surface modification of SiC to improve joint strength via Corona plasma treatment*. Ceramics International **48**, 23492–23497.
- Zhao B, Lu Z-H. A, (2009), *Two-dimensional approach of single-lap adhesive bonded joints*. Mechanics of Advanced Materials and Structures, **16**, 130-159

#### internet kaynakları

- 1- <https://www.erdemir.com.tr>, (04.04.2023)
- 2- <https://tur.sika.com>, (04.04.2013)
- 3- <https://www.labomaronline.com>, (05.04.2023)



# Control of the Quarter Vehicle Model with an Innovative Delayed Resonator Optimized by Genetic Algorithm

\*Makale Bilgisi / Article Info  
Alındı/Received: 21.07.2023  
Kabul/Accepted: 25.01.2024  
Yayımlandı/Published: 27.02.2024

## Genetik Algoritma ile Optimize Edilmiş Yenilikçi bir Gecikmeli Rezonatör ile Çeyrek Taşıt Modelinin Kontrolü

İbrahim Şenaslan , Boğaç Bilgiç 

Department of Mechanical Engineering, Istanbul University-Cerrahpaşa, Istanbul, Türkiye.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

### Öz

Bu çalışma, çeyrek araç modelini kullanmış ve aktif süspansiyon sistemini düzenlemek için bir gecikmeli rezonatör kontrol yaklaşımı uygulamıştır. Geleneksel gecikmeli rezonatörün aksine, bu çalışmada kuvvet sinyali konum, hız ve ivme gecikmeli rezonatörün uygulanmasıyla üretilir. Gecikmeli rezonatör denetleyicisinin tüm parametreleri, genetik algoritma yaklaşımı kullanılarak belirlenmiştir. Sonuçlar, gecikmeli rezonatörü entegre etmenin süspansiyon sisteminin performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Sistemin ivme, hız ve konum değişkenlerini kapsayan uygulanan kuvvet, kapsamlı olduğu için her koşulda başarılı olma kapasitesine sahiptir. Bu kapsamlı kontrolör, kontrol sisteminin başarılı bir şekilde çalışması için hayati öneme sahiptir.

**Anahtar Kelimeler** Gecikmeli Rezonatör, Genetik Algoritma, Aktif Süspansiyon Sistemi, Çeyrek Araç Modeli

### Abstract

This study utilized a quarter vehicle model and implemented a delayed resonator control approach to regulate the active suspension system. In contrast to the conventional delayed resonator, the force signal in this study is generated through the implementation of the position, velocity, and acceleration delayed resonator. The all parameters of the delayed resonator controller were determined using the genetic algorithm approach. The results suggest that integrating the delayed resonator significantly improves the performance of the suspension system. The applied force, which encompasses acceleration, velocity, and position variables of the system, remains stable under all conditions. This comprehensive controller is vital for the successful operation of the control system.

**Keywords** Delayed Resonator, Genetic Algorithm, Active Suspension System, Quarter Car Model

### 1. Introduction

The evolution of suspension systems in automobiles is a testament to the ongoing quest for heightened comfort and performance. In the nascent stages of automotive development, rigid suspension systems were prevalent, showcasing limited adaptability to diverse road conditions (Avinash et al. 2020). The inherent drawback of these early systems was the direct transmission of shocks and vibrations from the road to both the vehicle and its occupants.

With the advancement of automotive technology, engineers embarked on a mission to overcome these challenges by introducing more sophisticated suspension designs. The mid-20th century witnessed a pivotal moment with the advent of independent suspension

systems. This groundbreaking innovation permitted each wheel to move autonomously, resulting in enhanced stability and a smoother driving experience. Following this milestone, the automotive industry experienced a surge in the introduction of various suspension types, such as MacPherson struts, double-wishbone suspensions, and torsion beam suspensions (Cronin 1981, Vignesh et al. 2019, Shimatani et al. 1999). Each of these systems brought distinct advantages to the realms of handling and comfort.

In the modern automotive landscape, suspension systems have evolved into three main categories: passive, semi-active, and active suspensions (Smith and Swift 2016, Koulocheris et al. 2017, Goyal and Sharma 2017). Passive systems, relying on fixed mechanical

components for shock absorption, offer a certain comfort level but lack real-time adaptability to changing road conditions. Semi-active systems provide a compromise between passive and active systems, incorporating adjustable elements for modification based on driving conditions, offering a balance between comfort and performance with some adaptability. Active suspension systems, utilizing advanced electronic sensors and actuators, represent the pinnacle of technology by actively adjusting settings in real-time, ensuring optimal comfort and stability. Despite their higher complexity and cost, they have gained popularity for superior performance, enhancing the overall driving experience.

In active suspension systems, a crucial mechanism involves the generation of a counteracting force proportional to the forces between the wheels and the road, effectively balancing the acceleration induced by the road. To determine this force, a controller is employed. Commonly used controllers in automobiles include the Fuzzy Logic Controller (FLC), PID, and Sliding Mode Control (Mutlu 2023, Şahin and Ayas 2019, Karaman and Kayisli 2017). Although not as widely used as these controllers, the Delayed Resonator is also employed in vehicle control. The Delayed Resonator, discovered by Olgac in 1994, has found applications in the control field (Olgac and Hansen 1994). It incorporates delayed control of the selected parameter.

In this field, various optimization methods are employed to fine-tune and enhance the performance of suspension systems. These methods play a crucial role in determining the most effective parameters for achieving the desired balance between comfort and performance. Among the optimization techniques commonly utilized are the Ziegler-Nichols method, particle swarm optimization, and genetic algorithms (Huba et al. 2021, Eser et al. 2021). Each method has its unique advantages and disadvantages, contributing to the broader exploration of efficient suspension system designs. While numerous optimization approaches exist, the genetic algorithm has demonstrated remarkable success (Caner and Gülseren 2010). Despite its complexity, this algorithm stands out for its ability to find optimal solutions within a vast parameter space. Therefore, it has been chosen for implementation in this study due to its effectiveness.

The primary objective of this study is to enhance the performance of the suspension system by utilizing the delayed resonator. In contrast to the conventional

delayed resonator, the force signal is generated through the implementation of the position, velocity, and acceleration delayed resonator. To clearly demonstrate the effect, a quarter vehicle model was selected, and the coefficients employed in the study were determined using the Genetic Algorithm.

## 2. Materials and Methods

### 2.1 Mathematical Model

The vehicle suspension model can be modeled in three different ways as quarter, half and full vehicle. In terms of simplicity and clarity, the quarter car model is the most preferred model.

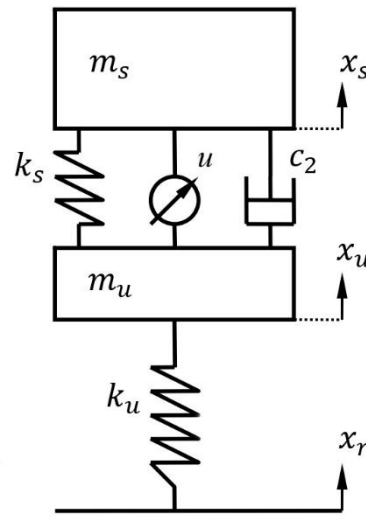


Figure 1. Physical model of quarter car

$$\begin{aligned} m_s \ddot{x}_s + c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_u) + \dots \\ \dots k_s (x_s - x_u) = u \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} m_u \ddot{x}_u + c_s (\dot{x}_u - \dot{x}_s) + \dots \\ \dots k_s (x_u - x_s) + k_u (x_u - x_r) = -u \end{aligned} \quad (2)$$

The physical model of a quarter car is shown in Figure 1. In this figure; The unsprung mass is denoted by  $m_u$ , the sprung mass by  $m_s$ , the damping coefficient of the suspension system by  $c_s$ , the coefficient of wheel spring by  $k_u$ , and the coefficient of suspension spring by  $k_s$ . The specific values for these parameters are provided in Table 1.

Table 1. Quarter car suspension parameters (Palanisamy and Karuppan 2016)

Parameter	Symbol	Value (Unit)
Sprung mass	$m_s$	290 (kg)
Unsprung mass	$m_u$	59 (kg)
Damping coefficient	$c_s$	1000 (Ns/m)
Coefficient of wheel spring	$k_u$	190000 (N/m)
Coefficient of suspension spring	$k_s$	16812 (N/m)

To make study comprehensive, three distinct types of road input were tested in this study. Initially, the ISO road was preferred for how this system respond to continuous road that we can see very often in daily life. After that, the step and bump inputs were implemented to obtain sudden road performance of our system.

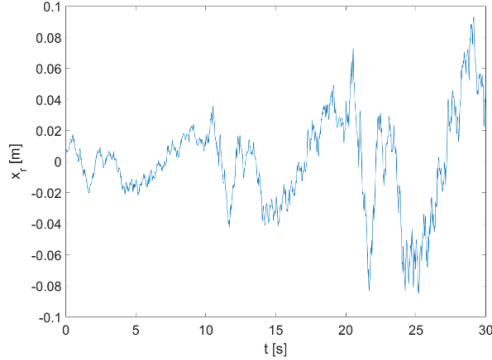


Figure 2. Iso road profile

Iso path include 3 different qualities. First quality road is A-B quality highway, the second and third roads are B-C and C-D quality road preferred for compelling situation. All quality roads are tested for 10 seconds, respectively.

$$G_d(n) = G_d(n_0) * \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-w} \quad (3)$$

where,  $G_d$  is displacement PSD in  $m^3$ ,  $n$  is the spatial frequency,  $n_0 = 0.1$  cycles/m in the reference spatial frequency and  $w$  is the exponent of the fitted PSD.

Table 2. ISO 8608 thresholds of the first three classes (ISO 8608, 2016) (A-C)

ISO 8608 class	$G_d(n) (10^{-6} * m^3)$
A (very good)	<32
B (good)	32-128
C (average)	128-512

Two different inputs also tested, their characteristics are different from the first.

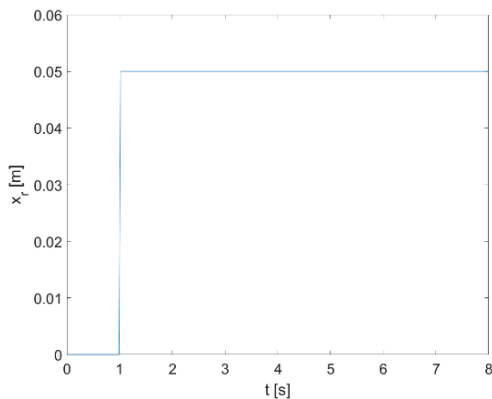


Figure 3. Step road profile

One of them is step, in this input, the behaviour of the car after climbing the 0.05m high step was observed.

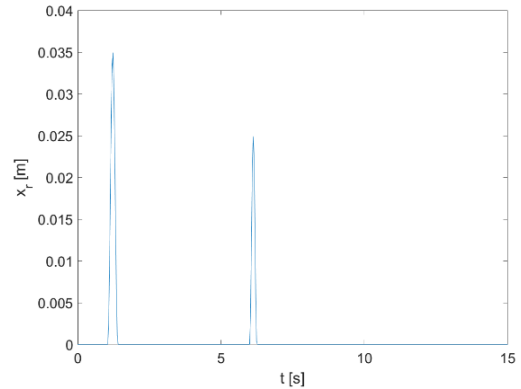


Figure 4. Bump road profile

The last input is bump, in this input, two short-term impacts that first of which is 0.035m high and the second 0.025m high were applied to system.

## 2.2 Control Algorithm

In order to keep the system more stable, a suitable control algorithm was chosen with the system. The system was controlled by the Delayed Resonator and the coefficients were optimized by the Genetic Algorithm.

Delayed Resonator multiplies a parameter in the system with a coefficient and the resulting force is reflected to the system with a delay.

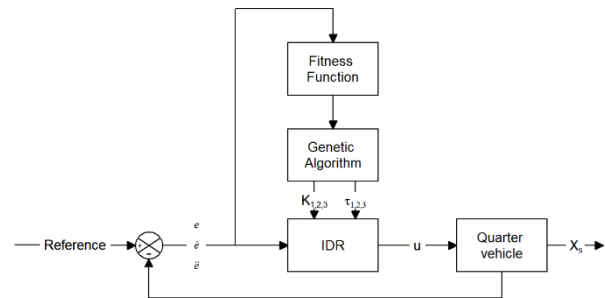


Figure 5. IDR optimized with GA

$$u = K_1 \ddot{e}(t - \tau_1) + K_2 \dot{e}(t - \tau_2) + K_3 e(t - \tau_3) \quad (4)$$

In this equation;  $K_1$ ,  $K_2$  and  $K_3$  represents coefficient of acceleration, velocity and position.  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  and  $\tau_3$  represents delay of acceleration, velocity and position.

$$\ddot{e} = \ddot{x}_{sref} - \ddot{x}_s \quad (5)$$

$$\dot{x}_{sref} = 0 \quad (6)$$

$$\dot{e} = \dot{x}_{sref} - \dot{x}_s \quad (7)$$

$$\dot{x}_{sref} = 0 \quad (8)$$

$$e = x_{sref} - x_s \quad (9)$$

$$x_{sref} = x_r \quad (10)$$

A flexible control mechanism was obtained by controlling the system with acceleration, velocity and position errors.

Genetic Algorithm is an optimization method that is commonly used in control or optimization studies. Genetic Algorithm needs an Goal Function to work. This Goal Function is tried to be approximated to zero by the Genetic Algorithm. In this study, IAE (Integral Absolute Error) and ISE (Integral Square Error) criteria were used to determine Goal Function.

$$IAE = \int_0^\infty |e(t)| dt \quad (11)$$

$$ISE = \int_0^\infty e^2(t) dt \quad (12)$$

The parameters to be controlled in suspension systems are acceleration and position. These parameters are used in the criteria. A correction constant  $k$  is used to equalize its effects.

$$G_1 = k * IAE_p + IAE_a \quad (13)$$

$$G_2 = k * ISE_p + ISE_a \quad (14)$$

$G_1$  and  $G_2$  represent Goal Functions,  $k$  represents the correction coefficient,  $IAE_p$  and  $ISE_p$  represents errors of position,  $IAE_a$  and  $ISE_a$  represents errors of acceleration. In order to determine the correction coefficient, the acceleration and position values according to the ISO input were taken into account. Since the distance between the extreme points is approximately 50 times, the correction coefficient was determined as 50.

After defining the desired function to be optimized, the Genetic Algorithm was employed to determine the Delayed Resonator coefficients. This algorithm utilizes random numbers within specified boundaries, treating each number as an individual within a given population. Once a predetermined number of populations is generated, the algorithm assesses the Goal Function value of each individual in the population. It identifies and records traits that closely align with the desired

objective as genes. Genes that are closer to the optimized value are passed on to the next generation, while distant genes are discarded and replaced with new genes to prevent being stuck at local minimums. Moreover, new individuals are introduced in each population independently from previous genes, ensuring that the algorithm continues to explore the search space and avoids premature convergence.

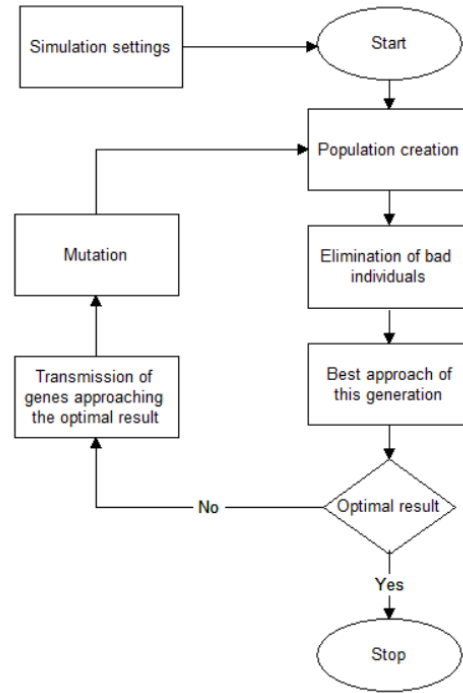


Figure 6. The flowchart of Genetic Algorithm

In this study, the lower limit of the delay time  $\tau$  was determined as 0 and the upper limit was determined as 1, the lower limit of coefficient  $K$  was determined as 0 and the upper limit was determined as 1000 for all parameters, the population number was 200 and the mutation rate was 20%.

The optimal value of  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  and  $\tau_3$  was determined as 0.117, 0.175 and 0.608. The optimal value of  $K_1$ ,  $K_2$  and  $K_3$  was determined as 118.995, 429.337 and 481.545.

### 3. Results and Discussions

Based on the information provided, Table 3 exhibits the Goal Function values associated with the ISO road input, while Table 4 illustrates the identical values for the step input, and Table 5 showcases the values for the bump input.

Table 3.  $G_1$  and  $G_2$  results according to ISO road input

	$G_1$	$G_2$
Passive	43.82	56.34
IDR	38.71	46.87

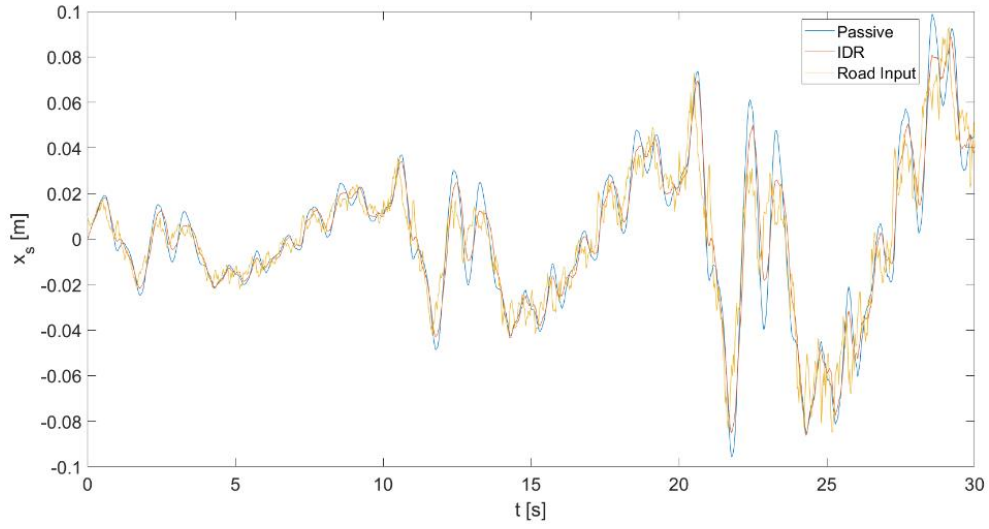


**Table 4.**  $G_1$  and  $G_2$  results according to step entry

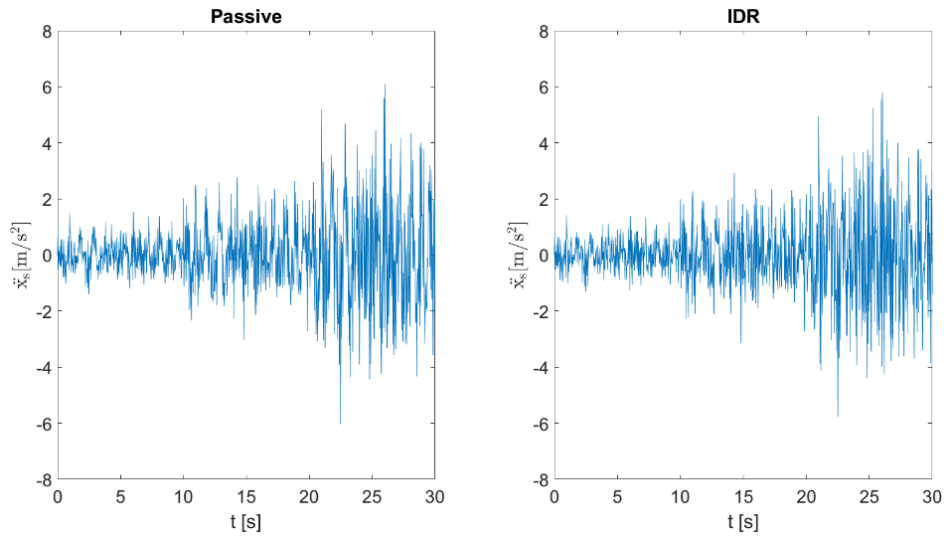
	$G_1$	$G_2$
Passive	2.73	4.30
IDR	1.67	3.55

**Table 5.**  $G_1$  and  $G_2$  results according to bump entry

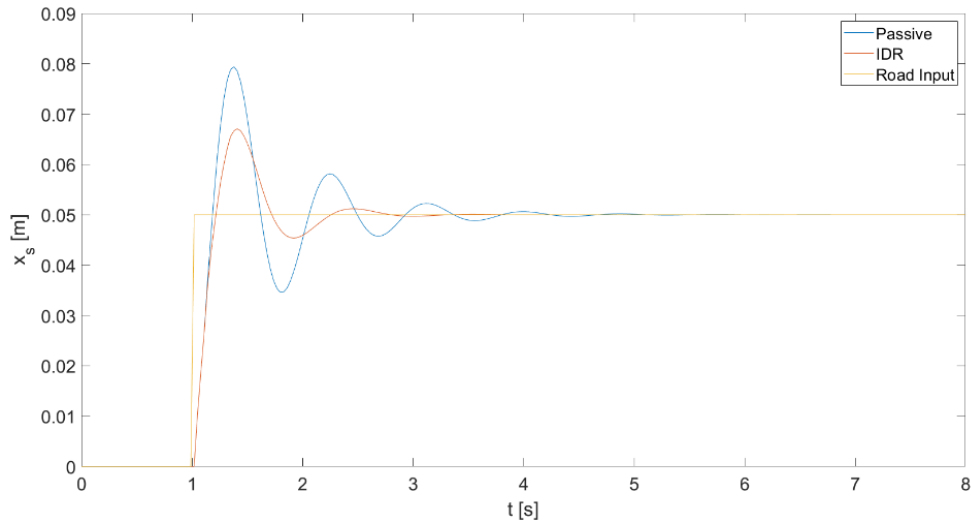
	$G_1$	$G_2$
Passive	3.52	1.99
IDR	2.14	1.62



**Figure 7.** The position-time graph of all systems according to ISO path entry



**Figure 8.** The acceleration-time graph of all systems according to ISO path entry



**Figure 9.** The position-time graph of all systems according to step entry

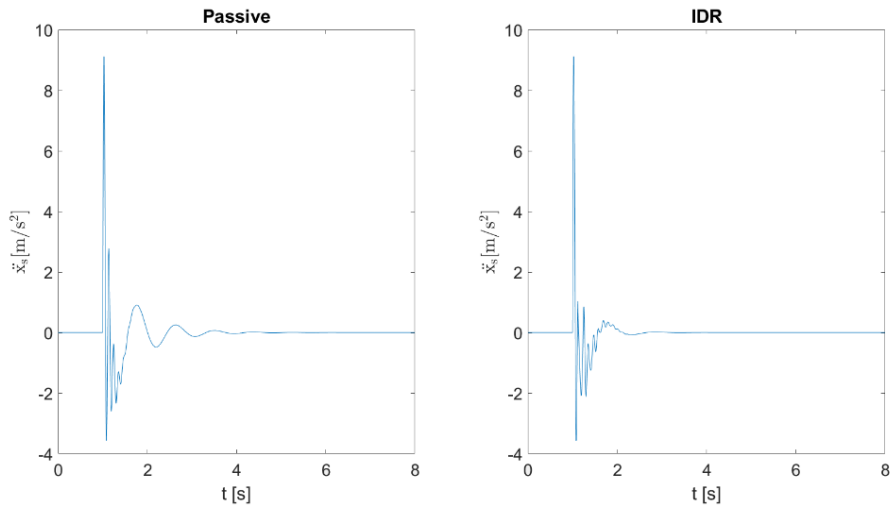


Figure 10. The acceleration-time graph of all systems according to step entry

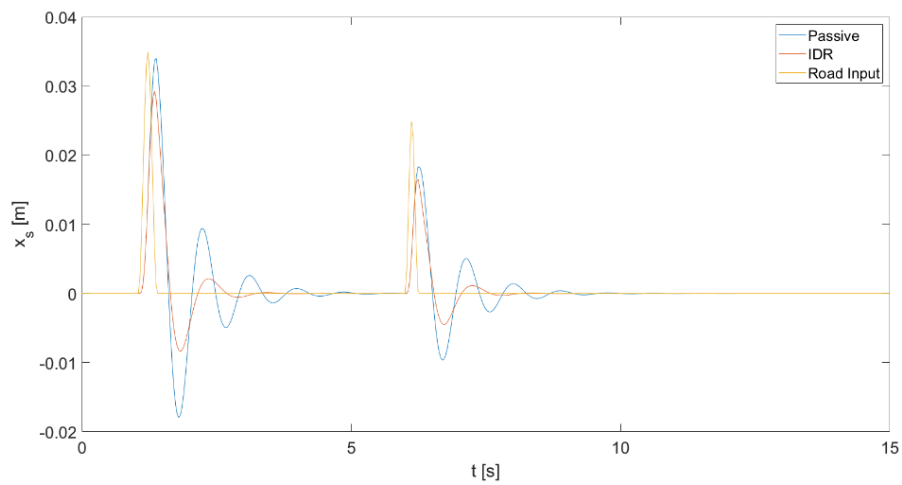


Figure 11. The position-time graph of all systems according to bump entry

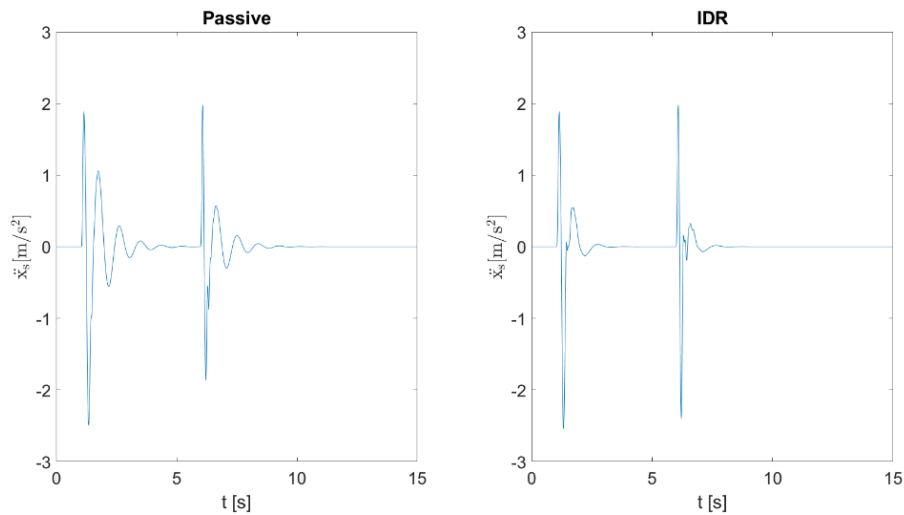


Figure 12. The position-time graph of all systems according to bump entry

Figure 7 depicts the graphical representation of the position variable  $x_s$  pertaining to the ISO path input, while Figure 8 illustrates the acceleration of  $x_s$  for each case. Similarly, Figures 9 and 10 illustrate the graphical depictions for the step input, and Figures 11 and 12 showcase the behavior corresponding to the bump

input. The superiority of the IDR controller is more evidently manifested in the position graphs of the spring-mass system in comparison to the passive state. Due to the inherent time delay in the structure of the IDR controller, it has not provided a visually noticeable response to sudden lane changes in the ISO road input,

as evident in Figure 8. However, there has been a significant numerical improvement. Similarly, due to the same reason, it could not prevent the initial acceleration, as depicted in Figure 10, but it has achieved a highly successful outcome for a controller in the continuation of the graph. These deficiencies arising from the time delay can be addressed in future studies by adding another controller to the system.

#### 4. Conclusions

The current investigation conducted an in-depth exploration by utilizing a quarter vehicle model as the basis and implementing a sophisticated IDR control mechanism to effectively regulate the active suspension system. Through the prudent employment of the genetic algorithm methodology, the essential parameters governing the delayed resonator controller were systematically determined, facilitating an optimal configuration tailored to the specific requirements of the suspension system.

The results of the study unequivocally advocate the profound advantages of integrating the Delayed Resonator within the suspension system. Notably, the incorporation of this innovative control approach resulted in a significant enhancement in the overall functionality and performance of the suspension system. By intelligently leveraging the delayed resonator, the system's dynamic behavior was meticulously managed, ultimately leading to an enhanced level of ride comfort and stability.

An exceptional feature of the proposed controller lies in its holistic approach to addressing the entire spectrum of acceleration, velocity, and position variables. Remarkably, the exerted force demonstrated an extraordinary level of resilience and robustness, retaining stability across a diverse range of operating conditions. This inherent capability of the controller to comprehensively encapsulate all relevant system variables ensures that the suspension system remains highly adaptable and responsive, even in the face of challenging and dynamic scenarios.

Given the central role played by the active suspension system in guaranteeing the safety, comfort, and overall performance of the vehicle, the successful incorporation of the comprehensive delayed resonator controller is undoubtedly a crucial milestone. By striking an optimal balance between ride comfort and road-holding ability, the proposed control mechanism paves the way for enhanced driving experiences and improved vehicle dynamics.

In conclusion, this research highlights the remarkable potential of the position, velocity, and acceleration

delayed resonator control strategy coupled with genetic algorithm-based parameter estimation to revolutionize active suspension systems. The profound improvements witnessed in the suspension system's performance, together with its inherent stability and adaptability, underscore the significance of this comprehensive controller in achieving a triumphant outcome for the entire control system. It is anticipated that the outcomes of this study will contribute substantially to the advancement of vehicular engineering and foster the development of cutting-edge suspension technologies for safer, smoother, and more enjoyable rides in the future.

#### 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

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

#### Acknowledgement

No support was received from any institution during this research.

#### 5. References

- Avinash, K. S., Chauhan, M., Mall, S., Karthik, K. S. G., Banik, T. and Dogra, S., 2020. A Review on suspension system design. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, **7**(11), 569-574.
- Caner, M. and Gülseren, U., 2010. Genetik Algoritma ile Fuzzy PSS'in Kural Tablosu Optimizasyonu. *Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering*, **1**, 83-92.
- Cronin, D.L., 1981. MacPherson Strut Kinematics. *Mechanism and Machine Theory*, **16**(6), 631-644. [https://doi.org/10.1016/0094-114X\(81\)90069-0](https://doi.org/10.1016/0094-114X(81)90069-0)
- Eser, O., Çakan, A., Botsalı, F.M. and Kalyoncu, M., 2021. Arı Algoritması (AA) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) Kullanarak Çeyrek Araç Modeli Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi. *Konya Journal of*

- Engineering Sciences*, **9**(3), 621-632.  
<https://doi.org/10.36306/konjes.881062>
- Goyal, A. and Sharma, A., 2017. Advances in Active Suspension System. *International Conference Proceeding*, **2017**, 177-181.
- Huba, M., Chamraz, S., Bistak, P. and Vrancic, D., 2021. Making the PI and PID Controller Tuning Inspired by Ziegler and Nichols Precise and Reliable. *Sensors*, **21**, 6157.  
<https://doi.org/10.3390/s21186157>
- ISO 8608:2016. Road Profile.
- Karaman, V. and Kayisli, K., 2017. Sliding Mode Control of Vehicle Suspension System Under Different Road Conditions. *International Journal of Engineering Science and Application*, **1**(2), 72-77.
- Koulocheris, D., Papaioannou, G. and Chrysos, E., 2017. A comparison of optimal semi-active suspension systems regarding vehicle ride comfort. *Materials Science and Engineering*, **252**, 012022.  
<https://www.doi.org/10.1088/1757-899X/252/1/012022>
- Mutlu, A., 2023. Robust Control with Fuzzy Based Neural Network for Robot Manipulators. *International Scientific Journal "Industry 4.0"*, **2**, 42-46.
- Olgac, N. and Hansen, T. H., 1994. A novel active vibration absorption technique: Delayed Resonator. *Journal of Sound and Vibration*, **176**(1), 93-104.  
<https://doi.org/10.1006/jsvi.1994.1360>
- Palanisamy, S. and Karuppan, S., 2016. Fuzzy control of active suspension system. *Journal of Vibroengineering*, **18**(5), 3197-3204.  
<https://doi.org/10.21595/jve.2016.16699>
- Shimatani, H., Murata, S., Watanabe, K., Kaneko, T. And Sakai, H., 1999. Development of Torsion Beam Rear Suspension with Toe Control Links. *Journal of Passenger Cars*, **108**(6), 18-22.  
<https://doi.org/10.4271/1999-01-0045>
- Smith, M.C. and Swift, S.J., 2016. Design of passive vehicle suspensions for maximal least damping ratio. *Vehicle System Dynamics*, **54**(5), 568-584.  
<https://doi.org/10.1080/00423114.2016.1145242>
- Şahin, E. and Ayas, M.S., 2019. Performance Analysis of Error-Based and User-Defined Objective Functions for a Particle Swarm Optimization Tuned PID Controller with Derivative Filter. *Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering*, **19**, 682-689.  
<https://doi.org/10.35414/akufemubid.520823>
- Vignesh, B.S., Ahmed, S., Chandan, V. and Shrivastava, P.K., 2019. Double Wishbone Suspension System; A research. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, **8**(2), 5033-5037.  
<http://www.doi.org/10.35940/ijrte.B1084.078219>

## Tersine Mühendislik ve Eklemeli İmalat ile Kişiyeye Özel Nazal Dilatör Tasarımı ve Üretimi

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 25.07.2023

Kabul/Accepted: 09.01.2024

Yayımlandı/Published: 27.02.2024

### Design and Fabrication of Custom Nasal Dilator with Reverse Engineering and Additive Manufacturing

Hasan Kemal SÜRME<sup>1\*</sup>, Tolga GÜVEN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Savunma Teknolojileri Bölümü, İstanbul, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

Nazal dilatörler nazal valfdeki yapısal anomalilerden kaynaklanan solunum güçlüğü gidermek amacıyla kullanılan medikal cihazlardır. Buruna dışarıdan veya içeriden uygulanan cihazlar burnun nazal valf bölgesini genişleterek buradaki hava direncini azaltır ve nefes almayı kolaylaştırır. Burun yapısı kişiden kişiye değişmekte hatta aynı bireyin iki nazal valf yapısı arasında bile yapısal farklılıklar bulunmaktadır. Bu nedenle kişiye özel olarak tasarlanan nazal dilatörler daha verimli ve konforlu olabilirler. Bu çalışmada tersine mühendislik ve eklemeli imalat yöntemleri kullanılarak kişiye özel nazal dilatör tasarımı ve üretiminden bahsedilmektedir. Tasarım sürecinde nazal valfin izi kalıp ile alınmış ve bu kalıbın 3B modeli fotogrametri yöntemiyle elde edilmiştir. Elde edilen model daha sonra bir 3B modelleme yazılımı ile hava geçişini sağlayacak ve cihazın kullanımı kolaylaştıracak şekilde tasarlanmıştır. Nazal dilatörün konforlu kullanımı için malzeme olarak esnek özelliğinden dolayı TPU seçilmiştir. Daha sonra modelin üretimi bir FDM (Fused Deposition Modeling) 3B yazıcı ile yapılmıştır. Elde edilen ürün, 3B modeli ile boyutsal doğruluk açısından karşılaştırılmıştır. Belirlenen çeşitli referanslardan alınan ölçümler neticesinde üründe ortalama boyutsal hata 0,058mm ile %0,609 olarak elde edilmiştir. Bu çalışmada geliştirilmiş olan kişiye özel nazal dilatörlerin her bir kullanıcının burun yapısıyla uyumu sayesinde farklı burun yapıları için kullanılan aynı formdaki standart nazal dilatörlere göre büyük üstünlük sağlayabileceği anlaşılmaktadır. Serbest-formlu organik objelerin modellenmesini kolaylaştıran tersine mühendislik ve tasarımdan doğrudan üretime imkân veren 3B baskı teknolojisi hat kurulumu ve yüksek ilk yatırım maliyetleri olmadan, seri üretime uygun olmayan kişiye özel medikal cihazların tasarım ve üretimi için önemli faydalar sunmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** 3B Baskı; Burun Dilatörü; Eklemeli İmalat; Fotogrametri; Kişiyeye Özel Tasarım; Tersine Mühendislik.

