



**DÜZCE
ÜNİVERSİTESİ**

**BİLİM ve TEKNOLOJİ
DERGİSİ**

Düzce University
Journal of
Science & Technology

e-ISSN: 2148-2446

Cilt
Volume

12

Sayı
Issue

1

Ocak / January
2024

Düzce Üniversitesi
BİLİM ve TEKNOLOJİ DERGİSİ
DÜBİTED

<http://dergipark.org.tr/dubited>



Düzce University
JOURNAL of SCIENCE & TECHNOLOGY
DUBITED

<http://dergipark.org.tr/dubited>

Sahibi

Owner

Uğur GÜVENÇ (Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü)

(D. Ü. Lisansüstü Eğitim Enstitüsü adına)

(On behalf of D. U. Institute of Graduate Programs)

Editör

Editor

Suat SARIDEMİR

Erdem ELİBOL

Ümit AĞBULUT

Yardımcı Editörler

Assistant Editors

Berfin ŞENİK

Vesile YALÇIN

Anıl DEMİRCAN

Ahmet AYTEĞİN

Nisa KAPLAN ERGÜL

Sorumlu Yazı İşleri Müdürü

Publishing Manager

Uğur GÜVENÇ

Yayın Kurulu

Editorial Board

Ahmet Bora KIRKLIKÇI, Karamanoğlu Mehmet Bey
Üniversitesi, Türkiye

Ali ÇALHAN, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Ali Etem GÜREL, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Alper ERGÜN, Karabük Üniversitesi, Türkiye

Ali ÖZDEMİR, Muş Alparslan Üniversitesi, Türkiye

Ali ÖZTÜRK, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Ahmet DEMİR, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Arif ÖZKAN, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye

Aytaç AYDIN, Karadeniz Teknik Üniversitesi,
Türkiye

Barış KARAKAYA, Fırat Üniversitesi, Türkiye

Emre AVCI, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Engin EROĞLU, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Fatih TAŞPINAR, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Fatih YILMAZ, Bayburt Üniversitesi, Türkiye
Fikret POLAT, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Alev ÖZKÖK, Hacettepe Üniversitesi, Türkiye
Gökhan YILDIZ, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Hakan ARSLAN, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Harun BAYRAKDAR, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Hüseyin BUDAK, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Hüseyin BAKIR, Doğu Üniversitesi, Türkiye
İrem DÜZDAR ARGUN, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Koray ŞARKAYA, Pamukkale Üniversitesi, Türkiye
Mecit AKSU, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Mehmet SÖNMEZ, Osmaniye Korkut Ata
Üniversitesi, Türkiye
Melahat Sevgül BAKAY AĞBULUT, Düzce
Üniversitesi, Türkiye
Melike ERDOĞAN, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Mert YILDIRIM, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Metin TOZ, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi,
Türkiye
Mevlüt ERSOY, Süleyman Demirel Üniversitesi, Türkiye
Muhammet Emin ŞAHİN, Yozgat Bozok Üniversitesi,
Türkiye
Muhammet GÜL, Munzur Üniversitesi, Türkiye
Mustafa KARAGÖZ, Karabük Üniversitesi, Türkiye
Murat AYDEMİR, Erzurum Teknik Üniversitesi, Türkiye
Murat Kadir YEŞİLYURT, Bozok Üniversitesi,
Türkiye
Murat EYVAZ, Gebze Teknik Üniversitesi, Türkiye
Mustafa DAYI, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Musa Çadırcı, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Nuray Benli YILDIZ, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Nihat Hakan AKYOL, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye
Nuri ŞEN, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Osman DİKMEN, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Osman KANDARA, Southern University,
Özge Tüzün ÖZMEN, İzmir Bakırçay Üniversitesi,
Türkiye
Özlem ÖZKAN ÖNÜR, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Pınar GÜLTEKİN, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Revna ACAR VURAL, Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye
Salih Tunç KAYA, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Semih ÖZDEN, Milli Savunma Üniversitesi, Türkiye
Sercan SERİN, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi,
Türkiye
Serdar BİROĞUL, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Serhat DUMAN, Bandırma Onyedil Eylül
Üniversitesi, Türkiye
Suat SARIDEMİR, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Şerife Gülsün KIRANKAYA, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Taner YOLDAŞ, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Tarık GEDİK, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Tikendra Nath VERMA, Maulana Azad National
Institute of Technology, Hindistan
Turgay BİRTÜRK, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Uğur GÜVENÇ, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Ümit AĞBULUT, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Ümit ERGUN, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Ümit YURT, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Yasin ŞALE, Gebze Teknik Üniversitesi, Türkiye
Yaşar Selman GÜLTEKİN, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Zehra KARAPINAR ŞENTÜRK, Düzce Üniversitesi,
Türkiye

Ulusal Danışma Kurulu
National Advisory Board

Adem ACIR, Gazi Üniversitesi, Türkiye
Adem ÇİÇEK, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Türkiye
Arif ÖZKAN, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye
Devrim AKGÜN, Sakarya Üniversitesi, Türkiye
Elif UZ, Uludağ Üniversitesi, Türkiye
Ercan ÖZGAN, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Erol BURDURLU, Gazi Üniversitesi, Türkiye
Ethem TOKLU, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Fahri VATANSEVER, Uludağ Üniversitesi, Türkiye
Fatih TAŞPINAR, Düzce Üniversitesi, Türkiye
H.Hüseyin CİRİTCİOĞLU, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Hakan AKTAŞ, Süleyman Demirel Üniversitesi, Türkiye
Hakan ALTINÇEKİÇ, İstanbul Üniversitesi, Türkiye
Hakan HOCAOĞLU, Gebze Teknik Üniversitesi, Türkiye
İbrahim YÜCEDAĞ, Düzce Üniversitesi, Türkiye
İlyas UYGUR, Düzce Üniversitesi, Türkiye
İsmail TORÖZ, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye
İsmet YILDIZ, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Mehmet BUDAKÇI, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Memiş IŞIK, Karabük Üniversitesi, Türkiye
Meral KEKEÇOĞLU, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Muharrem GÖKÇEN, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Murat KALE, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Murat SİPAHİOĞLU, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Türkiye
Mustafa OKUTAN, Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye
Raşit TURAN, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Türkiye
Salih TOSUN, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Selçuk ÖZMEN, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Seyhan FIRAT, Gazi Üniversitesi, Türkiye
Suat SARIDEMİR, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Şerife Gülsün KIRANKAYA, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Uğur GÜVENÇ, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Yasin KİŞİOĞLU, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye
Yusuf AVCI, Bahçeşehir Üniversitesi, Türkiye
Zeki DEMİR, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Uluslararası Danışma Kurulu
International Advisory Board

Abdelilah SLAOUI, Universite de Strasbourg, France
Clay S. GLOSTER, North Caroline A&T University,
USA
A.S. El-Shafay, Prince Sattam bin Abdulaziz Üniversitesi,
Suudi Arabistan
Nicoleta BREAZ, University of Alba Lulia, Romania
Luis ROSEIRO, Coimbra Institute of Engineering,
Portugual
Mohamed Saber Gad, Fayoum University, Egypt
Marwan BIKDASH, North Carolina A & T State
University, USA
Sadık ARTUNÇ, Mississippi State University, USA
Salim HIZIROĞLU, Oklahoma State University, USA
Thomas C. CULBRETH, North Carolina State
University, USA

Cilt
Volume

12

Sayı
Issue

1

Ocak/January
2024

Ürün Bilgisi

Product Information

Yayıncı
Publisher

Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Düzce University Institute of Graduate Programs

Sahibi

Uğur GÜVENÇ (Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü)

Owner

(D. Ü. Lisansüstü Eğitim Enstitüsü adına)

(On behalf of D. U. Institute of Graduate Programs)

Sorumlu Yazı İşleri Müdürü
Publishing Manager

Uğur GÜVENÇ

Web Sayfası

<http://dergipark.org.tr/dubited>

Web Page

Basım Tarihi
Date of Publication

Ocak 2024
January 2024

Yayın Dili
Language

Türkçe / İngilizce
Turkish / English

Yayın Aralığı
Frequency

Yılda dört kez yayınlanır
Published four times in a year

Yayın Türü
Type of Publication

Sürelî yayın
Periodical

e-ISSN Numarası
e-ISSN Number

2148-2446

Yazışma Adresi

Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim
Enstitüsü Rektörlük Binası 3. Kat 81620
Düzce/TÜRKİYE

Telefon: +90 380 542 12 08

Fax: +90 380 542 12 38

E-posta: dubitedyayin@duzce.edu.tr

<http://dergipark.org.tr/dubited>
adresinden dergiye ilişkin bilgilere ve
makalelerin tam metnine ulaşılabilir.

Correspondence Address

*Düzce University Institute of
Graduate Programs Rectorship
Building 3rd Floor 81620
Düzce/TURKEY*

Phone: +90 380 542 12 08

Fax: +90 380 542 12 38

E-mail: dubitedyayin@duzce.edu.tr

*Instructions for authors and all
articles in this journal can be
reached at
<http://dergipark.org.tr/dubited>*

İÇİNDEKİLER

Sayfa

Makale

BİYOLOJİ/BİYOKİMYA/ECZACILIK/MOLEKÜLER BİYOLOJİ VE GENETİK/SU ÜRÜNLERİ

Araştırma Makalesi/ Research Article

- 296-306 Piyasadan Temin Edilen Bazı Yağların Antioksidan Aktivitesinin Çeşitli Yöntemlerle Değerlendirilmesi
Evaluation Of Antioxidant Activity Of Some Commercial Oils By Various Methods
Selen İLGÜN, Semih YILDIRIM, Kübra KARAGÜL, Gökçe Şeker KARATOPRAK
- 365-374 Control potency of Trans-cinnamic acid and antifungal metabolites of Xenorhabdus szentirmaii against Alternaria brassicicola
Alternaria brassicicola'ya karşı Trans-cinnamic Asit ve Xenorhabdus szentirmaii'nin Antifungal Metabolitlerinin Kullanım Potansiyellerinin Araştırılması
Barış GÜLCÜ, Nedim ALTIN
- 375-389 Physiological and Biochemical Effects of Thermo-Priming on Wheat (Triticum aestivum L.) under Drought and Heat Stresses
Kuraklık ve Isı Stresi altındaki Buğdayda Thermo- Priming'in Fizyolojik ve Biyokimyasal Etkileri
Müge TEKER YILDIZ, Eda GÜNAY, Okan ACAR

BİLGİSAYAR / YAZILIM / BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ/BİLİŞİM SİSTEMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ

Araştırma Makalesi/ Research Article

- 89-111 Pandemi Sürecinde Uzaktan Eğitimde Senkron, Asenkron Ve Hibrit Yapılmış Derslerde Veri Madenciliği İle Öğrenci Performans Analizi
Student Performance Analysis With Data Mining In Distance Education Synchronous, Asynchronous And Hybrid Courses In The Pandemic Process
Serdar KIRIŞOĞLU, Mehmet YILDIRIM
- 219-229 Deep Learning Based Traffic Sign Recognition Using YOLO Algorithm

Yolo Algoritması Kullanarak Derin Öğrenme Tabanlı
Trafik İşareti Tanıma

Gökalp ÇINARER

307-319 Kötü Amaçlı Yazılım Tespiti için Makine Öğrenmesi
Algoritmalarının Kullanımı

Using Machine Learning Algorithms for Malware Detection

Pınar TÜFEKÇİ, Çetin Mutlu ÖNAL

337-347 Molecularly Imprinted Chitosan Modified Quartz Tuning Fork
Sensors for Real Time Biosensing in Liquid Environment

Sıvı Ortamda Gerçek Zamanlı Biyoalgılama için Moleküler Baskılı
Kitosan Modifiye Kuvars Ayar Çatalı Sensör Geliştirilmesi

Gizem KALELİ CAN

451-462 Confidence Interval Approach to Weather Forecasting with Horizon-
Based Genetic Programming

Ufuk Amaçlı Genetik Programlama ile Hava Durumu Tahminine
Güven Aralıklı Yaklaşım

Ömer MİNTEMUR

522-540 Can Economic and Financial Development Curb CO2 Emissions in
Qatar

Ekonomik ve Finansal Gelişme Katar'daki CO2 Emisyonlarını
Azaltabilir Mi?

Ibrahim ARI

Derleme Makale/ Review Article

134-142 A Review on Vehicle To Vehicle Communication Using BlockChain
Araç Araç Haberleşmesinde Blokzincir Kullanımı Üzerine Bir
İnceleme

Şükrü OKUL, Fatih KELEŞ, M. Ali AYDIN

ÇEVRE / ZİRAAT / JEOLJİ/ JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ

Derleme Makale/ Review Article

18-38 Katı Atık Depolama Sahası Sızıntı Sularında Mikroplastik Kirliliği
Microplastic Pollution in Landfill Leachates

Neriman BAYLAN, Pelin KOYUNCUOĞLU, Gülbin ERDEN

Araştırma Makalesi/ Research Article

121-133 Düşey Elektrik Sondajı Verilerinin Genelleştirilmiş Regresyon Sinir
Ağları ile Ters Çözümü

Inversion of Vertical Electrical Sounding Data by Using General Regression Neural Network

Doğukan DURDAĞ, Ertan PEKŞEN

185-198 Mantıksal Regresyon, Frekans Oranı ve ArcGIS Pro Suitability Model ile Yalova-Çınarcık Bölgesinin Heyelan Duyarlılık Analizi
Landslide Susceptibility Analysis of Yalova-Çınarcık Region with Logistic Regression, Frequency Ratio, and ArcGIS Pro Suitability Model

Zeliha TAŞ, Özkan CORUK

419-438 17 Kasım 2021 Merkez (Düzce) Depremi (Mw5.0) ve Artçı Şoklarının (Mw4.3 ve Mw3.9) Moment Tensör Çözümleri ve Ana Şok Coulomb Gerilme Analizi

Moment Tensor Solutions of November 17, 2021 Central (Duzce) Earthquake (Mw5.0) and its Aftershocks (Mw4.3 and Mw3.9) and Coulomb Stress Analysis of the Mainshock

Nihan HOŞKAN

541-563 Structural Interpretation and Tectonostratigraphy of High-Pressure Low-Temperature Blueschist Facies Rocks near Orhaneli, Bursa Province, Western Türkiye

Orhaneli, Bursa İli, Batı Türkiye Yakınlarındaki Yüksek Basıncılı Düşük Sıcaklıklı Mavişist Fasiyesli Kayaçların Yapısal Yorumlanması ve Tektonostratigrafisi

Umit YILDIZ

ELEKTRİK/ELEKTRONİK / ELEKTRİK ELEKTRONİK/ MEKATRONİK/ENERJİ/ DENİZ BİLİMLERİ ve TEKNOLOJİSİ MÜHENDİSLİĞİ

Araştırma Makalesi/ Research Article

247-263 Elektromanyetik Radyasyon Maruziyet Algısı Ölçeğinin Geliştirilmesi: Geçerlilik ve Güvenilirlik Analizleri
Development of The Electromagnetic Radiation Exposure Perception Scale: Validity and Reliability Analysis

Osman ÇEREZCİ, Aylin TUTGUN ÜNAL, Feyza SELAMET

348-364 İki Eksenli Güneş Takip Sistemi İle Sabit Eksenli Fotovoltaik (PV) Sistemlerinin Tasarımı Ve Uzaktan İzlenmesi
Design And Remote Monitoring Of Two Axis Solar Tracking System And Fixed Axis Photovoltaic (PV) Systems

Serkan SAĞLAM, Sibel AKKAYA OK ÇEREZCİ

463-495 Kırşehir il sınırları içerisinde Rüzgâr Enerjisi Santrali (RES) kurulumu için uygun sahaların mekânsal olarak belirlenmesi

Spatial determination of suitable installation sites of Wind Power Plants (WPPs) within the provincial borders of Kırşehir
Mehmet Seren KORKMAZ, Nur ÖZTÜRK, Soner HARNUBOĞLU

- 496-509 A Novel Control and Monitoring Interface Design for ROS Based Mobile Robots
ROS Tabanlı Mobil Robotlar İçin Yeni Bir Kontrol ve Görüntüleme Arayüz Tasarımı
Bilal GUREVIN, Muhammed YILDIZ, Furkan GULTURK, İhsan PEHLIVAN, Fatih CALISKAN, Baris BORU, M. Zahid YILDIZ
- 564-585 Dynamical simulation of a four legged robot with shooting at targets using Fuzzy Logic Control
Bulanık Mantık Kontrolü kullanarak hedeflere atış yapan dört bacaklı bir robotun dinamik simülasyonu
Ahmet Burak TATAR, Beyda TAŞAR, Alper Kadir TANYILDIZI, Oğuz YAKUT

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ / ENDÜSTRİYEL TASARIM MÜHENDİSLİĞİ

Derleme Makale / Review Article

İNŞAAT / METALURJİ ve MALZEME / ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ

Araştırma Makalesi / Research Article

- 39-48 Cam Küre Takviyeli Polimer Kompozitlerde UV Yaşlandırma ve Uyumlaştırıcı Etkisinin İncelenmesi
Investigation of UV Aging and Compatibilizer Effects on Glass Sphere Reinforced Polymer Composites
Elif ULUTAŞ, Münir TAŞDEMİR
- 49-62 Doğu Karadeniz Bölgesi Doğal Taşlarının Beton Üretiminde Agrega Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi
Investigation of the Usability of Eastern Black Sea Region Natural Stones as Aggregate in Concrete Production
Ercüment KOÇ, Tekin YILMAZ, Ali Osman YILMAZ
- 81-88 Generation of Coherent XUV Radiation in N₂ molecule and its Mixture with Ne Gas using Sub-terawatt Laser System
N₂ Molekülünden ve Bunun Ne Gazı ile Karışımından Sub-terawatt Lazer Sistemi kullanılarak Uyumlu XUV Radyasyonu Üretilmesi
Muhammed SAYRAC
- 230-246 Lityum Hava Pillerinde Kullanılan Grafen Elektrotlar

Graphen Electrodes Used in Lithium Air Batteries
Özge KILINÇ, Nil TOPLAN

- 264-278 Determination of Mechanical Properties of Walls Produced with Different Wall and Mortar Materials
Farklı Duvar ve Harç Malzemeleri İle Üretilen Duvarların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi
Behcet DÜNDAR, Hanifi TOKGÖZ
- 279-295 Tükenmiş Aktif Karbonun Rejenerasyonunda Yenilikçi Yaklaşımlar
Innovative Approaches in Spent Activated Carbon Regeneration
Nevim GENÇ, Esin KACIRA
- 400-418 Yüksek Fırın Cürufu, Kalsine Kaolin ve Diatomit İkameli Çimentoların Yapısal Özelliklerinin Eğilme Dayanımına Etkisi
Effect of Structural Properties of Blast Furnace Slag, Calcined Kaolin and Diatomite Substituted Cements on Flexural Strength
Ayperi TANIK, Yılmaz KOÇAK

GIDA MÜHENDİSLİĞİ

Derleme Makale/ Review Article

- 153-174 Geleceğin Alternatif Protein Kaynakları: Bitkiler
Alternative Protein Sources of The Future: Plants
Selen SEYHAN, Emine NAKİLCİOĞLU, Semih ÖTLEŞ

KİMYA / FİZİK

Araştırma Makalesi/ Research Article

- 602-611 Utilization of FTIR Spectroscopic Method in Classification and Analysis of Mineral Samples Containing Sodium and Potassium
Sodyum Ve Potasyum İçeren Maden Numunelerinin Sınıflandırılması ve Analizlerinde FTIR Spektroskopik Yöntemin Kullanılması
Fahriye ÖĞÜT, Adnan KENAR

MATEMATİK

Araştırma Makalesi/ Research Article

- 510-521 Bazı Genelleştirilmiş Sabit Çember Sonuçları Üzerine
On Some Generalized Fixed Circle Results
Nihal TAŞ, Özlem MORALI KIZANLIK

MAKİNE / MEKATRONİK / MALZEME / ENDÜSTRİ / İMALAT / OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ

Arastırma Makalesi/ Research Article

- 1-17 Üretim Parametrelerinin Seçici Lazer Ergitme Yöntemi ile Ti6Al4V Alaşımının Çekme Dayanımı, Elastisite Modülü ve Uzama Özelliklerine Etkisi
The Effect of Production Parameters on Tensile Strength, Modulus of Elasticity and Elongation Properties of Ti6Al4V Alloy by Selective Laser Melting Method
Dilara Selma AYDIN, Çağrı Vakkas YILDIRIM, Şenol ŞİRİN
- 63-80 Thermo-Fluidic Analysis of Pulsating Heat Pipes Charged with Water-Based Immiscible Fluid Pairs
Su Bazlı Karışmayan Akışkan Çiftleriyle Yüklü Atımlı Isı Borularının Termo-Akış Analizi
Burak MARKAL, Ramazan VAROL
- 112-120 İnsan Femurunda Eksenel ve Yanal Darbe Yüküne Maruz Kalan Kemik-İmplant Sisteminin Analizi
Analysis of Human Femur-Implant System Subjected to Axial and Lateral Impact Loading
Okan MADEN, Kenan TÜFEKÇİ
- 143-152 Investigation of Mechanical Properties of Ti6Al4V Alloy Foams produced by Powder Metallurgy Method
Toz metalurjisi Yöntemi ile Üretilen Ti6Al4V Alaşımılı Köpüklerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi
İsmail TOPCU
- 199-218 Bakır Oksit-Su ve Elmas-Su Nanoakışkanlı Birleşik Jet Akışlı Kanallarda Isı Transferi ve Akış Yapılarının Değerlendirilmesi
Landslide Susceptibility Analysis of Yalova-Çınarcık Region with Evaluation of Heat Transfer and Flow Structures in Combined Jet Flow Channels with Copper Oxide-Water and Diamond-Water
Koray KARABULUT
- 320-336 Kaldırma Kuvveti ve Yüzey Işınımının Eğik Bir Plakanın Çarpan Jet ile Soğutulmasına Etkilerinin Sayısal Olarak İncelenmesi
Numerical Investigation of the Effects of Buoyancy and Inter-Surface Radiation on Jet Impingement Cooling of an Inclined Plate
Buğra SARPER
- 439- 450 Karşıt Akışlı Ranque– Hilsch Vorteks Tüpünün Makine Öğrenmesi Metotları ile Performans Analizi
Performance Analysis of Counterflow Ranque– Hilsch Vortex Tube by Machine Learning Methods
Murat KORKMAZ, Ayhan DOĞAN, Volkan KIRMACI

586-601 Periyodik Oluklu bir Kanalda Laminer Pulsatif Akışın Isı Transferi Karakteristiğinin Sayısal Analizi
Numerical Analysis of Heat Transfer Characteristic of Laminar Pulsating Flow in a Periodical Corrugated Channel
Selma AKÇAY

ORMAN/ORMAN ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ/PEYZAJ MİMARLIĞI/ZİRAAT MÜHENDİSLİĞİ

Araştırma Makalesi/ Research Article

175-184 A New Hybrid Record for The Vascular Flora of Türkiye: Fagus x taurica Popl.
Türkiye Vasküler Florası İçin Yeni Bir Hibrit Kayıt: Fagus x taurica Popl.
Neval GÜNEŞ ÖZKAN, Turgay BİRTÜRK, Necmi AKSOY, Ahmet AYTEĞİN




390-399 Samsun İli Kanola Üretim Alanlarda Enfeksiyon Oluşturan Virüslerin Belirlenmesi
Detection of Viruses in Oilseed Rape (Canola) in Samsun Province
Mehmet Ali ŞEVİK, Abdullah BALTACI



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Üretim Parametrelerinin Seçici Lazer Ergitme Yöntemi ile Ti6Al4V Alaşımının Çekme Dayanımı, Elastisite Modülü ve Uzama Özelliklerine Etkisi

 Dilara Selma AYDIN^{a,*},  Çağrı Vakkas YILDIRIM^b,  Şenol ŞİRİN^c

^a Sivil Havacılık Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, TÜRKİYE

^b Uçak Gövde Motor Bölümü, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, TÜRKİYE

^c Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Gümüşova Meslek Yüksekokulu, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: dilaraa801@gmail.com

DOI: 10.29130/dubited.1134020

ÖZ

Eklemeli imalat, bilgisayar kontrollü üç boyutlu katı model verilerini kullanan modern bir imalat yöntemidir. Eklemeli imalatta amaç; malzemeyi kademeli şekilde üreterek nihai şekline getirmektir. Bu sayede karmaşık geometrilere sahip ürünlerin elde edilmesi diğer klasik yöntemlere göre nispeten daha kolaydır. Özellikle, yüksek ölçüm doğruluğuna, yüksek dayanıma ve düşük ağırlığa sahip parçaların hızlı üretilmesinin gerekli olduğu havacılık-uzay endüstrisi, biyomedikal ve savunma sanayii gibi geniş bir alanda tercih edilmektedir. Eklemeli imalat birçok alt yöntemden oluşmakta ve bu yöntemler malzemenin cinsi, parçanın boyutu, kullanım amacı, çalışma prensibi, malzemelerin hassasiyeti ve özellikleri, üretim sayısı ve hızı gibi birçok kritere bağlıdır. Seçici lazer eritme (SLM) yöntemi, eklemeli imalat yöntemleri arasında genellikle tercih edilmektedir. Ancak, SLM prosesini doğrudan ve dolaylı parametreler olmak üzere birçok faktör etkileyebilmektedir. Bu çalışmanın amacı, farklı üretim parametrelerinin SLM yöntemi kullanılarak üretilen Ti6Al4V alaşım malzemesi üzerinde mekanik özelliklerine etkisini incelemektir. Bu amaç doğrultusunda dört farklı üretim parametresi ve seviyeleri üretim parametresi olarak belirlenmiştir. Değerlendirme kriteri olarak çekme dayanımı, elastisite modülü ve uzama yüzdesi seçilmiştir. Deney tasarımında Taguchi L₁₆ tercih edilmiştir. Deney sonuçları değerlendirilirken S/N analizi kullanılmıştır. Kontrol faktörlerin etki düzeyini belirlemek için varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Deney sonuçlarından elde edilen verilerle çekme dayanımı için optimum parametreler; 75 µm lazer odak çapı, 230 W lazer gücü, 60 µm tarama mesafesi ve 300 mm/sn hız tarama hızı olarak tespit edilirken, elastisite modülü için 60 µm tarama mesafesi, 450 mm/sn tarama hızı, 80 µm lazer odak çapı ve 250 W lazer gücü ve uzama miktarı için 90 µm lazer odak çapı, 150 µm tarama mesafesi, 450 mm/sn tarama hızı ve 230 W lazer gücü olarak tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli imalat, Mekanik özellikler, Ti6Al4V, Seçici lazer eritme

The Effect of Production Parameters on Tensile Strength, Modulus of Elasticity and Elongation Properties of Ti6Al4V Alloy by Selective Laser Melting Method

ABSTRACT

Additive manufacturing is a modern manufacturing method that uses computer-controlled three-dimensional solid model data. The aim of additive manufacturing; It is to gradually produce the material and bring it to its final shape. In this way, products with complex geometries are relatively easier to obtain than other classical methods.