#### Abstract

Nasal dilators are medical devices used to relieve respiratory distress caused by structural anomalies in the nasal valve. These devices, which are applied to the nose externally or internally, widen the nasal valve part of the nose, reducing the air resistance and facilitating breathing. The structure of the nose varies from person to person, and there are even structural differences between two nasal valve structures of the same individual. Therefore, customized nasal dilators can be more efficient and comfortable. In this study, the design and fabrication of custom nasal dilators using reverse engineering and additive manufacturing methods are discussed. In the design process, the impression of the nasal valve was taken with a clay mold and the 3D model of this mold was obtained by photogrammetry method. The final model was then designed with a 3D modeling software to provide air passage and facilitate the use of the device. TPU was chosen as the material for the comfortable use of the nasal dilator due to its flexible feature. Then the final model was fabricated with an FDM (Fused Deposition Modeling) 3D printer. The final product was compared with its 3D model in terms of dimensional accuracy. As a result of measurements taken from various references, the average dimensional error in the product was obtained as 0.609% with 0.058mm. It is understood that the personalized nasal dilators proposed in this study can provide a great advantage over standard nasal dilators of the same form used for different nasal structures, thanks to their compatibility with the nasal structure of each user. Reverse engineering, which facilitates the modeling of free-form organic objects, and 3D printing technology, which enables direct fabrication from design, offers significant benefits for the design and production of personalized medical devices that are not suitable for mass production, without production line and high initial investment costs.

**Keywords** 3D Printing; Nasal Dilator; Additive Manufacturing; Photogrammetry; Custom Design; Reverse Engineering

#### 1. Giriş

Burun kemik ve kıkırdaktan yapılmış bir solunum ve koku organıdır. Burnun temel fonksiyonu solunumdur ve bu nedenle burunda yüksek miktarda hava direnci oluşmaktadır (Karataş 2012). Nazal direnç olarak da

bilinen bu durum burun deliği girişi olan nazal valf bölgesinde ve burnun arka kısmından burun deliğine kadar gelen, hava akımını yönlendirme görevini de yerine getiren konkalarda meydana gelmektedir (Tahamiler vd. 2007). Hava kanalının daralmasıyla burundaki hava direnci artarken hava kanalının genişlemesi ile burundaki

hava direnci azalır. Burundaki hava direncinin artışı veya azalışı sonucunda ise kişinin solunumu da bununla doğru orantılı olarak olumlu ya da olumsuz şekilde etkilenir (Akçam vd. 2005). Hava yolunu genişleterek burundaki nazal direnci azaltıp solunumu kolaylaştırmak için burun genişleticiler kullanılmaktadır.

Burun hava yolunun daralması sonucunda kişide burun tıkanıklığı gibi belirtiler meydana gelebilir. Burun tıkanıklığı uyku esnasında uyku kalitesini düşürebileceği gibi horlamaya da neden olabilir (Ulfberg ve Fenton 1997). Burun genişleticilerin burun hava yolunun daralmasından kaynaklanan horlamanın önlenmesine katkı sağladığı bilinmektedir (Matteo vd. 2019, Matteo vd. 2019, Matteo ve Giorgio 2019). Burun tıkanıklığı ile ilgili olduğu düşünülen obstrüktif uyku apne sendromu (OSAS) şikâyeti olan hastaların nazal dilatör kullanımı sonucunda şikayetlerinde düzelme olup olmadığı araştırılmıştır. Bu çalışmada sürekli pozitif havayolu basıncı (CPAP) terapisi yapılan OSAS'lı hastaların terapi sırasında nazal dilatör kullanımının solunum durumunu nasıl etkilediği incelenmiştir. Sadece CPAP cihazı kullanılması ile  $11,4 \pm 1,5 \text{ cmH}_2\text{O}$  değerinde hava akım basıncı elde edilmiştir. Nazal dilatör ile kullanılması sonucunda ise hava akım basıncı  $10,8 \pm 1,5 \text{ cmH}_2\text{O}$  olarak ölçülmüştür. Uyku sırasında nazal dilatörün buruna takılmasından sonra CPAP cihazının kullanılması sonucunda hava akım basıncının önemli ölçüde düştüğü gözlemlenmiştir (Matteo vd. 2019).

Matteo vd. (2019) yaptıkları bir diğer çalışmada obstrüktif uyku apnesi yaşayan hastalarda internal nazal dilatörün kullanımıyla solunum kalitesinin etkilenip etkilenmediği araştırılmıştır. Oksijen destürasyon ve apne-hipopne indeksinin nazal dilatör kullanımı sonucunda önemli ölçüde azaldığı ve ayrıca uyku kalitesinde önemli ölçüde iyileşme olduğu görülmüştür.

Bu çalışmalarda genel olarak burun dilatörlerinin kullanımı sonucunda uyku kalitesinde düzelme olduğu anlaşılmıştır. Ancak nazal dilatörlerin uyku sırasında burundan düşebileceği ve buruna basınç uygulamasından dolayı rahatsızlık verdiği görülmüştür. Ayrıca dilatörlerin burunla yapısal uyumsuzluğu nedeniyle bazı hastalar bu cihazları kullanmak istemediklerini belirtmişlerdir (Peterson 1989). Nazal dilatörler günümüzde birkaç standart boyutta üretilmektedirler. Bununla birlikte burun valfinin yapısı her insanda farklı boyutlarda ve şekilde olduğu için biyometrik özellikleri farklıdır. Hatta bir kişinin iki burun deliği arasında bile geometrik farklılıklar görülebilir (Eser vd. 2015). Bu durumlar dikkate alındığında her bir hastanın nazal valf

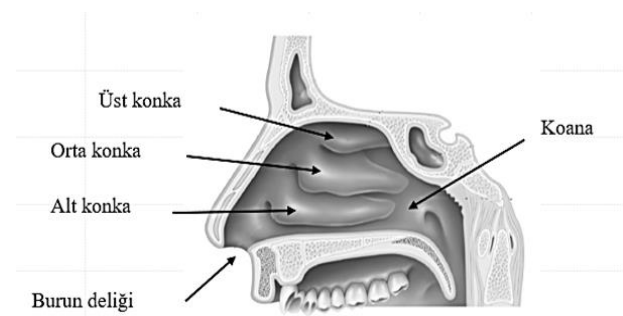
geometrisine göre tasarlanmış nazal dilatörler sayesinde fonksiyonellik, kullanım ve konforun iyileştirilebileceği fikri oluşmuş ve buradan yola çıkarak kişiye özel nazal dilatör tasarımı ve üretimi bu çalışmaya konu olmuştur.

İnsan vücudunun çeşitli bölgelerine uygulanan kişiye özel tasarımlar o bölgenin geometrik özelliklerine uygun olarak yapılmaktadır (Sürmen 2019, Bozkurt vd. 2021). İnsan vücudu gibi organik nesnelere serbest-formlu özellik göstermektedir. Bu nedenle bu bölgelere uygun tasarımlar için üç boyutlu tarama teknolojilerinden faydalanılır (Yüksel ve Bulut 2019, Rahmanimirshakarlou ve Tunçer 2022).

Bu çalışmada yakın mesafe fotogrametrisi (close-range photogrammetry) (Luhmann vd. 2019) ve bir eklemeli imalat teknolojisi olan Eriyik Yığarak Modelleme (Fused Deposition Modeling) (Sürmen 2019) kullanılarak kişiye özgü bir burun dilatörü tasarımı ve üretimi amaçlanmıştır. Nazal valfin iç yapısının 3B izinin alınmasında kil malzemesi kullanılmıştır. Kilin kolay şekil alma özelliği sayesinde burun nazal kısmının pozitif kalıbı alınmıştır. Alınan kalıbın 3B modeli fotogrametri yöntemi ile taranarak oluşturulmuştur. Bu model temel alınarak burun dilatörü hava akışını arttıracak şekilde tasarlanmış ve 3B baskı yöntemi ile üretilmiştir.

## 2. Burun ve Nazal Valf Yapısı

Burun, piramide benzeyen solunum sisteminin ilk bölümünü oluşturan kemik ve kıkırdaktan meydana gelen bir organdır. Burun yapısı eksternal ve internal olmak üzere iki yapıya ayrılır. Eksternal yapının 1/3'lük kısmı kemik ve 2/3'lük kısmı ise kıkırdak yapıdan oluşur (Mukhtarova 2020).

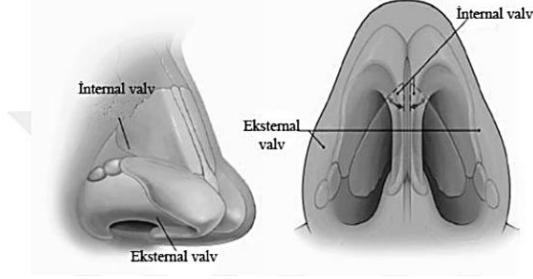


Şekil 1: İnternal burun yapısı

İnternal burun yapısında ("Şekil 1") nazal septum tarafından ikiye ayrılmış burun boşluğunun (nazal kavite) her bir tarafında burun deliği (nostril), nazal valf, koana olarak nazal açıklıklar ve alt, orta, üst konkalar ve konkaların alt kısımlarında meatuslar bulunur.

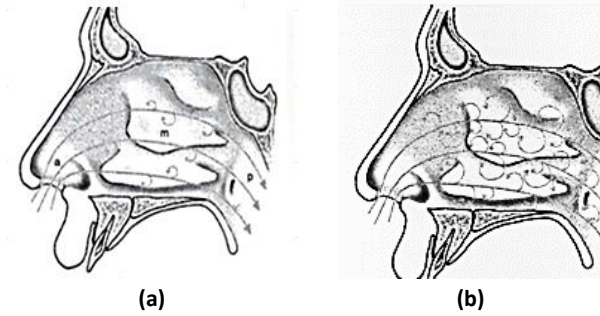


Nazal valf burnun en dar yapısını oluşturur. Eksternal ve internal nazal valf olarak ikiye ayrılır ("Şekil 2"). İnternal nazal valf 10-15 derecelik bir nazal valf açısına sahiptir ve burun deliklerinden yaklaşık 1,5 cm içeride yer alır (Eser vd. 2015). Nazal valf açısındaki değişimler nazal boşluktan geçen havanın direncinde değişiklik meydana getirir. Nazal valfin dar yapısından dolayı buradan giren havanın direnci fazladır. Bu bölgede aniden oluşacak bir daralma bölgedeki hava akışının türbülanslı olmasına neden olacaktır.



Şekil 2: İnternal ve eksternal nazal valf

İnspirasyon anında burundaki hava akımı nazal valften girip alt konkanın üzerinden devam ederek orta konkanın arka tarafından koanalara doğru geçer. İnspirasyon esnasında burun içerisinde laminer bir hava akışının olduğu düşünülse de nazal yapısından dolayı nazal duvarında hava akışı yavaş, orta kısımda ise hızlı olmasından dolayı türbülanslı bir akım oluşur (Karataş 2012). Ekspirasyon sırasında akım yönü tersine olduğundan inspirasyona göre türbülanslı akım daha fazladır ("Şekil 3").



Şekil 3: Burundaki hava akışı a) İnspirasyon sırasındaki hava akışı b) Ekspirasyon sırasındaki hava akışı

### 3. Nazal Valf Yapısından Kaynaklanan Rahatsızlıklar

Burun tıkanıklığı günümüzde çok sık rastlanabilen rahatsızlıklardan biridir. Burun tıkanıklığında alerjik veya kişinin anatomisinden kaynaklı sebeplerin haricinde nazal valfin yapısı da önemli bir rol oynamaktadır. Üst

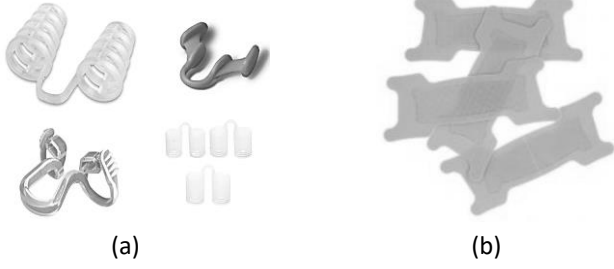
solunum yollarının en dar bölümünü nazal valfin olduğu alan oluşturur. Bu alanın darlığı buruna girecek hava miktarının azalmasına neden olacağından kişilerde burun tıkanıklığı, OSAS ve bunun sonucunda da horlama, uyku sırasında nefes durması, düzensiz uykudan dolayı gündüzleri yaşanan yorgunluk hissi ve halsizlik gibi rahatsızlıklar görülebilmektedir. Burun tıkanıklığından dolayı inspirasyon durumu olumsuz yönde etkilenir. Bu durum sonucunda oluşan negatif basınç nedeniyle burundaki hava türbülansı değişmektedir. Hava türbülansının değişmesi de horlamanın şiddetini etkilemektedir (Fairbanks vd. 2003, Hudgel ve Harasick 1990) Horlama verilerine göre yetişkinlerin %45'i ara sıra, %25'i sürekli horlamaktadır. 30-35 yaş grubundaki erkeklerin %20'si, bu yaş grubundaki kadınların ise %5'i, 60 yaş grubundaki kadınların %40'ı, bu yaş grubundaki erkeklerin ise %60'ı sürekli horlamaktadır (Varolğüneş 2010).

Göteborg Devlet Hastanesi'nde yapılan bir araştırmada Petruson (1989) gece yatarken burundan nefes almakta güçlük çekmesinden dolayı horlama yaşayan, sabah uyandığında yorgunluk hisseden ve boğaz kuruluğu yaşayan 50 hasta üzerinde nazal dilatör test edilmiştir. Bu şikayetleri yaşayan hastalara nazal dilatör kullanılarak yaşadıkları olumlu ve olumsuz sonuçların rapor edilmesi istenmiştir. Hastalardan gelen olumlu sonuçlara göre, horlama sorunu yaşayan 26 hastanın %88'i nazal dilatör kullanımı sonucunda horlamalarında azalma olduğunu belirtmiştir. Sabahları uyandığında ağız kuruluğu şikâyeti olan 34 hastanın %80'i uyandıklarında ağızlarında daha az kuruluk olduğunu söylemişlerdir. Hastaların yarısı nazal dilatör kullanımı sayesinde kendilerini daha az yorgun hissetmiştir. Öte yandan 11 hasta, gece yatarken uyku esnasında nazal dilatörlerin burunlarından düştüğünü belirtmişlerdir.

### 4. Nazal Dilatör

Burnun nazal valf kısmını genişletip burada oluşacak hava direncini azaltarak rahat nefes almayı sağlayan nazal dilatörler internal ve eksternal olmak üzere iki çeşittir ("Şekil 4"). İnternal dilatörler burnun içerisine, eksternal dilatörler ise dış kısmına yerleştirilir. Her iki nazal dilatör tipi de çeşitli tasarımlara sahiptirler. Bu tasarımlar standart olarak üretilmektedir. Farklı boyutları olan bazı nazal dilatör tipleri olsa da bunlar kişiyi özel tasarımlar olmadığı için kullanıcıların nazal valf yapılarıyla uyumlulukları zayıftır. Bu nedenle nazal dilatörlerin verimleri kişiden kişiye değişmekte, cihazlar her bireyde fonksiyonlarını etkili bir şekilde yerine getirememekte, kişilerin nazal valf yapılarındaki farklılıkların standart

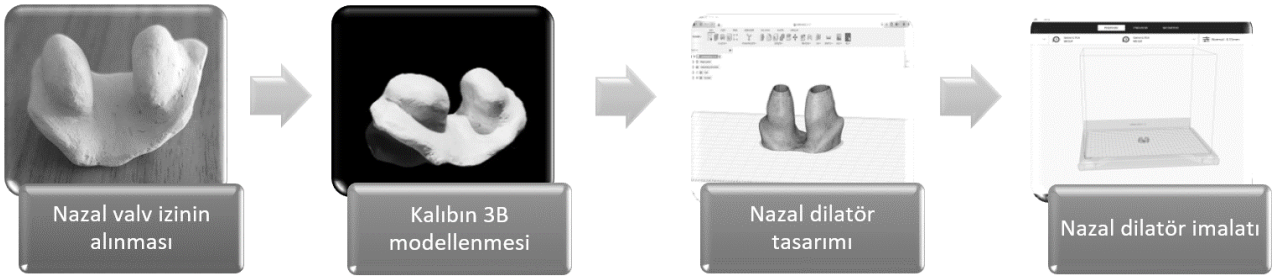
nazal dilatörlere uyumsuzluğundan dolayı konforsuz bir kullanım ve hatta kullanım esnasında dilatörlerin yerinden çıkması gibi durumlar yaşanabilmektedir.



Şekil 4: Nazal dilatör örnekleri a) internal nazal dilatörler b) Eksternal nazal dilatörler

## 5. Materyal ve Metot

Bu çalışmada izlenen iş adımları; 3B nazal valf izinin kil malzemesi kullanılarak alınması, mobil fotogrametri ile kalıbın 3B modelinin oluşturulması, 3B kalıp modeline göre burun dilatörünün tasarlanması, hava akışını arttıracak şekilde geliştirilmesi ve son olarak dilatör modelinin eklemeli imalat yöntemine göre çalışan bir FDM 3B yazıcı ile üretilmesinden oluşmaktadır (Şekil 5)



Şekil 5: Kişiyi özel nazal dilatörün tasarımı ve üretimi için uygulanan iş akış şeması

## 6. Burun Nazal Valf Kalıbının Alınması

Burun nazal valf kalıbının alınması için kil malzemesinden yararlanılmıştır. Kil yapısı itibariyle su çekme özelliğine sahiptir. Su ile teması sonucunda yumuşak, şekil alabilen bir malzemeye dönüşmektedir. Aynı zamanda sağlık açısından uygun, doğal bir malzemedir. Işığı absorbe ederek yansımaların oluşmasına izin vermeyen mat görünümlü kil dokusu fotogrametrik modelleme için oldukça uygundur. Kilden yapılmış objeler karmaşık yüzey yapılarına sahip olsalar dahi fotogrametri ile başarılı bir şekilde modellenebilmektedirler (Surmen 2023). Bu nedenle burun nazal valf kalıbının alınmasında kil malzemesinden faydalanılmıştır.



Şekil 6: Nazal valf izinin kalıbı

Uygun miktardaki kil suyla yumuşatılarak şekil alabilecek kıvama getirildikten sonra her iki burun girişinden nazal valfe doğru el ile uygulanmıştır. Kil malzemesi burnun giriş kısmını içeriden kaplayacak şekilde uygun derinlikte (15 mm) yerleştirildikten sonra kuruması için bir süre bekletilmiştir. Kuruyan kalıp çıkartılarak 3B modelleme için hazır hale gelmiştir ("Şekil 6").

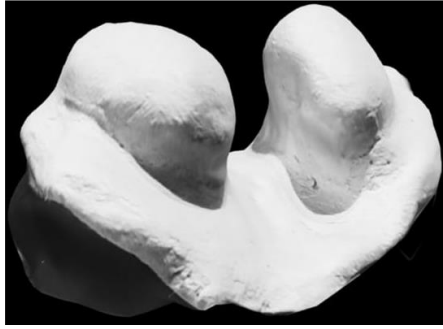
## 7. Burun Dilatörünün Tasarlanması

Fotogrametri genel olarak hava ve karasal fotogrametri olarak ikiye ayrılır. Karasal fotogrametri 300 metrenin altındaki mesafelerde yakın mesafe fotogrametrisi olarak adlandırılır (Surmen 2022). Görüntülerin arada temas olmadan elde edilmesi ve elde edilen bu görüntülerin işlenerek modelin oluşturulması prensibine dayanır (Oruç 2021). Eskiden haritalama alanında kullanılan fotogrametri günümüzde objelerin 3B modellerinin üretilmesinde kullanılmaktadır. Bu amaçla kullanılan yöntem resim tabanlı modelleme (image-based modeling), 3B fotogrametri (3D photogrammetry), fotogrametrik modelleme gibi isimlerle de anılmaktadır.

3B fotogrametri, bir objenin veya çevrenin birbiriyle örtüşen farklı açılardan çekilmiş 2B fotoğraflarının bir fotogrametri yazılımı ile birleştirilmesi neticesinde 3B modelinin elde edildiği bir rekonstrüksiyon yöntemidir (Surmen 2023). Bu yöntem gelişmiş fotoğraf

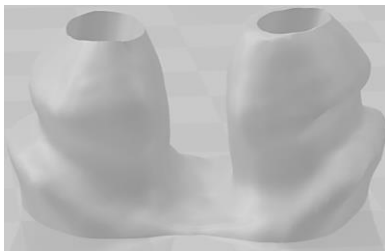
makinelerinin yanı sıra mobil telefonlarla da uygulanabilmektedir ve biyomedikal (Ravi vd. 2021, Surmen vd. 2016), mimarlık (Asadpour 2021), dijital dökümantasyon (Uslu ve Uysal 2021) ve arkeoloji (Yiğit ve Uysal 2021) gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Bilgisayar yazılımlarının yanı sıra Android ve IOS işletim sistemleriyle çalışan mobil telefonlar için de geliştirilmiş birçok fotogrametri yazılımı mevcuttur (Surmen 2022).

Bu çalışmada AR Generation/MagiScan 3B mobil fotogrametri yazılımı ve Android işletim sistemiyle çalışan bir mobil telefon kullanılarak nazal valf kalıbının 3B modeli elde edilmiştir. Nazal valf izi alınarak elde edilen kil kalıbın uygun ışık altında farklı açılardan fotoğrafları tüm yüzey detaylarını kapsayacak şekilde çekilmiştir. Fotoğraflar MagiScan 3B yazılımı tarafından işlenerek kil kalıbın 3B modeli üretilmiştir ("Şekil 7").



Şekil 7: Nazal valf izinin 3B modeli

Fotogrametri yöntemi ile elde edilen burun kalıbının üç boyutlu modeli temel alınarak nazal dilatörünün ilk tasarımı açık kaynaklı Blender Foundation/Blender ve Autodesk/Fusion 360 yazılımları kullanılarak düzenlenmiştir. 3B geometrik verisi elde edilen burun kalıbının yüzey pürüzsüzlüğünü sağlamak için Blender yazılımının şekillendirme modu olan "sculpting mode" kullanılmıştır. Modelin hava kanallarını açmak için için için Fusion 360 yazılımı kullanılmıştır. İçi boşaltılan modelin çeperleri hava akışını arttırmak için %10 genişletilmiştir. Ayrıca burun dilatörünün burundan çıkmasını engellemek için modelin tasarımı geliştirilmiştir ("Şekil 8").



Şekil 8: Kişiyi özel geliştirilmiş nazal dilatörün modifiye edilmiş 3B modeli

## 8. Burun Dilatörünün Üretilmesi

Eklemeli imalat, 3B geometrik verinin katmanlar halinde üretilerek bir nesneye dönüştürülmesi prensibine dayanan bir üretim yöntemidir. Eklemeli imalat prensibiyle çalışan 3B baskı teknolojileri serbest-formlu ve karmaşık geometrili objelerin üretiminde oldukça kullanışlıdır. Ayrıca seri üretime uygun olmayan kişiyi özel biyomedikal ürünlerin üretiminde eklemeli imalat, maliyet ve zaman açısından da avantaj sağlamaktadır (Sürmen 2019).

Günümüzde eklemeli imalat prensibinden faydalanan birçok 3B baskı teknolojisi mevcuttur. Bu teknolojilerden faydalanırken üretilmek istenen ürünün malzemesi ve kullanım şartları dikkate alınır. Bu çalışmada burun dilatörünün üretiminde FDM teknolojisinden yararlanılmıştır. FDM teknolojisinde filament halindeki termoplastik malzemeler kullanılarak üretim yapılabilmektedir. Filament ekstrüderden geçirilerek nozüle doğru itilir. Nozüle gelen filament yarı eriyik hale gelene kadar burada ısıtılır. Isıtılan filament basım tablasında katmanlar halinde basılarak bütün parça elde edilir (Sürmen 2019).

Nazal dilatör burun valfi içine yerleştirilen bir üründür; bu nedenle yumuşak bir malzemedan imal edilmesi konforu artırabilir. Ayrıca dilatörün burun çeperlerini genişletebilecek dirence sahip olması için malzemenin esnekliğinin doğru bir şekilde ayarlanması gerekmektedir. Bu çalışmada eklemeli imalat ile üretilmesi düşünülen burun dilatörü için Termoplastik Poliüretan (TPU) malzeme kullanılmıştır. Kullanılan TPU malzemesinin özellikleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

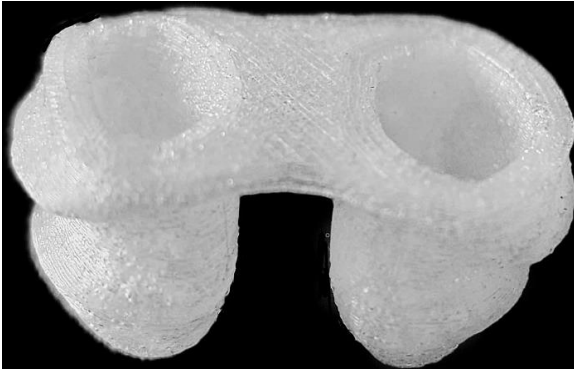
Tablo 1: 3B baskı işleminde kullanılan TPU filamentinin özellikleri

Baskı Sıcaklığı	220-240 °C
Çap	1.75 mm
Tabla Sıcaklığı	50-70 °C
Sıcaklık Direnci	70 °C
Uzama	> 500%

Tasarlanan burun dilatörünün üç boyutlu baskı ile üretilmesinde Tablo 2' deki veriler kullanılmıştır. Üç boyutlu baskı için Artillery, Sidewinder-X2 3B yazıcı kullanılmıştır. Baskı işlemi için Porima marka TPU Flex filament kullanılmıştır.

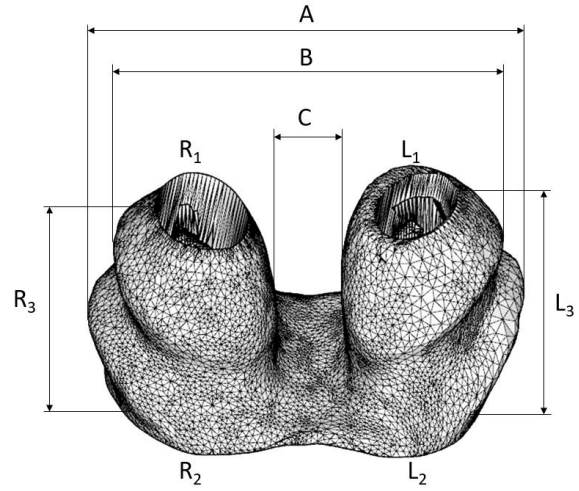
**Tablo 2:** 3B baskı parametreleri

Katman Yüksekliği	0.2 mm
Duvar Kalınlığı	1.32 mm
Duvar Hattı Sayısı	3
Dolgu Yoğunluğu	20%
Dolgu Deseni	Triangles
Baskı Sıcaklığı	230 °C
Tabla Sıcaklığı	60 °C
Baskı Hızı	60 mm/s

**Şekil 9:** 3B baskı ile üretilmiş kişiyi özel nazal dilatör

Nazal dilatör tasarımının üzerinde referans ölçüleri belirlenmiş ve bu ölçüler dikkate alınarak eklemeli imalat ile üretilen nazal dilatör ile boyutsal olarak karşılaştırılmıştır ("Şekil 10"). A ölçüsü dilatörün en uzak noktaları arasındaki en geniş mesafeyi tanımlamaktadır. B sağ ve sol kolonun en dış noktaları arasındaki mesafeyi, C ise kolonlar arasındaki iç mesafeyi göstermektedir. R sağ, L ise sol kolonu göstermektedir. R<sub>1</sub> sağ kolonun üst kısmını, R<sub>2</sub> alt kısmını ve R<sub>3</sub> yüksekliğini belirlemektedir. Tablo 3'te gösterilen R<sub>11</sub> üstteki eliptik olan deliğin kısa çapını, R<sub>12</sub> uzun çapını belirtmektedir. R<sub>21</sub> kanalın alt kısmındaki dışa açılan deliğin kısa çapını, R<sub>22</sub> uzun çapını göstermektedir. Benzer şekilde sol kolon için L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>, L<sub>3</sub>, L<sub>11</sub>, L<sub>12</sub>, L<sub>21</sub> ve L<sub>22</sub> ölçüleri tanımlanmıştır. Ölçüler dijital kumpas yardımıyla fiziki modelden elde edilmiş, 3B

modelden elde edilen ölçülerle karşılaştırılarak Tablo 3'te gösterilmiştir.

**Şekil 10:** Eklemeli imalat ile üretilen nazal dilatörün 3B modeli ile geometrik doğruluğunun kıyaslanmasında kullanılan referans ölçüler**Tablo 3:** Referans ölçülere göre 3B model ile eklemeli imalat ile üretilen ürünün geometrik doğruluğunun karşılaştırılması

Ölçüler	3B model (mm)	Ürün (mm)	Hata (mm)	Yüzde hata (%)
A	31,51	31,48	0,03	0,095
B	28,35	28,31	0,04	0,141
C	5,26	5,23	0,03	0,570
R <sub>11</sub>	6,38	6,31	0,07	1,097
R <sub>12</sub>	10,49	10,45	0,04	0,381
R <sub>21</sub>	9,21	9,18	0,03	0,325
R <sub>22</sub>	15,80	15,71	0,09	0,569
R <sub>3</sub>	13,97	13,90	0,07	0,501
L <sub>11</sub>	5,68	5,60	0,08	1,408
L <sub>12</sub>	9,12	9,05	0,07	0,767
L <sub>21</sub>	7,07	6,98	0,09	1,272
L <sub>22</sub>	15,52	15,48	0,04	0,257
L <sub>3</sub>	14,82	14,74	0,08	0,539
		Ortalama	0,058	0,609

3B baskı ile üretilen parçadan alınan ölçüler 3D modelin ölçülerine göre hep negatif yönde çıkmıştır. Boyutsal hata ortalaması 0,058mm olarak elde edilmiştir. Yüzde hata ortalaması ise %0,609 olarak hesaplanmıştır.

Eklemeli imalat ile üretilen ürün maliyet açısından da değerlendirilmiştir. Bir adet kişiyi özel nazal dilatör için harcanan süre, malzeme ve enerji Tablo 4'te verilmiştir. Tablonun son satırında toplam maliyet işçi ücreti hariç hesaplanmıştır.

**Tablo 4:** Bir adet kişiyi özel nazal dilatör için maliyet hesabı

Baskı süresi	39 dk
Harcanan filament uzunluğu	0.49 m
Harcanan filament miktarı	4 gr
Harcanan enerji	700 W/60 min x 39 min = 455 W
Bir adet için filament maliyeti	0.004 kg x 16.40 €/kg = 0.065 €
Bir adet için enerji maliyeti	0.455 kw x 0.035 €/kw = 0.015 €
Toplam maliyet	0.065 € + 0.015 € = 0.08 €

Bu çalışmada kullanılan Artillery Sidewinder-X2 3B yazıcısının elektrik harcaması saatte 700 W'tır. Yazıcının elektrik tüketim maliyeti hesaplanırken Türkiye'deki konut elektrik tüketim bedeli dikkate alınmıştır. Harcanan filament maliyeti Porima markasının 1 kg TPU Flex filament (16.40 €) dikkate alınarak hesaplanmıştır.

## 9. Tartışma

Bu çalışmada mobil fotogrametri yöntemi kullanılarak tersine mühendislik ile burun valfinin 3B modeli oluşturulmuş ve bu 3B model temel alınarak bir nazal dilatör, fonksiyon ve kullanım şartlarına göre tasarlanmıştır. Kişiyi özel olarak elde edilen bu tasarım daha sonra eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiştir.