In particular, it is preferred in a wide area such as the aerospace industry, biomedical and defense industry, where it is necessary to produce parts with high measurement accuracy, high strength and low weight. Additive manufacturing consists of many sub-methods and these methods depend on many criteria such as the type of material, the size of the part, the purpose of use, the principle of operation, the precision and properties of the materials, the number and speed of production. Selective laser melting (SLM) method is generally preferred among additive manufacturing methods. However, many factors can affect the SLM process, including direct and indirect parameters. The aim of this study is to examine the effect of different production parameters on the mechanical properties of Ti6Al4V alloy material produced using the SLM method. For this purpose, four different production parameters and levels are determined as production parameters. Tensile strength, modulus of elasticity and elongation percentage are selected as the evaluation criteria. Taguchi L16 is preferred in experimental design. S/N analysis is used when evaluating the results of the experiment. Variance analysis (ANOVA) is performed to determine the level of impact of control factors. Optimum parameters for tensile strength with the data obtained from the results of the experiment are determined as 75 µm laser focal diameter, 230 W laser power, 60 µm scanning distance and 300 mm/s speed scanning speed, while 60 µm scanning distance for the elasticity module, 450 mm/s scanning speed, 80 µm laser focal diameter and 250 W laser power and 90 µm laser focus diameter for elongation amount, 150 µm scanning distance, 450 mm/s scanning speed and 230 W laser power are determined.

Keywords: Additive manufacturing, Mechanical properties, Ti6Al4V, Selective laser melting

I. GİRİŞ

Üç boyutlu model verilerinden nesnelere üretimine olanak sağlayan eklemeli imalat yöntemi, malzeme, üretim ve teslimat süreçleri açısından sunduğu avantajlar nedeniyle hem akademik hem de endüstriyel araştırmalara konu olmakta ve kapsamı günden güne giderek artmaktadır [1]. Bu yöntem, bileşenlerin geliştirilmiş tasarımına ve hızlı üretimine imkân sağlamaktadır. Özellikle karmaşık parçaların üretimini ve onarımını kolaylaştırmaktadır [2]. Bu imalat yöntemi, mühendisliğe yenilikçi bir yaklaşım sağlamaktadır. Eklemeli imalat yöntemleri kullanılan malzemenin şekli, ekleme tekniği, enerji kaynağının türü ve işlemin konfigürasyonu gibi birçok kritere bağlı olarak değişiklik göstermektedir [3]. Eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan seçici lazer ergitme (SLM), genellikle tercih edilen bir yöntemdir. SLM, karmaşık geometrilere ve içyapılara sahip neredeyse tam yoğunluklu nesnelere veya ince parçaların üretimini sağlayan yenilikçi teknoloji modern bir imalat süreci sunmaktadır [4]. SLM işlemi, martensitik çelik, H13 takım çeliği, alüminyum alaşımları ve titanyum alaşımları gibi çeşitli metalik malzemelerin üretiminde aktif olarak kullanılmaktadır [5]. Ti6Al4V titanyum alaşımı, yüksek özgül mukavemet, mükemmel korozyon direnci, düşük yoğunluk ve biyouyumluluk gibi kimyasal ve mekanik özelliklerinden dolayı, SLM yöntemiyle üretilen parçaların endüstriyel uygulamaları için oldukça umut vermektedir [6].

SLM yöntemi, toz haldeki metal malzemenin yüksek yoğunluklu bir lazer güç kaynağı yardımıyla katman katman eritilip net şekle yakın üç boyutlu bir parça üretilmesi prensibine dayanmaktadır [7], [8]. SLM yönteminde metal tozları lazer ışını ile taranmakta ve eritilmektedir. Böylelikle hızlı soğutma, yüksek yoğunluk ve yüksek sertlik gibi bazı avantajlar sunmaktadır. SLM, havacılıkta yaygın olarak tercih edilen Ti6Al4V alaşımı ile soğutma kanalları, iç boşluklar gibi karmaşık geometrilere sahip parçaların üretimi için oldukça yüksek potansiyel uygulamalara sahiptir. Ayrıca geleneksel imalat yöntemleriyle karşılaştırılabilir mekanik özellikler elde edilmekte ve bu yöntemle karmaşık geometrilere sahip parçaların üretilmesinde iyileştirmeler sağlamaktadır. Bu nedenle eklemeli imalat yöntemleri arasında sıklıkla tercih edilen yöntemdir [9]–[14].

Literatürde SLM yöntemiyle üretilen Ti6Al4V alaşımının çekme testiyle ilgili yeterli çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle benzer çalışmalardan bazılarında aşağıda değinilmiştir. Han ve diğ. [9] Ti6Al4V alaşımını 194 W lazer gücü, 20 µm katman kalınlığı, 400~1100 mm/sn arasında bir tarama hızı ve 70~120 µm arasında değişen bir tarama mesafesi kullanarak üretmişlerdir. Çalışmanın sonucunda araştırmacılar, XOY ve XOZ arasında artık çekme gerilmeleri ve mikrosertlik anizotropisi, optimize edilmiş enerji yoğunlukları (120~190 J/mm³) kullanarak 1268 MPa'lık bir çekme mukavemeti ve %4,2'lik bir uzama elde etmişlerdir. Enerji yoğunluğunun numunelerin mikroyapısını ve mekanik

özelliklerini belirlemede önemli bir rol oynadığını öne sürmüşlerdir. Sun ve diğ. [15] SLM yöntemi ile 0°, 45° ve 90° yapım yönleri kullanarak Ti6Al4V alaşım numuneleri üretmişlerdir. Numunelerin mekanik özellikleri, giriş parametreleri olarak 350 W lazer gücü, 0.08 mm lazer odak çapı, 1000 mm/s tarama hızı ve 0.06 mm katman kalınlığı kullanılarak incelenmiştir. Deneysel sonuçların analizinde 45° kullanılarak üretilen numunelerin daha yüksek çekme mukavemeti (963,50 MPa) ve uzama değerlerine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Chang ve diğ. [16], SLM yöntemiyle Ti6Al4V alaşımından numuneler üretmişlerdir. Araştırmacılar çalışmalarında 350 W lazer gücü, 1250 mm/s tarama hızı, 0,06 mm katman kalınlığı ve zikzak tarama stratejisi kullanmışlardır. Deneysel çalışma sonucunda dikey yönde üretilen numunelerin uzama miktarı (%17,7) yatay yönde üretilen numunelerin uzama miktarından daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. Wang ve diğ. [17], SLM yöntemiyle Ti6Al4V alaşımını üretmişlerdir. Araştırmacılar, çalışmalarında bir dizi parametre üzerinden mikro yapı ve mekanik özellikleri incelemişlerdir. Girdi parametreleri olarak 50 ila 250 W aralığında lazer gücü, 250 ila 1750 mm/s aralığında tarama hızı, 30 µm katman kalınlığı, 100 µm tarama mesafesi ve 60° tarama açısı kullanılmıştır. Deneysel sonuçları analiz eden araştırmacılar, 200~250 W lazer gücü ve 850~1150 mm/s tarama hızı ile optimal sonuçlara ulaşmışlardır. Ayrıca belirlenen parametre grubunda artan tarama hızı ile uzama miktarının arttığını ve 1150 mm/s tarama hızında %7,8 uzama elde ettiklerini iddia etmişlerdir. Shi ve diğ. [18] yaptıkları çalışmada Ti6Al4V alaşımını ürettiler. 400 W lazer gücü kullanılarak yapılan çalışmada, 40~80 mm/s aralığında tarama hızı ve yüksek tabaka kalınlığı, nispeten pürüzlü bir yüzeye sahip numunelerin nihai çekme mukavemetini 1050 MPa ve uzama değerini %7.03 seviyesinde elde etmişlerdir. Bunun metalurjik yapışma ve mikro yapıdan kaynaklandığını öne sürmüşlerdir. Literatür taraması göstermiştir ki Ti6Al4V alaşımının çekme dayanımı, elastisite modülü ve uzama miktarıyla ilgili yeterli çalışma mevcut değildir.

Mevcut çalışmada, SLM yöntemiyle üretilen Ti6Al4V alaşımının üretimi sırasında farklı proses parametrelerinin çekme dayanımı, elastisite modülü ve uzama miktarı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla bir dizi deney yapılmıştır. Deneyler sırasında üretim parametresi olarak dört ana parametre ve bu parametrelere ait dört farklı seviye kullanılmıştır. Deney tasarımında Taguchi L₁₆ ortogonal dizilim kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan malzemeler, deney tasarımının detayları ve ölçüleri, deney sonuçları, elde edilen sonuçlar ve bunların tartışılmasının detayları aşağıdaki bölümlerde sunulmaktadır.

II. DENEYSEL PROSEDÜR

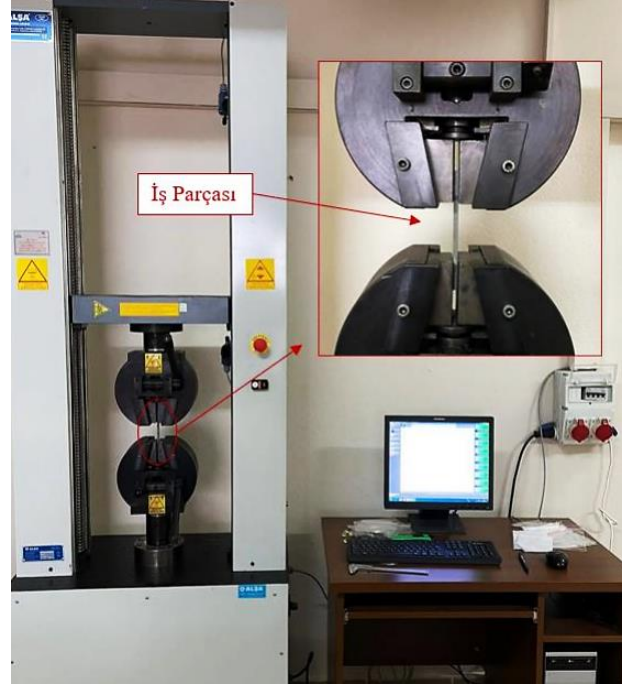
Mevcut çalışmada, Ti6Al4V titanyum alaşımının seçici lazer ergitme yöntemi ile birlikte üretim parametrelerinin çekme dayanımına, elastisite modülüne ve % uzama miktarına etkileri incelenmiştir. Ti6Al4V alaşım malzemeli iş parçası ASTM E 8M çekme standartları dikkate alınarak 16 adet iş parçası üretilmiştir. İş parçasının üretimi sırasında kullanılan gaz atomize Ti6Al4V metal tozları AP&C firması tarafından tedarik edilmiştir. Yapılan deneylerde çıktı parametresi, çekme mukavemeti, elastisite modülü, uzama miktarı olarak belirlenmiştir. Tablo 1’de deneyde kullanılan iş parçasına ait kimyasal bileşimi verilmiştir.

Tablo 1. Ti6Al4V alaşımının kimyasal bileşimi

Element	Al	V	Fe	C	O	N	H	Ti
Oran (%)	5,5~6,5	3,5~4,5	0~0,25	0~0,08	0~0,013	0~0,05	0~0,012	Denge

Üretim hacmi 250×250×300 mm olup maksimum lazer gücü 500 W olan Ermaksan Ena Vision 250 model SLM yazıcısında gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyde yatay yönlendirme (XZ-kenar yönü), şerit tarama stratejisi, 67° tarama açısı ve 30 µm katman kalınlığı sabit tutularak üretim yapılmıştır. Değişken parametreler ise lazer odak çapı (µm), tarama mesafesi (µm), tarama hızı (mm/sn) ve lazer gücü (W) olarak belirlenmiştir. Değişken ve sabit parametre seviyelerinin belirlenmesinde literatür bilgisi, araştırmacıların önceki çalışmaları ve ön deneyler etkili olmuştur. Çekme deneyi, 10 kN kapasiteye sahip Alşa firmasının MCK 10 elektromekanik çekme test cihazı kullanılarak ve 2 mm/dk hız altında

gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde ASTM E 8M çekme deneyi standartları dikkate alınmıştır. Bu deney, iş parçasının mukavemetini ve mekanik özelliklerini anlamak için oldukça önemlidir. Deneylerde kullanılan çekme cihazı ve iş parçasının çekme cihazına bağlanması Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. MCK 50 elektronik çekme testi cihazı ve iş parçasının bağlanması

Çalışmada, mekanik deney sonuçları ve sonrasında SLM üretim parametrelerinin bir fonksiyonu olarak elde edilen çıktı değerleri için Minitab 17 programı kullanılarak ANOVA analizleri yapılmıştır.

III. DENEY TASARIMI

Taguchi metodu, mühendislik deneylerinin tasarımı ve analizinde kullanılan önemli bir optimizasyon tekniğidir. Bu metod, dikey diziler yardımıyla deneylerin sayısını önemli ölçüde azaltmaktadır. Ayrıca kontrol edilemeyen faktörlerin etkisini de en aza indirmektedir [19]. Çekme deneyinde optimum kontrol faktörlerinin ve bu faktörlere ait seviyelerin belirlenmesinde Taguchi L₁₆ ortogonal dizini tercih edilmiştir. Kontrol faktörleri ve seviyeleri Tablo 2’de listelenmiştir.

Tablo 2. Deneylere ait kontrol parametreleri ve seviye değerleri

Kontrol Faktörleri	Birim	Sembol	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Lazer Odak Çapı	μm	A	75	80	85	90
Tarama Mesafesi	μm	B	60	90	120	150
Tarama Hızı	mm/sn	C	150	300	450	600
Lazer Gücü	W	D	190	210	230	250

Bu çalışmada, çekme dayanımı, elastisite modülü ve % uzama miktarı değerlerinin en büyük olması istendiğinden, S/N oranlarının hesaplanmasında “en büyük en iyi” amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Eşitlik 1’de buna ait değeri veren formül kullanılmıştır.

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1)$$

Burada, y deney sonucunu ve n, y değerlerinin sayısını ifade etmektedir [19]. Deney tasarımı sırasında kullanılan L₁₆ ortogonal dizisi Tablo 3'te listelenmiştir.

Tablo 3. Taguchi L16 deney tasarımı

Deney Sayısı	Kontrol Faktörleri ve Seviyeleri			
	A	B	C	D
1	75	60	150	190
2	75	90	300	210
3	75	120	450	230
4	75	150	600	250
5	80	60	300	230
6	80	90	150	250
7	80	120	600	190
8	80	150	450	210
9	85	60	450	250
10	85	90	600	230
11	85	120	150	210
12	85	150	300	190
13	90	60	600	210
14	90	90	450	190
15	90	120	300	250
16	90	150	150	230

Deneyde kullanılan kontrol faktörlerinin ve bu faktörlerin seviye değerlerinin etki oranlarını belirlemek amacıyla ANOVA yapılmıştır. Varyans analizi %95 güven aralığı ile yapılmıştır. Yapılan optimizasyon işleminde Minitab 17 programı kullanılmış ve analizler bu şekilde gerçekleştirilmiştir.

III. DENEY TASARIMI

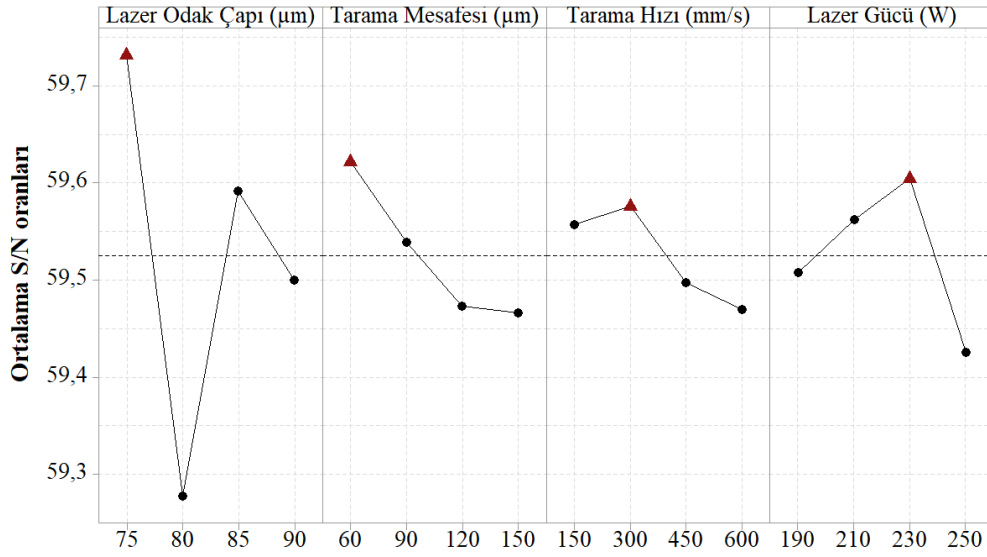
A. S/N ORAN ANALİZİ VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Ti6Al4V alaşımının çekme deneyi sonucunda ortaya çıkan çekme dayanımı, elastisite modülü ve uzama değerleri ile bunlara ait S/N değerleri Tablo 4'te listelenmiştir.

Tablo 4. Deney sonuçları ve bunlara ait S/N değerleri

Deney Sayısı	Kontrol Faktörleri				Deneysel Sonuçlar					
	A	B	C	D	Çekme Dayanımı (N/mm^2)	S/N Oranı (dB)	Elastisite Modülü (GPa)	S/N Oranı (dB)	Uzama (%)	S/N Oranı (dB)
1	75	60	150	190	982,71	59,84851	64,2	36,1507	12,882	22,19967
2	75	90	300	210	974,34	59,7742	64,9	36,2448	13,358	22,5148
3	75	120	450	230	968,57	59,7226	76,4	37,6618	12,274	21,7797
4	75	150	600	250	953,01	59,5819	60,3	35,6063	18,408	25,3001
5	80	60	300	230	951,53	59,5684	71,6	37,0982	16,816	24,5144
6	80	90	150	250	913,48	59,2129	66,2	36,4171	14,232	23,0653
7	80	120	600	190	900,8	59,0925	59,5	35,4903	11,412	21,1472
8	80	150	450	210	915,62	59,2343	81,7	38,2444	16,198	24,1892
9	85	60	450	250	944,26	59,5013	52,8	34,4526	18,203	25,2028
10	85	90	600	230	959	59,6363	62,2	35,8758	20,182	26,0992
11	85	120	150	210	963,01	59,6726	50,6	34,0830	17,298	24,7599
12	85	150	300	190	950,33	59,5574	40	32,0411	17,258	24,7398
13	90	60	600	210	951,63	59,5693	45,7	33,1983	16,954	24,5854
14	90	90	450	190	947,52	59,5317	32,2	30,1571	21,828	26,7802
15	90	120	300	250	933,81	59,4051	37,4	31,4574	14,872	23,4473
16	90	150	150	230	943,36	59,4935	40,8	32,2132	22,328	26,9770

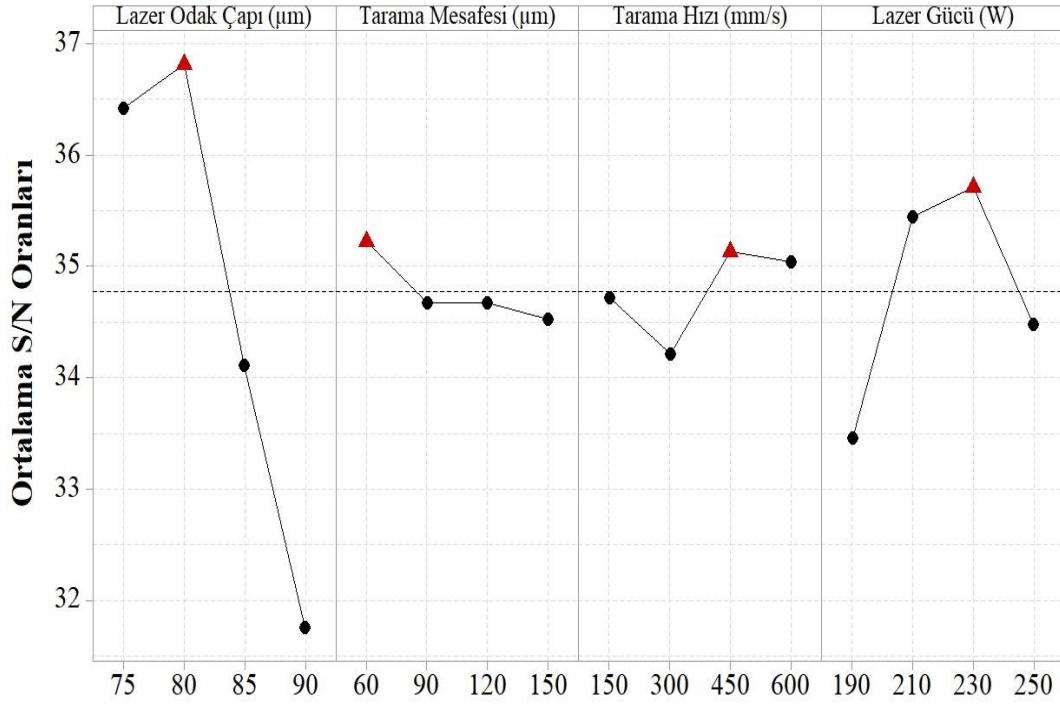
S/N ana etki grafiğinde kontrol faktörlerine ait en yüksek değer, ilgili faktörün optimum değerini vermektedir. Şekil 2’de çekme dayanımı, Şekil 3’te elastisite modül ve Şekil 4’te uzama değerlerine ait S/N ana etki grafikleri verilmiştir. Ayrıca, Tablo 5’ de bu ana etki grafiklerin sayısal değerlerini gösteren S/N yanıt tablosu gösterilmiştir.



Signal-to-noise: Larger is better

Şekil 2. Çekme Dayanımı için S/N oranları ortalama değerleri

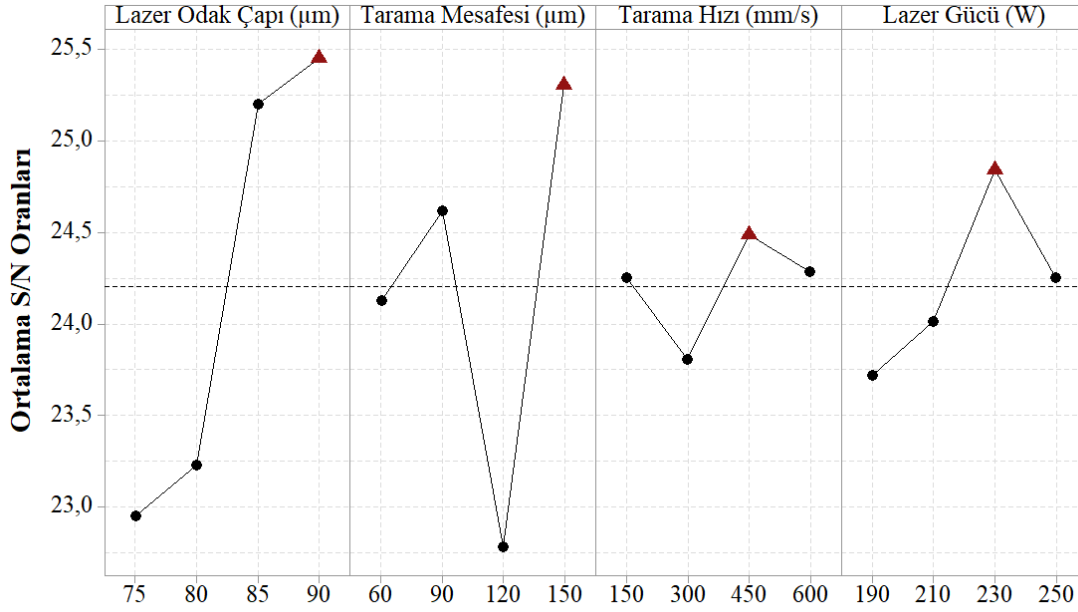
Şekil 2 verilen çekme dayanımı için S/N ana etki grafiği incelendiğinde 75 μm lazer odak çapı seviyesinde en yüksek dayanım elde edilmiştir. Lazer odak çapı 80 μm seviyesine arttırıldığında dayanımda azalma gözlemlenmiştir. Tarama mesafesinin artmasına bağlı olarak dayanım değerinde azalma meydana gelmiştir. Tarama mesafesi için en düşük dayanım değeri 150 μm seviyesinde gözlemlenirken en yüksek dayanım 60 μm seviyesinde elde edilmiştir. Tarama hızı için inceleme yapıldığında en düşük dayanımın 600 mm/s seviyesinde elde edildiği gözlemlenmiştir. Tarama hızının 150 mm/s seviyesinden 300 mm/s seviyesine çıkarılması dayanımın artmasına neden olduğu ve en yüksek dayanımın 300 mm/s seviyesinde elde edildiği gözlemlenmiştir. Lazer odak çapı için seviyelerdeki artış ile dayanımın arttığı ancak 230 W lazer gücünden daha yüksek bir seviyede lazer gücü kullanımıyla dayanımın azaldığı görülmektedir. Lazer gücü için en yüksek dayanım değerine 230 W lazer gücü kullanılarak elde edilirken en düşük dayanım değeri 250 W lazer gücü ile elde edildiği gözlemlenmiştir. Bu durumda 75 μm lazer odak çapı, 60 μm tarama mesafesi, 300 mm/s tarama hızı ve 230 W lazer gücü kullanılarak optimum çekme dayanım değerleri elde edilmiştir.



Signal-to-noise: Larger is better

Şekil 3. Elastisite modül için S/N oranları ortalama değerleri

Seçici lazer ergitme sürecinde elde edilen sonuçların analizinde elastisite modül için süreci etkileyen kontrol faktörlerinin etkileri incelenmiştir. Şekil 3'te elastisite modül değeri için S/N ana etki grafiği verilmiştir, grafik incelendiğinde; lazer odak çapı için en düşük elastisite modül değeri 90 µm seviyesinde elde edilmiştir. Seviye değerleri 90 µm 80 µm doğru azaldıkça elastisite modül değeri doğrusal olarak arttığı gözlemlenmiştir. En yüksek elastisite modül değerine 80 µm seviyesinde ulaşılmıştır. Tarama mesafesi faktörü incelendiğinde 150 µm seviyesinde en düşük elastisite modül elde edilirken en yüksek değere 60 µm seviyesinde ulaşılmıştır. 150 µm seviyesinden 60 µm seviyesine doğru azalma gösterdikçe elastisite modül değerinde artış gözlemlenmiştir. Tarama hızı için inceleme yapıldığında en düşük değere 300 mm/s seviyesinde ulaşılırken en yüksek değere 450 mm/s seviyesinde ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Seviye değerindeki bu artış elastisite modül değerinde artışa sebep olmuştur. Daha yüksek tarama hızı kullanıldığında azalma gözlemlenmiştir. Lazer gücü için inceleme yapıldığında 190 W seviyesinde en düşük değer elde edilirken, lazer gücünün artmasıyla elastisite modül değerinin iyileştiği gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak en yüksek değere 230 W seviyesinde ulaşılmıştır. Bu durumda, 80 µm lazer odak çapı, 60 µm tarama mesafesi, 450 mm/sn tarama hızı ve 230 W lazer gücünün bir kombinasyonu kullanılarak optimum elastisite modülü elde edilmektedir.