Çalışmada nazal valfin izi kil malzemesi kullanılarak alınmıştır. Kuruyan kil malzemenin 3B modeli başarılı bir şekilde mobil fotogrametri ile bir akıllı telefon kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen yüzey model üzerinde dilatörün hava kanalları hava geçişini artıracak şekilde açık kaynaklı bir yazılım ile tasarlanmıştır. Modelin üretimi ise günümüzde yaygın olarak kullanılan masaüstü bir FDM 3B yazıcı ile yapılmıştır. Tasarımdan doğrudan üretime imkân veren 3B baskı teknolojisi sayesinde hat kurulumu ve yüksek ilk yatırım maliyetleri olmadan kişiyi özel olarak tasarlanmış olan nazal dilatörün üretiminde zaman ve maliyetten kazanç sağlandığı görülmüştür.

Basılan bir parçanın geometrik doğruluğu onun 3B modeline boyutsal olarak yakınlığı olarak bilinir. Bununla beraber boyutsal doğruluk bir 3B yazıcının katman kalınlığı, basım hızı ve basım sıcaklığından etkilenir. (Mohamed vd. 2014, Reddy vd. 2018). Bu nedenle çalışmada, kullanılan filamentin baskı parametreleri üretici firmanın önerdiği değerlere göre belirlenmiştir. Basılan ürünün boyutları, CAD modelin boyutları ile karşılaştırılmış ve ortalama boyutsal hata 0,058 mm ve

%0,609 ile kabul edilebilir bir seviyede olduğu anlaşılmaktadır (Hanon vd. 2021, Saqib vd. 2012). El hüneri ile yapılan burun protezi gibi medikal ürünlere göre bilgisayar destekli tasarım ve üretim metodları kullanılarak üretilen medikal ürünler daha yüksek doğruluk sağlayabilmektedir (Shikara vd. 2018). Ayrıca bu çalışmada nasal dilatörlerin farklı kişilerde kullanımı dikkate alındığında ve kişiyi özel nazal dilatör tasarımı sadece birkaç boyuta sahip standart nasal dilatörlerle karşılaştırıldığında ortalama 0,058 mm boyutsal sapmanın makul bir değer olabileceği görülmektedir. Bununla birlikte eklemeli imalat ile üretilen parçaların yüzey pürüzlülüğünü azaltmak, merdiven etkisini gidermek için son-işlem teknikleri uygulanabilir. Bu yöntemlerden en sık kullanılanı boncuk şeklindeki plastik, cam, kum gibi aşındırıcı malzemelerle yapılan kumlama işlemidir. Kumlama işlemi ABS ve PLA için yüksek yüzey hassasiyeti istendiğinde tercih edilen bir yöntemdir (Zigon vd. 2020). Bir diğer son-işlem tekniği, 3B baskılı ile üretilmiş ABS parçalarında uygulanan aseton buharlaştırmadır (Pestano vd. 2022). Ancak bu çalışmada kullanılan malzeme oldukça esnek olan, sert plastiklere göre daha yüksek darbe dayanımına ve kimyasallara karşı daha yüksek dirence sahip poliüretan bazlı yumuşak-TPU malzemedir ve bu tekniklerden verim alınamamaktadır (Boualleg 2019). Ayrıca TPU, yüksek sünekliğinden dolayı boyama ve kaplama gibi yöntemler için de elverişli değildir. Bunun dışında sıcak hava tabancası ile yüzeylerin kısmen eritilerek pürüzlülüğünün giderilmesi için yapılan bazı amatör uygulamalar da mevcuttur. Ancak manuel olarak uygulanan bu yöntemde doğru hassasiyette ısı kontrolünün yapılabilmesi oldukça zordur ve boyutsal doğruluk büyük ölçüde etkilenmektedir. Bununla beraber pahalı bir yöntem olan, lazer ablasyon tekniğinden yararlanılarak (Boualleg 2019) eklemeli imalat ile üretilmiş TPU parçaların yüzey son-işlemleri için çözüm aranmaktadır.

Çalışmada elde edilen bir burun dilatörü için maliyet, işçi ücretleri hariç harcanan enerji ve malzeme dikkate alındığında ortalama 0.08 € olarak belirlenmiştir. Maliyeti ve baskı süresini düşürmek için farklı hastalara ait çok sayıda nazal dilatör modeli baskı platformu üzerine konumlandırılarak 3B baskı ile üretim yapılabilir. Bu durumda yazıcı, her baskı işlemi için ekstrüderi ve baskı platformunu yeniden ısıtmayacağı ve ara işlemler olmayacağı için hem baskı süresi hem de harcanan enerji azalacaktır. Böylece bir nazal dilatör için maliyet daha da düşürülebilir.

Kişiyi özel medikal ürünler tasarlanırken organik yapıların bilgisayar destekli tasarım yazılımları ile zor

modellenmesinden dolayı üç boyutlu tarama tekniklerinden faydalanılmaktadır. Bu tip medikal uygulamalarda sıklıkla kullanılan bilgisayar tomografi yöntemi hastayı potansiyel olarak zararlı radyasyona maruz bırakır. Ayrıca bu işlem ek bir maliyet de doğurur (Shikara vd. 2018). Bu çalışmada ise kişiyi özel nazal dilatör tasarımında faydalanılan fotogrametri yöntemi herhangi bir radyasyon ve zararlı bir dış etkiye neden olmaz ve düşük maliyetli bir yöntemdir.

## 10. Sonuç

Günümüzde burun ve kulak için kişiyi özel protezler tasarlanıp üretilebilmektedir (Mannoor vd. 2013, Deruyver vd. 2021). Bununla birlikte bu çalışmada nazal dilatörler için eklemeli imalat ile kişiyi özel tasarım anlayışı ileri sürülmüş ve bu cihazların tasarım ve üretiminde tersine mühendislik ve 3B baskı teknolojilerinin kullanımı başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Her kullanıcının burun yapısına göre tasarlanan cihazlar sayesinde konforlu bir kullanım sağlanabilir, standart boyutlu nazal dilatörlerden kaynaklanan rahatsızlıklar ve negatif durumların önüne geçilebilir. Seri üretime uygun olmayan kişiselleştirilmiş tasarımların üretiminde oyun değiştirici bir teknoloji olan 3B baskı ile maliyet ve üretim zamanı önemli ölçüde azaltılabilir. Ayrıca çalışmada ileri sürülen yöntem, tasarım esnasında bilgisayar ortamında model üzerinde hastaya özel hassas modifikasyonların yapılabilmesine de izin vermektedir.

Bu çalışma ile kişiyi özel bir nazal dilatörün tasarım ve üretim aşamaları detaylı bir şekilde ortaya konulmuş ancak herhangi bir klinik çalışma yapılmamıştır. Gelecek çalışmalarda belirtilen iş akışına göre kişiyi özel olarak üretilen dilatörler hastalar için tasarlanıp üretilebilir ve klinik sonuçları ortaya konularak standart dilatörlerle kullanım ve fonksiyonellik açısından karşılaştırılabilir.

## Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

## Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Fikir Sahibi, Araştırma, Metodoloji, Tasarım, Üretim, Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak, Kaynaklar

Yazar 2: Deney, Araştırma, Tasarım, Üretim, Doğrulama, Metodoloji, Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak, 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.

## 11. Kaynaklar

Akçam, T., Karakoç, Ö., Karahatay, S., & Yetişer, S. (2005). Burun Genişletici Bantların ve Lokal Dekonjestanların Nazal Hava Yoluna Etkileri. *The Turkish Journal Of Ear Nose And Throat*, **15(5)**, 97-102.

Asadpour, A. (2021). Mobile Photogrammetry for Architectural Documentation: Tips from a Case Study. *Academia Letters*, **1-9**.  
<https://doi.org/10.20935/AL2085>

Boualleg, A. (2019). Investigations on post-processing of 3D printed thermoplastic polyurethane (TPU) surface. Halmstad University, 63

Deruyver, L., Rigaut, C., Lambert, P., Haut, B., & Goole, J. (2021). *The importance of pre-formulation studies and of 3D-printed nasal casts in the success of a pharmaceutical product intended for nose-to-brain delivery*. *Advanced drug delivery reviews*, **175**, 113826.  
<https://doi.org/10.1016/j.addr.2021.113826>

Eser, C., Gencil, E., Tabakan, I., Kesiktaş, E., & Yavuz, M. (2015). Travmatik Nazal Deformasyonu Olan Olgularda Uygulanan Osteotomili ve Osteotomisz Açık Septorinoplasti Yöntemlerinin Karşılaştırılması. *Cukurova Medical Journal*, **40(4)**, 738-745.  
<https://doi.org/10.17826/cutf.22407>

Fairbanks, D. N., Mickelson, S. A., & Woodson, B. T. (Eds.). (2003). *Snoring And Obstructive Sleep Apnea*. Lippincott Williams & Wilkins.

Hanon, M. M., Zsidai, L., & Ma, Q. (2021). Accuracy investigation of 3D printed PLA with various process parameters and different colors. *Materials Today: Proceedings*, **42**, 3089-3096.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.1246>

Herbert, N., Simpson, D., Spence, W. D., & Ion, W. (2005). A preliminary investigation into the development of 3-D printing of prosthetic sockets. *Journal of Rehabilitation Research & Development*, **42(2)**.  
<https://doi.org/10.1682/JRRD.2004.08.0134>



- Hudgel, D. W., & Harasick, T. H. E. R. E. S. A. (1990). Fluctuation in timing of upper airway and chest wall inspiratory muscle activity in obstructive sleep apnea. *Journal of Applied Physiology*, **69(2)**, 443-450. <https://doi.org/10.1152/jappl.1990.69.2.443>
- Jiang, R., Jáuregui, D. V., & White, K. R. (2008). Close-range photogrammetry applications in bridge measurement: Literature review. *Measurement*, **41(8)**, 823-834. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2007.12.005>
- Karataş, D. (2012). Yüksek İrtifada Burun Fizyolojisi. *Eur J Basic Med Sci*, **2(1)**, 24-29. <https://doi.org/10.21601/ejbms/9172>
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Boehm, J. (2019). Close-Range Photogrammetry And 3d İmaging. In Close-Range Photogrammetry And 3d Imaging. De Gruyter. 1-27 <https://doi.org/10.1515/9783110607253>
- Mannoor, M. S., Jiang, Z., James, T., Kong, Y. L., Malatesta, K. A., Soboyejo, W. O., ... & McAlpine, M. C. (2013). 3D printed bionic ears. *Nano letters*, **13(6)**, 2634-2639. <https://doi.org/10.1021/nl4007744>
- Matteo, G., Giuseppe, P., Brigida, S., Nicola, Q., Giorgio, C., & On Snoring, I. S. G. (2019). Internal And External Nasal Dilatator İn Patients Who Snore: A Comparison İn Clinical Practice. *Acta Bio Medica: Atenei Parmensis*, **90(2)**, 10.
- Matteo, G., Pierluigi, I., Giuseppe, P., Vitaliano, N. Q., Onofrio, R., Nicola, Q., & Giorgio, C. (2019). Internal Nasal Dilator İn Patients With Obstructive Sleep Apnea. *Acta Bio Medica: Atenei Parmensis*, **90(2)**, 19.
- Matteo, G., & Giorgio, C. (2019). The Clinical İmportance Of The Nasal Valfe. *Acta Bio Medica: Atenei Parmensis*, **90(2)**, 31
- Matteo, G., Pierluigi, I., Giuseppe, P., Vitaliano, N. Q., Onofrio, R., Nicola, Q., & Giorgio, C. (2019). Internal Nasal Dilator İn Patients With Obstructive Sleep Apnea Syndrome And Treated With Continuous Positive Airway Pressure. *Acta Bio Medica: Atenei Parmensis*, **90(2)**, 24.
- Matteo, G., Pierluigi, I., Giuseppe, P., Vitaliano, N. Q., Onofrio, R., Nicola, Q., & Giorgio, C. (2019). Internal Nasal Dilator İn Patients With Obstructive Sleep Apnea. *Acta Bio Medica: Atenei Parmensis*, **90(2)**, 19.
- Mohamed, O. A., Masood, S. H., & Bhowmik, J. L. (2015). Optimiz"ation of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. *Advances in manufacturing*, **3**, 42-53. <https://doi.org/10.1007/s40436-014-0097-7>
- Mukhtarova, E. (2020). Nazal Septal Perforasyon Onarımında Kompozit Kıkırdak Greft ve Trombositten Zengin Plazma Uygulanması: Deneysel Çalışma. Uzmanlık Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Meram Tıp Fakültesi, Konya, 52
- Pestano, V., Oliveira, M. P. D., & Silva, F. P. D. (2022). Effect of acetone vapor smoothing process on surface finish and geometric accuracy of fused deposition modeling ABS parts. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, **10(10)**, 1-9. <https://doi.org/10.4236/msce.2022.1010001>
- Oruç, M. E. (2021). Küçük Objelerin Modellenmesinde Videogrametri ve Fotogrametri Yöntemlerinin Karşılaştırılması Üzerine Bir Çalışma. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, **3(2)**, 62-68. <https://doi.org/10.53030/tufod.1019385>
- Petruson, B. (1989). Better sleep with dilated nose. *Rhinology*, **27(3)**, 211-3.
- Rahmanimirshekarlou, R., & Tunçer, N. İ. (2022). Ortodontide 3 Boyutlu Teknolojiler. *Sağlık Bilimlerinde*, Prof. Dr. Engin Şahna, Prof. Dr. Hasan Akgül (Editörler), Gece Kitaplığı, 33-48.
- Ravi, T., Ranganathan, R., Ramesh, S. P., & Dandotiya, D. S. (2021). 3D Printed Personalized Orthotic Inserts Using Photogrammetry and FDM Technology. Fused Deposition Modeling Based 3D Printing, Dave, H.K., Davim, J.P., Springer, 349-361. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-68024-4\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-030-68024-4_18)
- Reddy, V., Flys, O., Chaparala, A., Berrimi, C. E., Amogh, V., & Rosen, B. G. (2018). Study on surface texture of Fused Deposition Modeling. *Procedia Manufacturing*, **25**, 389-396. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.108>
- Saqib, S.; Urbanic, J. (2012). An experimental study to determine geometric and dimensional accuracy impact factors for fused deposition modelled parts. In Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability, Hoda A. ElMaraghy, Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, pp. 293–298. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-23860-4\\_48](https://doi.org/10.1007/978-3-642-23860-4_48)

- Shikara, M., Rizzi, C. J., Zelig, B., Hubbard, F., Vakharia, K. T., Isaiah, A., & Vakharia, K. T. (2018). Assessment of a novel computer algorithm for printing a 3-dimensional nasal prosthetic. *JAMA Otolaryngology–Head & Neck Surgery*, **144(7)**, 557-563.  
<https://doi.org/10.1001/jamaoto.2018.0360>
- Surmen, K., Ortes, F., & Arslan, Y. Z. (2016). Design and production of subject specific insole using reverse engineering and 3D printing technology. *Int J Eng Sci Invent*, **5(12)**, 11-15.
- Surmen, H. K. (2023). Photogrammetry for 3D Reconstruction of Objects: Effects of Geometry, Texture and Photographing. *Image Analysis & Stereology*, **42(2)**, 51-63.  
<https://doi.org/10.5566/ias.2887>
- Sürmen, H. K. (2019). 3d Baskı Yöntemi ile Hastaya Özel Ortez İmalatı. 4th International Congress On 3d Printing (Additive Manufacturing) Technologies And Digital Industry, 1388-1395.
- Sürmen, H. K. (2019). Eklemeli İmalat (3b Baskı): Teknolojiler ve Uygulamalar. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, **24(2)**, 373-392.  
<https://doi.org/10.17482/uumfd.519147>
- Sürmen, H. K., 2022. Fotogrametri ile Üç Boyutlu Tarama – 3B Fotogrametri, Mühendislik Alanında Uluslararası Araştırmalar-I, Serüven Yayınevi, 173-196
- Tahamiler, R., Işıldak, H., & Çanakçıoğlu, S. (2007). Rinitli Hastalarda Burun Tıkanıklığının Objektif Ölçümü İçin Rinomanometri. *Cerrahpaşa Tıp Dergisi*, **38(1)**, 11-15.
- Ulfberg, J., & Fenton, G. (1997). Effect Of Breathe Right Nasal Strips On Snoring. *Rhinology*, **35**, 50-52.
- Uslu, A., & Uysal, M. (2021). Kitle kaynaklı fotoğraflar kullanılarak kültürel mirasın üç boyutlu modellenmesi ve web tabanlı görselleştirilmesi: Afrodisias-Tetrapylon örneği. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **21(3)**, 632-639.  
<https://doi.org/10.35414/akufemubid.889211>
- Varolüneş, A. (2010). Horlama ve Obstrüktif Sleep Apne Sendromu Hastalarında Damak Radyofrekans Uygulanması Etkinliğinin Değerlendirilmesi, Uzmanlık Tezi, Dicle Üniversitesi Tıp Fakültesi, Diyarbakır, 45.
- Yiğit, A. Y., & Uysal, M. (2021). Tarihi Eserlerin 3B Modellenmesi ve Artırılmış Gerçeklik ile Görselleştirilmesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, **8(2)**, 1032-1043.  
<https://doi.org/10.35193/bseufbd.1011064>
- Yüksel, H., & Bulut, M. O. (2019). Üç Boyutlu Tarama Sistemleri. *Tekstil ve Mühendis*, **26(116)**, 406-414.  
<https://doi.org/10.7216/1300759920192611612>
- Zigon, J., Kariz, M., & Pavlic, M. (2020). Surface finishing of 3D-printed polymers with selected coatings. *Polymers*, **12(12)**, 2797.  
<https://doi.org/10.3390/polym12122797>
- Zuniga, J. M., Dimitrios, K., Peck, J. L., Srivastava, R., Pierce, J. E., Dudley, D. R., ... & Knarr, B. A. (2018). Coactivation index of children with congenital upper limb reduction deficiencies before and after using a wrist-driven 3D printed partial hand prosthesis. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, **15(1)**, 1-11.  
<https://doi.org/10.1186/s12984-018-0392-9>

## Robot Nokta Kaynaklarında Smartblock™ ile Elektrot Bileme Sıklığı, Kaynak Akımı ve Süresinin Taguchi Metodolojisi Kullanılarak Araştırılması

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 05.08.2023

Kabul/Accepted: 19.01.2024

Yayımlandı/Published: 27.02.2024

### Investigation on Dressing Frequency, Welding Current and Time Using Taguchi Methodology in Robotic Spot Welding with Smartblock™

Hilal KIR<sup>1\*</sup>, Şükrü KARABULUT<sup>1</sup>, Mustafa YAZAR<sup>2</sup>, Şükrü TALAŞ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye

<sup>2</sup>AR&GE Merkezi, Şahinkul Makina ve Yedek Parça Sanayii ve Ticaret A.Ş. Bursa, Türkiye

<sup>3</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

Robot direnç nokta kaynaklarında elektrot aşınması ve efektif kullanımı iyi takip edilmesi gereken bir durumdur. Erkenden değiştirilen bir elektrot veya kullanım süresini aşan bir elektrodun getireceği fayda-zarar etkisi maliyetlere olumsuz olarak yansımaktadır. Elektrotların direnç nokta kaynağı boyutlarının şartnameye uygun oluşturması beklenirken aşınma ile beraber kaynak çekirdek boyut ölçümleri beklenen değerlerden farklı çıkmaktadır ve bu sorunun çözümü için elektrot bileme işlemi uygulanmaktadır. Bu çalışmada, prosesin otomatik hale getirilmesi Smartblock™ vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir ve "Smartblock™" kontrol algoritması kullanılarak bileme sıklığı, kaynak akımı ve süresinin robot nokta kaynaklarındaki en son çekirdek çap özelliklerine etkisi çalışılmıştır. En uygun elektrot bileme frekansı olarak 70 nokta kaynağı bulunurken, 100 ms kaynak süresi ve 8 kA kaynak akımı en iyi nokta kaynağı için diğer optimum parametreler olarak ortaya çıkmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Nokta Kaynağı, Elektrot Bileme, Taguchi Metodolojisi, Smartblock™

#### Abstract

Electrode wear and its effective use in robotic resistance spot welding are a condition that should be followed closely. The benefit-harm effect of an electrode that is replaced early or an electrode that exceeds its lifespan is reflected negatively on costs. While it is expected that the electrodes will give the resistance spot welding form in accordance with the specification; the weld nugget diameter measurements are different from the expected values due to wear and the electrode dressing process is applied to solve this problem. In this study, the automation of this process was carried out by means of the Smartblock™ and the effects of dressing frequency, welding current and time on the final nugget diameter properties of robot spot welds were studied using the "Smartblock™" control algorithm. As 70 spot welds were found as the most suitable electrode dressing frequency, 100 ms welding time and 8 kA welding current were the other optimum parameters for better spot welding.

**Keywords:** Spot Welding, Electrode Dressing, Taguchi Methodology, Smartblock™.

#### 1. Giriş

Otomotiv sanayisinde en yaygın kullanılan kaynak yöntemlerinden biri direnç nokta kaynağıdır (Ogawa vd. 2022, Soomro vd. 2022, Arslan ve Karabaş 2019). Direnç nokta kaynak yönteminde, kaynak metalleri iki elektrot arasına üst üste yerleştirilerek metaller üzerinden akım geçirilmesi şeklinde uygulanır. Bu akım ile üretilen ısı sac malzemeleri eriterek erimiş bir kütle, yani kaynak çekirdeğini oluşturmaktadır. Kaynak döngüsü sırasında oluşan eriyik hacmin soğuması beklenerek direnç nokta kaynağı tamamlanmaktadır (DiGiovanni vd. 2020). Sac-saca nokta kaynağı olan direnç nokta kaynağı hızlı bir yöntemdir ve bakımı kolaydır; bu sebeple, seri üretimde yaygın olarak tercih edilmektedir. Ayrıca araçlarda çarpışma anındaki kaynaklı yapıların bütünlüğünü

korumada ve darbe sönümlenmede önem taşımaktadır (Sabırlı ve Fığlalı 2020, Ma vd. 2021). Direnç nokta kaynağının yaygın kullanılma sebeplerinden biri de düşük üretim maliyeti ve yüksek verimlilik sağlamalarıdır (Chen vd. 2020). Ark kaynaklarıyla karşılaştırıldığında bu yöntemde zararlı gaz üretilmediği için yeşil kaynak yöntemi olarak da bilinmektedir (Bozkurt ve Keleş 2017, Deepati vd. 2021). Geleneksel kaynak yöntemlerine göre uygulanması için herhangi dolgu metaline ve kalifiye elemana ihtiyaç duyulmaması sebebiyle otomasyona uygundur (Deepati vd. 2021).

Bu kaynak metodunda bir süre sonra kaynak elektrotları aşınarak baskı yüzey çapları değişmeye başlamaktadır (Pashazadeh vd. 2016). Kaynak işlemi sırasında elektrotlarda meydana gelen aşınma, keplerin sürekli

yüksek sıcaklık, kaynak baskı kuvveti ve ani ısı değişimlerine bağlı olarak meydana gelmektedir (Açış ve Talaş 2023). Kaynak keplerinde meydana gelen bu değişimler kaynak kalitesini düşürmektedir. Kaynak kalitesinin sağlanması için aşınan kep ucuna bileme işlemi yapılmaktadır. Bileme işlemi geç yapılırsa kaynak kalitesini olumsuz etkilediği gibi erken yapılırsa da üretim hattının gereksiz durdurulmasına ve elektrodun gereken zamanından önce değiştirilmesine neden olmaktadır. Bu da üretim maliyetlerini arttırmaktadır (Pashazadeh vd. 2016). Direnç nokta kaynağı sırasında karşılaşılan diğer hatalardan bazıları; fazla kaynak ucu uzunluğu, kaynak uçları arasındaki merkezleme farklılığıdır. Kaynak uçları arasındaki merkez farklılığı elektrodun yanlış hizalanmasından, uyumun zayıf olmasından kaynaklanabilmektedir. Bu durum asimetrik kaynak dikişine sebep olmaktadır (Xing vd. 2018).

Direnç punta veya nokta kaynağı otomotiv, beyaz eşya gibi büyük sanayi kollarında kullanılması sebebiyle enerji verimliliğini sağlamak ve kaliteli ürün elde etmek için süreç-parametre optimizasyonuna ihtiyaç duymaktadır. Direnç nokta kaynak yönteminde sacların kaynaklanabilirliğini arttırmak, elektrot ömrünü iyileştirmek amacıyla farklı elektrot uç geometrileri üzerinde çalışılmıştır. Dört farklı geometrideki konik yuvarlak, düz Radius 3, düz Radius 6 ve düz konik nokta kaynak elektrot uç geometrileri ile aynı parametre değerlerinde deneysel olarak çalışılan kaynak işleminin sonucunda kaynak çekirdekleri incelenmiştir. Çalışma sonucunda çekirdek çapları analiz edildiğinde en yüksek çap değerinin düz Radius 3 elektroduyla ve en düşük çekirdek çapının ise düz konik elektrot ucuyla elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır (Demir vd. 2021). Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde nokta kaynak kalitesini arttırmak amacıyla elektrot uçlarının iç bükey geometriye sahip olarak da çalışılabileceği görülmüştür (Chen vd. 2020, Kim vd. 2016, Liv d. 2021, Watmon vd. 2020). Optimum kaynak parametreleri belirlenirken gri ilişki analizi, çoklu regresyon analizi ve genetik algoritma yaklaşımlarının birlikte kullanılması ile kaynak kalitesinin iyileştirildiği çalışmalar mevcuttur (Wan vd. 2016). Wan ve ark. (2016) ise yaptıkları çalışmada titanyum alaşımı için direnç nokta kaynağında çeşitli kalite özelliklerini öngörerek optimizasyon çalışmasına odaklanarak, optimum kaynak parametrelerini tahmin etmek amacıyla gri ilişki analizi, çoklu regresyon analizi ve genetik algoritma yaklaşımlarını kullanmışlardır. Bu algoritmalarından elde edilen çıktıları deneysel verilerle karşılaştırarak kaynak kalitesinin iyileştiği sonucuna ulaşmışlardır. Birden fazla yanıtı olan karmaşık çözümlü optimizasyon çalışmalarında gri sistem tabanlı analizler

de kullanılmaktadır. Otomotivde çelik sacların kaynak proseslerinde optimum kaynak parametrelerini elde etmek için deneysel tasarım yöntemi olan Taguchi Metodu yaygın olarak tercih edilmektedir. Belirlenen parametre sayısına göre deney matrisi oluşturulmuştur. Çalışma sonuçları kaynak çekirdek çapı kaynak kopma kuvveti gibi değerlere bağlı olarak ANOVA yöntemi ile değerlendirilmektedir (Ertek 2019, Mat Yasin vd. 2019). TWIP çelik sacların direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesi operasyonunda kaynak parametrelerinin optimizasyonu için gerçekleştirilen deneysel tasarımda L9 ortogonal Taguchi metodu kullanılmıştır. Optimum kaynak parametreleri mukavemet ve en iyi çekirdek çapını veren değerlere göre belirlenmiş ve mukavemet üzerinde etkili parametrenin kaynak akımı olduğu, kaynak çekirdek çapı için ise kaynak zamanı olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Ertek 2019). Bir başka çalışmada ise, direnç nokta kaynağında kaynak parametrelerinin optimizasyonu L9 ortogonal Taguchi metodunu kullanarak 1,2 mm kalınlığındaki düşük karbonlu çeliğin kaynak operasyonu için kullanılmış ve değişken elektrot kuvveti, kaynak akımı ve kaynak sürelerinin optimum değerleri bulunmuştur. Varyans analizi (ANOVA) yöntemi ile yapılan değerlendirme sonucuna göre, kaynak akımı ve süresi optimum sonuçları etkileyen ana parametreler olarak ortaya çıkmıştır (Mat Yasin vd. 2020).

Bu çalışmada, direnç nokta kaynağı MFDC trafolu punta kaynak robotu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. FEE 420 çelik sacların nokta kaynak parametrelerinin optimizasyon çalışması literatürdeki çalışmalardan farklı olarak Smartblock™ sistemi (Smartblock™ Tanıtım Broşürü 2020) kullanılarak bilenen elektrotlar ile yapılmıştır. Direnç nokta kaynağında enerji verimliliğinin artırılması amaçlandığı çalışmada deney tasarımı için L18 ortogonal Taguchi metodu kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kaynak akımı, kaynak zamanı ve elektrot ucunun bileme zamanı değişken parametrelerdir, impuls değeri ve baskı kuvveti ise sabit değerlerdir. İmpuls ve baskı kuvveti sabit tutularak değişken parametrelerin kaynak çekirdeği üzerindeki etkileri görülmek istenmektedir. Optimum direnç nokta kaynak parametreleri, tolerans değerleri aralığındaki en büyük çekirdek çapına göre belirlenmiştir. Sonuçların analizi için sinyal/gürültü oranı (S/N) ve varyans analizi (ANOVA) yöntemleri kullanılmıştır.

## 2. Malzeme ve Metot

Üretim hattında verimsizliğe neden olacak hat duruşlarının veya hataların önceden tahmin edilerek

önlenmesi gerekir. Smartblock™ sistemi ile kaynak ucu, kaynak akım ve kuvveti sistematik olarak takip edilebilmektedir. Smartblock™ sistemi (Şekil 1), kaynak robotlarında harici bir ölçüm terminali oluşturarak kaynak hatalarına neden olacak uygunsuzlukları önlemektedir. Kaynak robot kolu, belirlenen periyotlarla bu harici sisteme gelmektedir. Periyodik kontrollerle kaynak operasyonundaki akım gücü, baskı kuvveti ve kaynak ucunun (keplerinin) geometrisi ölçülmektedir. Smartblock™ sistemi ile kaynak parametre değerleri belirlenen tolerans değerinden yüksek bulunursa, bu durum hata olarak iletilmektedir. Hatalı değerler e-posta ile iletilerek kaynak robotu durdurulmaktadır. Yapılan kontrollerin ardından kaynak kalitesine uygunluğu değerlendirilerek gerekirse kaynak parametreleri değiştirilmektedir.



Şekil 1. Nokta kaynak elektrodu bileme için kullanılan "Smartblock™" istasyonu.

Bu çalışmada, kaynak robot hücrelerine harici bir Smartblock™ sistemi eklenerek, kaynak parametreleri ölçülmüş ve sonuçlar Taguchi yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışmada 70 adet nokta kaynağı ile 120 adet nokta kaynağı sonrasında bileme operasyonu yapılmış, iki elektrodun farklı kaynak akımı (7,5-8-8,5 kA) ve farklı kaynak sürelerinde (90, 100 ve 110 ms) deneysel analizleri yapılmıştır. Deneysel tasarım için Minitab 18 programı ile S/N oranına göre analiz amaçlı Taguchi ortogonal L18 metodu kullanılmıştır (Çizelge 1). Deney sonuçları sac-saca bindirme nokta kaynağı için ölçülen çekirdek çap değerlerine göre analiz edilmiştir.

## 2.1. FEE 420 Sac Malzeme

Bu çalışmada, otomotiv sanayinde yaygın olarak kullanılan 1.5 mm kalınlığındaki FEE 420 sac malzemenin nokta kaynağı ile sac-saca puntalama işlemi için optimum parametre değerleri analiz edilmiştir. Çeliğin mekanik özellikleri Çizelge 2'de, kimyasal özellikleri ise Çizelge

3'te gösterilmiştir. FEE 420 sac malzemeye deneysel analiz için L18 Taguchi metoduyla belirlenen parametre değerlerine bağlı olarak nokta kaynak işlemi uygulanmıştır. Kaynak elektrotlarında bileme periyodunun etkisini inceleyebilmek için 70 ve 120 adet nokta kaynak operasyonundan sonra elektrotlar bilenmiştir. Deneysel çalışmada kaynak impuls değeri 2 ve kaynak baskı kuvveti 330 daN sabittir. Kaynak elektrodu optimum bileme periyodu için kaynak akımının ve kaynak sürelerinin farklı parametre değerleri çalışılmıştır. Kaynak akımı 3 farklı değer olarak 7.5, 8.0 ve 8.5 kA olarak, kaynak süresi de 3 farklı değişken olarak 90, 100 ve 110 ms için araştırılmıştır. Çizelge 4'te nokta kaynağının kaynak işlem parametreleri ve seviyeleri gösterilmiştir.

Çizelge 1. Deney parametrelerini gösteren L18 deney sayılı Taguchi çalışma tablosu (P: punta sayısı).

Deney No	(A) Kaynak elektrodu bileme periyodu	(B) Kaynak akımı (kA)	(C) Kaynak zamanı (ms)
1	70P	7,5	90
2	70P	7,5	100
3	70P	7,5	110
4	70P	8,0	90
5	70P	8,0	100
6	70P	8,0	110
7	70P	8,5	90
8	70P	8,5	100
9	70P	8,5	110
10	120P	7,5	90
11	120P	7,5	100
12	120P	7,5	110
13	120P	8,0	90
14	120P	8,0	100
15	120P	8,0	110
16	120P	8,5	90
17	120P	8,5	100
18	120P	8,5	110

Çizelge 2. FEE 420 sac malzemenin mekanik özellikleri (İnt. Kyn. 1).

	Akma (Rp) N/mm <sup>2</sup>	Çekme (Rm) N/mm <sup>2</sup>
FEE 420	420-520	480 (min.)

Çizelge 3. FEE 420 sac malzemenin kimyasal özellikleri (% ağı.) (İnt. Kyn. 1).

% Element	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb
FEE 420	Max 0.12	Max 0.5	Max 1.6	Max 0.03	Max 0.03	Min. 0.01	0.015 0.040

## 3. Bulgular ve Tartışma

Deneysel analiz için L18 Taguchi metoduyla belirlenen ve Çizelge 1'de verilen parametre değerleri ile FEE 420 sac malzeme kullanılarak bindirme nokta kaynak işlemi uygulanmıştır. Kaynak elektrotlarında bileme

periyodunun etkisini inceleyebilmek için 70 ve 120 adet punta kaynak operasyonundan sonra elektrotlar Smartblock™ istasyonunda bilenmiştir.

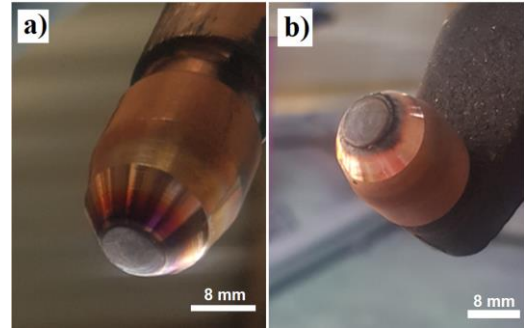
**Çizelge 4.** L18 Taguchi kaynak işlem parametreleri ve seviyeleri (P: Punta sayısı).

Sembol	Kaynak Parametreleri	Seviye	Seviye	Seviye
		1	2	3
A	Elektrot Bileme Sıklığı	70P	120P	-
B	Kaynak Akımı (kA)	7.5	8	8.5
C	Kaynak Süresi (ms)	90	100	110

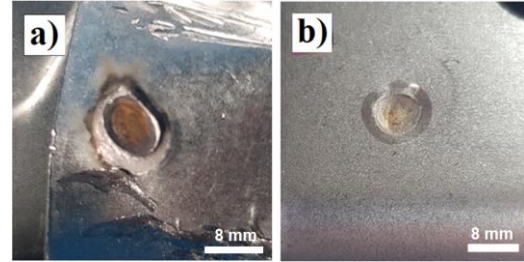
Belirlenen kaynak değerlerine göre 18 adet deney numunesi üzerinde çalışılmıştır. Şekil 2'de 70 ve 120 adet puntalama operasyonundan sonra çekilen nokta kaynak elektrotlarının makro görüntüleri verilmiştir. Nokta kaynak operasyonu sonrasında, elektrot yüzeyinde boyutsal değişimler ile şekilsel bozukluklar mevcut olup, özellikle 120 punta sonrası elektrot yüzeyinin (Şekil 2.b) deformasyonu sonucunda elektrot baskı yüzeyinde deformasyondan kaynaklı taşmalara sebep olduğu görülmektedir. Elektrot baskı yüzeyi çeperinde deformasyondan dolayı taşmalar oluşturması ardından elektrodun bu kısımlarının parçalanıp kaynak alanında yapışmalara ve hatta kaynak bölgesine bakır transferine kadar giden hasarlara sebep olmaktadır (Kekik vd. 2021). Bu tür elektrot baskı yüzey bozukluklarının genel olarak elektrik ısıtma yani Joule etkisi sonucu sac malzemede oluşan sıcaklık artışlarının bakır elektrotların plastik deformasyon kabiliyetini artırması ile beraber mantar etkisinin oluşması olarak tanımlanmaktadır (Bower vd. 1990). Bu etki, Şekil 2.a'da verilen 70 punta sonrası elde edilen elektrot baskı alanında daha az görülmektedir. Direnç nokta kaynağı boyutlarına olan etkisi ise Şekil 3'te 120 adet punta operasyonu öncesi ve sonrasındaki nokta kaynağını gösteren makro resimlerde verilmiştir. Şekil 3.a. ve Şekil 3.b.'de görüldüğü gibi, sırasıyla Smartblock™ ünitesinden geçmeden önce kaynak deformasyonu ve şekilsel bozuklukların, bileme işleminden geçtikten sonra tıraşlanmış yüzeyin daha temiz bir kaynak çekirdeği bıraktığı görülmektedir. Nokta kaynağındaki (Şekil 3.a) şekilsel bozukluk sadece elektrodun baskı yüzeyinin bozukluğundan değil aynı zamanda, elektrik akımının daha temiz olan elektrot baskı yüzeyi çeperinden geçmesi ile aşırı ısınması ve baskı kuvvetinin alansal olarak daha yüksek oranlara ulaşmasından kaynaklanmaktadır. Bu tür nokta kaynak şekil bozuklukları nokta kaynağının mekanik özelliklerini etkileyeceğinden dolayı reddedilmektedir. Bunu ortadan kaldırmanın en kısa ve en az maliyetli yolu ise

deformasyona maruz kalan elektrodun baskı yüzey çeperi ve bunu destekleyen kenarlara bileme uygulayarak daha temiz elektrot baskı yüzeyi ile çalışmaktır. Elektrot bileme operasyonu sonucunda elektrot çeper duvar kalınlıkları incelmekle beraber, belirli sayıda bileme işlemine müsaade edilmekte veya faydalı bir kalınlık değeri tecrübe edilerek veya bileme miktarları karşılaştırılarak bulunmaktadır.

Nokta kaynak işlemi ile birleştirilen deney numunelerine tam tahribatlı kopma yükü testi uygulanmıştır. Kopma kuvveti test cihazı kapasitesi 1.5 kW gücünde, 20 kN yük kapasitesindedir. Şekil 4'te 70 adet punta kaynak operasyonu öncesi ve sonrasındaki bileme için mekanik test yapılan test numuneleri ve 120 adet puntalama operasyonu öncesi ve sonrasındaki bileme için tahribatlı mekanik test yapılan test numuneleri verilmiştir.



**Şekil 2.** 70 adet (a) ve 120 adet (b) puntalama sonrası ve bileme öncesi nokta kaynak elektrotunun görünüşü.



**Şekil 3.** 120 adet puntalama operasyonu öncesi (a) ve sonrasındaki (b) nokta kaynağı görüntüleri.

Nokta kaynaklarının görsel hasar analizi yapıldığında, her iki elektrot bileme durumunda da kaynak çeperinden yırtılmanın genelleştirilebileceği uygun hasarlar görülürken, 120 punta kaynağı sonrasında yapılan numunelerin çekme testinde nokta kaynak çekirdek çeperinde yırtılma olmadan hasarlı kopmanın daha sık görüldüğü birkaç numune hariç (yaklaşık olarak % 20) genel olarak bu durumun değişmediği görülmektedir. Ancak, daha önce Şekil 3'te verildiği gibi görsel olarak 70 punta ve 120 punta sonrasında bileme öncesinde büyük farklılık oluşmaktadır. Nokta kaynak çekirdeğinin ısı tesiri altındaki bölgesinden (ITAB) mekanik test sonucunda yırtılması, beklenen bir hasardır.





Şekil 4. Her iki 70 ve 120 adet kaynak sonrası bilenmiş elektrotlarla kaynaklanmış ancak test edilmemiş test numuneleri; 70 adet (b) ve 120 adet (c) puntadan sonra bilenmiş elektrotla yapılan kopma testine tabi tutulmuş nokta kaynağı numuneleri gösterilmektedir.

Çizelge 5. L18 Taguchi metodu deney tasarımı, deney sonu elde edilen çekirdek çapları ve diğer istatistiksel veriler (P: Punta sayısı).

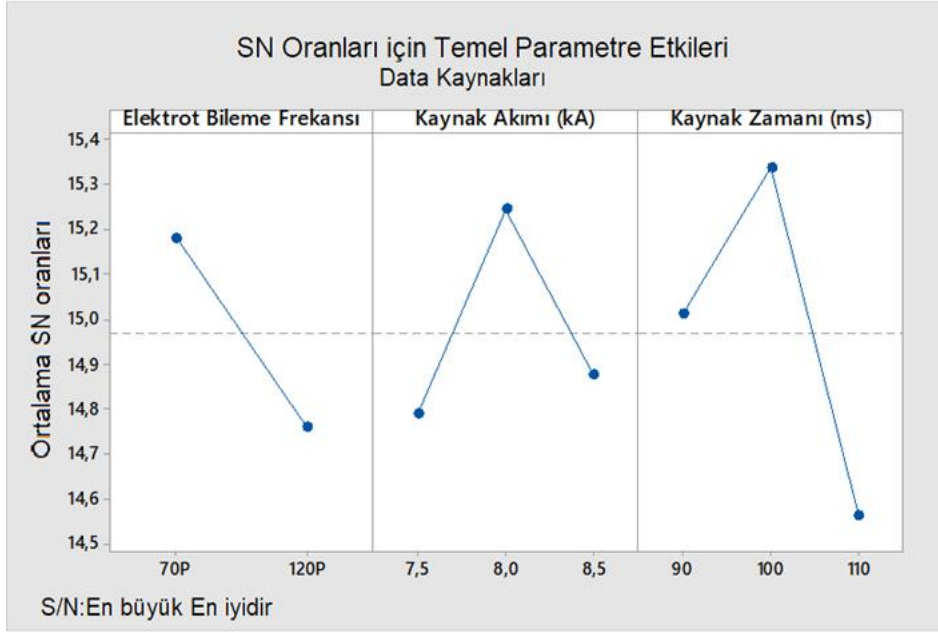
Deney No	(A) Kaynak elektrodu bileme periyodu	(B) Kaynak akımı (kA)	(C) Kaynak zamanı (ms)	Kaynak çekirdek çapı (mm)	S/N Oranı (dB)	Tahmin edilen çekirdek çapı (mm)
1	70P	7,5	90	5,30	14,48	5,66
2	70P	7,5	100	5,56	14,90	5,87
3	70P	7,5	110	6,30	15,98	5,39
4	70P	8,0	90	5,57	14,91	5,95
5	70P	8,0	100	6,24	15,90	6,16
6	70P	8,0	110	5,32	14,51	5,68
7	70P	8,5	90	6,42	16,15	5,72
8	70P	8,5	100	5,72	15,14	5,93
9	70P	8,5	110	5,37	14,59	5,45
10	120P	7,5	90	5,39	14,63	5,39
11	120P	7,5	100	5,66	15,05	5,60
12	120P	7,5	110	4,82	13,66	5,12
13	120P	8,0	90	5,83	15,31	5,68
14	120P	8,0	100	6,16	15,79	5,89
15	120P	8,0	110	5,63	15,01	5,41
16	120P	8,5	90	5,34	14,55	5,45
17	120P	8,5	100	5,76	15,20	5,66
18	120P	8,5	110	4,78	13,58	5,18

Genel olarak nokta kaynaklarının çekirdek kısmında yüksek sertlik değerleri görülürken, çekirdeğin hemen kenarındaki ITAB'ın sertliği düşük olmaktadır. Özellikle, tane irileşmesi gözlemlenen nokta kaynak çekirdeğinin ITAB başlangıç çizgisi en zayıf bölge olarak yırtılmaya en müsait bölgedir (Ertan vd. 2019, Demir vd. 2021). Kaynak akımı ile kaynak ısı girdisi arasındaki ilişkiye bağlı olarak, artan ısı girdisinin ITAB genişliğini artırması ve tane irileşmesine maruz kalan bölgenin de genişleyip oldukça düşük sertlikle sonuçlanması (Saha vd. 2012, Tutar vd. 2017) kaynak hasarının yırtılma ile daha çok kaynak çekirdeğinin hemen etrafından dairesel olarak ayrılmasına sebep olmaktadır.

FEE 420 sacının birleştirilmesi için kullanılan sac-saca bindirme nokta kaynağı yönteminde Taguchi L18 deneysel yaklaşımı ile optimizasyon çalışması yapılmıştır. Deneysel çalışmanın sonuçları iki farklı bileme sonrasındaki elektrodun nokta kaynak operasyonu sonrası bindirme kaynağı yapılan parçada oluşturduğu çekirdek çapına göre değerlendirilmiştir. Çizelge 5'te L18

ortogonal Taguchi yöntemine göre tasarlanan deney verileri ve elde edilen çekirdek çapları verilmiştir. Çalışmada Sinyal/Gürültü (S/N) oranları en büyük çekirdek çapı en iyi sonuçları veren "en büyük en iyidir" amaç fonksiyonu ile yorumlanmıştır.

Çizelge 5'te verilen değerler Minitab 18 programı ile S/N oranına göre analiz edilmiştir. L18 dizinine göre tasarlanan deneylerin S/N oranının grafiği Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 5'ten görüldüğü gibi, 120 punta, 8,5 kA ve 110 ms parametreleri için S/N değeri oldukça düşüktür ve kaynak akımı ve kaynak zamanı için en düşük ve en yüksek parametrelerin güvenilirliğinin ve uygulama sırasında çok farklı değerler verdiğini göstermektedir. Şekil 5 ve 6'da verildiği gibi elektrot bileme sayısının az olması yanında ölçüm yapılan numune sayıları da önemlidir. Bu çalışmada, 70 ve 120 punta kaynak operasyonu sonrası bileme arasındaki S/N farklarının yüksek olması, elektrot bilemede seçilen 70 ve 120 sayısının uygun olduğunu göstermektedir.

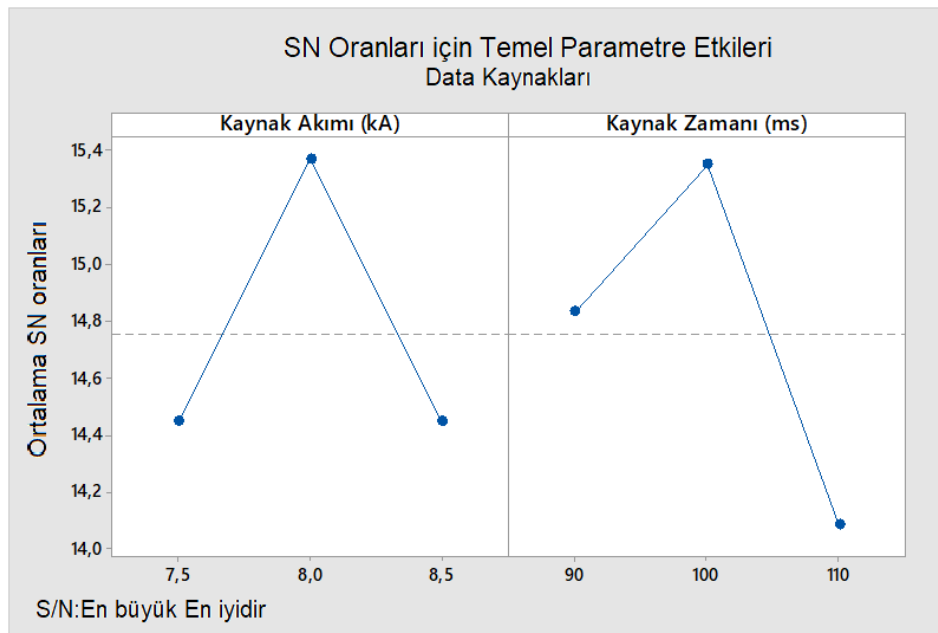


Şekil 5. L18 Taguchi deney tasarımı S/N grafiği (bütün parametreler için).

**Çizelge 6.** 70 punta ve 120 punta atım sonrası bileme işlemi için varyans analizi (PRESS: Tahmin edilen ve gerçek  $R^2$  değerleri arasındaki sapmanın bir ölçüsüdür- the prediction error sum of squares).

Kaynak	Serbestlik	Sırasal Kareler Toplamı (Seq SS)	Katkı Oranı	Uyarlanmış Kareler		
	Derecesi (DF)			Ortalaması (Adj MS)	F-Değeri	p-Değeri
Elektrot Bileme Frekansı	1	0,3280	9,13%	0,3280	1,72	0,215
Kaynak Akımı (kA)	2	0,2743	7,64%	0,1372	0,72	0,508
Kaynak Zamanı(ms)	2	0,6952	19,36%	0,3476	1,82	0,204
Hata	12	2,2941	63,87%	0,1912	--	--
Toplam	17	3,5917	100%			

Varyans Analizi (S)	$R^2$	$R^2$ ortalama	PRESS	$R^2$ ilk
0,437238	36,13%	9,51%	5,16177	0,00%



Şekil 6. 120 punta sonrası bileme ile elde edilen kaynakların kaynak akımı ve kaynak zamanı parametrelerine ait S/N sonuçları.

**Çizelge 7.** 120 punta atım sonrası bileme işlemi için varyans analizi (PRESS: Tahmin edilen ve gerçek R<sup>2</sup> değerleri arasındaki sapmanın bir ölçüsüdür- the prediction error sum of squares).

Kaynak	Serbestlik Derecesi (DF)	Sırasal Kareler Toplamı (Seq SS)	Katkı Oranı	Uyarlanmış Kareler Ortalaması (Adj MS)	F-Değeri	p-Değeri
Kaynak Akımı (kA)	2	0,6767	40,49%	0,3383	19,68	0,009
Kaynak Zamanı(ms)	2	0,9258	55,39%	0,4629	26,92	0,005
Hata	4	0,0688	4,12%	0,0172	--	--
Toplam	8	1,6712	100%			

Varyans Analizi (S)	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ortalama	PRESS	R <sup>2</sup> ilk
0,13113	95,88%	91,77%	0,34819	79,17%

Şekil 5 ve 6'da verildiği gibi elektrot bileme sayısının az olması yanında ölçüm yapılan numune sayıları da önemlidir. Bu çalışmada, 70 ve 120 punta kaynak operasyonu sonrası bileme arasındaki S/N farklarının yüksek olması, elektrot bilemede seçilen 70 ve 120 sayısının uygun olduğunu göstermektedir. Kaynak zamanının 10 ms daha fazla olması S/N oranının düşmesine sebep olmuştur. Artan kaynak süresinin kaynak ısı girdisinin artmasına yol açması ve sonuç olarak, kaynak çekirdek çapının artmasına sebep olacağı beklenirken (Piott vd. 2020, Moshayedi ve Sattari Far 2012), bu çalışmada ise artan kaynak süresinin kaynak çekirdek boyutunu ciddi oranda etkilemediği gibi bir sonuç ortaya çıkmıştır. Süre artışının çok küçük olması yanında dış etkenlere bağımlı bir sonuç olabileceği düşünülmektedir.

Çalışmadan elde edilen verilere göre, 70 adet punta operasyonundan sonra bileme işlemi uygulanan elektrodun, 8 kA kaynak akımı değerinin ve 100 ms kaynak süresinin optimum nokta kaynak parametreleri olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çizelge 5'te verildiği gibi, tahmin edilen değerler ile deneysel verilerin arasında fark olduğu görülmektedir. Bu farklılıkların sebebi deneylerin tekrarlanmaması ve ölçümler sırasındaki çevresel koşulların arasındaki farklar olarak değerlendirilmeye mümkündür. Özellikle çekirdek çaplarının ölçümü sırasında dijital teknolojinin veya resim analizi için programın kullanılmaması ölçüm farklılıklarının temel sebebi olarak düşünülebilir. Bu nedenle, gözle yapılan ölçümlerde, hassasiyetin düşük olması ve aynı zamanda, tam olarak tespit için çok yüksek sayıda ölçüm alınması ihtiyacı nedeniyle bu fark oluşabilmektedir. Ayrıca, bileme sayısındaki farkın diğer parametrelerdeki deneysel aralıklara göre farklı olması da S/N sonuçlarını etkileyebilmektedir. Sac-saca punta kaynağında kaynak parametreleri nokta kaynağı üzerinde farklı etki değerlerine sahiptirler. Bu etki değerleri

ANOVA yöntemiyle analiz edilmektedir (Çizelge 6). Çizelge 6'dan görüldüğü gibi, F değerinin kaynak akımı parametresinde sıfıra yakın çıkması, kaynak akım etkisinin bağımsız aşırı değişken olduğunu ifade etmektedir. Diğer parametrelerinde katkı sağladığı hata oranının yüksek olması bu grup deneyler için güvenilirliklerin zayıf olduğu ancak kaynak akımının etkisiyle sonuçların tamamıyla reddedilmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Ancak varyansın yüksek olduğu durumlarda ve F değerindeki değişikliklerin fazla olduğu durumlarda p değeri dikkate alınmalıdır. Bu nedenle, sonuçların güvenilirlik (p) değerinin elektrot bileme, kaynak akımı ve kaynak zamanı için düşük sayılabilecek bir değerde çıkması (p>0.05) ısı girdisine bağlı olarak çekirdek çapının beklentilerin aksine daralmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sadece 70P numunelerinde 7.5 kA serisinde artan ve 8.5 kA serisinde ise azalan davranış gözlemlenirken, diğerlerinde ise parametrik olarak değişken çekirdek çap ölçümleri görülmüştür. Ancak, sonuçlar birbirine oldukça yakın olması nedeniyle, bu değişimin önemli olmadığı veya etkisinin az olacağı düşünülmektedir. Şekil 6 ve Çizelge 7'de görüldüğü gibi, ikinci tip ölçüm sonucu 120P serisindeki bütün kaynak akım serilerinde görüldüğü ve değişiklik olmadığı için ölçüm sonuçlarındaki p güvenilirlik değerleri oldukça yüksek çıkmıştır (p<0.05). Uyarlanmış kareler değerlerinin ve F değerlerinin yüksek olması ve 120P sonrası tıraşlamanın sistemsel olarak, p güvenilirlik değerlerinin de çok düşük çıkması nedeniyle uygulanması gerektiğini göstermektedir.

ANOVA yöntemine göre, elde edilen deney verileri %5 anlamlılık ve %95 güven düzeyi ile hesaplanmıştır (Mohsin I. vd. 2020). Yapılan deneysel çalışma biraz yüksek hata oranına sahip olmakla beraber, çalışma 120 ve 70 punta sonrasında bileme operasyonu uygulanmış kaynak elektrotlarının kullanılmasıyla kaynak çekirdek çapına olan etkisi dikkate alındığında, deneysel verilerin

120 punta sonrasındaki değerlerin %95,88 güven düzeyine ulaştığı ( $R^2 > \%95$ ) sonucuna ulaşılmıştır. Bu koşullar altında, 120 punta sonrasında yapılan deneyler, daha güvenilir ve aynı zamanda parametrik değerlerin daha uygulanabilir olduğunu ortaya koyulmaktadır.

#### 4. Genel Sonuçlar

Bu çalışmadan elde edilen verilere göre aşağıdaki sonuçlar öne çıkmaktadır:

1. 70 adet punta operasyonundan sonra bileme işlemi uygulanan nokta kaynak elektrodunun, optimum parametreleri şunlardır; 8 kA kaynak akımı ve 100 ms kaynak süresidir. Optimum değerler sonucunda kaynak çekirdek çapı 6,24 mm'dir.
2. 120 puntadan sonra yapılan bileme işleminden elde edilen değerlere göre ise 8.0 kA ve 100 ms değerlerinde 6,16 mm çapında kaynak çekirdeği oluşmaktadır. Bu değerler 120 adet punta işleminden sonra elde edilen çekirdek çapı ile 70 adet punta işleminden sonra elde edilen kaynak çekirdek çapı arasında %1,282 değerinde bir fark olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre; 120 adet puntadan sonra yapılan bileme işlemi ile 70 adet puntadan sonra yapılan bileme işlemlerinin optimum parametre değerlerine yakın sonuçlar verdiğine ulaşılmaktadır.
3. Deneysel çalışmalarda, 70 punta sonrasında yapılan bilemenin istatistiki olarak daha az güvenilir sonuçlar verdiği buna karşın 120 punta sonrasında yapılan bileme işlemiyle beraber, deneysel güvenilirliklerin daha iyi olduğu görülmektedir.
4. Tahmin edilen çekirdek çapı ile ölçülen değerler arasındaki farkın bu yüksek hataya sebep olduğu da en önemli çıktı olarak düşünülebilir. Bu durumda, ölçüm sayısının artması bu hata oranını daha da azaltacaktır.

#### Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

#### Yazarlık Katkı Beyanı

Hilal KIR: Araştırma, Deney tasarımı, Analiz, Yazma – orijinal taslak  
Şükrü KARABULUT: Araştırma, Deney tasarımı, Yazma – orijinal taslak,  
Mustafa YAZAR: Fikir Sahibi, Metodoloji/Çalışma, deneysel tasarım,  
Proje Yöneticisi,  
Şükrü TALAŞ: Fikir Sahibi, Deney tasarımı, Analiz ve yorumlama,  
Yazma/inceleme ve düzenleme, 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.

#### Teşekkür

Bu proje Şahinkul Makine Ar-Ge merkezi tarafından Ar-Ge 2022-27 2200850000 nolu Robot Nokta Kaynaklarında Smartblock ile Proses Optimizasyonu projesi ile desteklenmiştir.

Çalışmada görev alan bursiyer öğrenciler Hilal Kır ve Şükrü Karabulut TÜBİTAK BİDEB tarafından desteklenmektedir (Proje No: 119C053).

#### Kaynakça

- Açış, İ. F., Talaş, Ş., 2023. Performance of resistance spot weld caps coated with Ni and Fe aluminate alloys by electro spark deposition on hot dip galvanized steel, *Revista de Metalurgia*, **59**(1), 237.  
<https://doi.org/10.3989/revmetalm.237>
- Arslan, S. ve Karabaş, M., 2019. Effect of Different Magnet Geometry On Magnetically Assisted Resistance Spot Welding, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **19**(1), 129-139.  
Doi: <https://doi.org/10.35414/akufemubid.436609>.
- Bower, R. J., Sorensen, C. D., and Eager T. W., 1990. Electrode Geometry in Resistance Spot Welding. *Welding Journal*, February, 45-51.
- Bozkurt, Y., Keleş, D., 2017. Effect on Worker Health of Emerging Gas and Fume in Fusion Welding Methods, *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, **4**, 144-150.  
<https://doi.org/10.7240/marufbd.372945> .
- Chen, T., Ling, Z., Wang, M., Kong, L., 2020. Effect of a slightly concave electrode on resistance spot welding of Q&P1180 steel, *Journal of Materials Processing Technology*, **285**, 116797.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116797>
- Deepati, A.K., Alhazmi, W., Benjeer, I., 2021. Mechanical characterization of AA5083 aluminum alloy welded using resistance spot welding for the lightweight automobile body fabrication, *Materialstoday Proceedings*, **45**(6), 5139-5148.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.646> .
- Demir, B., Elitaş, M. & Karakuş, H., 2021. Investigation of the Effect of the Electrode Tip Type on the Mechanical Properties of Advanced High Strength Steel Combined with Resistance Spot Welding, *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **7**(3) 277-285.  
<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.10> .
- DiGiovanni, C., He, L., Pistek, U., Goodwin, F., Biro, E., Zhou N.Y., 2020. Role of spot weld electrode geometry on liquid metal embrittlement crack

- development, *Journal of Manufacturing Processes*, **49**, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.11.015>.
- Ertan, R., Aras, S., Özgül, H.G., 2019. The Effect of the Welding Current on the Mechanical Properties of the New Generation Steels Welded with Resistance Spot Welding, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **19**, 025902 (461-469).
- Ertek Emre, H., 2019. Strength Optimization of Resistance Spot Welded TWIP Steel by Taguchi Method. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, **7**(1), 778-787.
- Kekik, M., Özen, F., İlhan, E., Aslanlar, S., Microstructural Evaluation and Influence of Welding Parameters on Electrode Plunge Depth in Resistance Spot Welded Dissimilar DP800HF/1200M Steel Joints, 2021. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, **9**(2), 284-291. <https://doi.org/10.21541/apjes.859623>.
- Kim, D., Yu, J., Rhee, S., 2016. Effect of a conically shaped hollow electrode on advanced high strength steel in three-sheet resistance spot welding, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, **17**, 331-336. <https://doi.org/10.1007/s12541-016-0041-9>.
- Li, M., Wang, Y., Yang, S., Tao, W., Zhang, G., 2021. Improving mechanical properties and electrode life for joining aluminum alloys with innovatively designated Newton ring electrode, *Journal of Manufacturing Processes*, **64**, 948-959. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.02.001>.
- Ma, Y., Takikawa, A., Nakanishi, J., Doira, K., Shimizu, T., Lu, Y., Ma, N., 2021. Measurement of local material properties and failure analysis of resistance spot welds of advanced high-strength steel sheets, *Materials & Design*, **201**, 10955. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109505>.
- Mat Yasin, N.A., Alisibramulisi, A., Salleh, Z., Ghazali, F., 2020. Optimization of Resistance Spot Welding (RSW) Parameters by using Taguchi Method, *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, **9**(3), 2795-2800.
- Mohsin, I., He, K., Li, Z., Zhang, F., Du, R., 2020, Optimization of the Polishing Efficiency and Torque by Using Taguchi Method and ANOVA in Robotic Polishing, *Applied Sciences*, **10**(3), 824. <https://doi.org/10.3390/app10030824>.
- Moshayedi, H., Sattari-Far, I., 2012, Numerical and experimental study of nugget size growth in resistance spot welding of austenitic stainless steels, *Journal of Materials Processing Technology*, **212**(2), 347-354. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.09.004>.
- Ogawa, Y., Ohara, I., Arakawa, J., Akebono, H., Sugetu, A., 2022. Effects of welding defects on the fatigue properties of spot welded automobile steel sheets and the establishment of a fatigue life evaluation Method, *Welding in the World*, **66**, 745-752. <https://doi.org/10.1007/s40194-021-01238-5>.
- Pashazadeh, H., Gheisari, Y., Hamed, M., 2016, Statistical modeling and optimization of resistance spot welding process parameters using neural networks and multi-objective genetic algorithm. *Journal of Intelligence Manufacturing*, **27**, 549-559. <https://doi.org/10.1007/s10845-014-0891-x>.
- Piott, M., Werber, A., Schleuss, L., Doynov, N., Ossenbrink, R., Michailov, V.G., 2020. A study of the heat transfer mechanism in resistance spot welding of aluminum alloys AA5182 and AA6014. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **111**, 263-271. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05650-x>.
- Sabırlı, A. ve Fiğlalı, A., 2020. Optimization of Electric Resistance Welding Parameters by Taguchi Method to Achieve Optimum Nugget Size. *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, **3**(2), 223-229.
- Saha, D.C., Han, S., Chin, K.G., Choi, I., Park, Y. Do, 2012. Weldability evaluation and microstructure analysis of resistance-spot-welded high-Mn steel in automotive application, *Steel Research International*, **83**, 352-35. <https://doi.org/10.1002/srin.201100324>.
- Smartblock Tanıtım Broşürü, 2020. TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., AR-GE Merkezi, Bursa.
- Tutar, M., Aydın, H., Bayram, A., 2017, Effect of Weld Current on the Microstructure and Mechanical Properties of a Resistance Spot-Welded TWIP Steel Sheet, *Materials*, **7**, 519. <https://doi.org/10.3390/met7120519>.
- Wan, X., Wang, Y., Zhao, D., 2016. Multiple Quality Characteristics Prediction and Parameter Optimization in Small-Scale Resistance Spot Welding, *Arabian Journal for Science and Engineering*, **41**, 2011-2021. <https://doi.org/10.1007/s13369-016-2061-2>.

Watmon, T. B., Wandera, C., Apora, J., 2020. Characteristics of resistance spot welding using annular recess electrodes, *Journal of Advanced Joining Processes*, **2**, 100035.  
<https://doi.org/10.1016/j.jajp.2020.100035>.

Xing, B., Yan, S., Zhou, H., Chen, H., Qin, Q. H., 2018. Qualitative and quantitative analysis of misaligned electrode degradation when welding galvanized steel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **97**, 629–640.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-018-1958-1>.

#### **İnternet Kaynakları**

1- [http://erdemir.ro/Sites/1/upload/files/Yassi\\_Urun\\_Katalogu\\_2020\\_subat-1205.pdf](http://erdemir.ro/Sites/1/upload/files/Yassi_Urun_Katalogu_2020_subat-1205.pdf), (10.02.2023).



# Katı Hal Fermantasyonu Kullanılarak *Streptomyces* sp. M127-1'den Elde Edilen Termotolerant Selülazın Yanıt Yüzeyi Metodolojisi ile Optimizasyonu

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 01.08.2023

Kabul/Accepted: 12.01.2024

Yayımlandı/Published: 27.02.2024

## Optimization of Thermotolerant Cellulase from *Streptomyces* sp. M127-1 with Response Surface Methodology using Solid-State Fermentation

Muzaffer BİNEK<sup>1</sup>, Elif Esin HAMEŞ<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup> Biyomühendislik Ana Bilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye

<sup>2</sup> Biyomühendislik Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

### Öz

Çalışma, kompostlamada kullanılabilecek selülazın aktinomiset izolatından katı hal fermantasyon yöntemiyle Yanıt Yüzeyi Metodolojisi (RSM) kullanılarak optimizasyonunu ve enzimin kısmi karakterizasyonunu amaçlamaktadır. Selülaz üreticisi olduğu belirlenmiş 5 izolat (M127-1, M127-2B, 1M1, M45-1 ve M6c-1) katı hal fermantasyonu ile selülaz üretimi açısından değerlendirilmiş ve izolat M127-1 ileri çalışmalar için seçilmiştir. Katı substrat seçimi için farklı substratların (talaş, malt çimi, soya unu ve buğday kepeği) kombinasyonları ile hazırlanan ortamlarda izolat M127-1 ile katı hal fermantasyonu gerçekleştirilmiş ve en iyi enzim aktivitesinin buğday kepeği-malt çimi (BM) (0,704 U/ml) ortamında olduğu belirlenmiştir. Ardından BM ortamı kullanılarak selülaz üretim optimizasyonu için nem, aşı miktarı ve inkübasyon süresi merkezi kompozit tasarımı kullanılarak optimize edilmiştir. Optimum selülaz üretim koşulları % 79,93 nem, 8,58 gün inkübasyon süresi ve 8,38 (v/w) aşı miktarı olarak belirlenmiş ve enzim aktivitesinin 1,8 kat arttığı görülmüştür. Enzimin optimum pH'sı 6 ve optimum sıcaklığı 60°C olarak belirlenmiştir. 16SrDNA dizi analizi ile izolat, *Streptomyces* sp. M127-1 olarak tanımlanmıştır. Sonuç olarak yüksek sıcaklıkta aktif selülazın uygun maliyetli substratlar kullanılarak katı hal fermantasyonu ile *Streptomyces* sp. M127-1'den istatistiksel üretim optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

### Anahtar Kelimeler

Selülaz; *Streptomyces*; Kompostlama; Katı hal fermantasyonu; Yanıt yüzey metodolojisi.