Signal-to-noise: Larger is better

Şekil 4. % uzama miktarı için S/N oranları ortalama değerleri

Şekil 4'te verilen % uzama miktarı için S/N ana etki grafiği incelendiğinde lazer odak çapı için 75 µm seviyesinden 90 µm seviyesine çıkıldıkça % uzama miktarında iyileşmeler olduğu gözlemlenmiştir. En düşük % uzama miktarına 75 µm seviyesinde ulaşılırken en yüksek uzama miktarına 90 µm seviyesinde ulaşılmıştır. Tarama mesafesinde 60 µm'den 90 µm seviyesine çıkıldıkça % uzama miktarında artma gözlemlenirken seviye değerinin daha da artmasıyla uzama miktarında azalma meydana gelmiştir ve en düşük % uzama miktarı 120 µm seviyesinde elde edilmiştir. 120 µm'den 150 µm seviyesine çıkıldığında % uzama miktarında iyileşmeler gözlemlenerek 150 µm'de en yüksek seviye değerine ulaşılmıştır. Bu durumda lazer odak çapı için 90 µm, tarama mesafesi için 150 µm, tarama hızı için 450 mm/sn ve lazer gücü için 230 W seviye kombinasyonları kullanılarak optimum uzama değerine ulaşılmıştır. Deneyde kullanılan alaşım için gerçekleştirilen uzama miktarı malzemenin sünek bir yapıya sahip olduğunun göstergesi olarak düşünülmektedir.

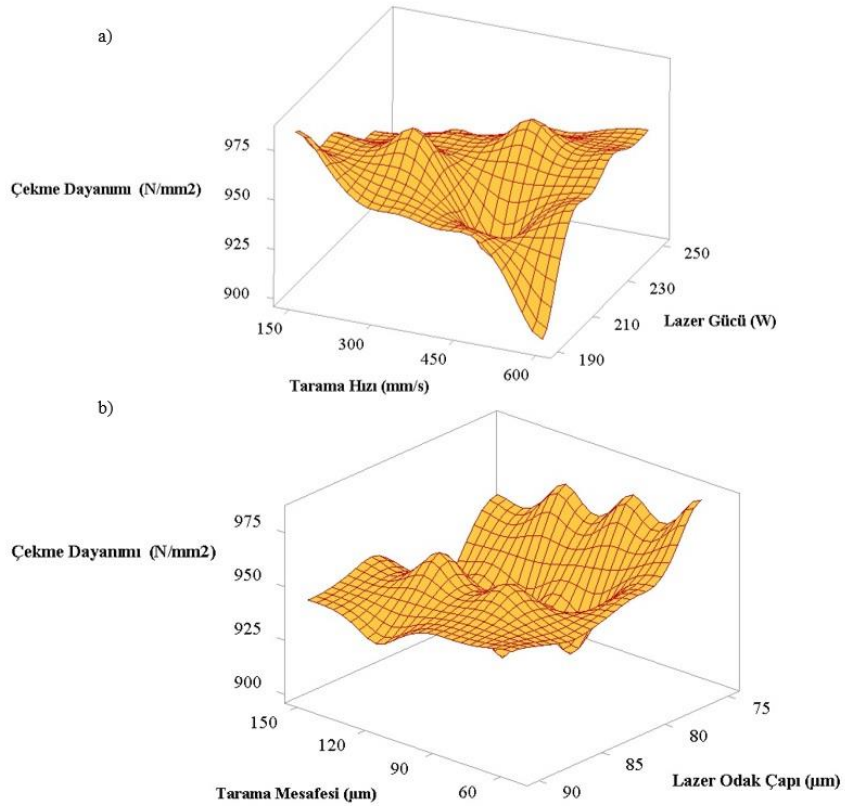
Tablo 5. Deney sonuçlarına ait S/N yanıt tabloları

Seviyeler	Kontrol Faktörleri			
	A	B	C	D
Çekme dayanımı				
1	59,73	59,62	59,56	59,51
2	59,28	59,54	59,58	59,56
3	59,59	59,47	59,50	59,61
4	59,50	59,47	59,47	59,43
Delta	0,45	0,16	0,11	0,18
Elastisite modülü				
1	36,42	35,22	34,72	33,46
2	36,81	34,67	34,21	35,44
3	34,11	34,67	35,13	35,71

Tablo 5 (devamı). Deney sonuçlarına ait S/N yanıt tabloları

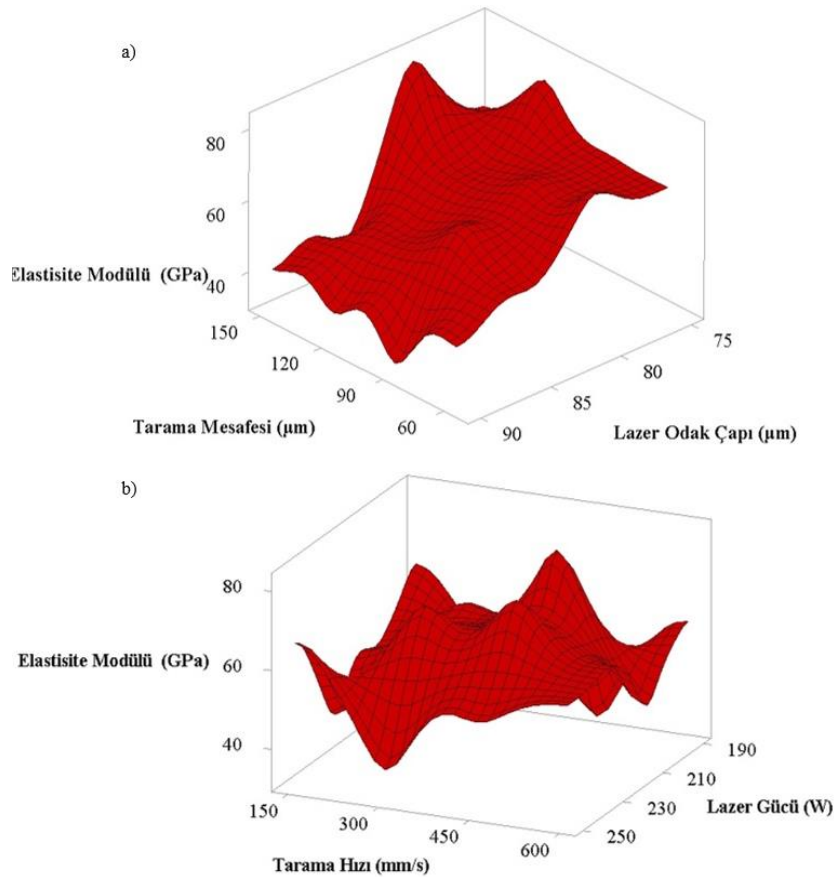
4	31,76	34,53	35,04	34,48
Delta	5,06	0,70	0,92	2,25
% Uzama miktarı				
1	22,95	24,13	24,25	23,72
2	23,23	24,61	23,80	24,01
3	25,20	22,78	24,49	24,84
4	25,45	25,30	24,28	24,25
Delta	2,50	2,52	0,68	1,13

Şekil 2, Şekil 3, Şekil 4 ve Tablo 5’ te verilen görsel ve sayısal ifadelerden de anlaşılacağı gibi her bir kontrol faktör oranının en yüksek olduğu seviye değerleri ilgili parametreye ait optimum değer olarak tanımlanmaktadır. Başka bir deyişle, çekme dayanımı için optimum kontrol parametreleri lazer odak çapı için seviye 1 (S/N oranı 59,73 dB), tarama mesafesi için seviye 1 (S/N oranı 59,62 dB), tarama hızı için seviye 2 (S/N oranı 59,58 dB) ve lazer gücü için seviye 3 (S/N oranı ise 59,61 dB) olduğu görülürken elastisite modül için optimum kontrol parametre seviyeleri lazer odak çapı için seviye 2 (S/N oranı 36,81 dB), tarama mesafesi için seviye 1 (S/N oranı 35,22 dB), tarama hızı için seviye 3 (S/N oranı 35,13 dB) ve lazer gücü için seviye 3 (S/N oranı ise 35,71 dB) olduğu görülmektedir. Optimum % uzama değerini veren parametre seviyeleri ise lazer odak çapı için seviye 4 (S/N oranı 25,45 dB), tarama mesafesi için seviye 4 (S/N oranı 25,30 dB), tarama hızı için seviye 3 (S/N oranı 24,49 dB) ve lazer gücü için seviye 3 (S/N oranı ise 24,84 dB) olduğu görülmektedir. Kontrol faktörleri için S/N ana etki grafiği S/N yanıt tablosunu destekler niteliktedir. Şekil 5’te çekme dayanımına ait üç boyutlu grafik gösterilmektedir.



Şekil 5. SLM parametrelerinin çekme dayanımı üzerindeki etkisi: (a) tarama hızı ve lazer gücü, (b) tarama mesafesi ve lazer odak çapı

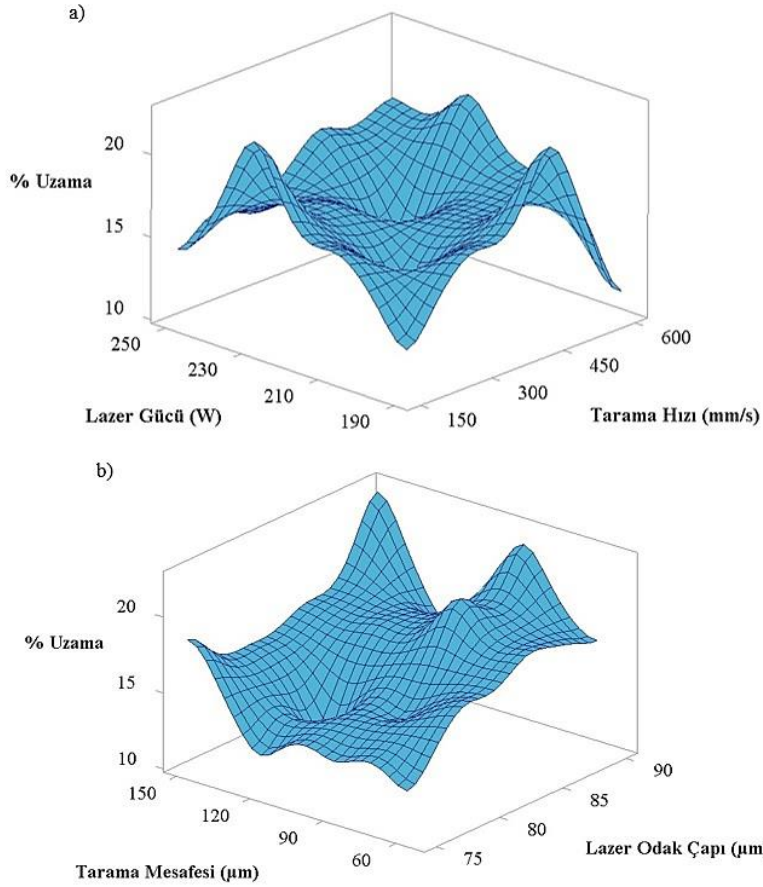
Şekil 5a incelendiğinde tarama hızı için en yüksek dayanım değerine 300 mm/sn (974,34 MPa) ile ulaşılırken düşük dayanıma 600 mm/sn (900,8 MPa) seviyesinde ulaşıldığı görülmektedir. Lazer gücünün çekme dayanımı üzerindeki etkisi incelendiğinde, lazer güç seviyesinin artırılması çekme dayanımının iyileşmesine yol açmaktadır. Lazer gücü için en yüksek dayanım değeri 230 W (968,57 MPa) ile elde edilirken, en düşük dayanım 190 W (900,8 MPa) ile elde edilmiştir. SLM işleminde ortalama bir tarama hızı ve lazer gücü kullanılarak kararlı bir yapı elde edildiğine ve bu durumun dayanımı önemli ölçüde etkilediği düşünülmektedir. Şekil 5b’de lazerin odak çapı arttıkça çekme dayanımının azaldığı görülmektedir. Lazer odak çapı, 75 µm seviyesinde en yüksek dayanım değerine ve 80 µm seviyesinde en düşük dayanım değerine sahiptir. Lazerin odak çapına göre çekme dayanımı incelendiğinde 75 µm seviyesindeki gerilme dayanım değeri 982,71 MPa iken 80 µm seviyesindeki gerilme dayanımı 913,48 MPa’dır. Bu nedenle, lazerin odak çapını 75 µm’den 80 µm’ye çıkarmak, gerilme dayanımında %7,6’lık bir azalma ile sonuçlanır. Tarama mesafesinin artmasıyla çekme mukavemetinin olumsuz etkilendiği ve mukavemetin düştüğü görülmektedir. Tarama mesafesinin artırılması aynı zamanda eriyik havuz boyutunu da artırır. Bu nedenle eksik ergitme işlemi içyapıda kusurların oluşmasına yol açmakta ve dayanımı azalttığı düşünülmektedir. En yüksek dayanım değerine tarama mesafesinde 60 µm (982,71 MPa) ile ulaşılmıştır. Artan tarama mesafesi ile çekme dayanımı azaldığı için en düşük mukavemet değeri 150 µm (915,62 MPa) seviyesinde elde edilmiştir. Tarama hızındaki artışın, toz malzemeyi ergitmek için yetersiz zamanın ve buna bağlı olarak oluşabilecek kusurların çekme dayanımını azalttığı düşünülmektedir. Şekil 6’da elastisite modülüne ait üç boyutlu grafik gösterilmektedir.



Şekil 6. SLM parametrelerinin elastisite modül üzerindeki etkisi: (a) tarama mesafesi ve lazer odak çapı, (b) tarama hızı ve lazer gücü

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, tipik Ti6Al4V alaşımının elastisite modülünden daha düşüktür. Bu durum, aşırı doygun V atomları nedeniyle kafes genişlemesine ve kafes üzerindeki büyük kusurlara (çıkıklar, ikizler ve istifleme hataları gibi) bağlanabilmektedir [4]. Şekil 6’da gösterilen üç boyutlu

grafik incelendiğinde kontrol faktörlerinin seviye değerlerine bağlı olarak elastisite modülünde değişimler olduğu gözlemlenmiştir. Artan lazer gücü seviyesi ile elastisite modülünün arttığı görülmektedir. Özellikler üzerinde aynı etki, tarama mesafesi ve/veya lazer odak çapı azaltılarak da elde edilebilmektedir. Şekil 6a incelendiğinde lazer odak çapının seviye değerlerinin artması elastisite modülünde büyük ölçüde azalmaya neden olduğu görülmektedir. Bu durum, mikroyapısal homojensizliğin elastisite modülü değerlerinde değişkenliğe neden olduğu düşünülmektedir. Şekil 6b’de ise tarama mesafesi seviye değerleri arttıkça elastik modülün olumsuz etkilendiği görülmektedir. Lazer odak çapının ve tarama mesafesinin seviye değerlerinin artması, eriyik havuzunun boyutunun artmasına neden olmaktadır. Bu durumun eriyik havuzunun stabil bir yapıya ulaşmamasına ve dolayısıyla elastik modül değerinin düşmesine neden olduğu düşünülmektedir. Lazer odak çapı için en yüksek değer 80 μm ile 81,7 GPa, en düşük değer ise 90 μm ile 32,2 GPa elde edilmiştir. Tarama mesafesi için elastisite modülüne bakılacak olursa, en yüksek değer 60 μm ile 71,6 GPa, en düşük değer ise 150 μm ile 40,8 GPa ulaşmıştır. Tarama hızı göz önüne alındığında, en düşük sonuç 300 mm/sn’de 37,8 GPa, en yüksek değer ise 450 mm/sn’de 81,7 GPa olduğu görülmektedir. Tarama hızı arttıkça elastisite modülü değeri %53,73 oranında iyileşme göstermiştir. 300 mm/sn tarama hızı ve tarama mesafesinin üst düzey kombinasyonları da elastik modülün azaltılmasında aktif rol oynamıştır. Lazer gücü açısından en düşük elastisite modülü değeri 190 W (32,2 GPa) lazer gücü ile elde edilirken, en yüksek elastisite modülü değeri 230 W (71,6 GPa) lazer gücü ile elde edilmiştir. Bu çalışma sonucunda, veriler incelendiğinde, kontrol faktörleri için farklı seviye değerleri kullanılarak elde edilen elastisite modülündeki farklılıklar, farklı seviye değerlerinden kaynaklanan mikroyapıda oluşan kusurlar, toz malzemeyi ergitecek enerji yoğunluğu, numune içerisindeki gözeneklilik değeri ve üretim sırasındaki bağımsız değişkenliğin değişkenliğe neden olduğu düşünülmektedir. Şekil 7’de % uzama değerine ait üç boyutlu grafik gösterilmektedir.



Şekil 7. SLM parametrelerinin % uzama miktarı üzerindeki etkisi: (a) tarama hızı ve lazer gücü, (b) tarama mesafesi ve lazer odak çapı

Şekil 7a incelendiğinde artan lazer gücü ve tarama hızı uzama açısından olumlu sonuçlar göstermiştir. Lazer gücü için en düşük değer 190 W (%11,412) seviyesiyle elde edilirken, en yüksek değer 230 W (%22,328) seviyesinde elde edilerek %48,9 oranında iyileşme gözlemlenmiştir. Tarama hızına bakıldığında en düşük değer 300 mm/sn'de %13,358 iken en yüksek değer 450 mm/sn'de %21,288 iken uzama miktarında ise %38,8'lik bir iyileşme görülmektedir. Şekil 7b'de ise lazer odak çapı ve tarama mesafesinin uzama miktarına etkisi görülmektedir. Lazerin odak çapı için en düşük uzama miktarı %12,274 değeri ile 75 µm'de elde edilirken, en yüksek uzama miktarı 90 µm seviyesinde %21,828'dir. Tarama mesafesi açısından en düşük değer 120 µm seviyesinde (%11,412) elde edilirken, en yüksek uzama miktarı 150 µm seviyesinde (%22,328) elde edilmiştir. Tarama mesafesindeki bu artış, uzama miktarında %48,9'luk bir iyileşme ile sonuçlanmıştır.

B. VARYANS ANALİZİ (ANOVA)

Deney tasarımı esnasında kullanılan kontrol faktörlerinin etkileşimlerini, performans özellikleri üzerindeki etkilerini ve farklı parametre seviyelerinde performans özelliklerindeki değişiklikleri belirlemek için varyans analizi kullanılmıştır [19]. Tablo 6'da çekme dayanımı, elastisite modülü ve uzama miktarına ait ANOVA sonuçları verilmiştir. Varyans analizleri %95 güven aralığı ile yapılmıştır. Burada SD değeri serbestlik derecesini, KT değeri karelerin toplamını, KO değeri karelerin ortalamasını ve PCR ise kontrol faktörlerinin etki oranlarını temsil etmektedir.

Tablo 6. ANOVA tablosu

Faktörler	SD	KT	KO	F	P	PCR
Çekme Dayanımı						
Lazer Odak Çapı (μm)	3	5131,3	1710,4	14,71	0,027	69,20%
Tarama Mesafesi (μm)	3	737,5	245,8	2,11	0,277	9,95%
Tarama Hızı (mm/sn)	3	349,0	116,3	1,00	0,500	4,71%
Lazer Gücü (W)	3	848,5	282,8	2,43	0,242	11,44%
Hata	3	348,8	116,3	-	-	4,70%
Toplam	15	7415,1	-	-	-	100,00%
Elastisite Modülü						
Lazer Odak Çapı (μm)	3	2423,41	807,804	16,84	0,022	76,26%
Tarama Mesafesi (μm)	3	20,56	6,852	0,14	0,928	0,65%
Tarama Hızı (mm/sn)	3	114,45	38,149	0,80	0,572	3,60%
Lazer Gücü (W)	3	475,39	158,462	3,30	0,176	14,96%
Hata	3	143,92	47,972	-	-	4,53%
Toplam	15	3177,72	-	-	-	100,00%
Uzama Miktarı						
Lazer Odak Çapı (μm)	3	71,017	23,672	2,80	0,210	44,79%
Tarama Mesafesi (μm)	3	46,054	15,351	1,81	0,318	29,05%
Tarama Hızı (mm/sn)	3	5,331	1,777	0,21	0,884	3,36%
Lazer Gücü (W)	3	10,762	3,587	0,42	0,750	6,79%
Hata	3	25,382	8,461	-	-	16,01%
Toplam	15	158,547	-	-	-	100,00%

ANOVA sonuçlarına göre çekme dayanımı üzerinde lazer odak çapı %69,20, lazer gücü %11,44, tarama mesafesi %9,95 ve tarama hızı %4,71 etki oranlarına sahiptir. En etkili faktörün %69,20 oranıyla lazer odak çapı olduğu görülmektedir. Analiz hesaplanmasında oluşan hata oranı %4,70 çıkmıştır. Elastisite modülü için etki oranları sırasıyla lazer odak çapı %76,26, lazer gücü %14,96, tarama hızı %3,60 ve tarama mesafesi %0,65 olduğu görülmektedir. Çalışmada hata oranı %4,53 çıkmıştır. En etkili faktörün %76,26 oranıyla lazer odak çapı olduğu görülmektedir. Uzama miktarında ise en etkili kontrol faktörünün %44,79 etki oranıyla lazer odak çapı olduğu anlaşılmaktadır. Lazer odak çapını, sırasıyla tarama mesafesi %29,05, lazer gücü %6,79 ve tarama hızı %3,36 etki oranıyla takip ettiği görülmektedir. Yapılan analiz sonucunda hata oranı %16,01 seviyesinde çıkmıştır. Shi ve diğ. [18] çalışmalarında Ti6Al4V alaşımli numuneleri 400 W lazer gücü, 40 ile 80 mm/s aralığında tarama hızı ve 200 µm katman kalınlığı kullanarak üretmişlerdir. Yaptıkları çalışmada nispeten kaba yüzeye sahip numuneler elde edilirken numunelerin gerilme mukavemeti ve uzama yüzdeleri sırasıyla 1050 MPa ve %7,03 seviyesinde elde etmişlerdir. Araştırmacılar sonuçların analizinde bu durumun mikroyapı ve metalürjik yapışma nedeniyle kaynaklandığını ileri sürmüşlerdir. Kong ve diğ. [11] yaptıkları çalışmada Ti6Al4V alaşımı için yoğunluk iyileştirme üzerine çalışmalar yapmışlardır. Araştırmacılar 177 W lazer gücü, 50-70 µm lazer odak çapı, 100-280 µm tarama mesafesi ve 50 µm katman kalınlığı değerlerini girdi parametresi olarak kullanmışlardır. Deney sonuçlarını analiz eden araştırmacılar, gözenekliliğin alana göre %0,1'den küçük olduğunu gösterirken alaşımın mikroyapısı martensitik α' fazı sergilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca deney sonuçlarına göre çekme mukavemeti 920-960 MPa ve uzama miktarını %3-5 olduğu gözlemlenmiştir. Araştırmacılar, çekme numunelerinin kırılma yüzeylerinin, sünek ve gevrek kırılmanın bir karışımı olduğunu ileri sürmüşlerdir. Chang ve diğ. [16] Ti6Al4V alaşımını SLM yöntemiyle üreterek numunenin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Girdi parametresi olarak 350 W lazer gücü, 1250 mm/s tarama hızı, 0,1 mm tarama mesafesi ve 0,06 mm katman kalınlığı kullanmışlardır. Deney sonuçlarını analiz eden araştırmacılar, numunelerde belirli bir dikey yorulma dağılımı olmasına rağmen, çekme dayanımı 953 MPa elde edilirken uzama miktarı %17,7 olarak elde edilmiştir. Araştırmacılar numunelerin uygun bir çekme dayanımı ve mükemmel süneklilik sergilediğini ileri sürmüşlerdir. Sonuç olarak yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar literatürle paralellik gösterdiği anlaşılmaktadır.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Ti6Al4V alaşımı SLM yöntemiyle farklı üretim parametreleri ve bu parametrelere ait farklı seviye değerleri kullanılarak üretilmiştir. Üretim sonucunda belirlenen parametrelerin ve seviyelerin çekme dayanımı, elastisite modülü ve uzama miktarı üzerindeki etkiler incelenmiştir. Çalışmada bahsedilen birçok araştırmacı SLM yöntemi kullanılarak Ti6Al4V alaşımın mekanik özelliklerini iyileştirmek için çalışmalar yapmışlardır. Yapılan çalışmalar katman kalınlığı, lazer gücü, tarama hızı ve tarama mesafesi dahil olmak üzere üretim parametrelerinin etkilerini dikkate alan lazer enerji yoğunluğu, SLM ile üretilen malzemelerin işlenebilirliğini, mekanik özelliklerini ve mikro yapısının belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır [9]. Wang ve diğ. [17], yüksek kalitede numune elde etmek ve mikroyapıdaki değişimi analiz etmek için SLM yöntemiyle işlenmiş titanyum alaşımının optimum yüzey pürüzlülük ve yoğunluk değerlerini saptamak için SLM üretim parametrelerinin optimizasyonu araştırmışlardır. Ayrıca optimum SLM parametre değerlerinde malzemelerin çekme özelliklerini de incelenmişlerdir. Araştırmacılar yaptıkları çalışmada girdi parametresi olarak 30 µm katman kalınlığı, 100 µm tarama mesafesi, 50-250W aralığında lazer gücü, 250-1750 mm/s aralığında tarama hızı ve 60° tarama açısı kullanmışlardır. Deney sonuçlarını analiz eden araştırmacılar, tarama hızının 250 mm/s olduğu numunenin mikro yapısı bazı kaba ve eş eksenli tanelerden oluştuğunu ve tarama hızının hızla 550 mm/s'ye yükselmesiyle, mikro yapıdaki eğilimleri açıkça gözlemlenmiştir. Tarama hızının mikroyapıda önemli bir etken olduğunu belirtmişlerdir. Üretim parametrelerinin mekanik özellikler üzerindeki etkisini araştıran araştırmacılar hem tarama hızının hem de lazer gücünün çekme mukavemeti üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığını belirtmişlerdir. Çekme dayanımları

1350-1400 MPa aralığında değiştiğini gözlemlenmişlerdir. Öte yandan uzama miktarı için tarama hızının ve lazer gücünün etkileri incelendiğinde 200-250 W lazer gücü aralığında uzama miktarı yaklaşık olarak %7,8 elde edilirken 275 W lazer gücü seviyesinde uzama miktarında azalma (%5) gözlemlenmiştir. Analiz tarama hızı için yapıldığında 700 mm/s tarama hızında uzama miktarı %3,8 elde edilirken tarama hızının artmasıyla uzama miktarının (%7,8) önemli ölçüde arttığını gözlemlenmişlerdir. Numunelerin gözeneklilik oranı %1'den düşük olduğu göz önünde bulundurularak nano- β partikülleri ve α (α') martensitik yapıları içeren mikroyapının değişiminde etkisinin önemli olduğunu ve β -fazının oluşması titanyum alaşımının sünekliğini azalttığını ve α kolonilerinin kayma uzunluğu titanyum alaşımının uzama miktarında önemli bir rol oynadığını ileri sürmüşlerdir.

Taguchi yöntemi ile yapılan optimizasyonun optimum üretim koşullarını belirlemede başarılı olduğu görülmüştür. Yapılan deneyler ve analizler sonucunda aşağdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Mekanik özellikleri belirlemek için yapılan deneylere ait sonuçların analizinde veriler S/N oranına dönüştürülerek değerlendirmeler yapılmıştır.
- Deney sonuçları analiz edildiğinde, 75 μ m lazer odak çapı, 230 W lazer gücü, 60 μ m tarama mesafesi ve 300 mm/sn hız tarama hızı kombinasyonları kullanılarak çekme dayanımı için optimum sonuç elde edilmiştir.
- Elastisite modülü için optimum sonuç, 60 μ m tarama mesafesi, 450 mm/sn tarama hızı, 80 μ m lazer odak çapı ve 250 W lazer gücü kombinasyonları kullanılarak elde edilmiştir.
- % uzama için en uygun sonuç, lazerin odak çapı için 90 μ m, tarama mesafesi için 150 μ m, tarama hızı için 450 mm/sn ve lazerin gücü için 230 W seviyelerinin bir kombinasyonu kullanılarak elde edilmiştir.
- Çekme dayanımı üzerinde en etkili parametre lazer odak çapı (%69.20), en etkisiz parametre ise tarama hızı (%4.71) olurken elastisite modülü üzerinde en etkili parametre lazer odak çapı (%76.26), en etkisiz parametre ise tarama mesafesi (%0.65) ve uzama miktarı için en etkili parametre lazer odak çapı (%44.79), en etkisiz parametre ise tarama hızı (%3.36) olmuştur.
- Tarama mesafesinde artışa bağlı olarak çekme dayanımında ve elastisite modül değerinde azalma gözlemlenmiştir.
- Lazer odak çapındaki artış ile % uzama miktarı doğru orantılı iyileşme göstermiştir.
- Numunedeki elastik modül değeri ve uzama miktarı için tarama hızının farklı seviyeleri incelendiğinde ilk olarak değerlerde düşüş gözlemlenmiş ancak tarama hızının artmasıyla her iki parametre için de en iyi sonucun elde edildiği görülmüştür.
- Gelecek çalışmalar için; farklı kontrol parametre ve seviye değerleri kullanılarak mikrosertlik ve yüzey topoğrafyası üzerindeki etkileri incelenebilir.
- Çalışmada sabit parametre değerleri değiştirilerek mekanik özelliklerde meydana gelen değişimler incelenebilir. Bunun yanı sıra değişken parametre değerleri sabit tutularak, sabit parametre değerleri ise değiştirilerek numunelerin mekanik özellikleri ve yüzey pürüzlülüğu incelenebilir.

V. KAYNAKLAR

[1] Ö. Poyraz, "Metallerin lazer katmanlı imalatında kullanılan proses parametrelerinin etkisinin, modelleme ve simülasyon yöntemleri kullanılarak incelenmesi", Doktora tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, 2018.

[2] O. Özsolak, "Eklemeli İmalat Yöntemleri Ve Kullanılan Malzemeler", *Int. J. Innov. Eng. Appl.*, c. 3, s. 1, ss. 9-14, 2019.

- [3] Ö. Poyraz and M. C. Kuşhan, "Investigation of the effect of different process parameters for laser additive manufacturing of metals," *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Derg.*, vol. 33, no. 2, pp. 729–742, 2018..
- [4] I. Yadroitsava, S. Grewar, D. Hattingh, and I. Yadroitsev, "Residual stress in SLM Ti6Al4V alloy specimens", *Mater. Sci. Forum*, vol. 828–829, pp. 305–310, 2015.
- [5] K. S. Al-Rubaie, S. Melotti, A. Rabelo, J. M. Paiva, M. A. Elbestawi, and S. C. Veldhuis, "Machinability of SLM-produced Ti6Al4V titanium alloy parts", *J. Manuf. Process.*, vol. 57, pp. 768–786, Sep. 2020.
- [6] S. Leuders, M. Thöne, A. Riemer, T. Niendorf, T. Tröster, H. A. Richard and H. J. Maier,, "On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance", *Int. J. Fatigue*, vol. 48, pp. 300–307, Mar. 2013.
- [7] A. Popovich, V. Sufiarov, E. Borisov, and I. Polozov, "Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Manufactured by SLM", *Key Eng. Mater.*, vol. 651–653, pp. 677–682, 2015.
- [8] A. V. S. R. Prasad, K. Ramji, and G. L. Datta, "An experimental study of wire EDM on Ti-6Al-4V Alloy", *Procedia Mater. Sci.*, vol. 5, pp. 2567–2576, 2014.
- [9] J. Han, J. Yang, H. Yu, J. Yin, M. Gao, Z. Wang and X. Zeng, "Microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V dependence on laser energy density", *Rapid Prototyp. J.*, vol. 23, no. 2, pp. 217–226, 2017.
- [10] B. Song, S. Dong, B. Zhang, H. Liao, and C. Coddet, "Effects of processing parameters on microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V", *Mater. Des.*, vol. 35, pp. 120–125, 2012.
- [11] C.-J. Kong, C. J. Tuck, I. A. Ashcroft, R. D. Wildman, and R. Hague, "High density Ti6Al4V via slim processing: microstructure and mechanical properties", *International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2011, pp. 475-483.
- [12] M. Roudnicka, J. Bigas, and D. Vojtech, "Tuning porosity and mechanical properties of Ti6Al4V alloy additively manufactured by SLM", *Key Eng. Mater.*, vol. 865, pp. 1–5, 2020.
- [13] M. Simonelli, Y. Y. Tse, and C. Tuck, "Effect of the build orientation on the mechanical properties and fracture modes of SLM Ti-6Al-4V", *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 616, pp. 1–11, 2014.
- [14] B. Song, S. Dong, H. Liao, and C. Coddet, "Process parameter selection for selective laser melting of Ti6Al4V based on temperature distribution simulation and experimental sintering", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 61, no. 9–12, pp. 967–974, 2012.
- [15] W. Sun, Y. Ma, W. Huang, W. Zhang, and X. Qian, "Effects of build direction on tensile and fatigue performance of selective laser melting Ti6Al4V titanium alloy", *Int. J. Fatigue*, vol. 130, no. pp. 105260, 2020.
- [16] K. Chang *et al.*, "Microstructural feature and mechanical property in different building directions of additive manufactured Ti6Al4V alloy", *Mater. Lett.*, vol. 267, pp. 127516, 2020.
- [17] Z. Wang, Z. Xiao, Y. Tse, C. Huang, and W. Zhang, "Optimization of processing parameters and establishment of a relationship between microstructure and mechanical properties of SLM titanium alloy", *Opt. Laser Technol.*, vol. 112, pp. 159–167, 2019.

[18] X. Shi *et al.*, “Performance of high layer thickness in selective laser melting of Ti6Al4V”, *Materials (Basel)*, vol. 9, no. 12, p. 975, 2016.

[19] Ç. V. Yıldırım, “Grafit parçacık takviyeli nano akışkan kullanılarak AISI 316’nın frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığının optimizasyonu”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknol. Derg.*, c. 7, s. 1, ss. 326–341, 2019.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Derleme Makale

Katı Atık Depolama Sahası Sızıntı Sularında Mikroplastik Kirliliği

 Neriman BAYLAN^a,  Pelin KOYUNCUOĞLU^a,  Gülbin ERDEN^{a,*}

^a Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: gerden@pau.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1107656

ÖZ

Plastiklerin küresel anlamda yüksek üretim ve tüketimi, önemli miktarda plastik atık oluşumuna sebep olmaktadır. Plastik atıkların katı atık düzenli depolama sahalarında bertaraf edilmesi ile, plastik atıklar zamanla bozunarak mikroplastik formuna dönüşmektedir. Depolama sahalarında oluşan sızıntı suları vasıtasıyla mikroplastikler, alıcı ortamlara taşınmakta ve potansiyel bir kirlilik kaynağı haline gelmektedir. Bu sebeple, birçok alıcı su ortamında ve tarım arazilerinde mikroplastik kirliliği meydana gelmektedir. Literatürde, sızıntı suyunda mikroplastik kirliliğinin tespiti için az sayıda çalışma bulunmaktadır. Sızıntı suyunda bulunan mikroplastik kirliliğinin çevresel etkilerinin ortaya konabilmesi için, bu alanda yapılan çalışma sayısının artması gerekmektedir. Bu çalışmada, literatür kapsamında incelenen çalışmalar ile sızıntı suyundaki mikroplastik kirliliği değerlendirilmiştir. İncelenen çalışmalarda, sızıntı sularında mikroplastiklerin örneklenmesi, izolasyonu ve analiz yöntemleri detaylı bir şekilde irdelenmiştir. Sızıntı suyu kaynaklı mikroplastik konsantrasyonları, şekilleri ve başlıca polimer türleri incelenmiş olup mikroplastik kirliliğinin ekolojik riskleri özetlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mikroplastik, Katı atık, Düzenli depolama sahası, Sızıntı suyu.

Microplastic Pollution in Landfill Leachates

ABSTRACT

The global high production and consumption of plastics cause a significant amount of plastic waste formation. With the disposal of plastic wastes in landfills, plastic wastes decompose over time and turn into microplastics. Microplastics are transported to receiving environments through leachate generated in landfills and become a potential source of microplastic pollution. For this reason, microplastic pollution occurs in many water bodies and agricultural lands. In the literature, there are few studies on the detection of microplastic pollution in leachate. In order to reveal the environmental effects of microplastic pollution in leachate, the number of studies in this area should be increased. In this study, microplastic pollution in leachate was evaluated with the studies examined in the literature. In the studies examined, sampling, isolation, and analysis methods of microplastics in leachate were examined in detail. Microplastics concentrations, shapes, and major polymer types from leachate were examined and the ecological risks of microplastic pollution were summarized.

Keywords: Microplastic, Solid waste, Sanitary landfill, leachate.

I. GİRİŞ

Artan nüfus miktarı ve atık yönetimindeki uygunsuzluklar nedeniyle, yıllar içinde katı atık miktarı artış göstermektedir [1], [2]. Avrupa Birliği ülkelerinde yıllık ölçekte yaklaşık olarak 250×10^6 tondan fazla kentsel katı atık üretildiği bilinmektedir [3]. Oluşan katı atıkların bertarafı için düzenli depolama yöntemi sıklıkla tercih edilmektedir. Düzenli depolama, kentsel katı atıkları düşük maliyetli ve basit bir şekilde bertaraf etmek amacıyla kullanılan bir yöntemdir [4]. Düzenli depolama sahalarında gıda plastik, kağıt ve ahşap gibi çeşitli atıkların bertarafı gerçekleştirilmektedir. Depolanan plastik atıklar, kentsel katı atıkların yaklaşık olarak %20'sini oluşturmaktadır [5], [6]. Küresel çapta üretilen plastiğin %21-42'sinin düzenli depolama alanlarında bertaraf edilmektedir [7]. Örneğin, Çin'de kentsel katı atıkların %52'sinin düzenli depolama alanlarında bertaraf edildiği ve bu atıkların %9,9- 19,1'lik bölümünün plastik atıklardan oluştuğu belirlenmiştir [8]. Düzenli depolama sahalarında depolanan plastikler, çeşitli biyokimyasal reaksiyonlar ve çevresel etkenlerle birlikte uzun depolama süreleri sonucunda mikroplastiklere dönüşmektedir [9], [10]. Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi (NOAA) tarafından mikroplastik, 5 mm'den küçük boyutta bulunan plastik parçacıklar olarak tanımlanmaktadır [11]. Mikroplastikler, kaynaklarına göre birincil ve ikincil mikroplastikler olarak sınıflandırılmaktadır. Birincil mikroplastikler, ticari amaçla pelet formunda üretilen mikroplastiklerdir [12]. İkincil mikroplastikler ise makro boyuttaki plastiklerin UV radyasyonu, hava koşulları, rüzgar ve diğer çevresel etkenlere maruz kalarak fiziksel, kimyasal ve biyolojik reaksiyonlar sonucunda oluşturduğu küçük plastik parçacıklardır [13], [14], [15]. Düzenli depolama sahalarında bulunan mikroplastiklerin farklı şekillerde yer altı suyu ve saha yakınlarında bulunan alıcı su ortamlarına taşınımı söz konusu olabilmektedir. Bu taşınım yüzey akışı, yağmur suyu, rüzgar, mikroorganizmalar, ham sızıntı suyu ve arıtılmış sızıntı suyu aracılığıyla gerçekleşebilmektedir. Sızıntı suyu, depolama sahasında bulunan atıkların zamanla bozunması ya da yağmur suyu akışı sonucunda oluşmaktadır [16], [17]. Sızıntı suyunun içeriğinde ağır metaller, patojenik mikroorganizmalar ve çeşitli organik kirleticiler bulunmaktadır [18], [19], [20]. Mikroplastikler, hidrofobik yapıları nedeniyle vektör davranışı sergilemekte ve sızıntı suyunun deşarjı ile kirleticileri alıcı ortamlara taşıyabilmektedir [21], [22], [23]. Sızıntı suyunun depolama sahasında birikimi ve topraktan süzülmesi ile mikroplastikler yer altı suyuna ulaşabilmektedir [24], [25], [26]. Depolama sahası çevresinde bulunan alanlar sızıntı suyunun yer altı suyuna ulaşması ile birlikte kontamine olabilmektedir [27]. Yer altı suyunda yapılan çalışmalarda, Amerika'da 15,2 adet/L, Hindistan'da ise 19,9 adet/L mikroplastik tespit edilmiştir. Ayrıca, sızıntı suyunun arıtılması sonucunda oluşan çamurun kompost haline getirilmesi ile mikroplastığın toprak ortamına girdiği belirlenmiştir [28]. Mikroplastiklerin burada bulunan bitki ve organizmaları olumsuz etkilediği bildirilmiştir [29], [30], [31].

Bu çalışmanın temel amacı, sızıntı sularında tespit edilen mikroplastiklerin konsantrasyonları, morfolojik ve kimyasal özelliklerinin incelenmesi, sızıntı suyunda tespit edilen mikroplastiklerin tercih edilen örnekleme, izolasyon ve analiz yöntemleri aracılığıyla elde edilen fiziksel ve kimyasal özelliklerine ait verilerin kıyaslanmasıdır. Buna ek olarak, sızıntı suyunda tespit edilen mikroplastiklerin konsantrasyonunu etkileyen faktörler incelenerek değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler ışığında, sızıntı sularının kompozisyonu, depolanan atıkların türü ve depolama yaşı gibi özelliklerin mikroplastikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Son olarak, gelecekte ele alınması gereken mevcut boşluklar belirtilmiştir. Çalışmanın bu yönüyle literatüre ışık tutacağı düşünülmektedir.

II. MATERYAL VE METOT

Üretilen plastiklerin, küresel anlamda %21-42 oranında düzenli depolama sahalarında bertaraf edilmesi [7], depolama sahalarında oluşan sızıntı suyu aracılığıyla birçok alıcı su ortamını [21], [26], [27] ve toprağı [32] kirletme potansiyeli dolayısıyla sızıntı suyunun mikroplastik kirliliği açısından önemli bir kaynak olduğu düşünülmektedir. Bu sebeple, Science Direct ve Web of Science arama platformlarının veri tabanında "microplastics" ve "landfill leachate" kelimeleri kullanılarak literatür

taraması yapılmıştır. 2018 yılında gerçekleştirilen ilk yayın ile birlikte [33], çalışmaların 2019 yılında artış gösterdiği belirlenmiştir [9], [34], [35]. 2018 yılından bu yana toplamda 11 adet çalışma yapıldığı tespit edilmiştir. Çalışmaların 10 tanesi bu çalışma kapsamına uygun bulunarak incelenmiştir. İncelenen çalışmalar kapsamında, Tablo 1’de mikroplastiklerin tespiti ve analizinin gerçekleştirildiği sızıntı suyu numune alma noktaları, sızıntı suyunun bulunduğu katı atık düzenli depolama sahaları, depolama sahasında bulunan atık türü ve atık miktarı hakkında elde edilen veriler özetlenmiştir. Bu verilerin benzer olduğu ve farklılık gösterdiği durumlar kıyaslanarak sızıntı suyunda bulunan mikroplastiklerin miktarı ile morfolojik ve kimyasal özellikleri hakkında değerlendirmeler yapılmıştır. Numune almak amacıyla birbirinden farklı noktalar seçildiği ve çoğunlukla sızıntı suyu havuzu ve pompa istasyonu noktalarından numune alındığı belirlenmiştir (R₉, R₁, R₃, R₆, R₇) [28], [33], [35], [37]. Sızıntı suyu numunelerinin alındığı depolama sahalarının ise genellikle kentsel ve tehlikesiz türdeki atık kompozisyonuna sahip olduğu tespit edilmiştir. Çalışmalarda, sahaya gelen en düşük günlük atık miktarının 90 ton/gün (R₆), en yüksek günlük atık miktarının ise 13,000 ton/gün (R₉) olduğu bildirilmiştir [28], [36]. Ayrıca, literatür taraması kapsamında birçok ülkede sızıntı suyunda bulunan mikroplastik kirliliği üzerine çalışmalar yapıldığı fakat çalışmaların yoğun şekilde gerçekleştirildiği ülkenin Çin (R₄, R₅, R₉, R₂, R₈, R₁₀) olduğu belirlenmiştir [9], [15], [32], [34], [38], [39].

Tablo 1. İncelenen çalışmalardaki katı atık düzenli depolama sahaları, sızıntı suyu numune alma noktaları, depolama sahasında bulunan atık türü ve atık miktarı.

Referans - Ülke	Katı Atık Düzenli Depolama Sahası	Numune Alma Noktası	Atık Türü	Atık Miktarı
R ₁ - Avusturya [33]	Álfsnes	Sızıntı suyu havuzu	Kentsel, Endüstriyel- Tehlikesiz	-
	Hollola	Sızıntı suyu havuzu	Kentsel, Endüstriyel- Tehlikesiz	
	Fiflholt (yeni)	Sondaj kuyusu	Kentsel, Endüstriyel- Tehlikesiz	
	Fiflholt (eski)	Deşarj noktası	Kentsel, Endüstriyel- Tehlikesiz	
	Anonim-2	Pompa İstasyonu	Kentsel, Endüstriyel- Tehlikesiz	
	Korvenmäki	Pompa İstasyonu	Kentsel, Endüstriyel- Tehlikesiz	
	Böler	Pompa İstasyonu	Kentsel, Endüstriyel- Tehlikesiz	
	Anonim-1	Pompa İstasyonu	Endüstriyel-Tehlikeli	
	Topinoja	Pompa İstasyonu	Kentsel-Tehlikesiz	
	Kujala	Çökeltim Havuzu	Kentsel-Tehlikesiz	
Gjerdrum	Kuyu	Karışık-Tehlikesiz		
R ₂ -Çin [34]	Shanghai-1	Toplama kuyusu, dengeleme havuzu	Kentsel-Tehlikesiz	-
	Wuxi	Toplama kuyusu, dengeleme havuzu		
	Shanghai-2	Dengeleme havuzu		
	Shanghai-3	Dengeleme havuzu		
	Suzhou	Dengeleme havuzu		
	Changzhou	Toplama kuyusu		

Tablo 1(Devam). İncelenen çalışmalardaki katı atık düzenli depolama sahaları, sızıntı suyu numune alma noktaları, depolama sahasında bulunan atık türü ve atık miktarı.

Referans - Ülke	Katı Atık Düzenli Depolama Sahası	Numune Alma Noktası	Atık Türü	Atık Miktarı
R ₃ -Tayland [35]	Takhian Tia	Sızıntı suyu havuzu	Tehlikesiz	-
	Samae San			
	Chachoengsao			
	Sai Noi			
	Nakornpathom			
	Bang Khla			
	Ban Lam			
R ₄ -Çin [9]	Laogang	Katı atık depolama alanı	Kentsel-Tehlikesiz	12,000 ton/gün
	Shanghai	Dengeleme havuzu	Kentsel	3000 ton/gün
R ₆ -Sırbistan [36]	Brijesnica	Su alma yapısı	Tehlikesiz	90 ton/gün
		Sızıntı suyu lagünü	Tehlikesiz	
	Novi Sad	Periferik kanal-1	Tehlikesiz	
		Periferik kanal-2	Tehlikesiz	
		Çökeltim lagünü	Kentsel-Tehlikesiz	
Gigoš	Havalandırılmalı lagün	Kentsel-Tehlikesiz		
R ₇ -Endonezya [37]	Galuga	Sızıntı suyu havuzu	Kentsel-Tehlikesiz	1075-1100 ton/gün
		Sızıntı suyu drenajı		
		Deşarj öncesi		
		Deşarj sonrası		
R ₈ -Çin [38]	Suzhou	Dengeleme havuzu	Kentsel-Tehlikesiz	480 ton/gün
		Biyoreaktör		
		Membran tank çıkışı		
		Deşarj noktası		
R ₉ -Çin [32]	Laogang Sızıntı Suyu Arıtma Tesisi	Ham sızıntı suyu	Kentsel-Tehlikesiz	13,000 ton/gün
R ₁₀ -Çin [39]	Shenzhen	Katı atık depolama alanı	Kentsel	-

III. SIZINTI SULARINDAN MİKROPLASTİK ÖRNEKLEME YÖNTEMLERİ

Örnekleme işlemi için gerekli olan ilk adım numune alma aşamasıdır [40]. Bunun için genellikle kompozit ve anlık numunelerden faydalanılmaktadır. Kompozit numune, 24 saat boyunca bir veya iki saatlik aralıklarla alınan numunelerden oluşmaktadır. Farklı zaman dilimlerinde meydana gelen dalgalanmaları belirleyerek daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesini mümkün kılmaktadır [41], [42]. Anlık numune ise belirli bir zamanda alınan tek bir numunedir oluşmaktadır. Kolay bir yöntem olmakla birlikte atıksuda gerçekleşen zamansal dalgalanmaları tam anlamıyla temsil etmemektedir [41], [43]. Örnekleme işlemi, mikroplastiklerin hedeflenen ortamdan toplanması amacıyla, sahada ya da laboratuvar ortamında gerçekleştirilmektedir. Sahada yapılan örnekleme işlemlerinde, pompa

sistemine bağılı elek setlerinden ve çeşitli ağ sistemlerinden faydalanılmaktadır. Pompa sistemleri aracılığıyla büyük hacimlerde numune toplamak mümkün hale gelmektedir. Hedeflenen mikropplastik boyutuna bağılı olarak, istenilen özellik ve sayıdaki elekler seçilebilmektedir. Bu yöntemin ekipman ve elektrik enerjisi gereksinimi dezavantajlarının yanında, numunenin cihaz tarafından kontamine olma riski de bulunmaktadır [44]. Sahada örnekleme için mümkün kılan bir diğere yöntem ise çeşitli ağ sistemleri ile gerçekleştirilir. Bu sistemler arasında yaygın olarak kullanılan plankton ağı, hızlı ve kolay kullanım sunan bir tekniktir. Pahalı ekipman ihtiyacının olması ve numune kompozisyonuna bağılı olarak ağ gözenek yapısının tıkanabilmesi gibi dezavantajlara sahiptir [45], [46]. Laboratuvar ortamında yapılan örnekleme işlemlerinde ise çeşitli elek setlerinden faydalanılır. Elek setleri sayesinde daha yüksek hacimdeki numunelerin filtrelenmesi mümkün hale gelmektedir. Farklı boyutlardaki eleklerle sahip elek seti kullanımı ile birlikte boyut sınıflandırılması da gerçekleştirilmektedir [47].

Kullanılan elek sayısı ve gözenek boyutu, tespit edilmek istenen ve giderilmesi hedeflenen mikropplastiklerin boyutuna göre seçilmektedir [48]. Hızlı ve kolay kullanım sunan bir yöntem olmasına karşın, eleklerin sahip olduğu potansiyel kontaminasyon riski, zahmetli ve zaman alıcı bir süreç oluşu gibi çeşitli dezavantajları bulunmaktadır [45], [46]. Kullanılan elek setleri ile birlikte mikropplastiklerin genel olarak boyut sınıflandırılması yapılmış olmasına karşın, lif şeklindeki mikropplastiklerin daha küçük gözenek boyutundaki eleklerden uzunlamasına geçebildikleri rapor edilmiştir [49], [50]. Numune hacmi belirlenirken bazı kriterlere dikkat etmek gerekmektedir. İlk olarak, numune karakterizasyonu göz önünde bulundurulmalıdır. Numunenin organik madde içeriğinin yüksek olması durumunda daha düşük miktarda numuneye ihtiyaç duyulmaktadır. Aksi takdirde, filtrelerde hızlı bir şekilde tıkanma meydana gelmektedir [51].

Bir diğere kriter ise partikül boyutudur. Çalışmada büyük boyuttaki mikropplastiklerin tespiti hedefleniyorsa büyük hacimli numunelerin tercih edilmesi gerekmektedir [51]. Örneğin, yapılan bir çalışmada, 300 µm'den büyük olan boyut sınıfı toplam partikül miktarının %5'ini oluşturduğu için 10,5–13,5 L numune hacmi yeterli olurken, daha küçük boyutlu, 20–100 µm aralığındaki mikropplastiklerin tespiti için ise 2 L'lik numune hacmine ihtiyaç duyulmuştur [41]. Tablo 2'de incelenen çalışmalarda çoğunlukla tercih edilen numune alma yönteminin kompozit numune olduğu belirlenmiştir (R₁, R₄, R₆, R₇, R₉) yüksek temsil oranının bu tercih üzerinde etkili olduğu tahmin edilmektedir.

Sahada ve laboratuvar ortamında gerçekleştirilen örnekleme yöntemleri arasında en çok tercih edilen yöntem ise laboratuvar ortamında gerçekleştirilen örnekleme yöntemi olarak belirlenmiştir. Laboratuvar ortamında yapılan örnekleme işlemlerinde kullanılan elek setleri ile çalışmada hedeflenen mikropplastik boyut aralığını seçmenin mümkün oluşu, sürecin bir adım daha kısalmaya olanağını sağladığından bu yöntemin sıklıkla kullanılma sebebi olarak düşünülmektedir.

Çalışmalarda kullanılan elek/filtre/ağ sistemlerinde birbirinden farklı gözenek boyutları tercih edilmiştir. Seçilen gözenek boyutları 10 µm ile 5000 µm aralığında değişim göstermektedir. Eleklerin gözenek boyutları ile ilgili belirli bir standardizasyon bulunmadığından ve çalışmalarda hedeflenen mikropplastik boyutları farklılık gösterdiğinden birbirinden farklı gözenek boyutları ile karşılaşılmaktadır. Çalışmalar, numune hacimleri açısından incelendiğinde, farklı hacimlerde numunelerin kullanıldığı belirlenmiştir. En düşük hacimli numune 250 mL (R₅), en yüksek hacimli numune ise 307 L (R₁) olarak tespit edilmiştir [15], [33].

Tablo 2. İncelenen çalışmalarda kullanılan örnekleme yöntemleri.