### Abstract

The study aims to optimise cellulase that can be used in composting from actinomycete isolate using the solid-state fermentation method with Response Surface Methodology and its partial characterisation. Five isolates (M127-1, M127-2B, 1M1, M45-1 and M6c-1) were previously determined to be candidate cellulase producers, were investigated for cellulase production by solid-state fermentation, and isolate M127-1 was selected for further studies. For solid substrate selection, solid-state fermentation was performed by isolate M127-1 in media-prepared combinations of different solid substrates (sawdust, soy flour, malt grass and wheat bran), and the highest enzyme activity was found to be wheat bran-malt grass (BM) medium (0.704 U/ml). Then, moisture, inoculum size, and incubation time were optimised with the central composite design for cellulase optimisation using BM medium. Optimum cellulase production conditions were determined as 79.93% moisture, 8.58 days incubation time and 8.38 (v/w) inoculum size, and it was observed that the enzyme activity increased by 1.8 times. The optimum pH of the enzyme was 6, and its temperature was 60°C. The isolate was identified as *Streptomyces* sp. M127-1 by 16SrDNA sequence analysis. In conclusion, the thermotolerant cellulase production at high temperatures was optimised from *Streptomyces* sp. M127-1 through solid-state fermentation using cost-effective substrates.

### Keywords

Cellulose; *Streptomyces*; Composting; Solid state fermentation; Response surface methodology.

### 1. Giriş

Selülaz, bitki hücre duvarında bulunan karmaşık bir karbohidrat olan selülozun parçalanmasında önemli rol oynayan bir enzimdir. Selülozik malzemelerin bozunması ile biyoyakıt üretimi, tekstil endüstrisi ve atık yönetiminde kullanım alanı bulan selülazlar, özellikle organik atıkların ayrışmasının doğal bir süreci olan

kompostlama ile sürdürülebilir atık yönetimi ve toprak zenginleştirme konusundaki muazzam potansiyeli nedeniyle artan bir ilgi görmektedir (Khan *et al.* 2016, Danso *et al.* 2022, Kumar *et al.* 2022, Korsa *et al.* 2023). Selülaz, bitkisel malzemelerin bozunmasında rol oynayarak organik atığın besin açısından zengin kompostta dönüştürülmesini kolaylaştırır. Çevre dostu bir atık yönetim tekniği olan kompostlama, toprak

iyileştirmesini sağlarken aynı zamanda organik atıkları düzenli depolama alanlarından uzaklaştırmak için sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır. Süreç, mikroorganizmaların etkisiyle organik maddenin ayrışmasını içerir (Ayılara *et al.* 2020). Selülozik biyokütlenin enzimatik hidrolizi, asit/alkali hidrolizinden farklı olarak bozunma ürünleri oluşturmadan yüksek özgülük ve yüksek verimde glikoz üretimi nedeniyle büyük umut vaat etmektedir (Khan *et al.* 2016). Çeşitli organik bileşikler arasında, bitki hücre duvarında bulunan selüloz, mikrobiyal bozunma için ana substratı oluşturur. Endoglukanazları, ekzoglukanazları ve  $\beta$ -glukosidazları içeren selüloz enzimleri, selülozun daha küçük glikoz birimlerine parçalanmasını başlatan katalizörlerdir. Endoglukanazlar, selüloz zinciri içindeki iç  $\beta$ -1,4-glikosidik bağları rastgele ayırarak daha kısa selüloz parçaları oluşturarak süreci başlatır. Ekzoglukanazlar bu parçalar üzerinde aktivite göstererek sellobiyozu serbest bırakır ve zincir uzunluğunu daha da kısaltır. Son olarak,  $\beta$ -glukosidazlar sellobiyozu mikroorganizmalar tarafından kolayca kullanılabilen glikoza hidrolize eder (Chen *et al.* 2021). Bu enzimlerin birlikte çalışması ile selülozun etkili hidrolizi sağlanarak kompostlama işlemi için atıklar mikrobiyal kullanıma hazır hale getirilir. Selüloz enzimlerinin varlığı ve aktivitesi, kompostlama işleminin verimini ve hızını önemli ölçüde etkiler. Yüksek selüloz aktivitesi, kompost olgunlaşmasının hızlandırılmasına yol açan selüloz bozunmasına neden olur. Selüloz enzimleri mikroorganizmaların selüloza ulaşmasını kolaylaştırarak mikrobiyal aktiviteyi ve biyokütle üretimini artırır (Sun *et al.* 2021, Kocak *et al.* 2023). Ayrıca, selülozun selüloz tarafından enzimatik olarak parçalanması, karbon, azot ve fosfor gibi besinlerin salınmasına katkıda bulunarak bu bileşiklerin bitki tarafından alınımını kolaylaştırır (Mazumder *et al.* 2021). Biyokütlenin enzimatik sürdürülebilir biyodönüşümü yoluyla selülozik atık miktarının azaltılmasında selülazın önemli rolü bulunmaktadır (Khan *et al.* 2016). Selülazlar, bitkiler, hayvanlar, funguslar ve bakteriler dâhil olmak üzere çok çeşitli organizmalar tarafından sentezlenir. Biyoaktif bileşik üretme yetenekleriyle bilinen Gram-pozitif filamentli bakteriler olan aktinomisetler, çok yönlü enzimatik yetenekleri ile de çeşitli biyoteknolojik süreçlerde araştırılmaktadır (Celaya-Herrera *et al.* 2021, Samuel *et al.* 2022, Topatan and Katı, 2022). Bu mikroorganizmalar dünya genelinde farklı iklim bölgelerinde yaygın olarak dağılır ve karasal ve sucul çevrelerde bulunur. Aktinomisetler, nötr ve alkali pH'ta mezofilik ve termofilik (50-60°C) şartlarda büyüyebilir ve ayrıca lignoselülozik materyaller gibi kompleks substratları parçalama yeteneğine sahiptir (Insam and de

Bertoldi 2007, Tuomela *et al.* 2000, Bhatti *et al.* 2017). Bu çalışmada, daha önce izole edilen aktinomiset suşları içerisinde yüksek selülaz aktivitesi gösteren aktinomisetler kullanılarak selülaz üreticisinin seçiminin ardından kompostlama hedefine yönelik selülozik içerikli substratlar kullanılarak katı hal fermantasyon tekniği ile selülaz üretiminin istatistiksel optimizasyonu ve kısmi karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir.

## **2. Materyal ve Metot / Materials and Methods**

### **2.1 Mikroorganizmaların aktivasyonu ve kültürasyonu**

Çalışmada Biyomühendislik Bölümü Medikal Biyoteknoloji laboratuvarında bulunan ve aynı zamanda World Federation of Culture Collections'a kayıtlı (WDCM 952) Aktinomiset Kültür Koleksiyonu (ACTINOCC) üyeleri içinden toprak kökenli mezofil alkalifilik aktinomiset suşları kullanılmıştır. Daha önce tarama çalışması yapılan ve iyi selülaz üreticisi olduğu belirlenen toprak, çamur ve termal sulardan izole edilmiş M127-1, M127-2B, 1M1, M45-1 ve M6c-1 kodlu izolatlar ile çalışma gerçekleştirilmiştir. İzolatların aktivasyonunda Mannitol Soya unu (MS) (mannitol 20 g, soya unu 20 g, agar 15 g, distile su 1L, pH 8) besiyeri kullanılmış, -20°C'de bulunan gliserol stoklarından petrilere inoküle edilen kültürler 30°C'de 5-7 gün inkübe edilmiştir (Hobbs *et al.* 1989).

### **2.2. Aşı kültürü hazırlanması**

Katı hal fermantasyonunu başlatmak için her defasında yeni hazırlanan aşı kültürü kullanılmıştır. MS besiyerinde aktive edilmiş genç kültürden 6 mm çapında 3 agarlı parça, plug yardımıyla alınarak 50 mL Glikoz Yeast ekstrakt (GY) (glikoz 10 g, maya özütü 2 g, pepton 25 g, K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 0,1 g, destile su 1 L, pH 8) içeren 250 mL'lik erlenlere aseptik koşullarda inoküle edilmiş ve 150 rpm ve 30°C'de 3-4 gün inkübe edilmiştir. Sporların çimlenmesi sonrası oluşan milimetrik boyuttaki pelletler aşı olarak kullanılmıştır (Demir *et al.* 2015). Aşılamanın homojenizasyonu ve pelletlerin verimli şekilde kullanılabilmesi için pellet içermeyen fazla besiyeri (toplam hacmin 4/5'i) aseptik koşullarda erlenlerden pipetlenerek çıkarılmış ve kalan yoğun pellet içeren kültürden 3 mL aşılama için kullanılmıştır.

### **2.3 Yüksek selülaz aktivitesine sahip suşun seçimi**

Karboksimetil selüloz (CMC) içeren sentetik besiyerinde yüksek selülaz aktivitesi daha önce belirlenmiş olan 5 izolatın (M127-1, M127-2B, 1M1, M45-1 ve M6c-1) buğday kepeği-malt çimi (BM) besiyerinde katı hal

fermantasyonu (7 gün, 30°C) gerçekleştirilmiştir. Besiyerleri 10 g katı substrat, aşı kültürü hacmi dikkate alınarak % 75 nem (Sargın ve Göksungur 2007) içerecek şekilde 250 mL'lik erlenlerde hazırlanmıştır. İnkübasyon sonrası selüloz aktivitesi ölçülmüş ve en yüksek aktivite elde edilen izolat ile optimizasyon çalışmasına devam edilmiştir.

#### **2.4 Enzim Ekstraksiyonu**

Katı hal fermantasyonunda selüloz aktivite ölçümü öncesinde enzim ekstraksiyonu gerçekleştirilmiştir. Bunun için her bir erlene 50 mL distile su eklenmiş, 30 dakika süresince aralıklarla karıştırılmış ve ardından bir huni üzerine yerleştirilen tülbent bezi üzerine erlen içeriği aktararak temiz bir kaba süzdürme işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen süzölmüş içerik 7000 rpm'de 5 dakika santrifüjlenerek üst sıvı enzim aktivite tayininde kullanılmıştır (Sargın ve Göksungur 2007).

#### **2.5 Selüloz aktivite tayini**

CMC ve filter kâğıdı yöntemi olarak 2 ayrı yöntem selüloz aktivite tayininde kullanılmış, enzimin endo- $\beta$ -1,4 glukanaaz aktivitesi belirlendiğinden ilerleyen çalışmalarda CMC yöntemi ile devam edilmiştir. CMC ile endo- $\beta$ -1,4 glukanaaz aktivitesi ve hesaplamaları Ghose (1987)'a göre gerçekleştirilmiştir. Selüloz aktivitesi inkübasyon süresince enzimin CMC'yi parçalayarak ortaya çıkardığı glikoz miktarının hesaplanması esasına göre yapılmaktadır. Bu işlem için ilk olarak farklı glikoz konsantrasyonları ile hazırlanan örnekler kullanılarak DNS (Dinitrosalicylic acid) yöntemi ile glikoz absorbans grafiği elde edilmiştir. Enzimatik aktiviteyi hesaplamak için enzimin farklı seyreltmelerinden alınan 0,5 mL enzim çözeltisi 0,5 mL CMC çözeltisi (sitrat tampon içinde %2 CMC) ile 50°C'de 30 dakika inkübe edilmiştir. İnkübasyon sonrası 3 mL DNS eklenerek 5 dakika kaynatılan tüplerin üzerine 20 mL distile su ilave edilmiş ve 549 nm'de UV-VIS Spektrofotometrede (Optizen POP, Korea) absorbans ölçülmüştür. Standart çözeltiler, kültür sıvıları ve kör örneklere de aynı işlem basamakları uygulanmıştır.

#### **2.6 Katı hal fermantasyonu ile uygun besiyeri seçimi**

Fermantasyon, içerdiği serbest su miktarına göre katı hal ve derin kültür fermantasyonu olabilmektedir. Katı hal fermantasyonu veya diğer ismiyle katı substrat fermantasyonu, serbest su içermeden mikroorganizmaların katı maddeler üzerinde gelişim gösterdiği bir fermantasyon işlemidir (Abdul Manan and Webb 2017). Doğada ölü bitki dokuları üzerinde büyüyen birçok mikroorganizma, katı hal fermantasyonu ile doğal

ortamlarına benzer koşullar sağlandığından başarılı olarak üretilebilmektedirler (Mendoza-Cal *et al.* 2010). Bu yöntem yenilenebilir ve ucuz substratların kullanımına uygun olması, az miktarda su kullanımı, toplam yatırım ve enerji harcamasının daha az olması gibi çeşitli avantajlara sahiptir (Raimbault 1998). Bu çalışmada da tarımsal katı substratların kullanıldığı katı hal fermantasyonunda karbon ve azot kaynağı dikkate alınarak beş farklı besiyeri oluşturulmuştur. Buğday kepeği-malt çimi besiyeri (BM) (buğday kepeği 9 g, malt çimi 1 g, distile su 27 mL), Buğday kepeği-soya unu besiyeri (BS) (buğday kepeği 9 g, soya unu 1 g, distile su 27 mL), Talaş-malt çimi besiyeri (TM) (talaş 9 g, malt çimi 1 g, distile su 27 mL), Talaş-soya unu besiyeri (TS) (talaş 9 g, soya unu 1 g, distile su 27 mL), Malt çimi besiyeri (M) (malt çimi 10 g, distile su 27 mL). Tüm besiyerleri 3 mL aşı kültürü hacmi de dikkate alınarak % 75 nem içeren (Sargın ve Göksungur 2007) substrat olacak şekilde 250 mL'lik erlenlerde hazırlanmış ve otoklavlanarak steril hale getirilmiştir. Ardından genç aşı kültürü (3 mL) ile laminar akışlı kabinde steril besiyerlerine aseptik koşullarda inoküle edilerek 30°C'de 5 gün inkübasyon gerçekleştirilmiştir. İnkübasyon sonrası enzim ekstraksiyonu ve aktivite tayini gerçekleştirilmiştir.

#### **2.7 Selüloz üretiminin istatistiksel optimizasyonu**

Bu çalışmada her seferinde bir değişkenin değiştirilerek diğerlerinin sabit tutulduğu dolayısı ile değişkenlerin birbirleri ile etkileşiminin ihmal edildiği (one variable at a time-OVAT) geleneksel optimizasyon çalışması yerine değişkenler arası etkileşimin değerlendirilmesini sağlayan daha az sayıda deneme ile istatistiksel olarak deneme tasarımı yapılarak optimizasyon gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel deney tasarımı, faktöriyel tasarım veya deney tasarımı olarak isimlendirilen ve yakın geçmişte biyoteknolojik işlemlerin optimizasyonunda da yoğun şekilde kullanılmaya başlanan, parametre sayısına göre iki veya üç boyutlu analize imkân tanıyan bir yöntemdir (Mandenius and Brundin 2008, Antony 2023). Enzim aktivite tayin sonuçlarına göre seçilen besiyeri kullanılarak katı hal fermantasyonu ile istatistiksel deney tasarımında önemli değişkenler olan nem oranı (%60-85), inkübasyon süresi (3-10 gün) ve aşı miktarının (%2-10 v/w) optimizasyonu çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Parametrelerin etkileri ve birbirleriyle etkileşimlerinin belirlenmesi için yanıt yüzeyi metodolojisi (Response Surface Methodology- RSM) yaklaşımı Design Expert Software 7.0.0 (Stat-Ease, Inc., Minneapolis, USA) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunun için Merkezde 6 tekrarı içeren 2<sup>3</sup>-Tam Faktöriyel Merkezi

Kompozit Tasarımı (Central Composite Design-CCD) deneysel tasarım olarak seçilmiştir. Programın oluşturduğu deney tasarımı **Çizelge 2'**de sunulmuştur.

## 2.8 İstatistiksel analiz

Tasarlanan modellerin regresyon ve varyans analizleri 'Design Expert Software' ile gerçekleştirilmiş ve varyans analizini (One-way analysis of variance ANOVA) değerlendirilmede modelin istatistiksel analizi yapılmıştır.

## 2.9 Enzim karakterizasyonu

### 2.9.1 Optimum pH

Optimum pH'nın belirlenmesi için %2 CMC içeren ve pH değeri 4-11 arasında değişen tamponlar (0,5 M) kullanılarak enzim aktivitesi ölçülmüştür. pH 4, 5 ve 6 için sitrat tamponu, pH 6, 7 ve 8 için fosfat tamponu, pH 8 ve

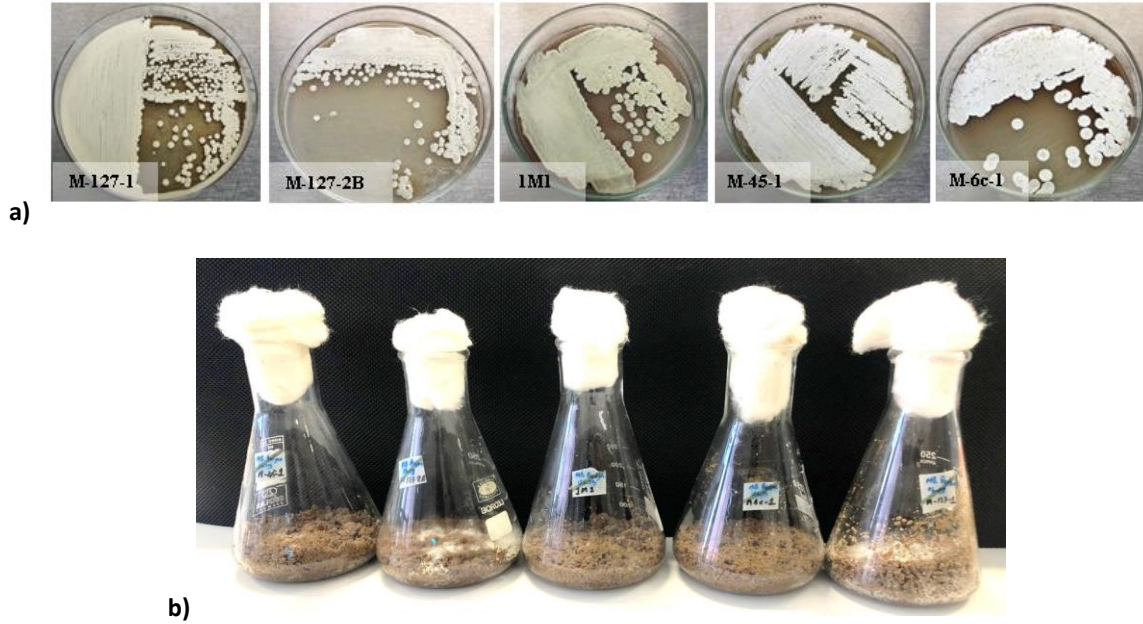
9 için Tris-HCl ve pH 9, 10 ve 11 için Glisin-NaOH tamponu kullanılmıştır (Lee *et al.* 2008).

### 2.9.2 Optimum Sıcaklık

Optimum sıcaklığın belirlenmesinde enzimatik reaksiyon farklı sıcaklıklarda (30, 40, 50, 60, 70 ve 80°C'de) gerçekleştirilerek enzim aktivitesi ölçülmüştür (Lee *et al.* 2008).

### 2.10 Genomik DNA izolasyonu ve polimeraz zincir reaksiyonu (PZR)

Actinomycetes izolasyonu agar besiyerinde 36 saat 30°C'de inkübe edilen izolatın DNA ekstraksiyonu Intron G-Spin DNA izolasyon kiti ile kullanıcı talimatlarına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Polimeraz zincir reaksiyonu (PZR) ile izolatın 16S ribozomal DNA dizisini kodlayan gen bölgesi çoğaltılmıştır.



**Şekil 1. a)** İzolatların MS agarda 5-7 günlük koloni görünüşleri, **b)** İzolatların katı substrat üzerinde gelişimleri (soldan sağa M45-1, M127-2B, 1M1, M6c-1, M127-1)

DNA'nın çoğaltılması için 16S ileri (AGAGTTTGATCCTGGCTCAG) ve geri (ACGGCTACCTGTACGACTT) primerleri kullanılmıştır. 5 µl Mg free Taq polimeraz tamponu, 3 µl MgCl<sub>2</sub> (25 mM), 5 µl deoksinükleotid trifosfat (10X), 10 pikomol/µl 16S rRNA primerleri ve 1.25 U of Taq DNA polimeraz kullanılmıştır. PZR programı ön denatürasyon için 94°C'de 1 dakika, ardından 40 döngü 94°C'de 1 dakika, 57°C'de 1 dakika, 72°C'de 1 dakika ve 72°C'de 10 dakika olarak gerçekleştirilmiştir. PZR ürünleri EXO-SAP-IT™ (Thermo Fisher Applied Biosystems™, katalog no. A55242) kiti kullanılarak saflaştırılmıştır, BIG-DYE cycle sequencing kit (Thermo Fisher Applied Biosystems™, katalog no. 4404312) kullanılarak ABI 3500 cihazında

dizileme işlemi gerçekleştirilmiştir. Çoklu dizi analizi BioEdit sequence alignment editor v7.2.5 (12/11/2013) programı aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. Filogenetik analiz programı (MEGA-X version 10.2.2) kullanılarak filogenetik ağaç çiziminde Neighbour-joining yöntemi ve 3000 bootstrap değeri kullanılmıştır. Dizileme ve filogenetik ağaç çizimi için Aquatayf Biyoteknoloji (İstanbul) firmasından hizmet alımı yapılmıştır.

## 3. Bulgular

### 3.1. Selülaz üreticisi izolatın seçimi

Daha önceki çalışma ile yüksek selülaz üreticisi olarak 100 izolat içerisinde CMC içeren besiyeri kullanılarak

seçilen beş izolat (**Şekil 1a**) aktive edilmiş, aşı kültürü hazırlanmış ve BM besiyerinde katı hal fermantasyonu gerçekleştirilmiştir. Yedi günlük inkübasyon sonunda M127-1 ve M127-2B suşları katı substratın üzerini sararak iyi bir gelişim göstermiştir (**Şekil 1b**). Bu iki suşa ait enzim ekstraksiyonu yapılmış ve selülaz aktivitesi M127-1 için 1,07 U/mL ve M127-2B için 0.96 U/mL olarak belirlenmiştir. Çalışmaya M127-1 suşu ile devam edilmesine karar verilmiştir.

### 3.2 Katı substrat seçimi

Katı hal fermantasyonu optimizasyonu çalışmalarına geçilmeden önce M127-1 suşunun buğday kepeği, malt çimi ve talaşın farklı kombinasyonları ile elde edilen beş farklı besin ortamında (BM, BS, M, TM ve TS) fermantasyonları gerçekleştirilmiş ve enzim aktiviteleri ölçülmüştür (**Çizelge 1**). Besin ortamlarında kullanılan katı substratların seçiminde azot ve karbon içerikleri, kolay ve uygun maliyetli olması, katı hal fermantasyonu sonrası hücre ve enzim içeriği ile birlikte bir karışım olarak (biyoaktivatör) kompostlama sürecine dâhil edilebilirliği gözetilmiştir. En iyi selülaz aktivitesi buğday kepeği-malt çimi içeren BM besiyeri ile elde edilmiş bunu BS ve M besiyerleri takip etmiştir. Talaşın malt çimi ve soya unu ile oluşturulan TM ve TS besiyerlerinde ise enzim aktivitesi belirlenememiştir. Bununla uyumlu olarak mikrobiyal gelişimin de oldukça az gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

**Çizelge 1.** Farklı besiyerlerinde katı hal fermantasyonu sonrası selülaz aktiviteleri

Besiyeri	Selülaz aktivitesi (U/ml ekstrakt)
BM	0,704
BS	0,584
M	0,452
TM	-
TS	-

### 3.3 Selülaz üretiminin istatistiksel optimizasyonu

Response Surface Methodology (RSM) ile merkezi kompozit tasarım (Central Composite Design, CCD) deneyleri, her parametre için optimum seviyeyi ve bunların selülaz üretimi üzerindeki karşılıklı etkileşimini bulmak için literatürden önemli olduğu belirlenen nem, aşı miktarı ve inkübasyon süresi parametreleri ile gerçekleştirilmiştir (Pandey 2001). Üç önemli parametrenin bireysel ve sinerjik etkisini araştırmak için tam faktöriyel CCD kullanılmış ve diğer parametreler sabit tutulmuştur. Design Expert programının vermiş olduğu deneme deseni kullanılarak katı hal

fermantasyonları gerçekleştirilmiş ve yanıt olarak selülaz aktiviteleri ölçülmüştür. Optimizasyon, 6 eksen noktası, 8 faktöriyel nokta ve merkez noktasında 6 tekrardan oluşan toplam 20 deney yapılmasına dayalı olarak tasarlanmıştır. **Çizelge 2'**de kullanılan deneme deseni ve yanıt olarak ölçülen selülaz aktivite değerleri verilmiştir.

**Çizelge 2.** CCD deneme deseni ve deneysel yanıtlar

Run	Nem (%)	İnkübasyon (gün)	Aşı miktarı (v/w)	Yanıt Selülaz (U/ml)
1	72,5	6,5	6	0,6
2	72,5	6,5	6	0,8
3	79,93	8,58	3,62	0,79
4	65,07	8,58	3,62	1,23
5	85	6,5	6	0,72
6	72,5	6,5	6	0,88
7	60	6,5	6	0,92
8	72,5	6,5	6	1,12
9	65,07	4,42	8,38	0,78
10	72,5	6,5	10	0,95
11	72,5	6,5	2	0,43
12	72,5	10	6	1,36
13	72,5	6,5	6	0,64
14	79,93	4,42	8,38	0,49
15	65,07	8,58	8,38	0,77
16	79,93	4,42	3,62	0,59
17	72,5	6,5	6	0,69
18	72,5	3	6	0,68
19	65,07	4,42	3,62	0,51
20	79,93	8,58	8,38	0,56

Enzim aktivitesi değerleri programa girilerek, istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve optimum enzim üretiminde kullanılmak üzere aşağıda verilen ikinci dereceden denklem (1) elde edilmiştir. Denklemde aktivite, U/mL cinsinden enzim üretimini, A, B ve C sırasıyla, nem (%), inkübasyon süresi (gün) ve aşığı (v/w) ifade etmektedir.

$$\text{Aktivite} = 0.63 + 0.094 \times A + 0.19 \times B + 0.052 \times C + 0.035 \times A \times B - 0.035 \times A \times C - 0.022 \times B \times C + 0.12 \times A^2 + 0.13 \times B^2 - 0.065 \times C^2 \quad (1)$$

ANOVA sonuçları incelendiğinde modelin anlamlı olduğu belirlenmiştir (**Çizelge 3**). B (inkübasyon süresi), C (aşı miktarı), B<sup>2</sup> ve C<sup>2</sup> istatistiksel olarak anlamlı etkisi olduğu tespit edilen değişkenlerdir. p>F değerleri %95 güven aralığında 0,05'ten küçük olduğunda anlamlı etki yaptığı kabul edilmektedir. Nem miktarı (A) tek başına selülaz enzim üretiminde istatistiksel olarak anlamlı etki göstermemiştir. Modelin değerlendirilmesinde kullanılan

diğer yöntem ise lack of fit değeridir ve anlamsız çıkması beklenir. Deneysel veriler matematiksel model ile uyuyorsa bu test ile sadece modelin doğasında bulunan hatalar yansıtılır. Design Expert programı mümkün olan en uzak mesafeye her bir parametre için uç noktalar atamaktadır. Bu noktalar ile oluşturulan modelin tahmin ettiği değer, denemeden elde edilen değerlerin tekrar noktalarındaki hataya göre anlamlı

farklılık gösterip göstermediği değerlendirilir. Lack of fit değerinin anlamlı çıkması oluşturulan modelin değişkenler arasındaki ilişkiyi ifade edemediğini gösterir. İstatistiksel olarak anlamsız (non-significant) lack of fit değeri, sonuçların model ile yeterli miktarda uyduğunu göstermektedir.  $R^2$  değerinin 1'e yaklaşması deneysel veriler ile tahmin edilen verilerin korelasyon gösterdiğini ifade etmektedir.

Çizelge 3. CCD denemesinin ANOVA sonuçları

Varyasyon kaynağı	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Kareler ortalaması	F değeri	p-değeri	Prob > F
<b>Model</b>	1,2	9	0,13	5,36	0,0075	<b>Anlamlı</b>
<b>A-Nem</b>	0,12	1	0,12	4,85	0,0523	
<b>B-İnkübasyon</b>	0,50	1	0,50	20,19	0,0012	
<b>C-Aşı miktarı</b>	0,037	1	0,037	1,47	0,0434	
<b>AB</b>	0,097	1	0,097	0,39	0,5451	
<b>AC</b>	0,097	1	0,097	0,39	0,5451	
<b>BC</b>	0,042	1	0,042	0,16	0,6959	
<b>A<sup>2</sup></b>	0,20	1	0,20	8,20	0,0669	
<b>B<sup>2</sup></b>	0,24	1	0,24	9,72	0,0109	
<b>C<sup>2</sup></b>	0,06	1	0,060	2,41	0,0151	
Artık (sapma)	0,25	10	0,025	2,41		
Uyum eksikliği	0,20	5	0,041	1,27	0,0658	<b>Anlamlı değil</b>
Saf hata	0,047	5	0,090			
Toplam	1,45	19				
$R^2$				0,8282		
Hassasiyet derecesi				8,594		

Adeq. precision değeri tasarım noktalarında tahminlenen değerlerin mesafelerini, ortalama tahmin hatasına göre karşılaştırır ve 4'ten büyük değer elde edilmesi istenir (Box *et al.* 1978, Bezerra *et al.* 2008, Antony 2023).

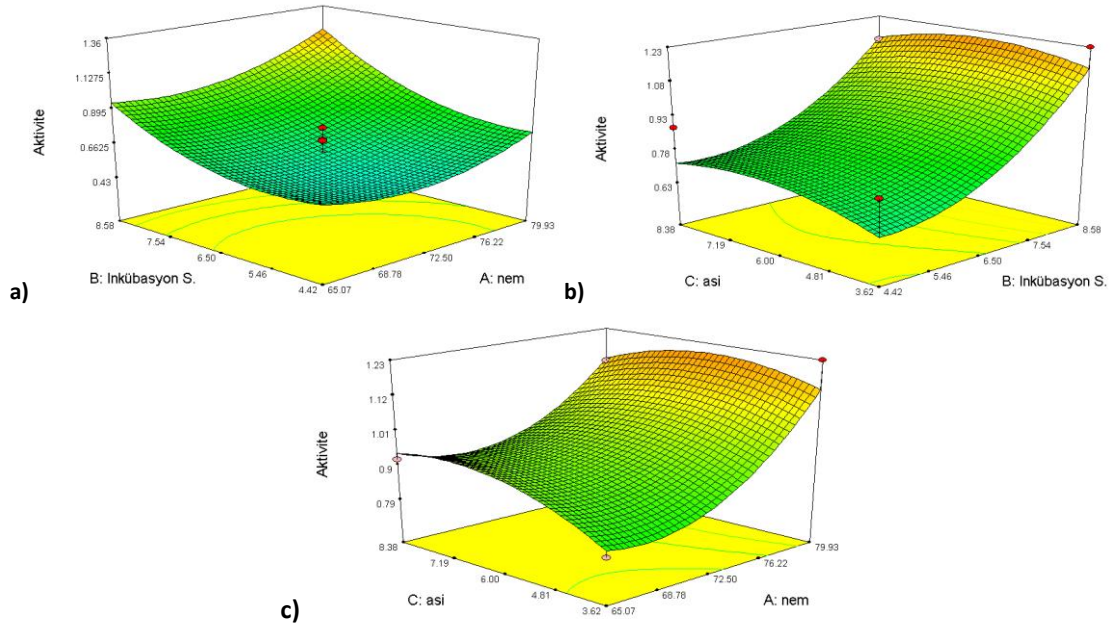
**Şekil 2'**de denemelerin sonucunda elde edilen model ile program tarafından çizilen 3B grafikler sunulmuştur. Renklendirme, üretilen selülazın Unit miktarlarına göre yapılmaktadır. Kırmızı renge yaklaşan bölgeler üretimin en yüksek olduğu noktaları göstermektedir. Üç boyutlu grafikler incelendiğinde inkübasyon süresinin üretim üzerindeki etkisinin yüksek olduğu ve inkübasyon süresi arttıkça enzim aktivitesinin de arttığı görülmektedir. Programın verdiği doğrulama deneyi ile nem %80, inkübasyon süresi 9 gün ve aşı miktarı 8.4 (v/w) olarak gerçekleştirilmiş ve enzimatik aktivite %95 güven aralığı

(0,79-1,61 U/mL) içerisinde 1,28 U/mL olarak ölçülmüştür. Optimizasyon sonrası enzim aktivitesinde yaklaşık 1,8 kat artış elde edilmiştir.