Referans	Örnekleme Yöntemi			Numune Hacmi (L)
	Elek/Filtre/Ağ Türü	Gözenek Boyutu (μm)	Numune Türü	
R ₁	Dalgıç pompa sistemine bağlı paslanmaz çelik elek seti	5000, 411, 47	Kompozit numune	5- 307
R ₂	Paslanmaz çelik elek seti	150, 75, 45, 25	Anlık numune	24
R ₃	Paslanmaz çelik elek	330	-	-
R ₄	Filtre	48	Kompozit numune	3
R ₅	Filtre	120	Anlık numune	0,25
R ₆	Plankton ağı	23	Kompozit numune	2,5
R ₇	Paslanmaz çelik elek seti	5000, 200, 20	Kompozit numune	150
R ₈	Paslanmaz çelik elek seti	150, 10	Anlık numune	0,5- 40
R ₉	Paslanmaz çelik elek	48	Kompozit numune	5
R ₁₀	Naylon membran filtre	20	Anlık numune	1

IV. SIZINTI SULARINDAN MİKROPLASTİK İZOLASYON YÖNTEMLERİ

Mikroplastikleri buldukları ortamlardan ayırmak için çeşitli izolasyon yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yöntemler arasında yaygın olarak kullanılanlar; kimyasal oksidasyon yöntemi, yoğunluk farkına dayalı ayırma yöntemi ve filtrasyon yöntemidir. Kimyasal oksidasyon yönteminde, fenton reaktifi ve hidrojen peroksit (H_2O_2) gibi oksidanlar yardımıyla organik maddelerin mikroplastiklere zarar vermeden ortamdaki giderilmesi amaçlanır. Bu yöntemde sıklıkla kullanılan oksidanlardan olan H_2O_2 , organik maddelerin giderilmesi için kullanılan etkili ve iyi bilinen bir oksitleyicidir. Deniz suyunda mikroplastik tespitine yönelik olarak yürütülen bir çalışmada, %30 H_2O_2 'nin numuneye eklenmesiyle birlikte 7 gün içinde organik maddenin parçalandığı ve plastik polimer yapılar üzerinde oluşturduğu minimum olumsuz etki ile bu işlemin gerçekleştiği rapor edilmiştir. Aynı amaca yönelik yürütülen diğer bir çalışmada ise oksidasyon işleminin, mikroplastığın polimer yapısını daha küçük ve daha ince hale getirerek bu yapıda hafif bir değişime sebep olduğu bildirilmiştir [52], [53]. Atıksuda fenton reaktifi kullanımı ile yapılan bir çalışma, bu yöntemle organik maddelerin hızlı bir şekilde ortamdaki giderildiğini ve yöntemin mikroplastiklere zarar vermediğini ortaya koymuştur [54].

Bu makale kapsamında incelenen çalışmaların tümünde, kimyasal oksidasyon işlemi kullanılmış ve birçoğunda (R₅, R₂, R₇) bu işlem izolasyon sürecinin ilk basamağı olarak tercih edilmiştir [15], [34], [37]. Bu amaçla, çalışmalarda (R₂, R₃, R₇) çoğunlukla H_2O_2 ve fenton reaktiflerinden yararlanılmıştır [34], [35], [37]. Kullanılan toplam oksidan dozları, yaklaşık olarak 20 ml ile 100 ml aralığında değişkenlik göstermiştir. Oksidasyon işlemlerinde uygulanan en düşük reaksiyon süresi 30 dakika (R₈) iken en fazla 3 gün (R₉) gibi daha uzun reaksiyon sürelerinden de yararlanılmıştır [32], [38]. Reaksiyon sürecinin verimini arttırmak üzere katalizör olarak sıcaklık parametresi kullanılmış olup, tercih edilen sıcaklık değerlerinin 50°C-75°C aralığında olduğu belirlenmiştir. Daha yüksek sıcaklık değerleri, mikroplastığın polimer yapısı üzerindeki olumsuz etkisi dolayısıyla kullanılmamaktadır [55]. Yoğunluk farkına dayalı ayırma yöntemi, mikroplastikleri diğer inorganik maddelerden ayırmak için kullanılan bir izolasyon yöntemidir [56]. Bu yöntemde, doymuş tuz çözeltisi, numune ile uygun hacimsel oranlarda karıştırılarak belirli bir zaman aralığında yoğunluğa dayalı ayırmaya bırakılmaktadır [57]. Çözeltiden daha hafif olan mikroplastiklerin yüzdürülmesi ile ortamdaki ayrışmaları sağlanmaktadır. İncelenen çalışmaların çoğunda mikroplastik izolasyon sürecinde yoğunluk farkına dayalı ayırma yöntemi kullanılmıştır (R₂, R₃, R₆, R₇, R₈, R₁₀) [34], [35], [36], [37],

[38], [39]. Yoğunluk farkına dayalı ayırma işlemi için NaI, etanol çözeltisi, NaCl, ZnCl₂ çözeltileri kullanılmıştır. İncelenen bir çalışmada (R₁₀), iki aşamalı yoğunluk ayırma işleminden yararlanılmıştır [39]. Bu yöntemde, çözeltilerin maruz bırakıldığı zaman periyodu çalışmalara göre değişkenlik göstermiştir. Örneğin, ZnCl₂ tuzunun kullanıldığı iki farklı çalışmanın birinde (R₈) 10 dakikalık kısa bir süre tercih edilirken diğer çalışmada ise (R₆) 1 gece gibi uzun bir süre zarfından faydalanılmıştır [36], [38].

İzolasyon yöntemlerinden bir diğeri olan filtrasyon, sadece sıvının geçebileceği bir ortam aracılığıyla katı maddelerin sıvı ortamdan ayrılma prensibine dayanan basit bir yöntemdir. Filtrasyon işlemi genellikle bir huni, filtre membranı ve vakum pompası sistemi ile yapılmaktadır [58]. Filtre kâğıdının gözenek boyutu, sıvıdan ayrılan mikroplastiklerin boyutunu belirlemektedir. Filtrenin, filtrasyon düzeneğinden petri kaplarına aktarılması sırasında mikroplastik kaybı meydana gelebilmektedir. Bu nedenle, filtreleme işlemi sırasında mikroplastiklerin olduğundan az veya fazla tahmin edilmesi riski bulunmaktadır [59]. Mikroplastiklerin boyutu önem arz etmektedir. Tercih edilen küçük gözenek boyutları, filtre üzerinde tutulan mikroplastiklerle birlikte izolasyon sırasında çözünmeyen maddelerin de filtre üzerinde tutulmasına sebep olmaktadır. Bu durum, mikroplastiklerin tanımlama işleminde zorluklara sebep olmaktadır [60], [61].

İncelenen çalışmalar kapsamında, filtrasyon yöntemi genel olarak izolasyon işleminin son basamağı olarak tercih edilmiştir. Bu süreçte birbirinden farklı filtreler kullanılmıştır. Kullanılan filtre türleri; membran filtre, naylon membran filtre, paslanmaz çelik filtre ve selüloz nitrat filtre olarak belirlenmiştir. Bu filtrelerin, birbirinden farklı gözenek boyutuna sahip olduğu ve çoğunlukla 0.45 µm gözenek boyutunun tercih edildiği tespit edilmiştir (R₇, R₈, R₁₀) [36], [38], [39]. Ayrıca 47 µm (R₄) ve 50 µm gözenek boyutundaki filtrelerden (R₅) yararlanılmıştır [9], [15].

İzolasyon işlemleri özet tablosu incelendiğinde (Tablo 3), izolasyon prosesi öncesinde çoğunlukla ıslak eleme yönteminden faydalandığı ve kimyasal oksidasyon yönteminin tüm izolasyon süreçlerinde kullanıldığı belirlenmiştir (R₁, R₃, R₆) [33], [35], [36]. İzolasyon prosesleri genellikle filtrasyon işlemi ile son bulmuş ve yoğunluk ayırma yöntemi ise üçüncü basamak olarak tercih edilmiştir. Çalışmalarda kullanılan detaylı izolasyon prosedürlerine ise Tablo 4'te yer verilmiştir.

Tablo 3. İncelenen çalışmalarda kullanılan izolasyon yöntemleri.

Referans	Islak Eleme	Kimyasal Oksidasyon	Yoğunluk Farkına Dayalı Ayırma	Filtrasyon
R ₁	√	√	-	-
R ₂	-	√	√	√
R ₃	√	√	√	-
R ₄	√	√	-	√
R ₅	-	√	-	√
R ₆	√	√	√	-
R ₇	-	√	√	√
R ₈	-	√	√	√
R ₉	√	√	-	-
R ₁₀	-	√	√	√

Tablo 4. İncelenen çalışmalarda kullanılan izolasyon prosedürü.

Referans	Islak Eleme	Kimyasal Oksidasyon				Yoğunluk Farkına Dayalı Ayırma	Filtrasyon
		Oksidan	Doz	Süre	Sıcaklık		
R ₁	500 µm, 50 µm	H ₂ O ₂ , HCl	-	-	-	-	-
R ₂	-	Fe(II), H ₂ O ₂	40 ml, 40 ml	-	-	NaI, etanol	Membran filtre (0.45 µm)
R ₃	330 µm	Fe(II), H ₂ O ₂	-	5 dakika, 30 dakika	75°C	NaCl (1 gece)	-
R ₄	20 µm	H ₂ O ₂	20 ml	72 saat	-	-	Naylon membran filtre (47 µm)
R ₅	-	H ₂ O ₂	20 ml	2-3 gün	-	-	Paslanmaz çelik filtre (50 µm)
R ₆	63 µm	H ₂ O ₂ , Fe(II)SO ₄	20 ml, 20 ml	-	75°C	ZnCl ₂ (1 gece)	-
R ₇	-	Fe(II)SO ₄ , H ₂ O ₂	6-10 ml + 12-20 ml	48-72 saat	50°C	NaCl	Selüloz nitrat filtre (0.45 µm)
R ₈	-	Fe(II) + H ₂ O ₂	100 ml	30 dakika	60°C	ZnCl ₂ (10 dakika)	Selüloz nitrat filtre (0.45 µm)
R ₉	20 µm	H ₂ O ₂	20 ml	3 gün	-	-	-
R ₁₀	-	Fe(II), H ₂ O ₂	40 ml, 40 ml	-	-	NaI, etanol	Membran filtre (0.45 µm)

V. SIZINTI SULARINDA MİKROPLASTİK ANALİZ YÖNTEMLERİ

Mikroplastiklerin örneklenmesi ve ortamdan çeşitli teknikler aracılığıyla izole edilmesinin ardından, morfolojik özellikleri ve polimer yapıları hakkında bilgi edinmek amacıyla analiz yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Mikroplastiklerin analiz edilebilmesi için temel olarak kimyasal ve fiziksel olmak üzere iki tür analiz yöntemi kullanılmaktadır. Fiziksel analiz yöntemleri ile mikroplastığın morfolojik özellikleri hakkında bilgi edinildikten sonra polimer türü ile ilgili gerekli verileri elde etmek için kimyasal analiz yöntemlerine başvurulmaktadır.

Fiziksel analiz yöntemi, mikroplastiklerin morfolojik açıdan tanımlanması için önemli bir aşamadır. Mikroplastiklerin boyut, şekil ve renk gibi çeşitli özellikleri hakkında veri toplama imkânı sunmaktadır. Fiziksel analiz yöntemi ile numunede bulunan plastik olmayan parçacık sayısını azaltmak için ön tarama işlemi uygulanmaktadır. Bunlar; çıplak gözle, pens yardımıyla, optik mikroskop, stereo mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu aracılığı ile yapılmaktadır. Pens kullanımı ile parçacığın yapısı, formu, sertliği veya elastikiyeti gibi mikroplastikleri tanımlamaya ve birbirinden ayırmaya yardımcı olan bazı özellikler tespit edilebilmektedir [62]. Plastik parçacıklara dokunmak için iğnelerin kullanıldığı sıcak iğne testi gibi yanlış tanımlamayı önlemek için bazı

alternatif yöntemler de kullanılmaktadır [63], [64]. Mikroplastiklerin fiziksel analizi tamamlandıktan sonra polimer türü hakkında bilgi edinmek amacıyla kimyasal analiz yöntemlerine başvurulmaktadır. Bu yöntemlerden yaygın olarak kullanılanları; FT-IR spektroskopisi, raman spektroskopisi ve piroliz gazı kromatografisi-kütle spektrometresidir (Pyr-GC-MS) [64].

Fiziksel ve kimyasal analiz tekniklerinin avantaj ve dezavantajları Tablo 5’te özetlenmektedir.

Tablo 5. Mikroplastiklerin tanımlanmasında yaygın olarak kullanılan analiz yöntemleri [65], [66],[67].

Fiziksel Analiz Yöntemleri			
Mikroskop	Çözünürlük	Görüntü	Avantaj/ Dezavantaj
Optik Mikroskop	Düşük	Karanlık	Düşük maliyet, kötü görüntü, zaman alıcı, yüksek hata payı
Stereo Mikroskop	Orta	Net	Net görüntü, düşük büyütme oranı
Floresan Mikroskobu	İyi	Parlak renkli	Düşük hata payı
SEM	Yüksek	Siyah-beyaz	Yüksek çözünürlük, yüksek maliyet
Kimyasal Analiz Yöntemleri			
Titreşim Spektroskopisi	Numune miktarı	Ölçüm Süresi	Avantaj/ Dezavantaj
FT-IR	1 mg	3- 6 saat	Numune tahribatı yok, pahalı
Raman	1 µg	40 dakika	Hızlı, pahalı, ölçüm öncesi hazırlık gerekliliği
Termal Analiz	Numune miktarı	Ölçüm Süresi	Avantaj/ Dezavantaj
Pyr-GC-MS	0,5 mg	30- 100 dakika	Numune üzerinde olumsuz etki

FT-IR: Fourier dönüşümlü kızıl ötesi spektroskopisi; **Pyr-GC-MS:** Piroliz gaz kromatografisi kütle spektrometresi; **SEM:** Taramalı elektron mikroskobu.

Tablo 6. İncelenen çalışmalarda kullanılan mikroplastik analiz yöntemleri.

Referans	Analitik Yöntem	
	Fiziksel Analiz	Kimyasal Analiz
R ₁	Mikroskop	µFT-IR ve µFT-IR-ATR Spektroskopisi
R ₂	-	µFT-IR ve ATR-FT-IR Spektroskopisi
R ₃	Stereo Mikroskop	FT-IR Spektroskopisi
R ₄	Stereo Mikroskop	µFT-IR-ATR Spektroskopisi
R ₅	-	µFT-IR Spektroskopisi
R ₆	Stereo Mikroskop	Yanma Testi
R ₇	Optik Mikroskop	µFT-IR ve ATR-FT-IR Spektroskopisi
R ₈	-	µ-Raman Spektroskopisi
R ₉	Stereo Mikroskop, SEM	µFT-IR-ATR Spektroskopisi
R ₁₀	SEM	FT-IR ve LDIR Spektroskopisi

ATR: Zayıflatılmış toplam yansıma; **FT-IR:** Fourier dönüşümlü kızıl ötesi spektroskopisi; **LDIR:** Lazer doğrudan kızıl ötesi spektroskopisi; **µFT-IR:** Mikro fourier dönüşümlü kızıl ötesi spektroskopisi; **µ-Raman:** Mikro-raman spektroskopisi; **SEM:** Taramalı Elektron Mikroskobu.

İncelenen çalışmalarda, mikroplastiklerin morfolojik özelliklerinin ve polimer türlerinin belirlenmesi için birbirinden farklı yöntemler kullanılmıştır (Tablo 6). Morfolojik özellikler hakkında gerekli bilgileri elde edebilmek için SEM, stereo mikroskop ve optik mikroskoptan faydalanılmıştır. Bu yöntemler arasında stereo mikroskop (R₃, R₄, R₆, R₉) en çok tercih edilen yöntem olmuştur [9], [32], [35], [36]. Stereo mikroskop aracılığıyla, mikroplastiklerin boyutunu ölçmek, miktarını belirlemek, renk ve şekil gibi morfolojik özellikleri hakkında direkt olarak veri sağlamak mümkündür. Bu

sebeplerin, stereo mikroskopun en çok tercih edilen yöntem olmasına yol açtığı düşünülmektedir. Mikroplastiklerin polimer yapısı hakkında veri elde etmek için en çok kullanılan yöntemlerin μ FT-IR (R_1, R_2, R_5, R_6) ve μ FT-IR-ATR (R_1, R_4, R_8) spektroskopisi olduğu belirlenmiştir [9], [15], [33], [34], [36], [38]. FT-IR spektroskopisi yöntemlerinin numune üzerinde herhangi bir tahribata sebep olmaması, bu yöntemlerin yüksek oranda tercih edilmesinde önemli bir faktördür. Çalışmaların bir tanesinde, diğerlerinden farklı bir yöntem olan LDIR spektroskopisi tercih edilmiştir (R_{10}) [39].

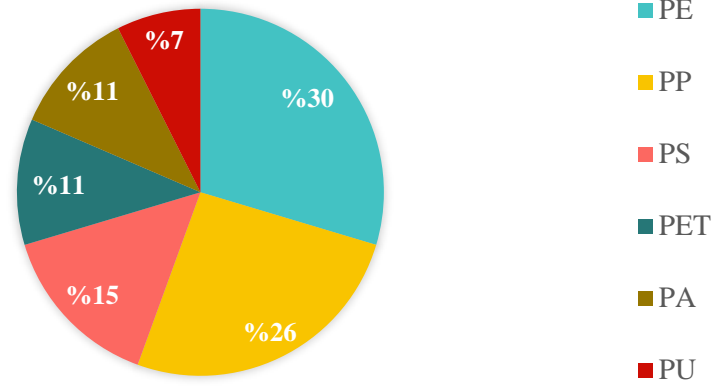
VI. BULGULAR

Sızıntı suyunda mikroplastik kirliliği üzerine yapılan çalışmalarda tespit edilen mikroplastiklerin morfolojik ve kimyasal özellikleri ile konsantrasyon değerleri Tablo 7’de özetlenmiştir. Mikroplastiklerin konsantrasyon değerleri incelendiğinde, litre bazında en yüksek değerin $235,4 \pm 17,1$ adet olduğu rapor edilmiştir (R_8) [38]. Bildirilen en küçük değer $5,19 \pm 4,44$ adet/ m^3 olarak belirlenmiştir (R_7) [37]. Bir çalışmada alınan numunede ise (R_1) mikroplastik tespit edilmemiştir [33]. Standart bir metodoloji bulunmadığı için çalışmaların bir bölümünde sayısal birimler aracılığıyla ($R_1, R_2, R_4, R_5, R_7, R_8, R_9, R_{10}$) diğer bölümünde (R_3, R_6) ise kütleli birimler üzerinden mikroplastik konsantrasyon değerleri ifade edilmiştir. Mikroplastik konsantrasyonlarının farklı birimler ile ifade edilmesi, bulguların karşılaştırılmasını zorlaştırmaktadır.

Tablo 7. Çalışmalarda tespit edilen mikroplastik konsantrasyonları, şekilleri ve polimer türleri.

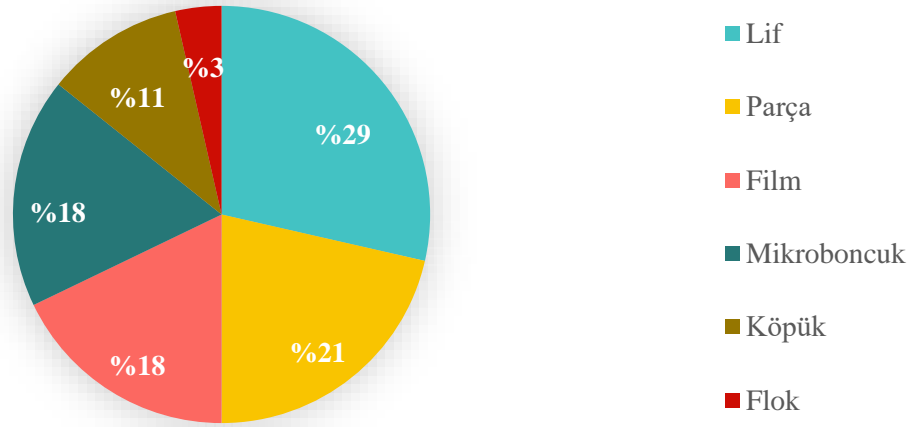
Referans	Mikroplastik Konsantrasyonu (adet/L)		Mikroplastik Şekli	Baskın Polimer Türü
	En Düşük	En Yüksek		
R_1	Tespit edilmedi	4,51	-	PE, PU, PET, PS
R_2	0,42	24,58	Köpük, mikroboncuk, lif, film, parça	PE, PP, PTFE, PET, PS
R_3	13,50 (adet/kg kuru ağırlık)	27,50 (adet/kg kuru ağırlık)	Mikroboncuk, film, lif	PE, PP, PET
R_4	4	13	Lif, parça, mikroboncuk	Selofan, PE, PS, PP
R_5	291 \pm 91 (ortalama)		Film, lif, parça, flok, köpük	PE, PA, rayon
R_6	0.3 (mg/L)	2.2 (mg/L)	-	-
R_7	5.19 \pm 4.44 (adet/ m^3)	57.04 \pm 5.88 (adet/ m^3)	Lif, parça, mikroboncuk, köpük	PE, PP, PS
R_8	0.4 \pm 0,1	235.4 \pm 17,1	Parça, film, mikroboncuk, lif	PE, PP, PA, PAEK
R_9	0.3	1.2	Lif, parça, film	PE, PES, EPM, PP
R_{10}	3	25	-	PU, PEC, PP, PAT, PA

EPM: Etilen propilen kauçuk; **PA:** Poliamid; **PAEK:** Poliarilherketon; **PAT:** Poliasetal; **PE:** Polietilen; **PEC:** Klorlu polietilen; **PES:** Polyester; **PET:** Polietilen tereftalat; **PP:** Polipropilen; **PS:** Polistiren; **PTFE:** Politetrafloretilen; **PU:** Poliüretan.



Şekil 1. İncelenen çalışmalarda en sık tespit edilen polimer türleri.

Katı atık düzenli depolama sahası sızıntı suyunda bulunan polimer türlerinin, sahada bulunan atık kompozisyonu, bölgesel farklılıklar ve depolama koşullarına bağlı olduğu bilinmektedir [34]. PE kökenli polimerlerin genellikle ambalaj atıkları ve kozmetik ürünlerinden, PA polimerinin tekstil kökenli atıklardan, PP polimerinin şişe kapakları ve pipetlerden, PS polimerinin gıda ambalajları ve oyuncaklardan, PET polimerinin tekstil ürünleri ve su şişelerinden kaynaklandığı bildirilmiştir [47], [50], [68], [69], [70], [71], [72],[73]. Değerlendirilen çalışmalar incelendiğinde, en sık karşılaşılan polimer türlerinin PE, PP, PS, PET, PA ve PU polimerleri olduğu görülmüştür (Şekil 1). %30'luk bir oran ile sızıntı sularında en sık bulunan polimer türü PE olmuştur (R₁, R₂, R₃, R₄, R₅, R₇, R₈, R₉) [9], [15], [28], [33], [34],[35], [37], [38]. Ardından, %26 oranla en çok karşılaşılan bir diğer polimer PP'dir (R₂, R₃, R₄, R₇, R₈, R₁₀) [9], [34], [35], [37], [38],[39]. Bu polimerlerden özellikle yoğun şekilde tespit edilen PE, PP ve PET polimerlerinin 2019 yılında elde verilere göre, küresel çapta plastik kullanımının sırasıyla %29,8, %19,4 ve %7,9'luk bir bölümünü oluşturduğu belirlenmiştir [74].



Şekil 2. Çalışmalarda tespit edilen mikroplastik şekillerinin bulunma yüzdeleri.

Mikroplastiklerin sahip olduğu şekil türünden yola çıkarak kaynağını tahmin etmek mümkündür. Bu sebeple; parçaların daha büyük boyuttaki plastiklerin parçalanmasından, filmlerin plastik poşet ve çeşitli ambalaj atıklarından, mikroboncukların çeşitli prosesler ve kişisel bakım ürünlerinden, liflerin sentetik giysilerden kaynaklandığı rapor edilmiştir [75], [76], [77], [78].

Sızıntı suyunda gerçekleştirilen çalışmalar değerlendirildiğinde, mikroplastik şekilleri lif> parça> film = mikroboncuk> köpük> flok olarak sıralanmıştır (Şekil 2). Su ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada, lif şeklindeki mikroplastiklerin sızıntı suyunda yüksek oranda bulunmasının liflerin küçük boyutuna bağlı olarak meydana geldiğinden bahsedilmiştir. Liflerin, depolama sahalarından sızıntı suyuna kolay bir şekilde taşınım gösterebilmelerinin bir sonucu olarak yoğun miktarda sızıntı suyunda

tespit edilebilmektedirler (R₄) [9]. Sızıntı suyunda bulunma oranı açısından lif şekliinden sonra belirlenen şekil, parçadır ve parça şeklinin büyük plastiklerin depolama sahasında yoğun şekilde bulunması ve zamanla parçalanmasının bir sonucu olabileceği; filmlerin plastik poşetlerin depolama sahasında sıklıkla bulunmasından kaynaklanabileceği; mikroboncukların ise kozmetik kökenli atıkların depolama alanlarındaki varlığı sonucunda bulunabileceği düşünülmektedir.

VII. TARTIŞMA

Sızıntı suyunda mikroplastik kirliliğinin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmalar incelendiğinde, tespit edilen mikroplastiklerin karakterizasyon ve konsantrasyon değerlerinin çeşitli faktörlerden etkilenerek farklılık gösterdiği belirlenmiştir.

İlk olarak, daha önce yapılan bazı çalışmalarda mevsimsel şartların mikroplastik konsantrasyonu ile pozitif korelasyon gösterdiğinden bahsedilmiştir [79], [80]. İncelenen çalışmalarda, Praagh ve diğerleri tarafından (R₁) mayıs ayında alınan numunelerde 0-4,51 adet/L mikroplastik konsantrasyonu; Z.Zhang ve diğerleri tarafından (R₉) mart-temmuz aylarını kapsayan dönemde 0,3-1,2 adet/L mikroplastik konsantrasyonu; Sun ve diğerleri tarafından kasım ayında gerçekleştirilen çalışmada ise (R₈) 0,4 ± 0,1 – 235,4 ± 17,1 adet/L aralığında mikroplastik konsantrasyonu tespit edilmiştir [32], [33], [38]. Tespit edilen en yüksek ve en düşük mikroplastik konsantrasyonları kıyaslandığında, en düşük konsantrasyonlar arasında belirgin bir fark bulunmamıştır. En yüksek mikroplastik konsantrasyonları kıyaslandığında ise kasım ayında yapılan çalışmada (R₈) en yüksek değere ulaşıldığı görülmüştür [38]. Sızıntı sularında yapılan çalışmalarda mikroplastik kompozisyonunu etkileyen etkenlerden biri de depolama yaşıdır. Su ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada (R₄) depolama yaşının mikroplastik kompozisyonu ve özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır [9]. Mikroplastik konsantrasyonları genç, orta ve yaşlı depolama alanlarında gram bazında 83±10, 68±6 ve 36±4 adet, litre bazında ise 8,4 ve 10 adet şeklinde tespit edilmiştir. Sızıntı suyundaki mikroplastiklerin genel boyut dağılımı, depolama yaşından etkilenmemesine rağmen, büyük boyutlu (1-5 mm) selofan polimerinde depolama sahası yaşının artmasıyla ortalama boyutlarında bir azalma göstermiştir. Genç depolama alanlarında bulunan PEUR polimeri miktarının, orta depolama yaşına sahip alanlardan çok daha fazla olduğu ve eski depolama alanlarında tespit edilmediği ifade edilmiştir. Bu durumdan hareketle, artan depolama yaşıyla birlikte polimer türü çeşitliliğinin ve mikroplastik konsantrasyonunun azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

Çalışmalar, atık türü açısından incelendiğinde; atıkların kentsel, endüstriyel, karışık, tehlikeli ve tehlikesiz atık olduğu görülmüştür. Praagh ve diğerleri tarafından 2018 yılında yapılan çalışmada (R₁), çoğunlukla kentsel ve endüstriyel nitelikli atık kompozisyonu bulunurken diğer çalışmalar çoğunlukla kentsel nitelikli atıklardan oluşmaktadır. Baskın polimer türleri kıyaslandığında hem kentsel hem endüstriyel atıklara ait sızıntı suyunda, diğer çalışmalardan farklı olarak PU polimerine rastlanmıştır [33]. PU polimerinin baskı silindirleri, araba tamponları, yatak ve araba koltukları, biyomedikal uygulamalar ve araba lastiklerinde kullanıldığı bildirilmiştir [81]. Bu durum, tespit edilen polimer türlerinin depolama sahasına gelen atıkların türüne bağlı olarak farklılık gösterdiğini kanıtlar niteliktedir.