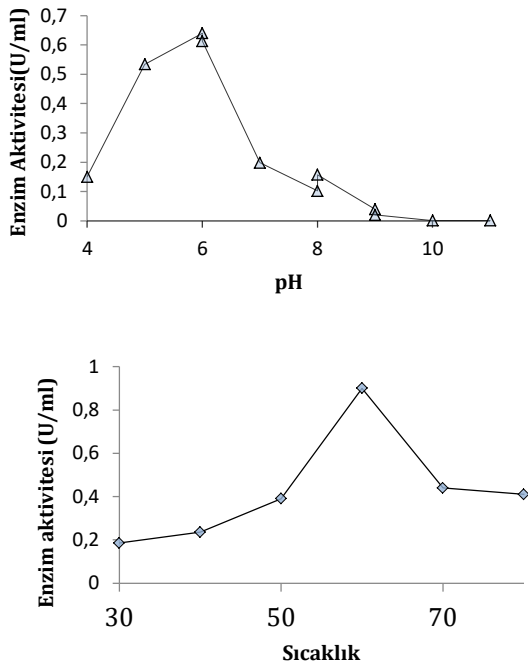
### 3.4 Optimum pH ve sıcaklık

pH'nın enzimin katalitik aktivitesine etkisini belirlemek için pH 4.00-11.00 aralığında farklı substrat çözeltileri kullanılarak DNS yöntemi ile aktivite tayini yapılmıştır. Selülazın optimum aktivite gösterdiği pH değerinin 6 olduğu belirlenmiştir (**Şekil 3a**). Sıcaklığın enzimin katalitik aktivitesine etkisini belirlemek için enzim aktivitesi 30-80°C aralığında ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda 60°C'de enzimin maksimum aktivite gösterdiği tespit edilmiştir (**Şekil 3b**).





**Şekil 2.** Optimizasyon parametrelerinin birbirleri ile etkileşiminin 3B görünümü a) inkübasyon süresi-nem, b) aşı miktarı-inkübasyon süresi, c) aşı miktarı-nem

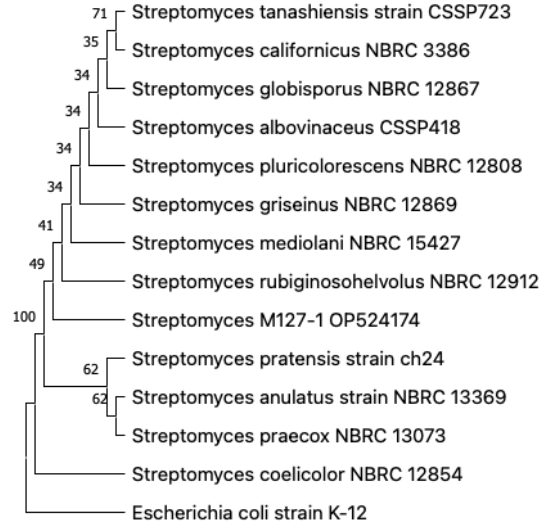


**Şekil 3.** pH (a) ve sıcaklığın (b) selüloz aktivitesine etkisi

### 3.5 Tanımlama

Tanımlama çalışması sonucunda, izolat M127-1 için elde edilen konsensus diziler NCBI (National Center for Biotechnology Information) web sayfasında (<http://blast.ncbi.nlm.nih.gov>) nükleotid dizi veri bankası kullanılarak BLAST (Basic Local Alignment Search Tool) analizi yapılmış ve izolatın *Streptomyces* cinsi üyesi olduğu belirlenmiştir (Tamura *et al.* 2021). Ayrıca elde edilen 16S rDNA dizisinin NCBI nükleotid veri

bankasına girişi yapılmış ve erişim (OP524174) numarası alınmıştır. M127-1'in 16S rDNA dizi analiz sonucuna dayanılarak çizilen filogenetik ağaç modeli **Şekil 4**'te sunulmuştur.



**Şekil 4** İzolat M127-1'in 16S rDNA dizi analiz sonucuna dayanılarak çizilen filogenetik ağaç (3000 bootstrap)

### 4. Tartışma ve Sonuç

Her gün dünyada lignoselülozik kökenli çok miktarda biyokütle atığı üretilmektedir. Selüloz biyosferin en bol bulunan, bitki hücre duvarı bileşeni ve karasal dünyada en fazla bulunan biyolojik bileşiktir. Tarımsal artıklar, kâğıt ve gıda atıkları gibi selüloz açısından zengin malzemeler, işlenmesi zor olan organik atıkların oluşumuna katkıda bulunur. Selüloz kullanılarak, bu atık

malzemeler verimli bir şekilde katma değerli ürünlere dönüştürülebilir (Khan *et al.* 2016). Selüloz üreten mikroorganizmaların veya selüloz enzimlerini aşırı ifade eden genetiği değiştirilmiş organizmaların kullanılması, kompostlama verimliliğini daha da artırma potansiyeline sahiptir (Chen *et al.* 2021). Mikrobiyal selülozlar, endoglukanaz, ekzoglukanaz ve  $\beta$ -glukosidaz aktiviteleri dâhil olmak üzere çeşitli hidrolitik aktiviteler sergileyerek selülozun verimli bir şekilde parçalanmasını sağlar (Celaya-Herrera *et al.* 2021).

Lignoselülozik malzemelerin parçalanması doğal ortamlarda çoğunlukla beyaz çürükçül funguslar tarafından gerçekleştirilir, ancak kompostlama işleminde lignoselülozik biyokütlenin bozunmasındaki merkezi rol aktinobakteriler tarafından gerçekleştirilir (Crawford 1978, Ramachandra *et al.* 1988, Sanchez *et al.* 2017). Bu bozunma kabiliyetinden dolayı, bu bakteri grubunun izolasyon ve karakterizasyonuna sadece kompostlama uygulamaları için değil aynı zamanda kağıt endüstrisi için de özel bir ilgi vardır (Crawford *et al.* 1993, Cuesta *et al.* 2012, Kausar *et al.* 2011). Kompostta bulunan aktinobakterilerin temsilcilerinin bazıları *Streptomyces thermovulgaris*, *Actinobifida chromogena*, *Thermoactinomyces vulgaris* (Insam and de Bertoldi 2007), *Micromonospora carbonacea* (Kausar *et al.* 2011), *Streptomyces lincolnensis*, *Streptomyces varieustantanus* (Cuesta *et al.* 2012) ve *Streptomyces sennicomposti* (Duangupama *et al.* 2022) örnek verilebilir. Bu çalışmada tanımlama için benzerlik analizi, M127-1 izolatının *Streptomyces* cinsinin bir üyesi olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle ürettikleri sekonder metabolitleri ile iyi bilinen gram pozitif bir bakteri olan *Streptomyces* üyeleri antibiyotik endüstrisinin dayanak noktasını oluşturmaktadırlar. Ancak çeşitli biyopolimerleri parçalama yetenekleriyle de birçok hücre dışı hidrolazları ürettikleri bilinmektedir (Korn-Wendisch and Kutzner 1992, Samuel *et al.* 2022).

Kompostlama süreçlerinde önemli bir hidrolitik enzim olan selüloz konusunda birçok çalışma yapılmış olmakla birlikte bu çalışmada, yerli bir *Actinobacteria* izolatı enzim aktivite taraması ile seçilerek *Streptomyces* sp. M127-1 (OP524174) olarak tanımlanmış ve selüloz üretim optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Katı hal fermantasyon tekniği ise kompostlama sürecinin bir katı hal fermantasyonu olması sebebiyle bu çalışmada tercih edilmiş ve ayrıca kompostlama süreçlerindeki benzer şekilde selülozik içerikli substratlar kullanılarak selüloz üretimi gerçekleştirilmiştir.

Substratların kombinasyonunda buğday kepeği ve talaş, karbon kaynağı (lignoselülozik yapı) olarak kullanılmıştır

(Manan and Webb 2017). Mikroorganizma selüloz sentezleyerek selülozik yapıyı parçalamış ve karbon ihtiyacını karşılamıştır. Malt çimi ve soya unu ise azot kaynağı olarak kullanılmıştır (Sargın ve Öngen 2003). En iyi sonuç BM kombinasyonu ile elde edilirken malt çimi yerine soya unu eklenmesi (BS) aktiviteyi %17 azaltmıştır. Bu etki malt çimine atfedilebilir görülmektedir. BM besiyerinde malt çimi azot kaynağı olarak katı substratın onda biri olarak kullanılmıştır. Tek başına malt çimi kullanımı ile aktivitenin %36 azaldığı belirlenmiştir (**Çizelge 1**).

Yakın zamanda gerçekleştirilen kapsamlı bir çalışmada *Streptomyces*'in organik madde bozulması üzerindeki etkisini aydınlatmak için kompostlama deneyleri gerçekleştirilmiş ve kompost sistemlerine eklenen suşların tüm kompost mikrobiyotasına hâkim olduğu ve bu aşamadaki en önemli faktörün enzim aktivitesi olduğu rapor edilmiştir (Kocak *et al.* 2023). Bostubayeva ve arkadaşları (2023) yaptıkları çalışmada iki *Streptomyces* türünün kompostlama süreçlerinde iyi bir biyoaktivatör olacağını rapor etmişlerdir. Birçok etkili mikrobiyal türün kompostlama süreçlerine inokülasyonun yapılmasının değerlendirildiği derlemede *Streptomyces* üyelerinin organik materyali parçalamada elde edilen olumlu sonuçlarına da değinilmiştir (Zainudin *et al.* 2022).

Nem, aşı miktarı ve inkübasyon süresi değişkenlerinin BM besiyerinde istatistiksel optimizasyonu sonucu anlamlı bir model elde edilmiş (**Çizelge 3**) ve aktivite yaklaşık 1,8 kat arttırılmıştır. İstatistiksel optimizasyon tasarımının geleneksel optimizasyon çalışmalarına göre en büyük avantajlarından birisi değişkenlerin ikili etkileşimlerini gösterebilmesidir. Üç boyutlu grafiklerde bir değişken sabit iken diğer iki değişkenin selüloz üretimine etkileri incelenebilmektedir (**Şekil 2**).

Bu çalışma özellikle kompostlama süreçlerinde *Streptomyces* üyelerinin gerek hücre olarak komposta karıştırılması gerekse de selüloz ve hücre içeren ham fermantasyon kütesinin doğrudan kompostlanacak selülozik içerikli atıklara karıştırılmasının etkin kompostlamada önemli olabileceği varsayımından hareketle selülozik içerikli katı substratlar kullanılarak üretim planlanmıştır. Enzimin 60°C'de en iyi aktiviteyi göstermesi kompostlama sürecinde yer alan ısınma periyodunda aktivitesini sürdüreceğini göstermektedir. Termostabilite, yüksek sıcaklıkta hızlı reaksiyona olanak tanıyan ve böylece enzim kullanımını azaltan herhangi bir endüstriyel enzimin en çok arzu edilen özelliğidir (Patel *et al.* 2019). Kompostlama süreçlerinde termofilik faz olarak ta isimlendirilen ısınma periyodu, organik maddenin parçalandığı ve ayrışmanın çoğunun

gerçekleştiği önemli bir süreçtir. Aktinobakteri üyeleri kompostta bulunan en baskın türlerdir ve ısınma periyodunda önemli rol oynarlar. Doğada da bu organizmalar toprakta bol bulunur ve ölü bitki ve hayvanların karmaşık polimerlerini parçalayabilen yüksek guanin ve sitozin içeriğine sahip bakterilerdir. Büyüme hızları bakterilere göre daha yavaştır ancak biyolojik olarak daha az parçalanabilen, karmaşık organik bileşikler diğer bakterilerle karşılaştırıldığında daha büyük parçalama kapasitesine sahiptirler. Bu bakteriler, selülaz, hemiselülaz ve lignolitik enzimler gibi lignoselülazların salgılanması yoluyla bitki biyokütlesindeki sert lignoselülozu parçaladıkları için lignoselüolitik mikroorganizmalar olarak bilinir (Palaniveloo *et al.* 2020). Bu çalışmada da kompostlama sürecinde özellikle termofil fazda katalizör etki gösterecek termostabil selülaz üretimi yapan suşun optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Selülaz üretimi açısından değerlendirildiğinde buğday kepeği, malt çimi ve talaş gibi lignoselüolitik substratların kullanım öncesi ön hidroliz işlemlerinin enzim aktivitesini artırıcı etkisi olabilir (Celaya-Herrera *et al.* 2021). Ancak yüksek tonlarda gerçekleştirilen kompostlama süreçlerinde uygulanacak işlemlerin enerji maliyetlerinin iyi hesaplanması gerekmektedir. Substrat seçenekleri saman ve küspe gibi ülkemize özgü diğer agroendüstriyel atıklar ile genişletilebilir. Diğer yonden ise *Streptomyces* sp. M127-1'in bir gen kaynağı olarak değerlendirilmesi de bir başka seçenektir. Selüloz atıklarının ekonomik olarak uygulanabilir işlemlerle değerli yan ürünlere dönüştürülmesi, uzun zamandır üzerinde çalışılan bir konudur. Bu çalışma ile daha önce izole edilen yüz adet aktinomiset içerisinden *Streptomyces* sp. M127-1'in buğday kepeği ve malt çimi kullanılarak termotolerant selülaz üretiminde verimli şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir. Katı hal fermantasyonu sonrası tüm substrat ve hücrelerin bir karışım halinde biyoaktivatör olarak kompostlama sistemine aktarılabilir olması da süreçlerin basitleştirilmesine katkı sağlayacaktır.

#### Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

#### Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Araştırma, Deneysel tasarım, Doğrulama, Görselleştirme, Yazma –orijinal taslak

Yazar 2: Fikir Sahibi, Analiz ve yorumlama, Yazma, inceleme ve düzenleme, Proje Yönetimi, 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 dâhil edilmiştir.

## Teşekkür

Bu çalışma Ege Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü FYL-2020-22356 nolu proje ile desteklenmiştir. Yazarlar Prof. Dr. Sait SARGIN'a destekleri için teşekkür eder.

## 5. Kaynaklar

- Abdul Manan, M., Webb, C., 2017. Modern microbial solid state fermentation technology for future biorefineries for the production of added-value products. *Biofuel Research Journal*, **16**, 730-740. <https://doi.org/10.18331/BRJ2017.4.4.5>
- Antony, J., 2023. Design of experiment for engineers and scientist. Elsevier.
- Ayılara, M.S., Olanrewaju, O.S., Babalola, O.O., Odeyemi, O., 2020. Waste management through composting: *Challenges and potentials. Sustainability*, **12**(11), 4456. <https://doi.org/10.3390/su12114456>
- Bezerra, M.A., Santelli, R.E., Oliveira, E.P., Villar, L.S., Escalera, L.A. 2008. Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta*, **76**(5), 965-977. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.05.019>
- Bhatti, A.A., Haq, S., Bhat, R.A., 2017. Actinomycetes benefaction role in soil and plant health. *Microbial pathogenesis*, **111**, 458-467. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2017.09.036>
- Bostubayeva, M., Baimbetova, E., Makenova, M., Shumenova, N., Sarmanova, R., Nauanova, A., 2023. Screening and evaluation of potential microbial bio-activators used in sewage sludge composting. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 1-9. <https://doi.org/10.22124/CJES.2023.6936>
- Box, G.E., Hunter, W.H., Hunter, S. 1978. Statistics for experimenters (Vol. **664**). New York: John Wiley and Sons.
- Celaya-Herrera, S., Casados-Vázquez, L.E., Valdez-Vázquez, I., Barona-Gómez, F., Bideshi, D.K., Barboza-Corona, J.E., 2021. A cellulolytic *Streptomyces* sp. isolated from a highly oligotrophic niche shows potential for hydrolyzing agricultural wastes. *BioEnergy Research*, **14**, 333-343. <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10174-z>
- Chen, X., Cheng, W., Li, S., Tang, X., Wei, Z., 2021. The "quality" and "quantity" of microbial species drive the degradation of cellulose during composting. *Bioresource Technology*, **320**, 124425.

- <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124425>
- Crawford, D. L., 1978. Lignocellulose decomposition by selected *Streptomyces* strains. *Applied and Environmental Microbiology*, **35**(6), 1041-1045.  
<https://doi.org/10.1128/aem.35.6.1041-1045.1978>
- Crawford, D.L., Lynch, J.M., Whipps, J.M., Ousley, M. A., 1993. Isolation and characterization of actinomycete antagonists of a fungal root pathogen. *Applied and Environmental Microbiology*, **59**(11), 3899-3905.  
<https://doi.org/10.1128/aem.59.11.3899-3905.1993>
- Cuesta, G., García-de-la-Fuente, R., Abad, M., Fornes, F., 2012. Isolation and identification of actinomycetes from a compost-amended soil with potential as biocontrol agents. *Journal of Environmental Management*, **95**, S280-S284.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.023>
- Danso, B., Ali, S.S., Xie, R., Sun, J., 2022. Valorisation of wheat straw and bioethanol production by a novel xylanase-and cellulase-producing *Streptomyces* strain isolated from the wood-feeding termite, *Microcerotermes* species. *Fuel*, **310**, 122333.  
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122333>
- Demir, T., Hameş, E.E., Öncel, S.S., Vardar-Sukan, F., 2015. An optimization approach to scale up keratinase production by *Streptomyces* sp. 2M21 by utilizing chicken feather. *International Biodeterioration & Biodegradation*, **103**, 134-140.  
<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.04.025>
- Duangupama, T., Pittayakhajonwut, P., Intaraudom, C., Suriyachadkun, C., Sirirote, P., He, Y.W., Thawai, C., 2022. *Streptomyces sennicomposti* sp. nov., an actinomycete isolated from compost of *Senna siamea* (Lam.). *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, **72**(4), 005320.  
<https://doi.org/10.1099/ijsem.0.005320>
- Ghose, T. K., 1987. Measurement of cellulase activities. *Pure and Applied Chemistry*, **59**(2), 257-268.  
<https://doi.org/10.1351/pac198759020257>
- Hobbs, G., Frazer, C.M., Gardner, D.C., Cullum, J.A., Oliver, S.G., 1989. Dispersed growth of *Streptomyces* in liquid culture. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **31**, 272-277.  
<https://doi.org/10.1007/BF00258408>
- Insam, H., and De Bertoldi, M., 2007. Microbiology of the composting process. In *Waste Management Series Vol. 8*. Elsevier, pp. 25-48.  
[https://doi.org/10.1016/S1478-7482\(07\)80006-6](https://doi.org/10.1016/S1478-7482(07)80006-6)
- Kausar, H., Sariah, M., Mohd Saud, H., Zahangir Alam, M., Razi Ismail, M., 2011. Isolation and screening of potential actinobacteria for rapid composting of rice straw. *Biodegradation*, **22**, 367-375.  
<https://doi.org/10.1007/s10532-010-9407-3>
- Khan, M.N., Luna, I.Z., Islam, M.M., Sharmeen, S., Salem, K.S., Rashid, T.U., Zaman, A., Haque, P., Rahman, M.M., 2016. Cellulase in waste management applications. In *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering*, Elsevier, pp. 237-256.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63507-5.00021-6>
- Kocak, F.O., Tanir, S.G.E., Cetin, A.K., Degirmenci, L., 2023. Simultaneous evaluation of composting experiments and metagenome analyses to illuminate the effect of *Streptomyces* spp. on organic matter degradation. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, **39**(3), 70.  
<https://doi.org/10.1007/s11274-023-03516-4>
- Korsa, G., Konwarh, R., Masi, C., Ayele, A., Haile, S., 2023. Microbial cellulase production and its potential application for textile industries. *Annals of Microbiology*, **73**(1), 13.  
<https://doi.org/10.1186/s13213-023-01715-w>
- Kumar, M., Kumar, P., Das, P., Solanki, R., Kapur, M.K., 2022. Proactive role of *Streptomyces* spp. in plant growth stimulation and management of chemical pesticides and fertilizers. *International Journal of Environmental Science and Technology*, **19**(10), 10457-10476.  
<https://doi.org/10.1007/s13762-021-03473-1>
- Korn-Wendisch F, Kutzner HJ (1992) The family Streptomycetaceae. In: Balows A, Trüper HG, Dworkin M, Harder W, Schleifer KH (eds) *The prokaryotes*. Springer, New York, pp 921–995.
- Lee, Y.J., Kim, B.K., Lee, B.H., Jo, K.I., Lee, N.K., Chung, C.H., Lee, Y-C., Lee, J.W., 2008. Purification and characterization of cellulase produced by *Bacillus amyloliquefaciens* DL-3 utilizing rice hull. *Bioresource Technology*, **99**(2), 378-386.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.12.013>
- Manan, M.A., and Webb, C., 2017. Design aspects of solid state fermentation as applied to microbial bioprocessing. *Journal of Applied Biotechnology and Bioengineering* **4**(1), 91.  
<https://doi.org/10.15406/jabb.2017.04.00094>
- Mandenius, C.F., and Brundin, A., 2008. Bioprocess optimization using design-of-experiments

- methodology. *Biotechnology Progress*, **24**(6), 1191-1203.  
<https://doi.org/10.1002/btpr.67>
- Mazumder, P., Akhil, P.M., Khwairakpam, M., Mishra, U., Kalamdhad, A.S., 2021. Enhancement of soil physico-chemical properties post compost application: Optimization using Response Surface Methodology comprehending Central Composite Design. *Journal of Environmental Management*, **289**, 112461.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112461>
- Mendoza-Cal, A., Cuevas-Glory, L., Lizama-Uc, G., & Ortiz-Vázquez, E., 2010. Naringinase production from filamentous fungi using grapefruit rind in solid state fermentation. *African Journal of Microbiology Research*, **4**(19), 1964-1969.
- Palaniveloo, K., Amran, M.A., Norhashim, N.A., Mohamad-Fauzi, N., Peng-Hui, F., Hui-Wen, L., Kai-Lin, Y., Jiale, L., Chian-Yee, M. G., Jing-Yi, L., Gunasekaran, B., Razak, S.A., 2020. Food waste composting and microbial community structure profiling. *Processes*, **8**(6), 723.  
<https://doi.org/10.3390/pr8060723>
- Patel, A.K., Singhania, R.R., Sim, S.J., & Pandey, A., 2019. Thermostable cellulases: current status and perspectives. *Bioresource Technology*, **279**, 385-392.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.049>
- Raimbault, M. 1998. General and Microbiological Aspects of Solid Substrate Fermentation *Electronic Journal of Biotechnology*, **1**(3), 26-27.  
<http://dx.doi.org/10.4067/S0717-34581998000300007>
- Ramachandra, M., Crawford, D.L., Hertel, G., 1988. Characterization of an extracellular lignin peroxidase of the lignocellulolytic actinomycete *Streptomyces viridosporus*. *Applied and Environmental Microbiology*, **54**(12), 3057-3063.  
<https://doi.org/10.1128/aem.54.12.3057-3063.1988>
- Sánchez, Ó. J., Ospina, D. A., & Montoya, S. (2017). Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process. *Waste management*, **69**, 136-153.  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.012>
- Samuel, M.S., Govarthan, M., Selvarajan, E., 2022. A comprehensive review on strategic study of cellulase producing marine actinobacteria for biofuel applications. *Environmental Research*, **214**, 114018.  
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114018>
- Sargın, S, ve Göksungur, Y., 2007. Çeşitli tarımsal atık ve yan ürünlerin katı kültür fermantasyonu ile laktik asit üretiminde kullanılabilirliklerinin incelenmesi. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, **44**(3), 89-99.
- Sargın, S., ve Öngen, G., 2003. Kanatlı yemi katkı olarak kullanılan ksilanaz enziminin katı kültür fermantasyon yöntemi ile üretiminde ölçek büyütme çalışmaları. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, **40**(3).
- Sun, C., Wei, Y., Kou, J., Han, Z., Shi, Q., Liu, L., Sun, Z., 2021. Improve spent mushroom substrate decomposition, bacterial community and mature compost quality by adding cellulase during composting. *Journal of Cleaner Production*, **299**, 126928.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126928>
- Tamura, K., Stecher, G., Kumar, S., 2021. MEGA11: molecular evolutionary genetics analysis version 11. *Molecular Biology and Evolution*, **38**(7), 3022-3027.  
<https://doi.org/10.1093/molbev/msab120>
- Topatan, Z.Ş., and Katı H., 2022. Screening of actinomycetes from *Cystoseira barbata* (Stackhouse) C. Agardh compost for their enzyme and antibacterial activities. *Trakya University Journal of Natural Sciences*. **23**(2): 113-124.  
<https://doi.org/10.23902/trkjnat.1059974>
- Tuomela, M., Vikman, M., Hatakka, A., Itävaara, M., 2000. Biodegradation of lignin in a compost environment: a review. *Bioresource Technology*, **72**(2), 169-183.  
[https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00104-2](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00104-2)
- Zainudin, M.H.M., Zulkarnain, A., Azmi, A.S., Muniandy, S., Sakai, K., Shirai, Y., Hassan, M.A., 2022. Enhancement of agro-industrial waste composting process via the microbial inoculation: a brief review. *Agronomy*, **12**(1), 198.  
<https://doi.org/10.3390/agronomy12010198>



## Investigating The Relationship Between Vehicle Speed and Pothole Detection by Using Mobile Phone

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 17.07.2023

Kabul/Accepted: 15.01.2024

Yayımlandı/Published: 27.02.2024

### Cep Telefonu Kullanılarak Araç Hızı ile Çukur Tespiti Arasındaki İlişkinin Araştırılması

Ömer KAYA<sup>1\*</sup>, Muhammed Yasin ÇODUR<sup>2</sup>

<sup>1</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Erzurum, Türkiye

<sup>2</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Teknoloji Fakültesi, American University of the Middle East, Egaila, Kuveyt

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Abstract

It is known that road pavements are damaged due to time, climatic conditions and construction errors. Considering these damages, the most important road defect that reduces road safety and comfort is potholes. Especially as the width and depth of the pothole increases, driving safety is also endangered. In addition, the locations of these potholes, especially on urban roads, are determined manually in many regions. This process causes delays in the maintenance and repair of the potholes. To this end, the authors plan an in-vehicle integrated system consisting of multiple stages to automatically detect potholes occurring in the road network. The main purpose of the planned system is to identify potholes with high accuracy. However, the effect of vehicle speed on pothole detection in this system is unknown. In order to solve this complex situation, real-time video recordings were made on the same road and pothole at different vehicle speeds. Then, the pothole detection process was realized through these videos with the single-stage detector YOLOv7 vs YOLOv8. When the results obtained were examined, exact relationship could not be determined between vehicle speed and pothole detection. This situation may vary according to various parameters such as camera angle, image quality, sunlight condition. In addition, when both models are compared according to the performance criteria, YOLOv7 has a partial superiority over YOLOv8 in mAP0.5, precision, recall and F1 score values. It is especially significant that these criteria are close to 1. Finally, the perception results obtained from the images obtained from the video showed that there was no overfitting in the models.

**Anahtar Kelimeler:** Road damage; Pothole; Automatic Detection; Speed; Intelligent Transportation Systems.

#### Öz

Yol kaplamalarının zaman, iklim koşulları ve inşaat hatalarından dolayı bozulduğu bilinmektedir. Bu hasarlar dikkate alındığında yol güvenliğini ve konforunu azaltan en önemli yol kusurlarından biri çukurlardır. Özellikle çukurun genişliği ve derinliği arttıkça sürüş güvenliğini de tehlikeye atmaktadır. Özellikle şehir içi yollarda bu çukurların konumları birçok bölgede manuel olarak belirlenmektedir. Bu süreç çukurların bakım ve onarımında gecikmelere neden olmaktadır. Bu amaçla yazarlar, yol ağında meydana gelen çukurları otomatik olarak tespit etmek için birden fazla aşamadan oluşan araç içi entegre bir sistem planlıyorlar. Bu sistemin ilk aşaması, yüksek doğrulukta nesne algılama yöntemleri ile çukurların belirlenmesidir. Ancak bu sistemde araç hızının çukur tespiti üzerindeki etkisi bilinmemektedir. Bu karmaşık durumu çözmek için aynı yol ve çukur üzerinde farklı araç hızlarında gerçek zamanlı video kayıtları yapılmıştır. Daha sonra YOLOv7 ve YOLOv8 tek aşamalı detektör ile bu videolar üzerinden çukur tespit işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde araç hızı ile çukur tespiti arasında kesin bir ilişki tespit edilememiştir. Bu durum kamera açısı, görüntü kalitesi, güneş ışığı durumu gibi çeşitli parametrelere göre değişiklik gösterebilmektedir. Ayrıca her iki model performans kriterlerine göre karşılaştırıldığında YOLOv7'nin mAP0.5, hassasiyet, geri çağırma ve F1 skoru değerlerinde YOLOv8'e kısmi üstünlüğü bulunmaktadır. Bu kriterlerin 1'e yakın olması anlamlıdır. Son olarak videodan elde edilen görsellerden elde edilen algılama sonuçları, modellerde aşırı uyumun olmadığını göstermiştir.

**Keywords:** Yol Hasarı; Çukur; Otomatik Algılama; Hız; Akıllı Ulaşım Sistemleri.

#### 1. Introduction

It is an undeniable fact that the material and spiritual demands of people have increased in recent years. The fact that Z and Y generations have excessive

consumption habits has caused changes in the structures of societies. In fact, 75 percent of the world's population consists of people under the age of 65, and 25 percent of this proportion consists of people under the age of 14 (Int. Ref. 1). In addition to consumption habits, excessive



mobility desires and the search for easy solutions to problems give rise to different approaches. Therefore, researchers and some companies in recent years have been offering open-source opportunities. This situation is considered as a policy of obtaining the highest efficiency from the existing young potential. To summarize, the artificial intelligence-based solutions used in recent years are not only related to the development of technology. It is shown as a success of the young people's community that supports this development and wants a quick, simple, cheap solution. One of the biggest steps of this success is image processing based on convolutional neural networks (CNN) (Zaidi et al. 2022). Image processing is frequently used to solve many existing problems (image enhancement (Huang and Su 2021), object detection (Wu et al. 2023), health sector (Pi et al. 2021), defence industry (Kim et al. 2021)) today. It is developing day by day and is used in different fields.

In this study, the automatic detection process of potholes, which is one of the most dangerous road damages occurring in the road network, is examined in detail. It causes material and moral damage to traffic components, especially when compared to other road damages. In addition, the wheel sizes and inadequate suspension systems of micro-multiplier vehicles increase the damage caused by potholes. Different types of road damage such as potholes, longitudinal, alligator and lateral cracks occur in the road network (Maeda et al. 2018a). The road covering where these damages occur is covered with asphalt concrete. Lifespan of flexible pavements used in the road network; It is directly proportional to the type of construction, the quality and size of the aggregate used, the quality and ratio of bitumen, the quality of workmanship, the ambient temperature and the traffic load passing over it. If one of them is not designed properly, damage to the road surface occurs. The occurrence of these damages is actually a traffic safety problem and poses a danger to human life. We just state a few facts from related studies worldwide. While 3597 people died due to potholes in India, 50 cyclists were seriously injured due to bad road conditions in the UK (Int.Ref. 2-3). The size of the pothole is very important in the severity of accidents. While the advanced safety and suspension systems of the new generation vehicles overcome small potholes, small wheeled vehicles such as bicycles and scooters are seriously damaged. There are studies and products for the detection of existing road damage on the road network. In particular, it is possible to obtain high-resolution coating status from coating surfaces with

vehicles with laser line-scan cameras and three-dimensional cameras. In addition, the depth defects existing in road surface are determined by the scan process. However, such imaging equipment mounted on dedicated vehicles is expensive and is often unaffordable for local agencies with limited budgets. Developing countries have entered economically more difficult periods with the recent cases (pandemic process). Therefore, simple but effective object detection-based smartphone applications are a solution to some problems. Moreover, road maintenance plays a vital role in the socio-economic development of a country. Institutions generally carry out road maintenance through notification or manual observations. This situation should until be done automatically and data flow should be provided from the problematic places.

The importance of the automatic detection system for the maintenance and repair of potholes in the road network for all components using the road network is increasing day by day. The authors plan to design an embedded system integrated into the vehicles. However, there are some research questions (RQ) in this process, which consists of different stages. The answer to the first question was answered within the scope of this study.

**RQ-How does the accuracy rate of the object detection methods used change in detecting potholes in the road network at different vehicle speeds?**

The authors wanted to bring the answer to this question to the literature. Because this system, which is planned to be designed, is intended to detect urban road defects. Therefore, object detection accuracy at different vehicle speeds is the key part of the system. It is thought that this system will be an intelligent transportation system product that will increase traffic comfort and safety in urban transportation. As the first step of this in this study, the pothole detection process based on the YOLOv7 (Wang et al. 2022) and YOLOv8 (Ultralytics 2023) object detection algorithm was performed. It has been investigated with what accuracy rates the potholes was detected automatically via real-time video.

The paper is divided into five sections following this introductory section. In the next section, a brief overview of the identification processes of road defects occurring in road networks and the contribution of this study to the subject is presented, while in the 3rd section, brief material information about the study and information about the method used are given. Chapter 4 includes the analysis results obtained about the pothole and vehicle speed and discussion of the results. Finally,

the last section summarizes the main results of this study.

## 2. Literature Review

In addition to the increase in success criteria in object detection models in recent years, the importance of object detection has increased because it can provide solutions to problems existing in many sectors. The trend and need for autonomy occurring in vehicles has greatly contributed to the object detection process. In this section, brief information about object detection in the literature, road damage in the road network and the studies carried out in the field of pothole detection are given. In this section, no comparisons about object detection methods be presented. Because object detection methods are constantly being updated and improved. However, readers can review (Sultana et al. 2019, Zaidi et al. 2022) for detailed information about these models.

With object detection models, many things such as people, animals, goods, disabled roads, pedestrian crossings, defects in the road network, vehicle license plates, cancerous cells are detected

(Everingham et al. 2010, Russakovsky et al. 2015, Tsung-Yi et al. 2014). The purpose and detection method of each detection process is different. The object detection process, which started with AlexNet (Krizhevsky and Hinton 2012) in 2012, continues to improve every passing year.

Nowadays, object detection studies are usually based on R-CNN (Hoang Ngan Le et al. 2016) and YOLO (Redmon et al. 2016). The latest updated versions of these two basic detection methods are quite state-of-the-art products in terms of speed and accuracy. In order for the readers to understand more clearly, some studies were given in the form of tables.