Depolama alanına gelen günlük atık miktarları karşılaştırıldığında en yüksekten düşüğe sırasıyla 13.000 ton/gün (R₉), 12.000 ton/gün (R₄), 3000 ton/gün (R₅), 1075–1100 ton/gün (R₇), 480 ton/gün (R₈), 140 ton/gün ve 90 ton/gün (R₆) şeklinde sıralanmaktadır [9], [15], [32], [36], [37], [38]. Mikroplastik konsantrasyonları kıyaslandığında en yüksek konsantrasyonlara günlük 3000 ton (R₅) ve 480 tonluk (R₈) atık değerlerinde ulaşıldığı görülmüştür [15], [38]. Günlük 13.000 ton (R₉) ve 12.000 tonluk (R₄) atık miktarlarında en düşük mikroplastik konsantrasyonlarıyla karşılaşmıştır [9], [32]. Bu sebeple, depolama sahasına gelen günlük atık miktarından daha belirleyici olan kriterin toplam atık miktarında bulunan plastik atık oranı olduğu öngörülmüştür.

Mikroplastiklerin tespiti ve analizi için kullanılan örnekleme, izolasyon ve analiz yöntemlerinin belirli bir standardizasyona sahip olmamasına bağlı olarak mikroplastik kompozisyonunda farklılıklar meydana gelmektedir. Örnekleme ve izolasyon aşamalarında tercih edilen elek/filtre sistemlerinin sahip olduğu gözenek boyutunun, tespit edilen mikroplastik konsantrasyonunu üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir. Yapılan bir çalışmada, lif şeklindeki mikroplastiklerin küçük gözenek boyutuna sahip elek/filtre sistemleri ile daha büyük gözenek boyutu ile yapılan çalışmalardan birkaç kat daha fazla konsantrasyonda tespit edildiği sonucuna ulaşılmıştır [82]. Filtre gözenek boyutu ile mikroplastik konsantrasyonu ilişkisinin önemini vurgulayan bir diğer çalışmada ise 80 µm gözenek boyutu kullanımı ile elde edilen mikroplastik konsantrasyonunun 450 µm gözenek boyutu kullanımından 100.000 kata kadar daha fazla olabileceği sonucuna ulaşılmıştır [83]. Sızıntı suyunda incelenen çalışmalar kapsamında, litre bazında en yüksek mikroplastik konsantrasyonları 291±91 adet (R₅) ve 235,4±17,1 adet (R₈) olarak belirlenmiştir [15], [38]. Bu çalışmalarda kullanılan en küçük gözenek boyutları 120 µm, 10 µm olarak belirlenmiştir.

Sızıntı sularının arıtılması için kullanılan çeşitli prosesler aracılığıyla mikroplastik giderimi belirli oranlarda mümkün olabilmektedir. İncelenen çalışmalar kapsamında, ileri fiziksel arıtma sonrasında mikroplastik gideriminin incelendiği iki farklı çalışma bulunmaktadır (R₁, R₉) [32], [33]. Praagh ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada (R₁), sızıntı suyu arıtımı; filtrasyon ve aktif karbon, yapay toprak filtrasyonu, ardışık kesikli reaktör ve kum filtresi proseslerinden oluşmaktadır. Bu prosesler ile sırasıyla, %76, %99, %3 ve %100 oranında mikroplastik giderimleri elde edilmiştir. Zhang ve diğerleri tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise (R₉) dengeleme havuzu, membran biyoreaktör, havalandırma, ultrafiltrasyon, nanofiltrasyon, ters ozmos proseslerinden oluşan bir sızıntı suyu arıtma prosedüründen yararlanılmıştır. Mikroplastik giderim verimleri sırasıyla; %16,67, %50, %20, %75 ve etkisiz olarak ifade edilmiştir. Birbirinden farklı arıtma prosesleri kullanılan bu çalışmalarda, en yüksek mikroplastik giderimine Praagh ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada (R₁) ulaşılmıştır [33]. Bu çalışmada, kum filtresi ünitesinde %100'e varan bir mikroplastik giderimi elde edilmiştir. Zhang ve diğerleri tarafından yapılan diğer çalışmada (R₉) ulaşılan en yüksek mikroplastik giderim verimi (%75) ise ultrafiltrasyon aşamasında elde edilmiştir. Bu çalışmada (R₉), nanofiltrasyon ve ters ozmos proseslerinde elde edilen giderim verimleri etkisiz olarak ifade edilmiştir [32]. Bu sonuç, nanofiltrasyon ve ters ozmos proseslerinden önce kullanılan proseslerin mikroplastik giderimi için yeterli olduğunu göstermiştir. Yanısıra, giderme verimleri incelendiğinde klasik arıtma sonrasında ileri fiziksel arıtma olarak kullanılan ultrafiltrasyon prosesinin mikroplastik gideriminde oldukça etkili olduğunu göstermiştir. Membran biyoreaktörde elde edilen düşük mikroplastik giderme verimi ise işletme problemi (membranların tıkanması) ile ilişkilendirilmiştir (R₄) [9]

VIII. SONUC

İncelenen çalışmalar kapsamında, sızıntı suyunda tespit edilen mikroplastiklerin çeşitli faktörlerden etkilendiği sonucuna ulaşılmıştır. Bunlar; depolama yaşı, depolama sahasında bulunan atık türü, depolama sahasına gelen günlük atık miktarı, sızıntı suyu arıtma prosesi, mevsim ve mikroplastiklerin tespit/analiz süreçlerinde tercih edilen yöntemler arasındaki farklılıklardır. Depolama yaşındaki farklılıklar, plastiklerin bozunma sürecine bağlı olarak farklı konsantrasyon ve polimer türüne sahip mikroplastiklerin tespiti ile sonuçlanmıştır. Atık türleri, mikroplastiklerin polimer türlerini belirleyen bir koşul olduğundan farklı türde atıkların bertarafı, polimer türlerinde değişkenliğe yol açmıştır. Depolama sahalarında bertaraf edilen günlük atık miktarının tek başına belirleyici faktör olmadığı, bu atıkların sahip olduğu plastik atık yüzdesinin temel etken olduğu kabul edilmiştir. Sızıntı suyu arıtma prosesleri ile alıcı ortamlara deşarj edilen mikroplastik konsantrasyonlarının azaldığı ve arıtma prosedürlerinin işletme ve bakım koşullarının mikroplastik giderim verimi üzerinde önemli bir etken olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Mevsimsel koşullara bağlı olarak, yağışlı mevsimlerde yüksek mikroplastik konsantrasyonlarına ulaşıldığı, yüzeysel akış ve sızıntı suyu miktarındaki artış ile birlikte alıcı ortamlara daha fazla mikroplastik deşarj edildiği düşünülmüştür. Mikroplastiklerin örnekleme, izolasyon ve analiz süreçlerinde standart bir metodoloji bulunmamasına bağlı olarak, mikroplastik kompozisyonunun numuneyi yansıtırma oranında farklılıklar meydana geldiği tespit edilmiştir.

Mikroplastik konsantrasyonunun farklı birimler (adet/L, adet/kg ve kg/L gibi) ile ifade edilmesi elde edilen sonuçların karşılaştırılmasını zorlaştırmaktadır.

İncelenen çalışmalarda değerlendirilen durumlara ek olarak, depolama alanında tespit edilen mikroplastiklerin varlığını etkileyen başka birçok faktör olduğu düşünülmektedir. Bunlar; çevresel faktörler, depolama sahasında bulunan mikroorganizmalar/organizmalar, depolama sahasının özellikleri, ülkelerin gelişmişlik düzeyi, demografik etkiler, ülkenin plastik üretimi/talebi, atık yöntemi bütçesi, ülkelerin plastik atık yönetimi konusunda izlediği politikalarıdır. Çevresel faktörlerden pH ve sıcaklığın plastiklerin bozunma sürecini etkilediği belirlenmiştir. Depolama alanlarında bulunan çeşitli mikroorganizmaların farklı polimer türlerini parçaladığı bildirilmiştir [84], [85]. Buna ek olarak, solucanların depolama sahasındaki hareketiyle birlikte toprak ortamında oluşan gözenekler aracılığıyla mikroplastiklerin taşınımı kolaylaşmaktadır [86]. Depolama sahasının sahip olduğu toprak bileşiminin mikroplastik varlığı üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir. Üst katmanda kil tabakası bulunduran sahalarda oluşan sızıntı sularının akış sürecinin daha yavaş gerçekleştiği bilinmektedir [87]. Bu sebeple, yavaş akış ile depolama sahasında bulunan mikroplastiklerin sızıntı suyuna taşınımı daha yavaş gerçekleşmektedir. Ayrıca, depolama alanlarında bulunan sızdırmaz katman yardımıyla sızıntı sularının arıtma tesislerine uygun şekilde taşınımı gerçekleştirilirken, sızdırmazlık tabakasına sahip olmayan depolama alanlarında oluşan sızıntı suları ve içerdiği çeşitli kirleticiler ve mikroplastiklerin alıcı ortama doğrudan taşınımı gerçekleşmektedir [88]. Gelişmekte olan ülkelerde katı atık yönetiminde büyük problemler yaşandığı bilinmektedir [1]. Bu ülkelerin atık yönetimine öncelik vermemesi ve düşük bütçe ayırmasının bir sonucu olarak, plastik atıkların bertarafı vahşi depolama alanlarında sonlanmaktadır [89]. Depolama sahasına gelen evsel katı atıkların; hizmet edilen nüfusun eğitim düzeyi, atık yönetimi tercihi ve yaş ortalaması gibi çeşitli demografik faktörlerden etkilendiği belirlenmiştir [90]. Buna ek olarak, depolama alanında bertaraf edilen gıda atıklarının da önemli olduğu düşünülmektedir. Golwala ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada, marketlerden temin edilen gıda atıklarının kilogram bazında 300.000 adet mikroplastik içerdiği rapor edilmiştir [91]. Küresel çapta, 2050 yılına kadar 12.000 milyon ton plastik atığın oluşacağı tahmin edilmektedir [76]. Oluşan plastik atıkların büyük çoğunluğunun depolama alanlarında bertaraf edileceği varsayıldığında, yüksek mikroplastik konsantrasyonları ile karşılaşmanın mümkün olacağı öngörülebilmektedir.

Praagh ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada (R_1), bir depolama sahasından meydana gelen yıllık mikroplastik deşarjının 177 kilografa kadar ulaşabildiği bildirilmiştir [33]. Sızıntı sularının, yer altı suyuna ve ardından çeşitli alıcı su ortamlarına ulaşarak kontaminasyona sebep olabileceği tahmin edilmektedir. Bu noktadan hareketle, sızıntı suyunun alıcı su ortamları ve kullanıldığı tarım arazileri için potansiyel bir mikroplastik kaynağı olacağı düşünülmektedir. Bu sebeple, sızıntı suyunun ve kökeni olan depolama sahasının optimum şekilde yönetilmesi önem arz etmektedir.

Mikroplastikler, katı atık depolama sahalarda henüz bir kirletici olarak tanımlanmamaktadır [33]. Buna ek olarak pek çok ülkede, ulusal düzeyde atık yasaının oluşturulmadığı ve atık yönetimi tam anlamıyla uygulanmadığı bilinmektedir [92]. Elde edilen veriler ışığında, mikroplastiklerin sızıntı suyunda bir kirletici olarak tanımlanması, plastik tüketiminin azalmasını sağlayacak teşvikler/kampanyalar oluşturulması, üreticilerin beşikten mezara anlayışı ile hareket etmesi, uluslararası iş birliklerinin sağlanması, gerekli yasaların oluşturulması ve depolama sahası madenciliği ile plastiklerin geri kazanımının sağlanması gibi eylemlerin hayata geçirilmesi gerekliliği sonucuna ulaşmıştır.

IX. KAYNAKLAR

- [1] H. I. Abdel-Shafy and M. S. M. Mansour, "Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization", *Egyptian Journal of Petroleum*, vol. 27, no. 4, pp. 1275–1290, 2018.
- [2] Z. Minghua, F. Xiumin, A. Rovetta, H. Qichang, F. Vicentini, L. Bingkai, A. Giusti, and L. Yi,

- “Municipal solid waste management in Pudong New Area, China”, *Waste Management*, vol. 29, no. 3, pp. 1227–1233, 2009.
- [3] D. N. Beede and D. E. Bloom, “The Economics of Municipal Solid Waste”, *The World Bank Research Observer*, vol. 10, no. 2, pp. 113–150, 1995.
- [4] I. Madon, D. Drev, and J. Likar, “Long-term risk assessments comparing environmental performance of different types of sanitary landfills”, *Waste Management*, vol. 96, pp. 96–107, 2019.
- [5] X. Wang, B. Xie, D. Wu, M. Hassan, and C. Huang, “Characteristics and risks of secondary pollutants generation during compression and transfer of municipal solid waste in Shanghai”, *Waste Management*, vol. 43, pp. 1–8, 2015.
- [6] C. Zhou, W. Fang, W. Xu, A. Cao, and R. Wang, “Characteristics and the recovery potential of plastic wastes obtained from landfill mining”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 80, pp. 80–86, 2014.
- [7] L. Nizzetto, G. Bussi, M. N. Futter, D. Butterfield, and P. G. Whitehead, “A theoretical assessment of microplastic transport in river catchments and their retention by soils and river sediments”, *Environmental science: Processes & Impacts*, vol. 18, no. 8, pp. 1050–1059, 2016.
- [8] Y. Ding, J. Zhao, J. W. Liu, J. Zhou, L. Cheng, J. Zhao, Z. Shao, Ç. Iris, B. Pan, X. Li, and Z. T. Hu, “A review of China’s municipal solid waste (MSW) and comparison with international regions: Management and technologies in treatment and resource utilization”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 293, 126144, 2021.
- [9] Y. Su, Z. Zhang, D. Wu, L. Zhan, H. Shi, and B. Xie, “Occurrence of microplastics in landfill systems and their fate with landfill age”, *Water Research*, vol. 164, 114968, 2019.
- [10] Z. Youcai and L. Ziyang, “Pollution Control and Resource Recovery: Municipal Solid Wastes at Landfill”, *Pollution Control and Resource Recovery: Municipal Solid Wastes at Landfill*, pp. 1–382, 2016.
- [11] C. Arthur, J. E. Baker, and H. Bamford, “Proceedings of the International Research Workshop on the Occurrence, Effects and Fate of Microplastic Marine Debris”, *NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R*, 2009.
- [12] M. Cole, P. Lindeque, C. Halsband, and T. S. Galloway, “Microplastics as contaminants in the marine environment: A review”, *Marine Pollution Bulletin*, vol. 62, no. 12, pp. 2588–2597, 2011.
- [13] Y. Hu, M. Gong, J. Wang, and A. Bassi, “Current research trends on microplastic pollution from wastewater systems: a critical review”, *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, vol. 18, no. 2, pp. 207–230, 2019.
- [14] E. D. Okoffo, S. O’Brien, J. W. O’Brien, B. J. Tschärke, and K. V. Thomas, “Wastewater treatment plants as a source of plastics in the environment: a review of occurrence, methods for identification, quantification and fate”, *Environmental Science: Water Research & Technology*, vol. 5, no. 11, pp. 1908–1931, 2019.
- [15] Z. Xu, Q. Sui, A. Li, M. Sun, L. Zhang, S. Lyu, and W. Zhao, “How to detect small microplastics (20–100 µm) in freshwater, municipal wastewaters and landfill leachates? A trial from sampling to identification”, *Science of the Total Environment*, vol. 733, 139218, 2020.

- [16] O. Y. A. Costa, J. M. Raaijmakers, and E. E. Kuramae, “Microbial extracellular polymeric substances: ecological function and impact on soil aggregation”, *Frontiers in Microbiology*, vol. 9, 1636, 2018.
- [17] S. Mukherjee, S. Mukhopadhyay, M. A. Hashim, and B. Sen Gupta, “Contemporary environmental issues of landfill leachate: assessment and remedies”, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 45, no. 5, pp. 472–590, 2014.
- [18] H. tao Liu, “Achilles heel of environmental risk from recycling of sludge to soil as amendment: A summary in recent ten years (2007-2016)”, *Waste Management*, vol. 56, pp. 575–583, 2016.
- [19] A. Rani, S. Negi, A. Hussain, and S. Kumar, “Treatment of urban municipal landfill leachate utilizing garbage enzyme”, *Bioresource Technology*, vol. 297, 122437, 2020.
- [20] Q. Sui, W. Zhao, X. Cao, S. Lu, Z. Qiu, X. Gu, and G. Yu, “Pharmaceuticals and personal care products in the leachates from a typical landfill reservoir of municipal solid waste in Shanghai, China: Occurrence and removal by a full-scale membrane bioreactor”, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 323, pp. 99–108, 2017.
- [21] H. S. Auta, C. U. Emenike, and S. H. Fauziah, “Distribution and importance of microplastics in the marine environment: A review of the sources, fate, effects, and potential solutions”, *Environment International*, vol. 102, pp. 165–176, 2017.
- [22] H. Bouwmeester, P. C. H. Hollman, and R. J. B. Peters, “Potential health impact of environmentally released micro- and nanoplastics in the human food production Chain: experiences from nanotoxicology”, *Environmental Science and Technology*, vol. 49, no. 15, pp. 8932–8947, 2015.
- [23] N. B. Hartmann, S. Rist, J. Bodin, L. H. S. Jensen, S. N. Schmidt, P. Mayer, A. Meibom, and A. Baun, “Microplastics as vectors for environmental contaminants: exploring sorption, desorption, and transfer to biota”, *Integrated Environmental Assessment and Management*, vol. 13, no. 3, pp. 488–493, 2017.
- [24] M. El-Fadel, A. N. Findikakis, and J. O. Leckie, “Modeling leachate generation and transport in solid waste landfills”, *Environmental Technology*, vol. 18, no. 7, pp. 669–686, 2010.
- [25] J. Islam and N. Singhal, “A laboratory study of landfill-leachate transport in soils”, *Water Research*, vol. 38, no. 8, pp. 2035–2042, 2004.
- [26] N. J. Themelis and P. A. Ulloa, “Methane generation in landfills”, *Renewable Energy*, vol. 32, no. 7, pp. 1243–1257, 2007.
- [27] S. Mor, K. Ravindra, R. P. Dahiya, and A. Chandra, “Leachate characterization and assessment of groundwater pollution near municipal solid waste landfill site”, *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 118, no. 1, pp. 435–456, 2006.
- [28] Z. Zhang, Q. Cui, L. Chen, X. Zhu, S. Zhao, C. Duan, X. Zhang, D. Song, and L. Fang, “A critical review of microplastics in the soil-plant system: distribution, uptake, phytotoxicity and prevention”, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 424, 127750, 2022.
- [29] A. A. De Souza MacHado, C. W. Lau, J. Till, W. Kloas, A. Lehmann, R. Becker, and M. C. Rillig, “Impacts of microplastics on the soil biophysical environment”, *Environmental Science and Technology*, vol. 52, no. 17, pp. 9656–9665, 2018.
- [30] A. A. De Souza Machado, C. W. Lau, W. Kloas, J. Bergmann, J. B. Bachelier, E. Faltin, R.

- Becker, A. S. Görlich, and M. C. Rillig, “Microplastics can change soil properties and affect plant performance”, *Environmental Science and Technology*, vol. 53, no. 10, pp. 6044–6052, 2019.
- [31] E. Huerta Lwanga, H. Gertsen, H. Gooren, P. Peters, T. Salánki, M. Van Der Ploeg, E. Besseling, A. A. Koelmans, and V. Geissen, “Microplastics in the terrestrial ecosystem: implications for *Lumbricus terrestris* (Oligochaeta, Lumbricidae)”, *Environmental Science and Technology*, vol. 50, no. 5, pp. 2685–2691, 2016.
- [32] Z. Zhang, Y. Su, J. Zhu, J. Shi, H. Huang, and B. Xie, “Distribution and removal characteristics of microplastics in different processes of the leachate treatment system”, *Waste Management*, vol. 120, pp. 240–247, 2021.
- [33] M. van Praagh, C. Hartman, and E. Brandmyr, “Microplastics in landfill leachates in the Nordic countries”, Nordic Council of Ministers, Denmark, 2018.
- [34] P. He, L. Chen, L. Shao, H. Zhang, and F. Lü, “Municipal solid waste (MSW) landfill: A source of microplastics? -Evidence of microplastics in landfill leachate”, *Water Research*, vol. 159, pp. 38–45, 2019.
- [35] A. Puthcharoen and S. Leungprasert, “Determination of microplastics in soil and leachate from the landfills”, *Thai Environmental Engineering Journal*, vol. 33, no. 3, pp. 39–46, 2019.
- [36] A. C. Narevski, M. I. Novaković, M. Z. Petrović, I. J. Mihajlović, N. B. Maoduš, and G. V. Vujić, “Occurrence of bisphenol A and microplastics in landfill leachate: lessons from South East Europe”, *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, no. 31, pp. 42196–42203, 2021.
- [37] Nurhasanah, M. R. Cordova, and E. Riani, “Micro- and mesoplastics release from the Indonesian municipal solid waste landfill leachate to the aquatic environment: Case study in Galuga Landfill Area, Indonesia”, *Marine Pollution Bulletin*, vol. 163, 111986, 2021.
- [38] J. Sun, Z. R. Zhu, W. H. Li, X. Yan, L. K. Wang, L. Zhang, J. Jin, X. Dai, and B. J. Ni, “Revisiting microplastics in landfill leachate: unnoticed tiny microplastics and their fate in treatment works”, *Water Research*, vol. 190, 116784, 2021.
- [39] Y. Wan, X. Chen, Q. Liu, H. Hu, C. Wu, and Q. Xue, “Informal landfill contributes to the pollution of microplastics in the surrounding environment”, *Environmental Pollution*, vol. 293, 118586, 2022.
- [40] E. Dümichen, A. K. Barthel, U. Braun, C. G. Bannick, K. Brand, M. Jekel, and R. Senz, “Analysis of polyethylene microplastics in environmental samples, using a thermal decomposition method”, *Water Research*, vol. 85, pp. 451–457, 2015.
- [41] J. Talvitie, A. Mikola, A. Koistinen, and O. Setälä, “Solutions to microplastic pollution – removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies”, *Water Research*, vol. 123, pp. 401–407, 2017.
- [42] A. Dyachenko, J. Mitchell, and N. Arsem, “Extraction and identification of microplastic particles from secondary wastewater treatment plant (WWTP) effluent”, *Analytical Methods*, vol. 9, no. 9, pp. 1412–1418, 2017.
- [43] S. Lasee, J. Mauricio, W. A. Thompson, A. Karnjanapiboonwong, J. Kasumba, S. Subbiah, A. N. Morse, and T. A. Anderson, “Microplastics in a freshwater environment receiving treated wastewater effluent”, *Integrated Environmental Assessment and Management*, vol. 13, no. 3,

pp. 528–532, 2017.

- [44] J. C. Vermaire, C. Pomeroy, S. M. Herczegh, O. Haggart, and M. Murphy, “Microplastic abundance and distribution in the open water and sediment of the Ottawa River, Canada, and its tributaries”, *FACETS*, vol. 2, pp. 301–314, 2017.
- [45] J. C. Prata, J. P. da Costa, A. C. Duarte, and T. Rocha-Santos, “Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: A critical review”, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, vol. 110, pp. 150–159, 2019.
- [46] D. Thomas, B. Schütze, W. M. Heinze, and Z. Steinmetz, “Sample preparation techniques for the analysis of microplastics in soil—a review”, *Sustainability*, vol. 12, no. 21, pp. 1–28, 2020.
- [47] J. Sun, X. Dai, Q. Wang, M. C. M. van Loosdrecht, and B. J. Ni, “Microplastics in wastewater treatment plants: detection, occurrence and removal”, *Water Research*, vol. 152, pp. 21–37, 2019.
- [48] L. Cutroneo, A. Reboa, G. Besio, F. Borgogno, L. Canesi, S. Canuto, M. Dara, F. Enrile, I. Forioso, G. Greco, V. Lenoble, A. Malatesta, S. Mounier, M. Petrillo, R. Rovetta, A. Stocchino, J. Tesan, G. Vagge, and M. Capello, “Microplastics in seawater: sampling strategies, laboratory methodologies, and identification techniques applied to port environment”, *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 27, no. 9, pp. 8938–8952, 2020.
- [49] S. M. Mintenig, I. Int-Veen, M. G. J. Löder, S. Primpke, and G. Gerdt, “Identification of microplastic in effluents of waste water treatment plants using focal plane array-based micro-Fourier-transform infrared imaging”, *Water Research*, vol. 108, pp. 365–372, 2017.
- [50] S. Ziajahromi, P. A. Neale, L. Rintoul, and F. D. L. Leusch, “Wastewater treatment plants as a pathway for microplastics: development of a new approach to sample wastewater-based microplastics”, *Water Research*, vol. 112, pp. 93–99, 2017.
- [51] G. Gatidou, O. S. Arvaniti, and A. S. Stasinakis, “Review on the occurrence and fate of microplastics in sewage treatment plants”, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 367, pp. 504–512, 2019.
- [52] G. Liebezeit and F. Dubaish, “Microplastics in beaches of the East Frisian Islands Spiekeroog and Kachelotplate”, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 89, no. 1, pp. 213–217, 2012.
- [53] M. T. Nuelle, J. H. Dekiff, D. Remy, and E. Fries, “A new analytical approach for monitoring microplastics in marine sediments”, *Environmental Pollution*, vol. 184, pp. 161–169, 2014.
- [54] A. S. Tagg, J. P. Harrison, Y. Ju-Nam, M. Sapp, E. L. Bradley, C. J. Sinclair, and J. J. Ojeda, “Fenton’s reagent for the rapid and efficient isolation of microplastics from wastewater”, *Chemical Communications*, vol. 53, no. 2, pp. 372–375, 2016.
- [55] K. Munno, P. A. Helm, D. A. Jackson, C. Rochman, and A. Sims, “Impacts of temperature and selected chemical digestion methods on microplastic particles”, *Environmental Toxicology and Chemistry*, vol. 37, no. 1, pp. 91–98, 2018.
- [56] F. Stock, C. Kochleus, B. Bänsch-Baltruschat, N. Brennholt, and G. Reifferscheid, “Sampling techniques and preparation methods for microplastic analyses in the aquatic environment – a review”, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, vol. 113, pp. 84–92, 2019.