**Table 1.** Some studies conducted about road distress

Content of the studies	Applied method	Application Area / Data source	Ref.
In the study, an ensemble model was proposed for the efficient detection and classification of road damage. The proposed ensemble model has been extensively tested with different model versions. It was observed that the presented data set had two separate test sets and the F1 value for both cases was 0.628 and 0.6358, respectively.	YOLO-v4 / Region CNN	Experimental/ data set collected from Czech Republic-Japan-India was used.	(Doshi and Yilmaz 2020)
Since the road damage caused by the earthquake is constantly changing, it is necessary to monitor the road damage situation with remote sensing. For this purpose, the study proposes an automated approach to quickly determine road damage using high resolution satellite images and road maps. It is used to show the status of damage change by reference to roadside lines. If there is a change in the roadside line after the earthquake, this is the biggest proof that the road has been damaged. Damaged road sections are determined by comparing before / after the earthquake.	Remote Sensing, Edge Detector with Embedded Confidence (EDEC), Hough transformation	Wenchuan	(Ma et al. 2013)
This study introduced a YOLOv5x based solution to detect various road damages. Model training was carried out on four main damage types and 26620 images. The number of data used after data pre-processing was updated to 12195. The F1 values are 0.568 for test1 and 0.571 for test2, respectively.	YOLO-v5 / Deep learning	Experimental/ data set collected from Czech Republic-Japan-India was used.	(Jeong 2020)

<p>In this study, a new system has been developed that detects road damage with a camera installed in the vehicle. Road damage detection with the CNN model has been successfully performed with 96% accuracy.</p>	<p>CNN-AlexNet</p>	<p>It was not mentioned exactly from which area the data were obtained.</p>	<p>(Aşçı and Karsıgil 2020)</p>
<p>With the help of high-resolution images obtained by remote sensing, road damage extraction based on road vector data and change detection method was performed. The road line is determined before the earthquake and the damaged road sections are determined by comparing the same road line after the earthquake. The damage in this study should not be confused with other types of damage. Earthquakes cause structural rupture and separation damage to the road network.</p>	<p>Remote sensing</p>	<p>Wenchuan</p>	<p>(Gong et al. 2012)</p>
<p>The authors created a complementary system for detecting road surface anomalies using two different methods. A smartphone-based system has been developed that can take images of problematic sections on the road surface and measure the acceleration of the vehicle. A comparative analysis was made by classifying the obtained images according to the road surface abnormality and transferring the changes in acceleration to histogram graphs. The detection process was carried out via the image.</p>	<p>Fully CNN / Three-axis acceleration</p>	<p>Goyang City</p>	<p>(Lee et al. 2021)</p>
<p>Deep learning algorithms based on different network backbones are used for automatic detection and classification of coating defects. CSPDarknet53, Hourglass-104 and EfficientNet models were used to evaluate their classification performance. These models were trained with 21041 images. According to different algorithms, YOLO-CSPDarknet53, (test1=F1score:0.5714 and test2=F1score:0.5751), which gave the best F1 score in two test sets, respectively, was obtained.</p>	<p>YOLO / CNN (CenterNet / EfficientDet)</p>	<p>Experimental/ data set collected from Czech Republic-Japan-India was used.</p>	<p>(Mandal et al. 2020)</p>
<p>A virtual road network inspector is proposed in this study to detect potholes in the road network and to monitor road conditions continuously. With this system, maintenance costs reduced, service quality and road safety increased. The results show that the road damage status is determined with an accuracy rate of 97.5%.</p>	<p>Machine Learning (support vector machines)</p>	<p>New South Wales, Australia</p>	<p>(Anaissi et al. 2019)</p>
<p>The authors used the YOLOv4 model in this study to automatically identify road damage. In addition, proportional-integral-differential (PID) optimization and YOLOv4 are used together to increase the efficiency of the model and the efficiency has been doubled.</p>	<p>YOLO-V4 / Proportional-integral-differential</p>	<p>The data set of Japan and another study was used.</p>	<p>(Guo et al. 2021)</p>
<p>In order to increase the accuracy of the study, images were collected in different weather and light conditions such as sunny, cloudy and sunset. While the aim of this study is to detect road damage, its main purpose is to establish a generalized model for monitoring road conditions in more than one country. As a generalized model, four cracks classes and pothole damage were taken into account. Training and evaluation processes were carried out with 30 scenarios and 16 deep neural network models by creating training and test sets in different variations of the data sets of three countries.</p>	<p>CNN</p>	<p>Experimental/ data set collected from Czech Republic-Japan-India was used.</p>	<p>(Arya et al. 2021)</p>
<p>Damage datasets for the model were obtained from Microsoft CoCo as 7240 images. Multi-level Feature Pyramids, YOLOv3 and RetinaNet, which are object detection models for road damage detection, are discussed. When the AP and mAP values were examined, it was determined by the authors that the Multi-level Feature Pyramids object detection model gave better values. However, it was stated by the authors that the detection speed of the model is not sufficient to use this model in real time.</p>	<p>Multi-level Feature Pyramids / YOLOv3 / RetinaNet</p>	<p>Microsoft COCO</p>	<p>(Yin et al. 2021)</p>

<p>Five damage types out of 16165 road damage samples were taken into consideration in this study. By using SSD and R-CNN with MobileNet, Inception and ResNet in different scenarios, the successful model in road damage detection was determined. At the end of the study, the authors determined that R-CNN-based models were more successful than SSD-based models. However, the biggest disadvantage of the models created on both bases is the very low success rate in damage with small objects.</p>	<p>SSD / R-CNN / MobileNet / Inception / ResNet</p>	<p>Japan</p>	<p>(Cao et al. 2020)</p>
<p>The authors aimed to better train the model by creating new synthetic data. In this context, they removed the pitted parts of the images with PG-NAT and placed them professionally on the undamaged road image with Poisson blending. As a result of this process, they provided the opportunity to create a new dataset by providing new synthetic data. With the obtained dataset, detection and classification processes were performed for each class using SSD MobileNet and SSD Resnet50.</p>	<p>PG-NAT / SSD MobileNet / SSD Resnet50</p>	<p>Experimental/ data set collected from Czech Republic-Japan-India was used.</p>	<p>(Maeda et al. 2018b)</p>
<p>The main purpose of this study is to develop a new large-scale data set for road damage detection and classification of this damage. Then, a damage assessment model based on the state-of-the-art CNN method was trained and evaluated. In addition, the authors believe that a simple method of road inspection using only a smartphone would be beneficial in regions where experts and financial resources are scarce.</p>	<p>Inception V2 / MobileNet</p>	<p>Japan</p>	<p>(Maeda et al. 2021)</p>

When the studies in the literature are examined, the detection process of road damage over the collected data has been carried out with different detection methods in many studies. Detection results were also checked over the image. However, real-life is quite different from this situation. These systems have to be used in real time to solve problems. In particular, automation is critical in detecting road defects. How pothole detection accuracy varies at different vehicle speeds is a gap in the literature. In addition, vehicle speeds were never taken into account in the studies. Because the detection processes are done on the image.

This study aims to eliminate the uncertainty between vehicle speed and pothole detection in the literature. To the best of our knowledge, real-time detection of potholes in the road network with YOLOv7 and YOLOv8 was performed for the first time, taking into account the vehicle speed. YOLOv7 and YOLOv8, which are single-stage detectors, were chosen because of real-time detection. The contribution and innovation of the current study to the literature are mentioned below:

- I. Potholes occurring in the road network of six different countries were used as a dataset in a study for the first time. A global scale pothole detection system has been obtained. Obtaining pothole damage images from different countries increases the robustness of the detection model.

- II. As a result of the dataset labelling process, a comparative analysis of the pothole detection was performed using the YOLOv7 and YOLOv8 models.
- III. Real-time video recording of the pothole in the road network was performed at 25-35-50-70 km/h speeds. Pothole detection was performed on this process with YOLOv7 and YOLOv8.
- IV. Performance analysis of the pothole detection process was performed in real time at different vehicle speeds. In terms of traffic safety, no speed test was conducted below 25 km/h. According to the speed limits published by the General Directorate of Highways of Turkey, the highest speed of construction machines is determined as 20 km/h. In addition, the speed limit for the automobile on the road network where the testing was carried out is 90 km/h. Considering these two situations, the authors chose the lowest test speed of 25 km/h (Int.Ref. 4).

### 3. Materials and Methods

#### 3.1 Network Architecture

This section will provide information about object detection models that automatically detect potholes. Recently, models with high object detection speed and accuracy have been presented to the literature by researchers. The last members of the YOLO family,

YOLOv7 and YOLOv8, have preferred in this study. Because in this study, the test process performed via a real-time video. Therefore, it has been stated by (Zaidi et al. 2022) that single-stage detectors are suitable for this process. The flowchart of the study is given in Figure 1. All stages are explained in detail in other sections.

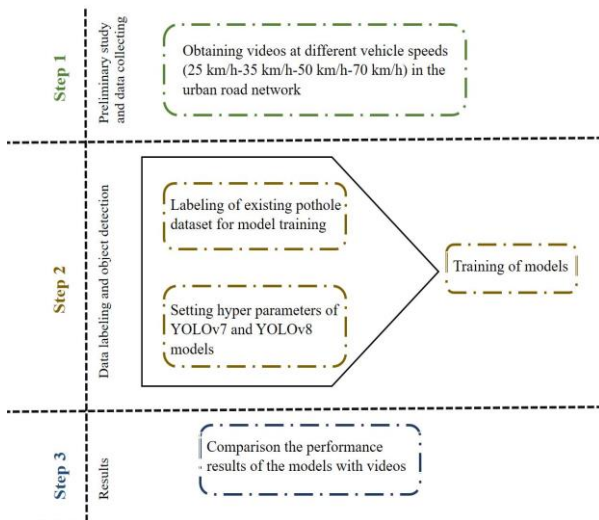


Figure 1. The workplan of the study.

### 3.2 Base Models

The critical point in object detection has been AlexNet, which emerged in 2012. The critical point in detecting and classifying road defects was the Global Road Damage Detection Challenge 2020 (GRDDC) competition organized by Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) in 2020 (Int.Ref. 5). 121 teams from different countries competed in this competition. Road damage data collected from India, Czech Republic and Japan were given to the competitors. The detection performance evaluation of the teams was made over the F1 score. The IMSC team, which came first in the competition, preferred YOLO as the detection model.

The YOLO family was first introduced in 2016 by Redmon et al. (Redmon et al. 2016). YOLO is a one-stage network model that estimates class probabilities and bounding boxes directly from the input image using a simple CNN network. Since 2016, many YOLO versions have been brought to the literature by different developers. In this study, the authors preferred the YOLOv7 and YOLOv8 object detection models, which are the last members of the YOLO family. The network structure and working principle of the YOLOv7 model are shown in Figure 2.

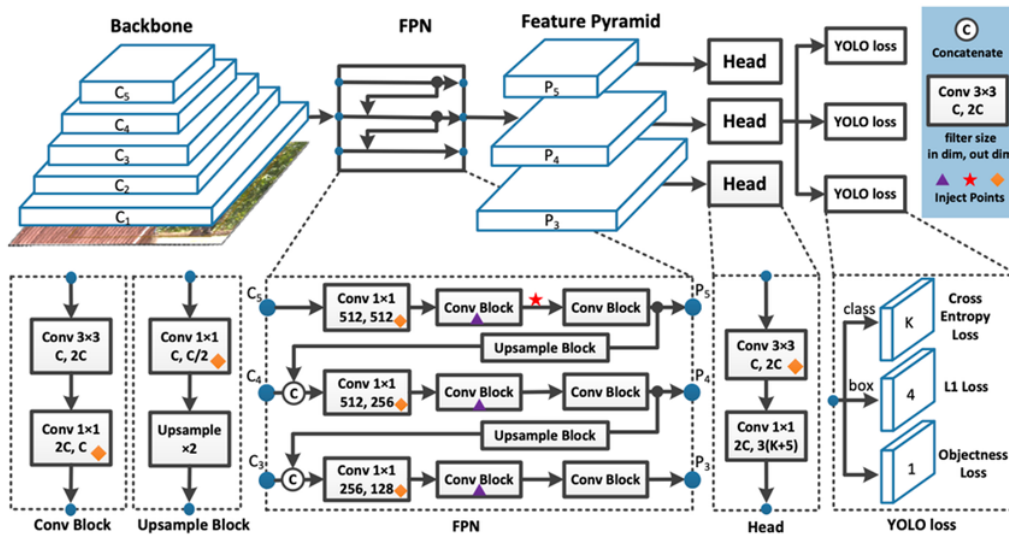
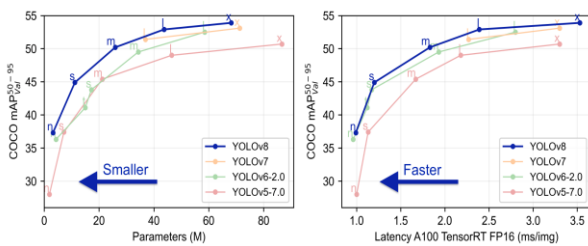


Figure 2. YOLOv7 network architecture (Wang et al, 2022)

A new trainable bag-of-freebies method was designed by Wang et al 2022. for problems derived from state-of-the-art methods. With the new version obtained, it surpassed all known object detectors in terms of both speed and accuracy. It has the highest accuracy (56.8% AP) of all real-time object detectors. This was valid until Ultralytics' YOLOv8 model was brought to the literature.

It should be remembered that the object detection process is always updated. YOLOv8 is a state-of-the-art model that builds on the success of previous YOLO versions and introduces new features and improvements to further increase performance and flexibility. YOLOv8 is designed to be fast, accurate and easy to use. This makes it an excellent choice for object detection, image

segmentation and image classification tasks. The YOLOv8 network architecture is not presented in this section. Because Ultralytics did not visualize the network model. However, readers can look at the network architecture visualized by GitHub user RangeKing (Int.Ref. 6). The detailed comparison between both models is shown in Figure 3. As the number of parameters increases, the performance values get closer to each other. However, it is clearly seen that YOLOv8 is faster than YOLOv7. The biggest difference between the two models is the speed value over object detection.



**Figure 3.** Comparative analysis of the latest models of the YOLO family (Int.Ref. 7)

In general, developers of object detection models offer users the opportunity to customize their models. This process is called configuration. Users' data quality, data size, hardware status and experience are effective considerations in this configuration process. There are also many hyper parameters in the configuration. It is almost impossible to try all these parameters in different configurations. However, both the literature and the author's experience are helpful in determining value ranges.

### 3.3 Data exploration and splits

Only the pothole data was obtained by extracting data from the approximately 13 thousand-road damage public dataset provided by GRDDC. This data set was obtained from India, Czech Republic and Japan, respectively. In addition, data for six countries (Japan, India, Czech Republic, Norway, United States, and China) included in the Crowdsensing-based Road Damage Detection Challenge (CRDDC2022) were also extracted. A total of 835 road images containing pothole damage were obtained. These images were photographed by researchers in different countries. No data augmentation was applied to the road images used. Some researchers cut the pothole image from a different image and add it to the other image to expand the data set. However, it has been determined that some data are the same or not used. The total number of data sets used for this study is 673. The data set consists of three parts: training, testing and validation set. Training set 539, test set 67 and validation 67 were divided into 80%, 10% and 10%, respectively. The limited number of road images, studies in the literature, and author experiences were effective in the separation rates of the dataset. In object detection, the quality and number of training data affect model accuracy. Example images of the public dataset are in Figure 4. These public datasets are very valuable in the field of road damage. Because creating a road damage dataset is both costly and time consuming. For readers who want to access the dataset: (Int.Ref. 8)



**Figure 4.** Some images and data labelling boxes in the training set



Roboflow (Int.Ref. 9) provides opportunities to researchers with the open resources it has provided in the field of image processing in recent years. The authors carried out the labelling process of the data set through Roboflow considering this situation. Readers who want to access the extracted and labelled data set can contact the authors. In addition, the road network and equipment layout of the videos obtained at different vehicle speeds in the study are presented in Figure 5.

The mobile phone used is iPhone 11 64GB model. The approximate height of the rearview mirror on which the camera is fixed is 1.3 meters from the ground. The resolution is 1080 while the video dimensions are 1920x1080. Some camera features of the phone used are, respectively, extended dynamic range for video up to 60 fps, 120° field of view, dual 12MP wide and ultra-wide cameras.



Figure 5. Display of the route and equipment where speed data is collected

### 3.4 Evaluation indicators of model

Various criteria have been used in the literature to understand model performances from different perspectives and levels of detail. In this study, an object detection-based application was implemented instead of image classification or segmentation. There are basic evaluation factors in model evaluation in object detection. The IoU, also referred to as the Jaccard Index, facilitated similarity quantifications between the ground truth  $G_b$  and the predicted  $P_b$  bounding boxes, as shown in (1):

$$IoU = \frac{area(P_b \cap G_b)}{area(P_b \cup G_b)} \quad (1)$$

IoU is the area of overlap divided by the area of union value. In this case, if  $IoU \geq 0.5$ , then it is a match, and it is not otherwise. mAP (mean average precision) value was preferred to understand the precision of the model.

In this study, Precision, Recall, mAP and F1 score values were taken into account in order to accurately and objectively evaluate the performance of the object detection model. Precision is the state that indicates success in a positively predicted situation. Recall

indicates how successfully positive states were predicted. As the precision value increases, the model detection success also increases. However, high Precision alone does not make sense. Other values should also be considered for an accurate and comprehensive assessment. Precision, Recall, mAP, and F1 score were calculated as follows (Hussain et al. 2022, Patel et al. 2022, Wu et al. 2022):

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \quad (2)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \quad (3)$$

$$F1 \text{ score} = 2 \times \frac{(Precision \times Recall)}{(Precision+Recall)} \quad (4)$$

$$mAP = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n AP_i \quad (5)$$

where TP (True Positive) represents the number of potholes that are correctly detected; FP (False Positive) represents the number of other objects detected as potholes ; and FN (False Negative) represents the number of potholes that are undetected/missed.

### 3.5 Model training details

Before starting the training process of the pothole detection model, a number of hyper parameters need to be set. Also, this process has been implemented with GoogleColab with Pytorch. This process varies depending on many factors. Factors such as user knowledge and experience, the number and type of data set, the hardware of the computer used and the platform on which the model will run directly affect the selection of hyper parameters. Similar values are used for the YOLOv7 and YOLOv8 models. The defined hyper parameters for guiding the training process are presented in Table 2. The image sizes of the data used for training in both models are equal and 640x640. Considering the number of data used for training, it is sufficient for the batch size and epochs numbers to be 16 and 32, respectively. Initial learning rate is a tuning parameter that determines the step size in each iteration while moving towards the minimum loss function.

**Table 2.** Training hyper parameters

Models	Input Image Size	Initial Learning Rate	Batch Size
YOLOv7	640 x 640	0.01	16
YOLOv8	640 x 640	0.01	16

Models	Momentum	Weight Decay	Total Epochs
YOLOv7	0.937	0.0005	32
YOLOv8	0.937	0.0005	32

### 4. Results and Discussion

It is vital that potholes that occur on road networks are detected automatically and that the repair process is

carried out quickly. Because this road defect dangerously affects traffic safety and comfort according to its width and depth. The biggest example of this negative situation is in India. In 2019, 3597 deaths occurred due to road potholes. Another issue that should be taken out of this information is that the severity of small wheeled vehicles being affected by potholes is quite high. In recent years, it is planned to prevent traffic congestion under the name of micro-mobility. The increase in the number of e-scooters in Türkiye in recent years causes many problems in some regions. In the province of Istanbul, there are problems between many local municipalities and e-scooter service providers. E-scooter users often use sidewalks for parking and driving. Considering that the vehicles will use the same road network with the legal regulation in the future, it is foreseen that the potholes will cause great material and moral losses. Therefore, this situation is only one of the reasons for the automatic detection of potholes.

In this study, YOLOv7 and YOLOv8, which are single-stage detectors, are preferred among object detection methods. The main reason for this is that the model aims to obtain a real-time pothole detection system as well as object detection and speed. In addition, these models have been brought to the literature as the newest object detection models. The authors think that these models will be more suitable for the in-vehicle integrated system, which is the second phase of this study.

Firstly, screenshots over the videos obtained at different speeds are presented in Figures 6 and 7 to show and compare the detection results of both models. Although the differences between both models are small, it has been observed that YOLOv8 detects it with higher detection accuracy.



**Figure 6.** Detection performance of YOLOv7 on the same road and pothole at 25-35-50-70 km/h



Figure 7. Detection performance of YOLOv8 on the same road and pothole at 25-35-50-70 km/h

The detection accuracy of the YOLOv8 at three different speeds other than 35 km/h is higher than that of the YOLOv7. The authors thought that there would be a correlation between object detection accuracy and vehicle speed. However, the experimental results obtained showed that there is no exact relationship between vehicle speed and detection accuracy. There may be different reasons for this situation. Many parameters such as camera location, camera resolution quality, weather conditions, sun light angle have an effect on object detection. It can also be expressed that the models have the power to overcome such difficulties. It is intended that all parameters been the same by making video recordings within a 30-minute time frame. There are some values that prove the validity of these models as a result of the trained data set.

First, the mAP, Precision, Recall, F1 score values of the YOLOv7 and YOLOv8 models trained to detect the potholes were examined. These values of YOLOv7 and YOLOv8 are given in Table 3.

Table 3. Comparative experiments

Models	mAP0.5	mAP0.5:0.95	Precision
YOLOv7	0.995	0.635	0.996
YOLOv8	0.978	0.572	0.951
Models	Recall	F1 score	-
YOLOv7	0.995	1	-
YOLOv8	0.9	0.924	-

It is observed that the performance values between the two models are close to each other.

While the detection values of YOLOv7 are higher in experimental comparisons obtained over real-time

video, the detection accuracy of YOLOv8 is higher. The complex network structures of object detection models are shown as the reason for this situation. In addition, the results obtained from real-time videos and image data may vary. This is the success of the internal structure of the models. As a result, it is observed that both models work with high accuracy performance. F1 score and PR curve graphs are presented in Figure 8 to understand the accuracy of the model more clearly.

The F1 score value of the YOLOv7 model was observed to be 1. In some cases, a value of 1 may indicate that the model is overfitting. However, pothole detection was successfully achieved in the images obtained from the video. The situation is similar for the test set, which includes images other than the images used for the model training set. If the difference between the detection accuracies made with YOLOv7 and YOLOv8 was large, overfitting could be mentioned. However, when Figures 6 and 7 are examined, the pattern detection accuracy rates are quite close. The lowest detection rate was measured as 51%. This value is especially sufficient for pothole detection whose shape varies. In particular, the variable situation of damage to road networks challenges researchers in perceiving it. It is possible to increase the accuracy rate in both models. As data heterogeneity, data number and quality are increased, model detection performance will also increase.

Both PR and F1 score charts of both models are acceptable. It is understood from the graphics that the models work correctly or even perfectly. In YOLOv7, the highest F1 value is reached within the confidence interval of 0.461.



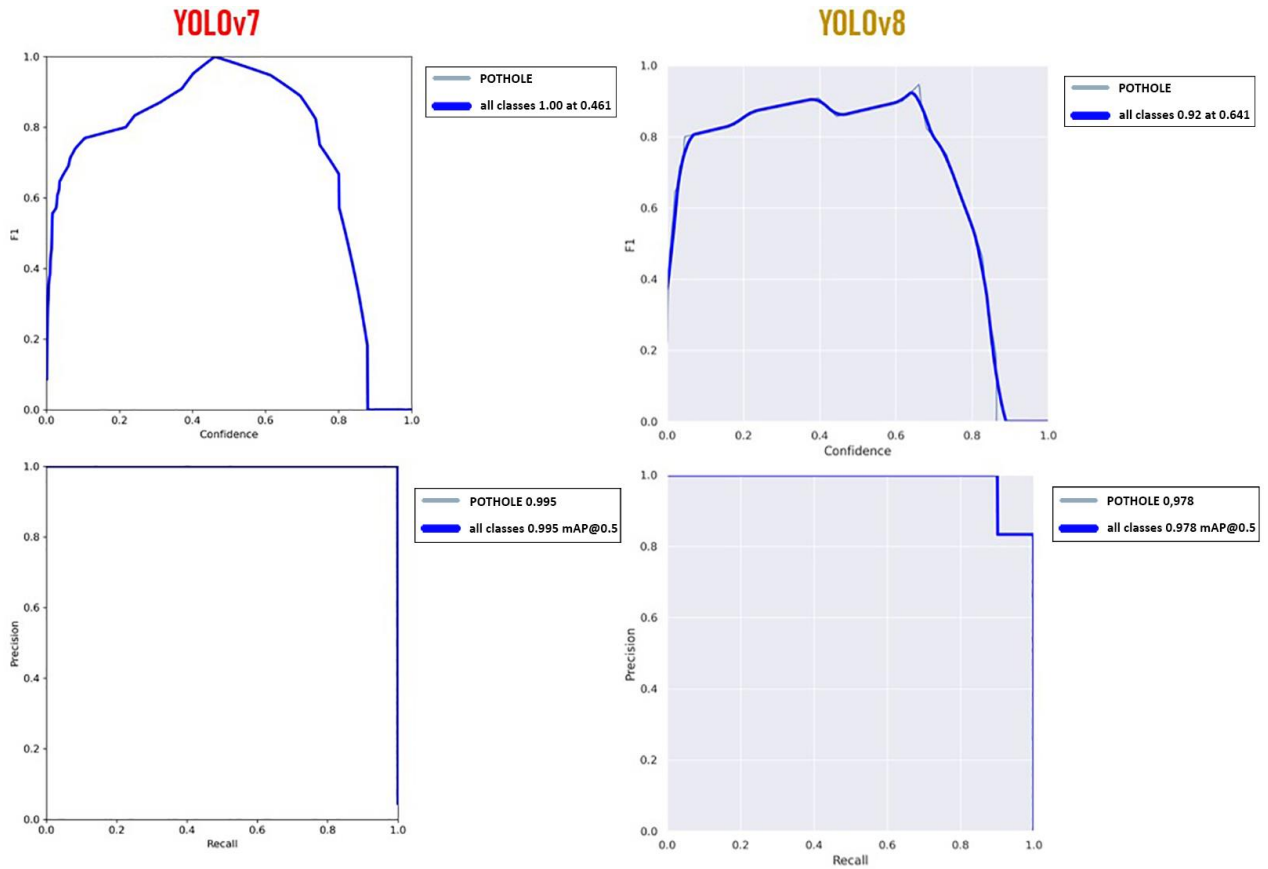


Figure 8. PR and F1 score graphs of YOLOv7 and YOLOv8

However, it can be seen that high F1 values are achieved up to the confidence interval of 0.8. It is seen that the model does not give almost accurate results, especially after the 0.8 confidence interval. In YOLOv8, the highest F1 value was obtained with a confidence interval of 0.641. Both models showed poor performance after the 0.8 confidence interval. This shows that the models generally do not have the ability to detect with the highest accuracy. Improvement in training data will increase these values. In addition, the highest and lowest F1 values obtained by the competitors in the first competition organized by IEEE are 0.662 and 0.4656, respectively. However, comparing these results with this study may not give completely accurate results. Because the status of the data used in object detection is very important. In order to ensure complete comparison, the test data must be the same in the studies carried out. The contribution of this study is important for researchers who want to use moving objects or moving object detection systems. However, since object detection processes depend on many parameters, different results are expected in different studies. Another situation that the authors noticed is that the models detect the potholes in the images with high accuracy. But the highest detection rate on video is 0.69.

This is related to the angle of collection of training data. While the image of the potholes is clear and clear in the collected data, the camera angle is very shallow in the video recording process. This causes a decrease in the detection rate on the video.

### 5. Conclusion

Automatic detection of potholes that occur for different reasons in road networks is important for road safety and comfort. The integration of these systems into vehicles and the sharing of existing pothole locations on the road network to local municipalities will accelerate the road maintenance and repair processes. Accuracy performance of pothole detection at different vehicle speeds, which is the first stage of this embedded system, is investigated in depth in this study. Two different object detection models were analysed on the same road and pothole at four different speeds (25-35-50-70 km/h). The lowest accuracy rate belongs to YOLOv7 with 51%. While this rate was achieved at a speed of 50 km/h, YOLOv8 reached a value of 69% at the same speed. It is clear that the YOLOv7 and YOLOv8 models used in the pothole detection process are successful. In addition, precision, recall and F1 score values being close to one indicate that the models are working well. The lowest

values of these evaluation criteria are 0.951, 0.9 and 0.924, respectively. These obtained values are considered successful in object detection processes. The authors expected a linear relationship between vehicle speeds and pothole detection before performing the analysis. However, in the analysis results obtained, exact relationship between speed and detection accuracy could not be determined. This situation showed that the system to be obtained could be used at high speeds on intercity roads. This will provide a great benefit to the literature. It will be a guide for researchers who want to obtain embedded systems in different fields about the effect of speed parameter on detection accuracy.

#### **Declaration of Ethical Standards**

The authors declare that they comply with all ethical standards.

#### **Credit Authorship Contribution Statement**

Author 1: Conceptualization, Methodology/Study design, Validation, Investigation, Resources, Data curation, Writing-original draft, Writing – review and editing, Visualization.

Author 2: Validation, Writing – review and editing, Visualization, Supervision

#### **Declaration of Competing Interest**

The Authors declare that there is no conflict of interest.

#### **Data Availability Statement**

The authors declare that the main data supporting the findings of this work are available within the article.