- [57] M. G. J. Löder and G. Gerdts, “Methodology used for the detection and identification of microplastics—a critical appraisal”, *Marine Anthropogenic Litter*, pp. 201–227, 2015.
- [58] C. B. Crawford and B. Quinn, *Microplastic Pollutants*, Amsterdam, Netherlands: Elsevier Inc., 2016, pp. 1–315.
- [59] M. Lares, M. C. Ncibi, M. Sillanpää, and M. Sillanpää, “Intercomparison study on commonly used methods to determine microplastics in wastewater and sludge samples”, *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 26, no. 12, pp. 12109–12122, 2019.
- [60] J. Blumenröder, P. Sechet, J. E. Kakkonen, and M. G. J. Hartl, “Microplastic contamination of intertidal sediments of Scapa Flow, Orkney: a first assessment”, *Marine Pollution Bulletin*, vol. 124, no. 1, pp. 112–120, 2017.
- [61] A. Cincinelli, C. Scopetani, D. Chelazzi, E. Lombardini, T. Martellini, A. Katsoyiannis, M. C. Fossi, and S. Corsolini, “Microplastic in the surface waters of the Ross Sea (Antarctica): Occurrence, distribution and characterization by FTIR”, *Chemosphere*, vol. 175, pp. 391–400, 2017.
- [62] E. Fries, J. H. Dekiff, J. Willmeyer, M. T. Nuelle, M. Ebert, and D. Remy, “Identification of polymer types and additives in marine microplastic particles using pyrolysis-GC/MS and scanning electron microscopy”, *Environmental Science: Processes & Impacts*, vol. 15, no. 10, pp. 1949–1956, 2013.
- [63] B. De Witte, L. Devriese, K. Bekaert, S. Hoffman, G. Vandermeersch, K. Cooreman, and J. Robbens, “Quality assessment of the blue mussel (*Mytilus edulis*): comparison between commercial and wild types”, *Marine Pollution Bulletin*, vol. 85, no. 1, pp. 146–155, 2014.
- [64] W. J. Shim, S. H. Hong, and S. E. Eo, “Identification methods in microplastic analysis: a review”, *Analytical Methods*, vol. 9, no. 9, pp. 1384–1391, 2017.
- [65] Q. Qiu, Z. Tan, J. Wang, J. Peng, M. Li, and Z. Zhan, “Extraction, enumeration and identification methods for monitoring microplastics in the environment”, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 176, pp. 102–109, 2016.
- [66] T. A. Lastovina and A. P. Budnyk, “A review of methods for extraction, removal, and stimulated degradation of microplastics”, *Journal of Water Process Engineering*, vol. 43, 102209, 2021.
- [67] A. M. Elert, R. Becker, E. Duemichen, P. Eisentraut, J. Falkenhagen, H. Sturm, and U. Braun, “Comparison of different methods for MP detection: What can we learn from them, and why asking the right question before measurements matters?”, *Environmental Pollution*, vol. 231, no. 2, pp. 1256–1264, 2017.
- [68] A. L. Andrady and M. A. Neal, “Applications and societal benefits of plastics”, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 364, no. 1526, pp. 1977–1984, 2009.
- [69] M. Lares, M. C. Ncibi, M. Sillanpää, and M. Sillanpää, “Occurrence, identification and removal of microplastic particles and fibers in conventional activated sludge process and advanced MBR technology”, *Water Research*, vol. 133, pp. 236–246, 2018.
- [70] A. G. J. Driedger, H. H. Dürr, K. Mitchell, and P. Van Cappellen, “Plastic debris in the Laurentian Great Lakes: A review”, *Journal of Great Lakes Research*, vol. 41, no. 1, pp. 9–19, 2015.

- [71] R. Geyer, J. R. Jambeck, and K. L. Law, “Production, use, and fate of all plastics ever made”, *Science Advances*, vol. 3, e1700782, 2017.
- [72] M. R. Cordova, I. S. Nurhati, E. Riani, Nurhasanah, and M. Y. Iswari, “Unprecedented plastic-made personal protective equipment (PPE) debris in river outlets into Jakarta Bay during COVID-19 pandemic”, *Chemosphere*, vol. 268, 129360, 2021.
- [73] F. De Falco, G. Gentile, E. Di Pace, M. Avella, and M. Cocca, “Quantification of microfibrils released during washing of synthetic clothes in real conditions and at lab scale”, *The European Physical Journal Plus*, vol. 133, no. 7, pp. 1–4, 2018.
- [74] Plastic Europe - Association of Plastics Manufacturers, “Plastics—the Facts 2020”, Belgium, pp. 1–64, 2020.
- [75] I. Acosta-Coley and J. Olivero-Verbel, “Microplastic resin pellets on an urban tropical beach in Colombia”, *Environmental monitoring and assessment*, vol. 187, no. 7:435, 2015.
- [76] I. E. Napper and R. C. Thompson, “Release of synthetic microplastic plastic fibres from domestic washing machines: Effects of fabric type and washing conditions”, *Marine Pollution Bulletin*, vol. 112, no. 1–2, pp. 39–45, 2016.
- [77] M. A. Browne, P. Crump, S. J. Niven, E. Teuten, A. Tonkin, T. Galloway, and R. Thompson, “Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks”, *Environmental Science and Technology*, vol. 45, no. 21, pp. 9175–9179, 2011.
- [78] U. Pirc, M. Vidmar, A. Mozer, and A. Kržan, “Emissions of microplastic fibers from microfiber fleece during domestic washing”, *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 23, no. 21, pp. 22206–22211, 2016.
- [79] M. R. Cordova and I. S. Nurhati, “Major sources and monthly variations in the release of land-derived marine debris from the Greater Jakarta area, Indonesia”, *Scientific Reports*, vol. 9, 18730, 2019.
- [80] H. Lee and Y. Kim, “Treatment characteristics of microplastics at biological sewage treatment facilities in Korea”, *Marine Pollution Bulletin*, vol. 137, pp. 1–8, 2018.
- [81] S. Lambert, C. Sinclair, and A. Boxall, “Occurrence, degradation, and effect of polymer-based materials in the environment”, *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 227, pp. 1–53, 2014.
- [82] V. Hidalgo-Ruz, L. Gutow, R. C. Thompson, and M. Thiel, “Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification”, *Environmental Science and Technology*, vol. 46, no. 6, pp. 3060–3075, 2012.
- [83] R. L. Lozano and J. Mouat, “Marine litter in the North-East Atlantic Region: Assessment and priorities for response”, London, United Kingdom, pp. 127, 2009.
- [84] S. Yoshida, K. Hiraga, T. Takehana, I. Taniguchi, H. Yamaji, Y. Maeda, K. Toyohara, K. Miyamoto, Y. Kimura, and K. Oda, “A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate)”, *Science*, vol. 351, no. 6278, pp. 1196–1199, 2016.
- [85] A. A. Shah, F. Hasan, A. Hameed, and S. Ahmed, “Biological degradation of plastics: a comprehensive review”, *Biotechnology Advances*, vol. 26, no. 3, pp. 246–265, 2008.

- [86] M. Yu, M. van der Ploeg, E. H. Lwanga, X. Yang, S. Zhang, X. Ma, C. J. Ritsema, and V. Geissen, “Leaching of microplastics by preferential flow in earthworm (*Lumbricus terrestris*) burrows”, *Environmental Chemistry*, vol. 16, no. 1, pp. 31–40, 2019.
- [87] K. Gopinath, S. Seshachalam, K. Neelavannan, V. Anburaj, M. Rachel, S. Ravi, M. Bharath, and H. Achyuthan, “Quantification of microplastic in Red Hills Lake of Chennai city, Tamil Nadu, India”, *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 27, no. 26, pp. 33297–33306, 2020.
- [88] D. Mmereki, A. Baldwin, and B. Li, “A comparative analysis of solid waste management in developed, developing and lesser developed countries”, vol. 5, no. 1, pp. 120–141, 2016.
- [89] Y. Lyons, M. L. Neo, A. Lim, Y. L. Y. L. Tay, and D. Vu Hai, “United Nations Environment Programme, Coordinating Body on the Seas of East Asia, & National University of Singapore Status of Research, Legal and Policy Efforts on Marine Plastics in ASEAN +3: A Gap Analysis at the Interface of Science, Law and Policy”, <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/33383>, 2020.
- [90] T. Tadesse, A. Ruijs, and F. Hagos, “Household waste disposal in Mekelle city, Northern Ethiopia”, *Waste Management*, vol. 28, no. 10, pp. 2003–2012, 2008.
- [91] H. Golwala, X. Zhang, S. M. Iskander, and A. L. Smith, “Solid waste: an overlooked source of microplastics to the environment”, *Science of the Total Environment*, vol. 769, 144581, 2021.
- [92] C. Meidiana and T. Gamse, “The new waste law: challenging opportunity for future landfill operation in Indonesia”, *Waste Management and Research*, vol. 29, no. 1, pp. 20–29, 2011.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Cam Küre Takviyeli Polimer Kompozitlerde UV Yaşlandırma ve Uyumlaştırıcı Etkisinin İncelenmesi

 Elif ULUTAŞ^{a,*},  Münir TAŞDEMİR^a

^a Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Marmara Üniversitesi, İstanbul, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: elif.ulutas@marmara.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1184670

Öz

Maleik anhidrit aşıllı polipropilen (MAPP) oranı ve UV (Ultraviyole) yaşlandırma işleminin polipropilen (PP)/cam küreler (GS) polimer kompozitlerinin mekanik ve morfolojik özellikleri üzerindeki etkileri üzerine bir araştırma yapılmıştır. UV yaşlandırma, 70 °C sıcaklıkta 0, 15, 30 gün olacak şekilde üç farklı bekletme süresinde gerçekleştirilmiştir. Polipropilen matris içerisine %1, 5, 10 ve 15 oranlarında katılan cam küre parçacıkları ekstrüderde karıştırılarak homojen bir karışım elde edilmiştir. Ekstrüderde elde edilen karışım kırıcıdan geçirilerek granül formuna getirilmiştir, ardından enjeksiyon makinesinde standartlara uygun şekilde test numuneleri kalıplanmıştır. MAPP ve UV tutma süresinin, PP/cam küreler kompozitlerinin elastik modülü, akma mukavemeti, kopmadaki çekme mukavemetleri, %uzama, İzod darbe mukavemeti, sertlik, yoğunluk ve morfolojik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. MAPP ve UV tutma süresinin, kompozitlerin elastiklik modülü ve yoğunluğu gibi mekanik özellikleri üzerinde marjinal etkileri vardır. Sonuçlar, artan MAPP içeriğinin ve UV tutma süresinin elastiklik modülü ve yoğunluğunun artmasına neden olduğunu, buna karşın UV tutma süresi arttıkça İzod darbe dayanımı ve %uzamanın azaldığını göstermiştir. MAPP içeriği kompozitin termal davranışına etki ederek vicat yumuşama sıcaklığı ve ısıl çarpılma sıcaklığı-HDT değerlerinde önemli derecede artışa sebep olmuştur. Ayrıca, bu deneylerde cam küre parçacıklarının mikro yapısını ve malzeme dağılımını değerlendirmek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemesi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Mekanik özellikler, Polipropilen, Polimer kompozitler, UV yaşlandırma, Cam küre.

Investigation of UV Aging and Compatibilizer Effects on Glass Sphere Reinforced Polymer Composites

ABSTRACT

A study was conducted on the maleic anhydride grafted polypropylene (MAPP) ratio and the effects of UV (ultraviolet) annealing on the mechanical and morphological properties of polypropylene (PP)/glass spheres (GS) polymer composites. The UV annealing process was carried out at 70 °C in three different holding times of 0, 15 and 30 days. A homogeneous mixture was obtained by mixing glass sphere particles in the polypropylene matrix at the rate of 1, 5, 10 and 15% in the extruder. The mixture obtained in the extruder was passed through the crusher to form granules, then the test samples were molded in the injection machine in accordance with the standards. The effects of MAPP and UV retention time on the elastic modulus, yield strength, tensile strength at break, % elongation, Izod impact strength, hardness, density and morphological properties of PP/glass sphere composites were investigated. MAPP and UV retention time have marginal effects on the mechanical properties of composites such as modulus of elasticity and density. The results showed that increasing MAPP content and UV retention time caused an increase in modulus of elasticity and density, whereas Izod impact strength and % elongation decreased as UV retention time increased. The MAPP content affected the thermal behavior of the composite,

causing a significant increase in vicat softening temperature and heat deflection temperature-HDT values. In addition, scanning electron microscope (SEM) examination was performed to evaluate the microstructure and material distribution of the glass sphere particles in these experiments.

Keywords: Mechanical properties, Polypropylene, Polymer composites, UV aging, Glass sphere.

I. GİRİŞ

Çağlardan beri endüstriyel açıdan yarar sağlayan hafif ve yüksek mukavemetli malzemelerin geliştirilmesi için dünya çapında araştırmalar yapılmaktadır. Çalışma prensibi yakıt tüketime bağlı olan her aracın taşıma kapasitesi, yakıt verimliliği ve hızı gövdenin ağırlığına bağlı olarak değişir. Otomotiv, havacılık ve savunma gibi bazı endüstriler ağırlığı azaltmak ve mukavemeti artırmak amacıyla polimer kompozitlerin geliştirilmesine kendilerini adanmışlardır [1]. Otomobiller, köprüler ve uçaklar gibi birçok kullanım alanına sahip olan polimer kompozitler, hafiflikleri, düşük maliyetleri, mükemmel korozyon direnci ve kolay işlenebilmeleri nedeniyle günlük yaşamın ve endüstrinin bir parçası haline gelmiştir [2-6]. Parçacıklarla güçlendirilmiş çeşitli polimer kompozitler, ısıtıcılar, elektrotlar ve yüksek sıcaklıkta termal kararlılığa sahip kompozitler gibi çok çeşitli endüstriyel uygulama alanlarına sahiptir [7, 8]. Düşük yoğunluk, iyi esnek ömür, sterilize edilebilirlik, iyi yüzey sertliği, çok iyi aşınma direnci ve mükemmel elektriksel özellikler gibi olağanüstü özelliklere sahip olan polipropilen endüstriyel ve yapısal uygulamalarda kullanılmaktadır [9-11]. Ayrıca maliyeti düşük olan bu polimer, kimyasal direnci ve inert oluşu sayesinde çok yönlü kullanıma sahip bir termoplastiktir. Ancak polipropilenin üretimi sırasındaki yüksek büzülme aralığı ve düşük darbe dayanımı gibi dezavantajları bulunmaktadır. Polimerlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için polimer matrisine çeşitli dolgu maddeleri ve katkı maddeleri eklenmektedir. PP'nin performansı, cam küreler gibi sert, inorganik dolgu maddeleri eklenerek geliştirilebilir [12-15]. İçi boş cam küreler, hafif oluşu, yüksek sertlikleri, düşük ısı iletkenlikleri ve elektriksel özellikleri nedeniyle kompozit üretimi alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca polimerlerde dolgu maddesi olarak da kullanılan cam küreler, kompozitlerin özelliklerini arttırmanın ve maliyeti düşürmenin kabul edilen bir yolu olmuştur [13,16]. Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri, dolgu ve katkı maddelerinin hacim oranlarına, toz veya dolgu gibi biçimlerine ve bu parçacıklar ile matris arasındaki ara yüzey uyumluluğuna bağlıdır [17]. Polimerik bir uyumlaştırıcı madde olarak maleik anhidrit aşıllı polipropilen matris ve dolgu arasındaki uyumluluğu arttırmak için kullanılır [18].

Taşdemir ve arkadaşı [19] yapmış oldukları çalışmada cam küreler, talk ve kalsit partiküllerinin yüksek yoğunluklu polietilen üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Ekstrüzyonla birleştirme ve enjeksiyon kalıplama kullanarak hazırlanan ağırlıkça %5, 10, 15 ve 20 dolgu içeriğine sahip polimer kompozitlerin mekanik, morfolojik ve termal özellikleri incelenmiştir. Yapılan testler doğrultusunda; dolgu içeriğinin artmasıyla elastiklik modülünün, vicat yumuşama sıcaklığının, hdt ve sertlik miktarının arttığını gözlemlemişlerdir. Bunun aksine, akma ve çekme mukavemetinde parçacıkların aglomerasyonundan kaynaklanan bir düşüş meydana gelmiştir. Çelebi çalışmasında [20]; eriyik ekstrüzyon yöntemi ile hazırladığı içi boş cam mikroküreler dolgululu polipropilen kompozitlerin performansını incelemek için morfolojik, çekme ve termal iletkenlik testleri yapmıştır. Matris ve dolgu arasındaki uyumluluğu arttırmak için cam kürelerin yüzeyi 3-(Trimetoksisilil) propil metakrilat (TMSM) silan birleştirme maddesi ile modifiye edilmiştir. Yapılan testlerin sonuçları, birleştirme maddesi kullanıldığında cam küreler ve polipropilen matris arasındaki ara yüzey bölmesinde iyileşmeler olduğunu göstermiştir. Uyumlaştırıcı olarak kullanılan silan miktarı arttıkça kompozitlerin elastiklik modülü artmıştır ve taneciklerin homojen dağılımı mekanik özelliklerde bir gelişme sağlamıştır. Mizera ve arkadaşları [21] yapısında %5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60 oranlarında içi boş cam küreler bulduran poliüretan elastomer kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan deney sonuçlarına göre saf poliüretan en yüksek sertliğe sahiptir. Cam kürelerin eklenmesi tokluğu azalmıştır, ancak artan dolgu miktarı ile sertlik de artış göstermiştir. Statik çekme testi sonucunda yapısında %15 oranında cam küre bulduran kompozitler %100 uzamadaki en yüksek mukavemet değerine sahiptir. Ayrıca dolgu miktarındaki artışa bağlı olarak kompozitlerin çekme mukavemeti, %uzaması ve elastiklik modülü de artış göstermiştir.

Bu araştırmada polipropilen, MAPP ve cam küre tozu kompozitleri hazırlanmıştır. MAPP ve cam küre tozu oranının polimer kompozitlerin mekanik ve morfolojik özellikleri üzerindeki etkileri sunulmuştur. Kompozitleri üretmek için PP'ye cam küre tozu (ağırlıkça %20) ilave edilmiştir. MAPP, kompozit üretmek için PP'ye dört farklı konsantrasyonda (ağırlıkça %1, 5, 10 ve 15) ilave edilmiştir. MAPP ve UV yaşlandırmanın polipropilen/cam küre polimer kompozitlerinin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri üzerine bir araştırma yapılmıştır. UV yaşlandırma 70 °C sıcaklıkta 0, 15 ve 30 gün olmak üzere üç farklı bekletme süresi için gerçekleştirilmiştir.

II. DENEYSEL PROSEDÜRLER

Yapılan araştırma kapsamında beş farklı polimer kompozit hazırlanmıştır. Oluşturulan polipropilen/cam küre/maleik anhidrit açılı polipropilen (PP/GS/MAPP) polimer kompozitlerinin bileşimleri Tablo 1'de verilmiştir. Çalışmada kullanılan PP (Moplen EP 3307) Lyondell Basell tarafından temin edilmiştir ve yoğunluğu 0.900 g/cm³, ergime akış indeksi (MFI) değerı 15 g/10dk (230°C, 2,16 Kg) ve ısıl çarpılma sıcaklığı (0.45 MPa, tavsız) 95.0 °C'dir. RockTron International (Bristol-Birleşik Krallık) tarafından temin edilen cam kürelerin (MinTron 7) nem içeriği ve partikül özgül ağırlığı sırasıyla <0,5 ve 2,2-2,4 g/cm³, partikül boyutu dağılımı ise (d50) 20-35 µm'dir

Tablo 1. PP/GS/MAPP polimer kompozitlerinin içerik dağılımı

Polipropilen (ağırlıkça %)	Cam Küre (ağırlıkça %)	Maleik anhidrit-g-PP (ağırlıkça %)
80	20	-
79	20	1
75	20	5
70	20	10
65	20	15

Polipropilen, cam küreler ve maleik anhidrit eriyik karıştırmadan önce bir vakumlu fırında 24 saat boyunca 105 °C sıcaklıkta kurutuldu. Bileşimlerin mekanik karıştırılması, ilk olarak 20 dk boyunca LB-5601 marka bir sıvı-katı karıştırıcı (The Patterson-Kelley Co., Inc. ABD) kullanılarak yapıldı. Çeşitli oranlardaki PP/GS/MAPP polimer kompozitler, Microsan marka ekstrüder (Microsan Instrument Inc. Turkey) ile 190-210 °C sıcaklıkları arasında 15 bar basınçta ve 20 rpm dönüş hızında üretilmiştir. Polimer kompozitler ekstrüzyondan sonra 24 saat 105 °C sıcaklıkta vakumlu etüvde kurutuldu. Daha sonra enjeksiyon kalıplama ile test numuneleri üretilmiştir. Enjeksiyon makinesi çalışma şartları; sıcaklık 190-210 °C, basınç 90-100 bar ve vida hızı 20 rpm olarak belirlenmiştir. Kalıplanmış ekme plakalarının elastiklik modülü, akma-gerilme mukavemeti ve % uzama değerleri ASTM D638 standardına göre Zwick marka çekme test cihazı (Almanya) kullanılarak oda sıcaklığında ve 50 mm/dk hızında ölçülmüştür. Her bileşim için yedi numune test edilmiştir. Sertlik testi, Zwick sertlik test cihazı ile ASTM D2240 standardına göre yapılmıştır. Kırılma davranışını araştırmak için, Zwick B5113 darbe test cihazı (Almanya) ile ASTM D256 standardına göre oda sıcaklığında İzod darbe testi numunelere çentik açılarak yapılmıştır. Yoğunluk tayini ISO 2781 test standardına göre her bileşim için üç ölçüm alınarak yapılmıştır. UV yaşlandırma, ASTM D 5208 standardına göre şekil 1'de verilen Devotrans marka n ısıtmalı UV fırınında yapılmıştır. UV yaşlandırma sıcaklığı 70 °C ve UV uygulama süresi 15 ve 30 gün olarak belirlenmiştir. Işık mesafesi 50 mm olup, Osram 300 W ultra-vitalux tipi lamba kullanılmıştır.

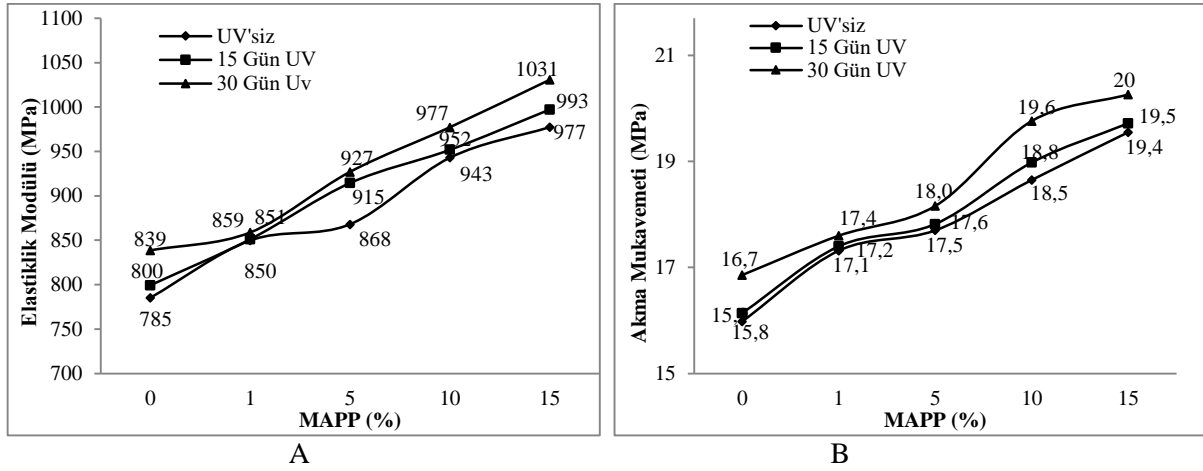


Şekil 1. UV yaşlandırma fırını

PP/GS/MAPP polimer kompozitlerinin kırık yüzeyleri, elektriksel yüklenmeyi önlemek için Polaron SC7640 marka yüksek çözünürlüklü püskürtmeli kaplayıcı (İngiltere) ile 20 Å kalınlığında altın-paladyum (Au) karışımı ile kaplandı. Hazırlanan numunelerin yüzeyleri JEOL-JSM 5910 LV (JEOL Ltd., Tokyo, Japonya) marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile 20 kV hızlanma voltajında gözlemlendi.

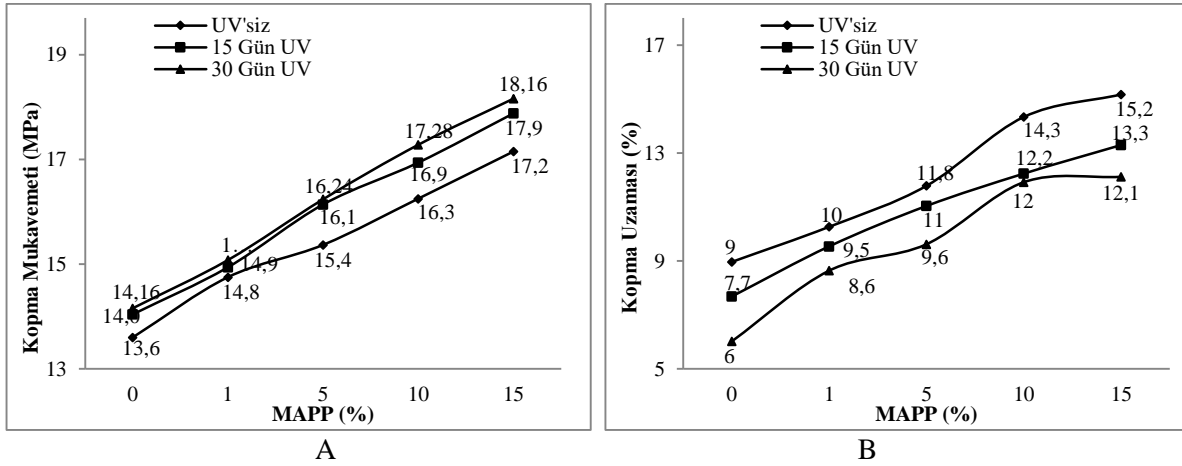
III. BULGULAR ve TARTIŞMA

Elastiklik modülü ile polipropilen/cam küreler polimer kompozitlerinin maleik anhidrit aşılınmış polipropilen yüzdesi arasındaki ilişki Şekil 2-A'da gösterilmektedir. MAPP'nin PP/GS matrisine dahil edilmesiyle, kompozitin esneklik modülünün arttığı görülmüştür. UV yaşlandırma yapılmayan ve yapısında %0, 1, 5, 10, 15, 15 MAPP barındıran numunelerin elastiklik modülü sırasıyla 785, 850, 868, 943, 977 MPa olarak ölçülmüştür. PP/GS (80/20) polimer kompozitinde MAPP konsantrasyonunun %15 oranında artırılmasıyla elastiklik modülünün %24 arttığı görülmüştür. Benzer sonuçlar diğer gruplarda da bulunmuştur. Yapılan çalışmalarda UV tutma süresinin polimer kompozitlerin elastiklik modülünü etkilediği görülmüştür. Örneğin; UV uygulanmamış, 15 ve 30 gün UV uygulanmış PP/GS/MAPP (65/20/15) polimer kompozitlerinin elastiklik modülü sırasıyla 977, 993 ve 1031 MPa olarak ölçülmüştür. UV tutma süresinin artmasıyla kompozitlerin elastiklik modülü artmaktadır. Akma mukavemeti ve polipropilen/cam küreler polimer kompozitlerinin maleik anhidrit aşılınmış polipropilen yüzdesi arasındaki ilişki Şekil 2-B'de gösterilmiştir. MAPP'in PP/GS matrisine dahil edilmesiyle, kompozitlerin akma mukavemetinin arttığı görülmüştür. Örneğin, UV yaşlandırma yapılmamış kompozitlerde %0, 1, 5, 10, 15 MAPP ilavesiyle akma mukavemeti sırasıyla 15.8, 17.1, 17.5, 18.5, 19.3 MPa olarak ölçülmüştür. UV uygulanmamış grupta PP/GS (80/20) polimer kompozitine kıyasla, ağırlıkça %15 MAPP konsantrasyonu olan kompozitlerin akma mukavemeti %23 oranında artmıştır. Benzer sonuçlar diğer gruplarda da bulunmuştur. UV tutma süresinin akma mukavemetine etkisi incelendiğinde; süresinin artmasıyla kompozitlerin akma mukavemetinin arttığı görülmüştür. Örneğin; PP/GS/MAPP (65/20/15) kompozitinin UV uygulanmamış, 15 ve 30 gün UV uygulanan numunelerinin akma mukavemeti sırasıyla 19.3, 19.4 ve 20 MPa olarak ölçülmüştür. Souissi ve arkadaşları [22] çalışmalarında uyumlaştırıcı olarak kullandıkları MAPP'nin ürettiği oldukları polipropilen/zeytin odununu bazlı ahşap polimer kompozitlerin üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada kompozitlere uygulanan ısı ve MAPP işlemleri mekanik özellikleri iyileştirmiştir. Ağırlıkça %30 oranında zeytin odunu kullandıkları kompozitlerde, uyumlaştırıcı takviyesiyle elastiklik modülünün arttığını gözlemlemişlerdir.