#### **Acknowledgement**

This research was supported by Erzurum Technical University Scientific Research Projects Coordination Office (Project No: 2023/036)

## **6. References**

- Anaissi, A., Khoa, N.L.D., Rakotoarivelo, T., Alamdari, M.M., Wang, Y., 2019. Smart pothole detection system using vehicle-mounted sensors and machine learning. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, **9**, 91–102.  
<https://doi.org/10.1007/s13349-019-00323-0>
- Arya, D., Maeda, H., Ghosh, S.K., Toshniwal, D., Mraz, A., Kashiyama, T., Sekimoto, Y., 2021. Deep learning-based road damage detection and classification for multiple countries. *Automation in Construction*, **132**, 103935.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103935>
- Aşçı, G., Karslıgil, M.E., 2020. Road Damage Detection via in Car Cameras. 28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU). Gaziantep, Türkiye. 1–4.  
<https://doi.org/10.1109/SIU49456.2020.9302086>
- Cao, M.T., Tran, Q.V., Nguyen, N.M., Chang, K.T., 2020. Survey on performance of deep learning models for detecting road damages using multiple dashcam image resources. *Advanced Engineering Informatics*, **46**, 101182.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101182>
- Doshi, K., Yilmaz, Y., 2020. Road Damage Detection using Deep Ensemble Learning. IEEE International Conference on Big Data. Atlanta, USA, 5540–5544.  
<https://doi.org/10.1109/BigData50022.2020.9377774>
- Everingham, M., Van Gool, L., Williams, C.K.I., Winn, J., Zisserman, A., 2010. The pascal visual object classes (VOC) challenge. *International Journal of Computer Vision*, **88**, 303–338.  
<https://doi.org/10.1007/s11263-009-0275-4>
- Gong, L., An, L., Liu, M., Zhang, J., 2012. Road damage detection from high-resolution RS image. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Munich, Germany, 990–993.  
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6351235>
- Guo, L., Li, R., Jiang, B., 2021. A road surface damage detection method using yolov4 with pid optimizer. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, **17**, 1763–1774.  
<https://doi.org/10.24507/ijic.17.05.1763>
- Hoang Ngan Le, T., Zheng, Y., Zhu, C., Luu, K., Savvides, M., 2016. Multiple Scale Faster-RCNN Approach to Driver's Cell-Phone Usage and Hands on Steering Wheel Detection. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. Las Vegas, USA, 46–53.  
<https://doi.org/10.1109/CVPRW.2016.13>
- Huang, T.-W., Su, G.-M., 2021. Reversible Guidance Image Based Image Detail Enhancement. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). Anchorage, USA, 1704–1708.  
<https://doi.org/10.1109/ICIP42928.2021.9506374>
- Hussain, M., Al-Aqrabi, H., Munawar, M., Hill, R., Alsoubi, T., 2022. Domain Feature Mapping with YOLOv7 for Automated Edge-Based Pallet Racking Inspections. *Sensors*, **22**.  
<https://doi.org/10.3390/s22186927>

- Jeong, D., 2020. Road Damage Detection Using YOLO with Smartphone Images. IEEE International Conference on Big Data. Atlanta, USA, 5559–5562. <https://doi.org/10.1109/BigData50022.2020.9377847>
- Kim, M., Jeong, J., Kim, S., 2021. Ecap-yolo: Efficient channel attention pyramid yolo for small object detection in aerial image. *Remote Sensing*, **13**, 1–20. <https://doi.org/10.3390/rs13234851>
- Krizhevsky, A., Hinton, G.E., 2012. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*, **60**, **6**, 84–90. <https://doi.org/10.1145/3065386>
- Lee, T., Chun, C., Ryu, S.K., 2021. Detection of road-surface anomalies using a smartphone camera and accelerometer. *Sensors*, **21**, 1–17. <https://doi.org/10.3390/s21020561>
- Ma, H., Lu, N., Ge, L., Li, Q., You, X., Li, X., 2013. Automatic road damage detection using high-resolution satellite images and road maps. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS. Melbourne, Australia, 3718–3721. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2013.6723638>
- Maeda, H., Kashiyama, T., Sekimoto, Y., Seto, T., Omata, H., 2021. Generative adversarial network for road damage detection. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **36**, 47–60. <https://doi.org/10.1111/mice.12561>
- Maeda, H., Sekimoto, Y., Seto, T., Kashiyama, T., Omata, H., 2018. Road Damage Detection and Classification Using Deep Neural Networks with Smartphone Images. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **33**, **12**, 1127–1141. <https://doi.org/10.1111/mice.12387>
- Mandal, V., Mussah, A.R., Adu-Gyamfi, Y., 2020. Deep Learning Frameworks for Pavement Distress Classification: A Comparative Analysis, IEEE International Conference on Big Data (Big Data). Atlanta, USA, 5577–5583. <https://doi.org/10.1109/BigData50022.2020.9378047>
- Patel, K., Bhatt, C., Mazzeo, P.L., 2022. Improved Ship Detection Algorithm from Satellite Images Using YOLOv7 and Graph Neural Network. *Algorithms*, **15**, **12**. <https://doi.org/10.3390/a15120473>
- Pi, A., Nath, N., Sampathkumar, S., Behzadan, A., 2021. Deep Learning for Visual Analytics of the Spread of COVID-19 Infection in Crowded Urban Environments. *Natural Hazards Review*, **22**, **3**. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)NH.1527-6996.0000492](https://doi.org/10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000492)
- Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., Farhadi, A., 2016. You Only Look Once : Unified , Real-Time Object Detection, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Las Vegas, USA, 779–788. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.91>
- Russakovsky, O., Deng, J., Su, H., Krause, J., Satheesh, S., Ma, S., Huang, Z., Karpathy, A., Khosla, A., Bernstein, M., Berg, A.C., Fei-Fei, L., 2015. ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge. *International Journal of Computer Vision*, **115**, 211–252. <https://doi.org/10.1007/s11263-015-0816-y>
- Sultana, F., Sufian, A., Dutta, P., 2019. A review of object detection models based on convolutional neural network. *Computer Vision and Pattern Recognition*, **1157**, 1–16. <https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.01614>
- Tsung-Yi, L., Maire, M., Belongie, S., Hays, J., Pietro, P., Ramanan, D., Dollar, Piotr, Zitnick, L., 2014. Microsoft COCO: Common Objects in Context. *Computer Vision – ECCV 2014*. **8693**, 740–755. [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-10602-1\\_48](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-10602-1_48)
- Wang, C., Bochkovskiy, A., Liao, H.M., 2022. YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors. *Computer Vision and Pattern Recognition*, 1–15. <https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.02696>
- Wu, C., Ye, M., Zhang, J., Ma, Y., 2023. YOLO-LWNet : A Lightweight Road Damage Object Detection Network for Mobile Terminal Devices. *Sensors*, **23**, **6**. <https://doi.org/10.3390/s23063268>
- Wu, D., Jiang, S., Zhao, E., Liu, Y., Zhu, H., Wang, W., Wang, R., 2022. Detection of Camellia oleifera Fruit in Complex Scenes by Using YOLOv7 and Data Augmentation. *Applied Sciences*, **12**, **22**. <https://doi.org/10.3390/app122211318>



- Yin, J., Qu, J., Huang, W., Chen, Q., 2021. Road damage detection and classification based on multi-level feature pyramids. *KSI Transactions on Internet and Information Systems*, **15**, **2**, 786–799. <https://doi.org/10.3837/tiis.2021.02.022>
- Zaidi, S.S.A., Ansari, M.S., Aslam, A., Kanwal, N., Asghar, M., Lee, B., 2022. A survey of modern deep learning based object detection models. *Digital Signal Processing: A Review Journal*, **126**, **103514**. <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2022.103514>

### Internet References

- 1- Ritchie, H., Roser, M., Age Structure, <https://ourworldindata.org/age-structure>, (15.01.2023).
- 2-Batchelor, T., 50 cyclists killed or seriously injured every year because of Britain's poor roads, <https://www.independent.co.uk/news/uk/home-news/cyclist-road-deaths-injuries-pothole-statistics-chris-boardman-department-transport-a7535816.html>, (12.10.2022).
- 3-Dash, D., Potholes killed 3,597 across India in 2017, terror 803, <https://timesofindia.indiatimes.com/india/potholes-killed-3597-across-india-in-2017-terror-803/articleshow/64992956.cms>, (12.06.2022).
- 4-Traffic / Speed Limits. <https://www.kgm.gov.tr/sayfalar/kgm/sitetr/trafik/hizsinirlari.aspx>, (16.06.2023).
- 5-Global Road Damage Detection, <https://rdd2020.sekilab.global/> (13.01.2022).
- 6-Francesco, J.S., What is YOLOv8? The Ultimate Guide, <https://blog.roboflow.com/whats-new-in-yolov8/>, (20.01.2023).
- 7-YOLOv8, <https://github.com/ultralytics/ultralytics> , (12.01.2023).
- 8-Road damage detector, <https://github.com/sekilab/RoadDamageDetector> , (19.03.2023)
- 9-Give your software the sense of sight, <https://roboflow.com/>, (16.02.2023)

## An Investigation for Soliton Solutions of the Extended (2+1)-Dimensional Kadomtsev–Petviashvili Equation

\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 26.07.2023

Kabul/Accepted: 09.01.2024

Yayımlandı/Published: 27.02.2024

### Genişletilmiş (2+1)-boyutlu Kadomtsev–Petviashvili Denkleminin Soliton Çözümlerinin Araştırılması

Melih ÇINAR \* 

Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Matematik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Abstract

This article presents an investigation for soliton solutions of the extended (2+1)-dimensional Kadomtsev–Petviashvili equation which describes wave behavior in shallow water. We utilize the unified Riccati equation expansion method. By employing the powerful method, many soliton solutions are successfully derived, and it is verified by Wolfram Mathematica that the solutions satisfy the main equation. Additionally, Matlab is utilized to generate plots and examine the properties of the obtained solitons. The results reveal that the considered equation exhibits a wide range of soliton solutions, including dark, bright, singular, and periodic solutions. This comprehensive investigation of soliton solutions for the Kadomtsev–Petviashvili equation holds significant relevance in various fields such as oceanography and nonlinear optics, contributing to practical applications.

**Anahtar Kelimeler:** Nonlinear Optic; Unified Riccati Equation Expansion Method; Shallow Water Waves; Kadomtsev–Petviashvili Equation.

#### Öz

Bu makale, sığ suda dalga davranışını tanımlayan genişletilmiş (2+1) boyutlu Kadomtsev–Petviashvili denkleminin soliton çözümlerinin birleşik Riccati denklemi genişletme yöntemini kullanarak bir araştırmasını sunmaktadır. Söz konusu yöntem kullanılarak, birçok soliton çözümü başarıyla elde edildi ve çözümlerin ana denklemi sağladığı Wolfram Mathematica programı kullanılarak doğrulandı. Grafikler oluşturmak ve elde edilen solitonların özelliklerini incelemek için Matlab programı kullanıldı. Sonuçlar, ele alınan denklemin karanlık, parlak, tekil ve periyodik çözümler dahil olmak üzere çok çeşitli soliton çözümler sergilediğini ortaya koymaktadır. Kadomtsev–Petviashvili denklemi için soliton çözümlerinin bu kapsamlı araştırması, pratik uygulamalara katkıda bulunan oşinografi ve doğrusal olmayan optik gibi çeşitli alanlarda önemli bir öneme sahip olduğu için bu alanlardaki ileri çalışmalara ışık tutacağı görülmektedir.

**Keywords:** Doğrusal Olmayan Optik; Birleşik Riccati Denklemi Genişletme Yöntemi; Sığ Su Dalgaları; Kadomtsev–Petviashvili Denklemi

#### 1. Introduction

Nonlinear partial differential equations (NLPDEs) play a crucial role in understanding and predicting the behavior of complex systems in numerous scientific areas such as physics and engineering to chemistry, biology, and economics (Braun, 1983b), (Cinar et al., 2022), (Debnath, 2012), (Albayrak, P. 2022), (Das, S. E. 2022). These equations provide a mathematical framework to describe various physical phenomena, including fluid dynamics, heat transfer, wave propagation, and electromagnetism, etc. (Weigand 2015), (Cinar et al. 2023) (Robinson & Rodrigo 2009), (Davis 2012), (Albayrak 2023), (Ozisk 2022). The ability to accurately model phenomena in nature through NLPDEs and solve these equations is vital for advancing scientific knowledge and facilitating engineering design (Farlow 2012).

In 2022, Wazwaz studied the extended (2+1)-dimensional Kadomtsev–Petviashvili (KP) equation (Wazwaz 2022).

$$\alpha z_{xt} - \frac{\alpha^4 - 6\alpha^2\beta^2 + \beta^4}{16} z_{xxxx} - \frac{3(\beta^2 - \alpha^2)}{4} (z^2)_{xx} + \kappa z_{xx} + \sigma z_{xy} + \gamma z_{yy} = 0, \quad (1)$$

in which  $z = z(x, y, t)$  and  $\alpha, \beta, \kappa, \sigma$  and  $\gamma$  are reals such that  $\alpha \neq 0$ .

The growing fascination with the KP equation has sparked significant attention towards developing and investigating its numerous extensions such as extended, generalized and variable coefficient, etc. In (Ma et al., 2023), the extended (2+1)-dimensional KP equation was solved using conjugate complex and long-wave limit methods. In (Mohanty et al., 2023), authors studied (2+1)-dimensional Kadomtsev–Petviashvili equation with

variable coefficients by extended generalized  $\frac{G'}{G}$  expansion method. In (Li *et al.* 2021), the generalized (2+1)-dimensional KP equation was studied. Ozisik *et al.* studied soliton solutions of the (2+1)-dimensional KP equation via two different integration technique, namely modified F-expansion and modified generalized Kudryashov methods. In (Ma *et al.* 2023), (2+1)-dimensional KP equation was solved using Painlevé and Lie symmetry analysis.

In this article, the optical solitons of the extended (2+1)-dimensional KP equation are investigated using the unified Riccati equation expansion method (UREEM) (Sirendaoreji 2017), (Zayed *et al.* 2020).

The framework of the subsequent sections is given as follows: In Section 2, a nonlinear ordinary differential equation (NLODE) is obtained by using a wave transformation and then, the unified Riccati Equation expansion method is applied to the NLODE. In Section 3, the results of the paper is given and also a discussion is included.

## 2. Method

### 2.1. Wave Transformation

The extended KP equation can be converted into an ordinary differential equation (ODE) utilizing the following transformation:

$$z(x, y, t) = \mathcal{H}(\mu), \quad \mu = p x + q y - r t, \quad (2)$$

where  $p, q,$  and  $r$  are reals. So, one attains:

$$p^4(\alpha^4 - 6\alpha^2\beta^2 + \beta^4)\mathcal{H}'' - 16(\kappa p^2 + pq\sigma - \alpha pr + \gamma q^2)\mathcal{H} - 12 p^2(\alpha^2 - \beta^2)\mathcal{H}^2 = 0, \quad (3)$$

in which  $\mathcal{H} = \mathcal{H}(\mu)$ .

### 2.2. Unified Riccati Equation Expansion

The solutions of the eq. (3) can be supposed in the following form (Sirendaoreji 2017), (Zayed *et al.* 2020):

$$\mathcal{H}(\mu) = A_0 + \sum_{i=1}^N A_i \psi^i(\mu), \quad (4)$$

where  $A_N \neq 0$  and  $N$  represents a balance number. Balancing the terms  $\mathcal{H}^2$  and  $\mathcal{H} \mathcal{H}''$  in Eq. (3), we get  $N = 2$ . So, Eq. (4) is converted into:

$$\mathcal{H}(\mu) = A_0 + A_1 \psi(\mu) + A_2 \psi(\mu)^2, \quad (5)$$

where  $A_2 \neq 0$  and  $\psi(\mu)$  represents the solutions of the following equation:

$$\psi'(\mu) = c_0 + c_1\psi(\mu) + c_2\psi^2(\mu), \quad (6)$$

in which Eq. (6) has the following solutions (Sirendaoreji 2017), (Zayed *et al.* 2020):

If  $\Delta > 0$ , then

$$\psi_1(\mu) = -\frac{c_1}{2c_2} - \frac{\sqrt{\Delta} \left( b_1 \tanh\left(\frac{\sqrt{\Delta}}{2}\mu\right) + b_2 \right)}{2c_2 \left( b_1 + b_2 \tanh\left(\frac{\sqrt{\Delta}}{2}\mu\right) \right)},$$

$$\psi_2(\mu) = -\frac{c_1}{2c_2} - \frac{\sqrt{\Delta} \left( b_1 \coth\left(\frac{\sqrt{\Delta}}{2}\mu\right) + b_2 \right)}{2c_2 \left( b_1 + b_2 \coth\left(\frac{\sqrt{\Delta}}{2}\mu\right) \right)},$$

If  $\Delta > 0$ , then

$$\psi_3(\mu) = -\frac{c_1}{2c_2} - \frac{1}{2c_2\mu + b_3},$$

If  $\Delta < 0$ , then

$$\psi_4(\mu) = -\frac{c_1}{2c_2} + \frac{\sqrt{-\Delta} \left( b_4 \tan\left(\frac{\sqrt{-\Delta}}{2}\mu\right) - b_5 \right)}{2c_2 \left( b_4 + b_5 \tan\left(\frac{\sqrt{-\Delta}}{2}\mu\right) \right)},$$

$$\psi_5(\mu) = -\frac{c_1}{2c_2} - \frac{\sqrt{-\Delta} \left( b_4 \cot\left(\frac{\sqrt{-\Delta}}{2}\mu\right) - b_5 \right)}{2c_2 \left( b_4 + b_5 \cot\left(\frac{\sqrt{-\Delta}}{2}\mu\right) \right)}$$

where  $\Delta = c_1^2 - 4c_0c_2$  and  $b_1, b_2, b_3, b_4,$  and  $b_5$  are arbitrary constants. The solutions  $\psi_1(\mu)$  and  $\psi_2(\mu)$  are non-trivial and nondegenerate if and only if  $b_2 = \pm b_1, b_1^2 + b_2^2 \neq 0$ . The solutions  $\psi_4(\mu)$  and  $\psi_5(\mu)$  are non-trivial and nondegenerate if and only if  $b_4^2 + b_5^2 \neq 0$ . By collecting all terms with the same power of  $\psi(\mu)$  in Eq. (3), and then setting all coefficients to zero, the following system of equations is obtained:

The coefficient of  $\psi^0(\mu)$ :

$$-c_0 p^4 Q_1 (2A_2 c_0 + A_1 c_1) + 12A_0^2 p^2 Q_3 + 16 A_0 (\kappa p^2 + pq\sigma - \alpha pr + \gamma q^2) = 0. \quad (7)$$

The coefficient of  $\psi^1(\mu)$ :

$$-6A_2 c_0 c_1 p^4 Q_1 - A_1 (-24A_0 p^2 Q_3 + c_1^2 p^4 Q_1 + 2c_0 c_2 p^4 Q_1 - 16Q_2) = 0. \quad (8)$$

The coefficient of  $\psi^2(\mu)$ :

$$3A_1c_1c_2p^4Q_1 + 4A_2(-6A_0p^2Q_3 + c_1^2p^4Q_1 + 2c_0c_2p^4Q_1 - 4Q_2) - 12A_1^2p^2Q_3 = 0. \quad (9)$$

The coefficient of  $\psi^3(\mu)$ :

$$p^2(5A_2c_1c_2p^2Q_1 + A_1(c_2^2p^2Q_1 - 12A_2Q_3)) = 0. \quad (10)$$

The coefficient of  $\psi^4(\mu)$ :

$$p^2A_2(-2Q_3A_2 + p^2Q_1c_2^2) = 0. \quad (11)$$

where

$$\begin{aligned} Q_1 &= \alpha^4 - 6\alpha^2\beta^2 + \beta^4, \\ Q_2 &= \kappa p^2 + pq\sigma - apr + \gamma q^2, \\ Q_3 &= \alpha^2 - \beta^2. \end{aligned} \quad (14)$$

Upon solving the overdetermined system of algebraic equations using a computer algebra system, the sets are obtained:

**SET 1.**

$$\sigma = \frac{c_1^2p^4Q_1 - 4(c_0c_2p^4Q_1 + 4(\kappa p^2 - apr + \gamma q^2))}{16pq},$$

$$A_0 = \frac{c_0c_2p^2Q_1}{2Q_3},$$

$$A_1 = \frac{c_1c_2p^2Q_1}{2Q_3},$$

$$A_2 = \frac{c_2^2p^2Q_1}{2Q_3}.$$

**SET 2.**

$$\sigma = -\frac{16(-pra + q^2\gamma + p^2\kappa) + p^4Q_1c_1^2 - 4p^4Q_1c_0c_2}{16pq},$$

$$A_0 = \frac{(c_1^2 + 2c_0c_2)p^2Q_1}{12Q_3},$$

$$A_1 = \frac{c_1c_2p^2Q_1}{2Q_3},$$

$$A_2 = \frac{c_2^2p^2Q_1}{2Q_3}.$$

By substituting the obtained sets above into Eq. (4) and considering Eq. (2), we can derive the following solutions for the extended (2+1)-dimensional KP equations mentioned in Eq. (1):

$$\begin{aligned} z_{1,1}(x, y, t) &= \frac{c_0c_2p^2Q_1}{2Q_3} + \frac{c_2^2p^2Q_1 \left( -\frac{\sqrt{\Delta}(b_2+b_1 \tanh(\frac{\mu}{2}\sqrt{\Delta}))}{2c_2(b_1+b_2 \tanh(\frac{\mu}{2}\sqrt{\Delta}))} - \frac{c_1}{2c_2} \right)^2}{2Q_3} \\ &+ \frac{c_1c_2Q_1 \left( -\frac{\sqrt{\Delta}(b_2+b_1 \tanh(\frac{\mu}{2}\sqrt{\Delta}))}{2c_2(b_1+b_2 \tanh(\frac{\mu}{2}\sqrt{\Delta}))} - \frac{c_1}{2c_2} \right)}{2Q_3}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} z_{1,2}(x, y, t) &= \frac{c_0c_2p^2Q_1}{2Q_3} + \frac{c_2^2p^2Q_1 \left( -\frac{\sqrt{\Delta}(b_2+b_1 \coth(\frac{\mu}{2}\sqrt{\Delta}))}{2c_2(b_1+b_2 \coth(\frac{\mu}{2}\sqrt{\Delta}))} - \frac{c_1}{2c_2} \right)^2}{2Q_3} \\ &+ \frac{c_1c_2Q_1 \left( -\frac{\sqrt{\Delta}(b_2+b_1 \coth(\frac{\mu}{2}\sqrt{\Delta}))}{2c_2(b_1+b_2 \coth(\frac{\mu}{2}\sqrt{\Delta}))} - \frac{c_1}{2c_2} \right)}{2Q_3}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} z_{1,3}(x, y, t) &= \frac{c_0c_2p^2Q_1}{2Q_3} + \frac{c_2^2p^2Q_1 \left( -\frac{1}{c_2(px+qy-rt)+b_3} - \frac{c_1}{2c_2} \right)^2}{2Q_3} \\ &+ \frac{c_1c_2p^2Q_1 \left( -\frac{1}{c_2(px+qy-rt)+b_3} - \frac{c_1}{2c_2} \right)}{2Q_3}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} z_{1,4}(x, y, t) &= \frac{c_0c_2p^2Q_1}{2Q_3} + \frac{c_2^2p^2Q_1 \left( \frac{\sqrt{-\Delta}(b_4 \tan(\frac{\mu}{2}\sqrt{-\Delta}) - b_5)}{2c_2(b_4+b_5 \tan(\frac{\mu}{2}\sqrt{-\Delta}))} - \frac{c_1}{2c_2} \right)^2}{2Q_3} \\ &+ \frac{c_1c_2p^2Q_1 \left( \frac{\sqrt{-\Delta}(b_4 \tan(\frac{\mu}{2}\sqrt{-\Delta}) - b_5)}{2c_2(b_4+b_5 \tan(\frac{\mu}{2}\sqrt{-\Delta}))} - \frac{c_1}{2c_2} \right)}{2Q_3}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} z_{1,5}(x, y, t) &= \frac{c_0c_2p^2Q_1}{2Q_3} + \frac{c_2^2p^2Q_1 \left( -\frac{\sqrt{-\Delta}(b_4 \cot(\frac{\mu}{2}\sqrt{-\Delta}) - b_5)}{2c_2(b_4+b_5 \cot(\frac{\mu}{2}\sqrt{-\Delta}))} - \frac{c_1}{2c_2} \right)^2}{2Q_3} \\ &+ \frac{c_1c_2p^2Q_1 \left( -\frac{\sqrt{-\Delta}(b_4 \cot(\frac{\mu}{2}\sqrt{-\Delta}) - b_5)}{2c_2(b_4+b_5 \cot(\frac{\mu}{2}\sqrt{-\Delta}))} - \frac{c_1}{2c_2} \right)}{2Q_3}, \end{aligned}$$

$$z_{2,1}(x, y, t) = \frac{(c_1^2 + 2c_0c_2)p^2Q_1}{12Q_3} + \frac{c_2^2p^2Q_1 \left( -\frac{\sqrt{\Delta}(b_2+b_1 \tanh(\frac{\mu}{2}\sqrt{\Delta}))}{2c_2(b_1+b_2 \tanh(\frac{\mu}{2}\sqrt{\Delta}))} - \frac{c_1}{2c_2} \right)^2}{2Q_3} + \frac{c_1c_2p^2Q_1 \left( -\frac{\sqrt{\Delta}(b_2+b_1 \tanh(\frac{\mu}{2}\sqrt{\Delta}))}{2c_2(b_1+b_2 \tanh(\frac{\mu}{2}\sqrt{\Delta}))} - \frac{c_1}{2c_2} \right)}{2Q_3},$$

$$z_{2,5}(x, y, t) = \frac{(c_1^2 + 2c_0c_2)p^2Q_1}{12Q_3} + \frac{c_2^2p^2Q_1 \left( -\frac{\sqrt{-\Delta}(b_4 \cot(\frac{\mu}{2}\sqrt{-\Delta})-b_5)}{2c_2(b_4+b_5 \cot(\frac{\mu}{2}\sqrt{-\Delta}))} - \frac{c_1}{2c_2} \right)^2}{2Q_3} + \frac{c_1c_2p^2Q_1 \left( -\frac{\sqrt{-\Delta}(b_4 \cot(\frac{\mu}{2}\sqrt{-\Delta})-b_5)}{2c_2(b_4+b_5 \cot(\frac{\mu}{2}\sqrt{-\Delta}))} - \frac{c_1}{2c_2} \right)}{2Q_3}.$$

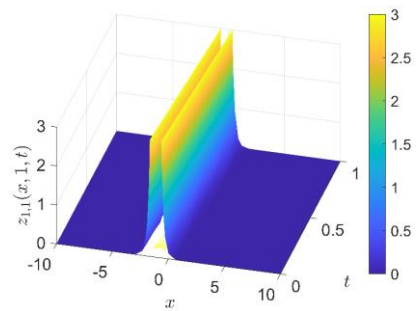
$$z_{2,2}(x, y, t) = \frac{(c_1^2 + 2c_0c_2)p^2Q_1}{12Q_3} + \frac{c_2^2p^2Q_1 \left( -\frac{\sqrt{\Delta}(b_2+b_1 \coth(\frac{\mu}{2}\sqrt{\Delta}))}{2c_2(b_1+b_2 \coth(\frac{\mu}{2}\sqrt{\Delta}))} - \frac{c_1}{2c_2} \right)^2}{2Q_3} + \frac{c_1c_2p^2Q_1 \left( -\frac{\sqrt{\Delta}(b_2+b_1 \coth(\frac{\mu}{2}\sqrt{\Delta}))}{2c_2(b_1+b_2 \coth(\frac{\mu}{2}\sqrt{\Delta}))} - \frac{c_1}{2c_2} \right)}{2Q_3},$$

$$z_{2,3}(x, y, t) = \frac{(c_1^2 + 2c_0c_2)p^2Q_1}{12Q_3} + \frac{c_2^2p^2Q_1 \left( -\frac{1}{c_2(px+qy-rt)+b_3} - \frac{c_1}{2c_2} \right)^2}{2Q_3} + \frac{c_1c_2p^2Q_1 \left( -\frac{1}{c_2(px+qy-rt)+b_3} - \frac{c_1}{2c_2} \right)}{2Q_3},$$

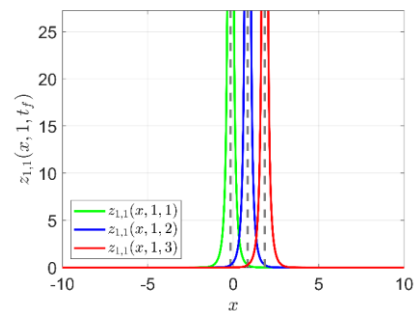
$$z_{2,4}(x, y, t) = \frac{(c_1^2 + 2c_0c_2)p^2Q_1}{12Q_3} + \frac{c_2^2p^2Q_1 \left( \frac{\sqrt{-\Delta}(b_4 \tan(\frac{\mu}{2}\sqrt{-\Delta})-b_5)}{2c_2(b_4+b_5 \tan(\frac{\mu}{2}\sqrt{-\Delta}))} - \frac{c_1}{2c_2} \right)^2}{2Q_3} + \frac{c_1c_2p^2Q_1 \left( \frac{\sqrt{-\Delta}(b_4 \tan(\frac{\mu}{2}\sqrt{-\Delta})-b_5)}{2c_2(b_4+b_5 \tan(\frac{\mu}{2}\sqrt{-\Delta}))} - \frac{c_1}{2c_2} \right)}{2Q_3},$$

### 3. Results and Discussion

In this paper, utilizing the UREEM, many soliton solutions of the extended (2+1)-dimensional KP equation were obtained. The diverse graphs of some obtained solutions are demonstrated using two- and three- dimensional plots. The results of this study imply that the considered equation admits dark, bright, singular, and periodic solutions. Figure 1 covers the demonstration of the solution  $z_{1,1}(x, 1, t)$  utilizing the parameters  $a = 1, p = 2, q = 2, r = 2, \beta = 2, \gamma = 2, \zeta = 2, \kappa = 2, b_1 = 1, b_2 = 3, c_0 = 1, c_1 = 3,$  and  $c_2 = 1$ . It admits a singular solution. In Fig. (1-a) and Fig. (1-b), 3-dimensional and 2-dimensional demonstrations of the soliton are shown for  $t_f = 1, 2,$  and  $3$ . As can be deduced from Fig. (1-b), the soliton goes to the right on the horizontal axis.



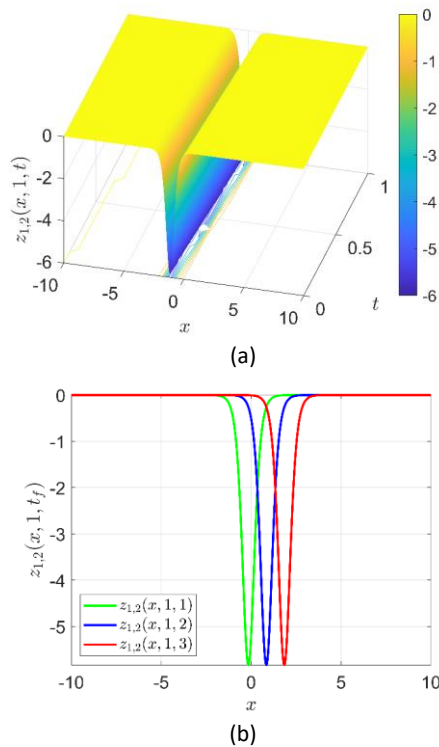
(a)



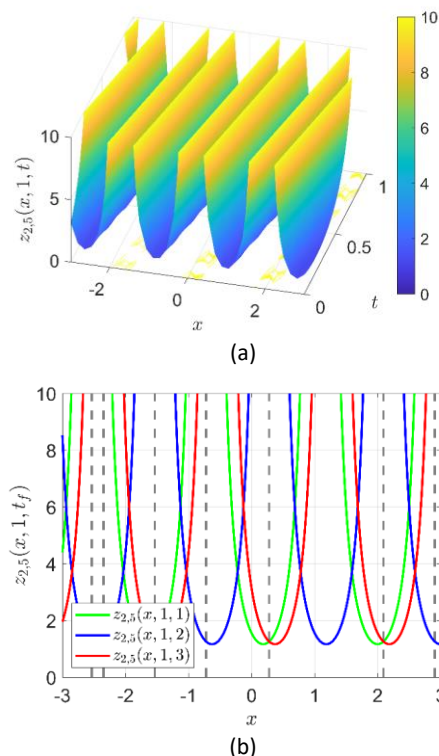
(b)

**Figure 1.** Three and two-dimensional plots of  $z_{1,1}(x, 1, t)$  (singular solution)

Fig. (2-a) and Fig. (2-b) include some plots of the solution  $z_{1,2}(x, 1, t)$  for  $a = 1, p = 2, q = 2, r = 2, \beta = 2, \gamma = 2, \zeta = 2, \kappa = 2, b_1 = 1, b_2 = 3, c_0 = 1, c_1 = 3,$  and  $c_2 = 1$ . It demonstrates a dark soliton. The wave goes to the right on the horizontal axis while  $t_f = 1, 2,$  and 3.



**Figure 2.** Three and two-dimensional plots of  $z_{1,2}(x, 1, t)$  (dark soliton)



**Figure 3.** Three and two-dimensional plots of  $z_{2,5}(x, 1, t)$  (periodic solution)

Finally, we present the 3D and 2D graphs of the periodic solution  $z_{2,5}(x, 1, t)$  with  $a = 1, p = 2, q = 2, r = 2, \beta = 2, \gamma = 2, \zeta = 2, \kappa = 2, b_4 = 1, b_5 = 3, c_0 = 1, c_1 = 1,$  and  $c_2 = 1$ , in Fig. (1-a) and Fig. (1-b), respectively.

#### 4. Conclusion

This research deals with the extracting the soliton solutions of the extended (2+1)-dimensional KP equation. Various soliton solutions including kink, bright, and singular solitons were obtained using the UREEM. The plots of the obtained solutions are demonstrated in figures. We anticipate that the obtained outcomes in this study will prove valuable to researchers working in the field of nonlinear wave dynamics and beyond, extending their applicability across various disciplines.

#### Declaration of Ethical Standards

All authors have complied with the ethical standards.

#### Credit Authorship Contribution Statement

In this article, all components - conceptualization, methodology, coding and analysis, writing (both original draft and review and editing), visualization- are solely attributed to a single author who is Melih Cinar.

#### Declaration of Competing Interest

The authors hereby declare that they have no competing interests related to the content of this article.

#### Data Availability

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

#### Acknowledgement

The authors extend their sincere thanks to the peer reviewers and the journal editors for their valuable insights and guidance, which significantly contributed to the enhancement and refinement of this manuscript.

#### 5. References

- Albayrak, P. (2022). Soliton solutions of (2+ 1)-dimensional non-linear reaction-diffusion model via Riccati-Bernoulli approach. *Thermal Science*, **26**(Spec. issue 2), 811-821. <https://doi.org/10.2298/TSCI22S2811A>
- Albayrak, P. (2023). Optical solitons of Biswas–Milovic model having spatio-temporal dispersion and parabolic law via a couple of Kudryashov’s schemes. *Optik*, **279**, 170761. <https://doi.org/10.1016/j.jileo.2023.170761>
- Braun, M. (1983b). Differential Equations and Their Applications: An Introduction to Applied Mathematics. In *Springer eBooks*. USA.



<https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4360-1>

- Cınar, M., Secer, A., & Bayram, M. (2022). Analytical solutions of (2+ 1)-dimensional Calogero-Bogoyavlenskii-Schiff equation in fluid mechanics/plasma physics using the New Kudryashov method. *Physica Scripta*, **97**(9), 094002. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ac883f>
- Cınar, M., Secer, A., Ozisik, M., & Bayram, M. (2023). Optical soliton solutions of (1+ 1)-and (2+ 1)-dimensional generalized Sasa–Satsuma equations using new Kudryashov method. *International Journal of Geometric Methods in Modern Physics*, **20**(02), 2350034. <https://doi.org/10.1142/S0219887823500342>
- Das, S. E. (2022). Retrieval of soliton solutions of (1+ 1)-dimensional non-linear telegraph equation. *Thermal Science*, **26**(Spec. issue 2), 801-810. <https://doi.org/10.2298/TSCI22S2801D>
- Davis, J. L. (2012). Wave propagation in electromagnetic media. *Springer Science & Business Media*.
- Debnath, L. (2012). Nonlinear partial differential equations for scientists and engineers. *In Birkhäuser Boston eBooks*. <https://doi.org/10.1007/978-0-8176-8265-1>
- Farlow, S. J. (2012). Partial Differential Equations for Scientists and Engineers. *Dover Publications*.
- Li, L., Xie, Y., & Mei, L. (2021). Multiple-order rogue waves for the generalized (2+1)-dimensional Kadomtsev–Petviashvili equation. *Applied Mathematics Letters*, 107079. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aml.2021.107079>
- Ma, H., Mao, X., & Deng, A. (2023). Resonance solutions and hybrid solutions of an extended (2+1)-dimensional Kadomtsev–Petviashvili equation in fluid mechanics. <https://doi.org/10.1007/s11071-023-08569-6>
- Malik, S., Almusawa, H., Kumar, S., Wazwaz, A. M., & Osman, M. S. (2021). A (2+ 1)-dimensional Kadomtsev–Petviashvili equation with competing dispersion effect: Painlevé analysis, dynamical behavior and invariant solutions. *Results in Physics*, **23**, 104043. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2021.104043>
- Mohanty, S. K., Kravchenko, O. V., Deka, M. Kr., Dev, A. N., & Churikov, D. V. (2023). The exact solutions of the 2+1–dimensional Kadomtsev–Petviashvili equation with variable coefficients by extended generalized G’G-expansion method. *Journal of King Saud University - Science*, **35**(1), 102358. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.102358>
- Ozisik, M., Secer A., Bayram, M., Yusuf A., & Sulaiman T. A. (2023). Soliton solutions of the (2+1)-dimensional Kadomtsev–Petviashvili equation via two different integration schemes. *International Journal of Modern Physics B*, 2350212. <http://doi.org/10.1142/s0217979223502120>
- Wazwaz, A. (2022). Painlevé integrability and lump solutions for two extended (3+1)- and (2+1)-dimensional Kadomtsev–Petviashvili equations. *Nonlinear Dynamics*, 111(4), 3623–3632. <https://doi.org/10.1007/s11071-022-08074-2>
- Weigand, B. (2015). Analytical methods for heat transfer and fluid flow problems. *Springer International Publishing*. USA. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46593-6>