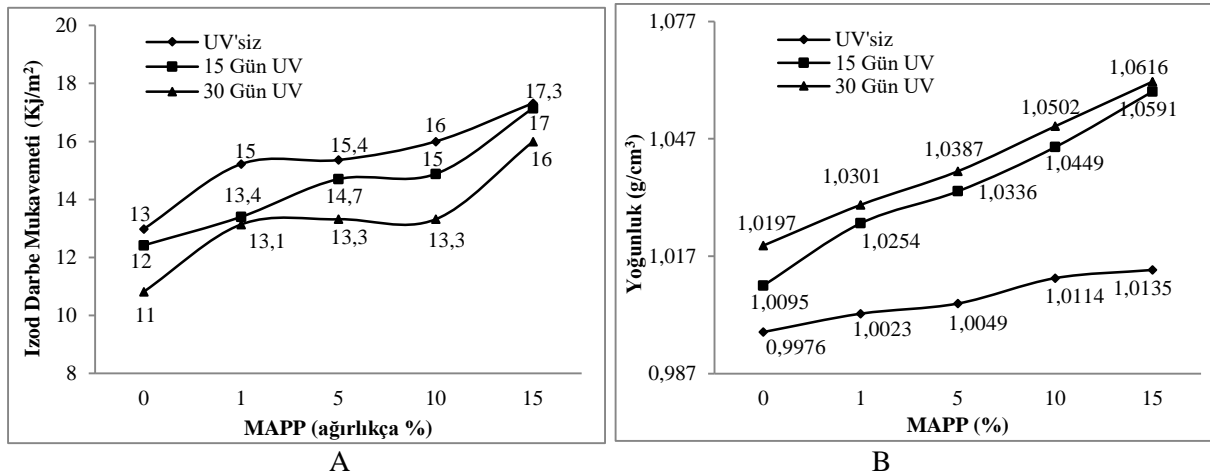
Şekil 2. PP/GS/MAPP polimer kompozitlerinin elastiklik modülü ve akma mukavemeti değerleri

Çekme mukavemeti ile polipropilen/cam küreler polimer kompozitlerinin maleik anhidrit aşlanmış polipropilen yüzdesi arasındaki ilişki Şekil 3-A'da gösterilmiştir. MAPP'nin PP/GS matrisine dahil edilmesiyle, kompozitin gerilme mukavemetinin arttığı bulunmuştur. Örneğin, UV uygulanmamış grupta yapısında %0, 1, 5, 10, 15, 15 oranında MAPP bulunduran kompozitlerin çekme mukavemeti sırasıyla 13.6, 14.8, 15.4, 16.3, 17.2 MPa olarak ölçülmüştür. PP/GS (80/20) polimer kompozitinde MAPP konsantrasyonunun %15 oranında artırılmasıyla çekme mukavemetinin %17 arttığı görülmüştür. Benzer sonuçlar diğer gruplarda da bulunmuştur. UV tutma süresinin çekme mukavemetine etkisi incelendiğinde; süresinin artmasıyla kompozitlerin çekme mukavemetinin arttığı görülmüştür. Örneğin, PP/GS/MAP (65/20/15) polimer kompozitlerinin UV uygulanmamış, 15 ve 30 gün UV yaşlandırma yapılmış numunelerinin çekme mukavemeti değerleri sırasıyla 17.2, 17.9 ve 18.2 MPa olarak ölçülmüştür. Patankar ve arkadaşları [23] sodyum borosilikat içi boş cam küreler ve maleik anhidrit aşıllı polietilen (PE-g-MAH) miktarının yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) üzerindeki etkilerini incelemiştir. Yapılan çekme testi sonuçlarına göre bu çalışma ile benzer etkiler rapor edilmiştir. Cam küre miktarındaki artış ve %1 oranında PE-g-MAH ilavesi kompozitin yalnızca mukavemetini arttırmakla kalmaz, aynı zamanda kompozitin kırılma gerilmesinde iyileşme sağlar. Abdelwabah ve arkadaşları [24] enjeksiyon kalıplama yöntemi ile polipropilene ve ligninden oluşan biyokompozitler üretmişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada uyumlaştırıcının ara yüzey yapışmasının kompozitler üzerindeki etkilerini incelemiştir. Uyumlaştırıcı olarak kullandıkları MAPP'nin PP/lignin biyokompozitine dahil edilmesiyle çekme mukavemetinin arttığını gözlemlemişlerdir. Ara yüzey yapışmasını arttırdığından dolayı kompozitlerde kullanılan uyumlaştırıcı maddenin mekanik özellikleri olumlu yönde etkilediğini belirtmişlerdir. Kotek ve arkadaşları [25] 80 °C sıcaklıktaki UV ışığının 24, 96, 264, 720 saat süreyle polipropilen üzerindeki etkisini incelemiştir. Polimere ait çekme mukavemeti sonuçlarının, yaşlandırma süresi artışına bağlı olarak arttığı rapor edilmiştir.



Şekil 3. PP/GS/MAPP polimer kompozitlerinin çekme mukavemeti ve % uzama değerleri

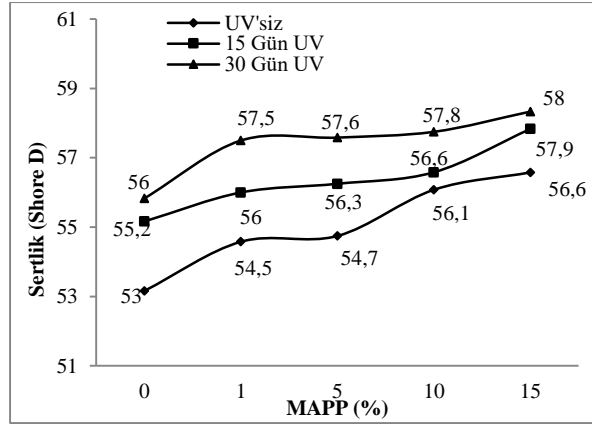
Polipropilen/cam küreler polimer kompozitlerinin maleik anhidrit aşıllı polipropilen yüzdesi ile uzama yüzdesi arasındaki ilişki Şekil 3-B'de gösterilmektedir. MAPP'nin PP/GS matrisine dahil edilmesiyle kompozitin % uzamasının arttığı görülmüştür. Örneğin, UV uygulanmamış grupta yapısında %0, 1, 5, 10, 15, 15 oranında MAPP bulunduran kompozitlerin çekme mukavemeti sırasıyla %6, 8,6, 9,6, 12, 12,1 olarak ölçülmüştür. PP/GS (80/20) polimer kompozitinde MAPP konsantrasyonunun %15 oranında artırılmasıyla % uzama değerinin %102 azaldığı görülmüştür. Diğer gruplarda da benzer sonuçlar bulunmuştur. Ayrıca yapılan çalışmalarda UV tutma süresinin de % uzamayı etkilediği tespit edilmiştir. Örneğin, PP/GS/MAP (65/20/15) polimer kompozitlerinin UV uygulanmamış, 15 ve 30 gün UV yaşlandırma yapılmış numunelerin % uzama değerleri sırasıyla %15,2, 13,3 ve 12,1 olarak ölçülmüştür. UV tutma süresi arttıkça kompozitlerin % uzama değerleri azalmıştır. Taşdemir [27] akrilonikril bütadien stiren (ABS)/kırmızı çamur polimer kompozitinin mekanik, termal ve morfolojik özellikleri üzerine kırmızı çamur oranı ve UV yaşlandırmanın etkileri ile ilgili bir araştırma yapmıştır. Yapmış olduğu çekme testi sonuçları UV yaşlandırmanın % uzama değerleri için etkili olduğunu göstermektedir. Bu çalışma ile benzer şekilde sonuçlanan değerler; UV tutma süresi 100 saatten 200 saate çıktıkça uzama miktarının azaldığını göstermektedir.



Şekil 4. PP/GS/MAPP polimer kompozitlerinin İzod darbe dayanımı ve yoğunluk değerleri

İzod darbe mukavemeti ile polipropilen/cam küreler polimer kompozitlerinin maleik anhidrit aşıllı polipropilen yüzdesi arasındaki ilişki Şekil 4-A'da gösterilmektedir. MAPP'nin PP/GS matrisine dahil edilmesiyle kompozitin İzod darbe dayanımının arttığı bulunmuştur. Örneğin, UV uygulanmamış grupta yapısında %0, 1, 5, 10, 15, 15 oranında MAPP bulunduran kompozitlerin İzod darbe mukavemeti değerleri sırasıyla 11, 13,1, 13,3, 13,3, 16 kJ/m² olarak ölçülmüştür. PP/GS (80/20) polimer

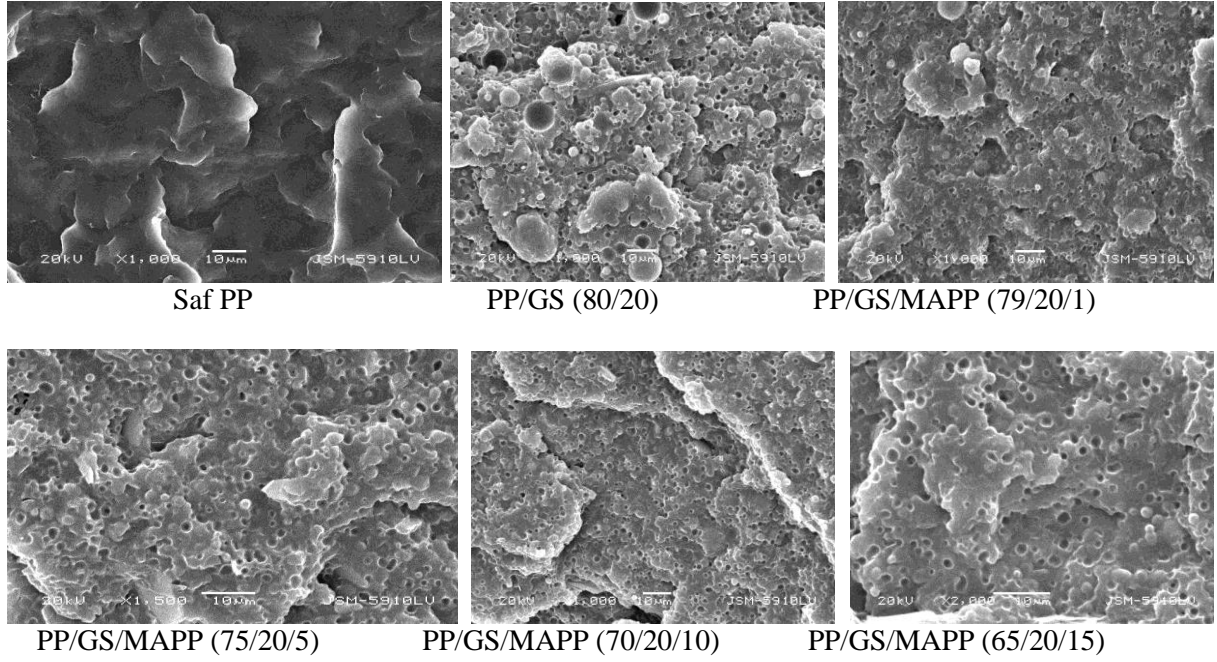
kompozitinde MAPP konsantrasyonunun %15 oranında artırılmasıyla İzod darbe dayanımının %45 artırdığı görülmüştür. Diğer gruplarda da benzer sonuçlar bulunmuştur. Yapılan çalışmalarda, UV tutma süresi ve İzod darbe dayanımı arasında ters orantılı bir ilişki olduğu görülmüştür. PP/GS/MAPP (65/20/15) numunelerine UV uygulanmadan, 15 ve 30 gün UV uygulanarak darbe testi yapılmış ve sonuçlar sırasıyla 17.3, 17 ve 16 kJ/m² olarak ölçülmüştür. UV tutma süresi arttıkça kompozitlerin İzod darbe dayanımı azalmaktadır. Souissi ve arkadaşları [22] yapmış oldukları Charpy darbe testi sonuçlarında, bir uyumlaştırıcı olarak kullandıkları MAPP'nin ve birlikte uyguladıkları ısıl işlemin, ahşap polimer kompozitlerin darbe dayanımını iyileştirdiğini tespit etmişlerdir. Polipropilen/cam küreler polimer kompozitlerinin maleik anhidrit aşıllı polipropilenin yoğunluğu ve yüzdesi arasındaki ilişki Şekil 4-B'de gösterilmektedir. MAPP'nin PP/GS matrisine dahil edilmesiyle kompozitin yoğunluğunun arttığı bulunmuştur. Örneğin, UV uygulanmamış grupta yapısında %0, 1, 5, 10, 15, 15 oranında MAPP bulunduran kompozitlerin yoğunlukları sırasıyla 0.9976, 1.0023, 1.0049, 1.0114, 1.0135 (g/cm³) olarak ölçülmüştür. PP/GS (80/20) polimer kompozitinde MAPP konsantrasyonunun %15 oranında artırılmasıyla yoğunluğun %4 arttığı görülmüştür. Diğer gruplarda da benzer sonuçlar bulunmuştur. Yapılan çalışmalarda UV tutma süresi arttıkça kompozitlerin yoğunluğu da arttığı görülmüştür. Örneğin, PP/GS/MAP (65/20/15) polimer kompozitlerinin UV uygulanmamış, 15 ve 30 gün UV yaşlandırma yapılmış numunelerin yoğunluk değerleri sırasıyla 1.0135, 1.0591 ve 1.0616 g/cm³ olarak ölçülmüştür.



Şekil 5. PP/GS/MAPP polimer kompozitlerinin sertlik değerleri

Polipropilen/cam küreler polimer kompozitlerinin maleik anhidrit aşıllı polipropilenin sertliği ile yüzdesi arasındaki ilişki Şekil 5'te gösterilmiştir. MAPP'nin PP/GS matrisine dahil edilmesiyle kompozitin sertliğinin arttığı bulunmuştur. Örneğin, UV uygulanmamış grupta yapısında %0, 1, 5, 10, 15, 15 oranında MAPP bulunduran kompozitlerin sertliklerinin sırasıyla 53, 54.5, 54.7, 56.1, 56.6 Shore D olarak ölçülmüştür. PP/GS (80/20) polimer kompozitinde MAPP konsantrasyonunun %15 oranında artırılmasıyla sertliğinin %7 arttığı görülmüştür. Diğer gruplarda da benzer sonuçlar bulunmuştur. UV etkisini incelemek için yapılan testlerde PP/GS/MAPP (65/20/15), polimer kompozitlerinin UV uygulanmamış, 15 ve 30 gün UV yaşlandırma yapılmış numunelerinin sertlik değerlerinin sırasıyla 56.6, 57.9 ve 58 Shore D olarak ölçülmüştür. UV tutma süresi arttıkça kompozitlerin sertliği de artmaktadır. Mizera ve arkadaşlarının [21] yapmış olduğu sertlik testinin sonuçları bu çalışma ile paralellik göstermektedir. Poliüretan içerisinde bulunan cam kürelerin miktarı arttıkça elastomer kompozitlerin sertlik miktarı artmıştır. Taşdemir [26] HDPE/kırmızı çamur polimer kompozitine 100, 200 ve 300 saat UV ışığı uygulayarak kompozitin mekanik özelliklerinde meydana gelen değişiklikleri incelemiştir. UV yaşlandırma süresi 100 saatten 300 saate çıktıkça HDPE/kırmızı çamur polimer kompozitlerin sertliğinin arttığı rapor edilmiştir. Taşdemir'e ait sertlik sonuçları bu çalışma ile benzer etkiye sahiptir.

Sem çalışması, MAPP ve cam kürelerin PP matrisindeki dağılımını incelemek için gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'da verilen sem görüntüleri incelendiğinde, polimer matrisin kırık yüzeylerinde cam küreler ve PP matris arasındaki sınırlar ve kontrast açıkça görülebilir. Mikrograflar, cam küre parçacıklarının polimer matrisinin kırık yüzeyleri üzerinde homojen bir şekilde dağıldığını göstermektedir.



Şekil 6. PP/GS/MAPP polimer kompozitlerinin SEM fotoğrafları

IV. SONUÇLAR

MAPP ve UV tutma süresinin, PP/GS kompozitlerinin elastiklik modülü, akma dayanımı, kopmada çekme dayanımı, % uzama, İzod darbe dayanımı, sertlik, yoğunluk ve morfolojik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. MAPP ve UV tutma süresinin, kompozitlerin elastiklik modülü ve İzod darbe dayanımı gibi mekanik özellikleri üzerinde marjinal etkileri vardır. Aşağıdaki sonuçlar elde edildi:

1. MAPP'nin PP/GS matrisine dahil edilmesiyle kompozitin elastiklik modülünün arttığı bulunmuştur. UV tutma süresi, kompozitlerin elastiklik modülünü de artırmaktadır.
2. MAPP'nin PP/GS matrisine dahil edilmesiyle kompozitin akma ve çekme mukavemetinin arttığı bulunmuştur. UV tutma süresi, kompozitlerin verimini artırır ve çekme mukavemeti de artar.
3. MAPP'nin PP/GS matrisine dahil edilmesiyle kompozitin %uzamasının arttığı bulunmuştur. Öte yandan UV tutma süresi arttıkça kompozitlerin %uzamaları azalmaktadır.
4. PP/GS matrisine MAPP'nin eklenmesiyle kompozitin İzod darbe dayanımının arttığı tespit edilmiştir. Öte yandan UV tutma süresi arttıkça kompozitlerin İzod darbe dayanımı azalmaktadır.
5. MAPP'nin PP/GS matrisine dahil edilmesiyle kompozitin yoğunluğunun ve sertliğinin arttığı bulunmuştur. UV tutma süresi, kompozitlerin yoğunluğunu ve sertliğini artırır.
6. Yapılan testler yapıya MAPP bağdaştırıcısının dahil edilmesiyle mekanik özelliklerin iyileşmesi, bağdaştırıcının yapışmayı iyileştirmedeki başarısını doğrulamaktadır ve dolayısıyla PP/cam küre polimer kompozitlerinin mekanik özelliklerini iyileştirmede MAPP kritik bir rol oynamıştır.
7. Mikrograflar, cam küre parçacıklarının PP matrisinin kırık yüzeyleri üzerinde homojen bir şekilde dağıldığını göstermektedir.

V. KAYNAKLAR

- [1] N. Kumar, S. Mireja, V. Khandelwal, B. Arun, and G. Manik, "Light-weight high-strength hollow glass microspheres and bamboo fiber based hybrid polypropylene composite: A strength analysis and morphological study," *Composites Part B: Engineering*, vol. 109, pp. 277-285, 2017.
- [2] Y. P. Mamunya, V. V. Davydenko, P. Pissis, and E. V. Lebedev, "Electrical and thermal conductivity of polymers filled with metal powders," *European polymer Journal*, vol. 38, no. 9, pp. 1887-1897, 2002.
- [3] Y. Guo, K. Ruan, X. Shi, X. Yang and J. Gu, "Factors affecting thermal conductivities of the polymers and polymer composites: A review," *Composites Science and Technology*, vol. 193, doi:108134, 2020.
- [4] K. Ruan, X. Shi, Y. Guo, and J. Gu, "Interfacial thermal resistance in thermally conductive polymer composites: A review," *Composites Communications*, vol. 22, doi:100518, 2020.
- [5] I. H. Tavman, "Thermal and mechanical properties of copper powder filled poly (ethylene) composites," *Powder Technology*, vol. 91, pp. 63-67, 1997.
- [6] I. H. Tavman, "Thermal and mechanical properties of aluminum powder-filled high-density polyethylene composites," *Journal Applied Polymer Science*, vol. 62, no. 12, pp. 2161-2167, 1996.
- [7] K. Jung-it, P. H. Kang and Y. C. Nho, "Positive temperature coefficient behavior of polymer composites having a high melting temperature," *Journal Applied Polymer Science*, vol. 92, no. 1, pp. 394-401, 2004.
- [8] S. Nikkeshi, and M. T. Kudo, "Dynamic viscoelastic properties and thermal properties of Ni powder-epoxy resin composites," *Journal Applied Polymer Science*, vol. 69, no. 13, pp. 2593-2598, 1998.
- [9] A. J. Nunez, P. C. Sturm, J. M. Kenny, M. I. Aranguren, N. E. Marcovich and M. M. Reboredo, "Mechanical characterization of polypropylene-wood flour composites," *Journal Applied Polymer Science*, vol. 88, pp. 1420-1428, 2003.
- [10] W. Liu, L. Cheng and S. Li, "Review of electrical properties for polypropylene based nanocomposite," *Composites Communications*, vol. 10, pp. 221-225, 2018.
- [11] M. Taşdemir, "Mechanical properties of polypropylene biocomposites with sea weeds," *Nanomaterials Science & Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 22-29, 2019.
- [12] S. H. Yetgin, "Effect of multi walled carbon nanotube on mechanical, thermal and rheological properties of polypropylene," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 5, pp. 4725-4735, 2019.
- [13] O. Yagcı, B. Gumus, M. Taşdemir, "Thermal, structural and dynamical mechanical properties of hollow glass sphere-reinforced polypropylene composites," *Polymer Bulletin*, vol. 78, pp. 3089-3101, 2021.
- [14] F. Özkaya, F. Özen, E. İlhan ve S. Aslanlar, "Cam küre takviyeli polipropilen kompozit malzemelerin delaminasyon faktörünün deneysel olarak incelenmesi," *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 19, ss. 843-849, 2019.

- [15] S. H. Yegin, "Effect of multi walled carbon nanotube on mechanical, thermal and rheological properties of polypropylene," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 5, pp. 4725-4735, 2019.
- [16] B. Gumus, "Effect of montmorillonite clay on physical properties of HDPE/HGS composites," *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 21, pp. 735-744, 2021.
- [17] Y. P. Mamunya, H. Zois, L. Apekis and E. V. Lebedev, "Influence of pressure on the electrical conductivity of metal powders used as fillers in polymer composites," *Powder & Technology*, vol. 140, pp. 49-55, 2004.
- [18] Z. Razak, A. B. Sulong, N. Muhamad, C. H. Haron, M. K. Fadzly, M. D. Radzi, D. Tholibon, I. Tharazi and N. F. Ismail, "The Effects of maleic anhydride grafted PP (MAPP) on the mechanical properties of injection moulded Kenaf/CNTs/PP composites," *Sains Malaysiana*, vol. 47, no. 6, pp. 1285-1291, 2018
- [19] M. Tasdemir and U. Yerleşen, "Study on the friction and wear behaviors of modified hdpe/glass spheres composites," *Romanian Journal of Materials*, vol. 45, no. 1, pp. 59-66, 2015.
- [20] H. Celebi, "Thermal conductivity and tensile properties of hollow glass microsphere/polypropylene composites," *Anadolu University Journal of Science and Technology A- Applied Sciences and Engineering*, vol. 18, no. 3, pp. 746-753, 2017.
- [21] K. Mizera, M. Chrzaszcz and J. Ryszkowska, "Thermal and mechanical properties of ureaurethane elastomer composites with hollow glass spheres," *Polymer Composites*, vol. 39, no. 6, pp. 2019-2028, 2018.
- [22] I. Souissi, F. Lachtar, A. Elloumi and A. Bergeret, "Properties of wood polymer composites based on polypropylene/olive wood flour: effects of fiber treatment and compatibilizer," *Iranian Polymer Journal*, 2022. doi: 10.1007/s13726-022-01089-x
- [23] S. N. Patankar, A. Das and Y. A. Kranov, "Interface engineering via compatibilization in HDPE composite reinforced with sodium borosilicate hollow glass microspheres," *Compos Part A Applied Science Manufacturing*, vol. 40, no. 6-7, pp. 897-903, 2009.
- [24] M. A. Abdelwahab, M. Misra and A. K. Mohanty, "Injection molded biocomposites from polypropylene and lignin: Effect of compatibilizers on interfacial adhesion and performance," *Industrial Crops and Products*, vol. 132, pp. 497-510, 2019.
- [25] J. Kotek, I. Kelnar, J. Baldrian and M. Raab, "Structural transformations of isotactic polypropylene induced by heating and UV light," *European Polymer Journal*, vol. 40, no. 12, pp. 2731-2738, 2004.
- [26] M. Tasdemir, "High density polyethylene red mud polymer composites effect of UV annealing," *ICAMS 2016-6 th International Conference on Advanced Materials and Systems*, Romania, 2016, pp. 171-176.
- [27] M. Tasdemir, "Acrylonitrile butadiene styrene/red mud polymer composites: ultraviolet annealing," *Advanced Science, Engineering and Medicine*, vol. 8, no. 10, pp. 804-809, 2016



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Doğu Karadeniz Bölgesi Doğal Taşlarının Beton Üretiminde Agrega Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi

Ercüment KOÇ^a, Tekin YILMAZ^{b,*}, Ali Osman YILMAZ^c

^a Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, TÜRKİYE

^b Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, Gümüşhane MYO, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane, TÜRKİYE

^c Maden Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: yilmaz@gumushane.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1206778

ÖZ

Agrega, inşaat endüstrisinin en önemli yapı malzemelerinden birisi olan beton içerisinde oldukça yüksek miktarda (%65-80) bulunur. Bu bağlamda, bu çalışma, Doğu Karadeniz Bölgesi'nin farklı lokasyonlarından getirilen doğal taşların (andezit, bazalt, çamurtaşı ve traverten) beton üretiminde agrega olarak kullanılabilirliklerinin araştırılması üzerine kurgulanmıştır. Bu amaçla, farklı numune şekillerinde (silindirik karot, küp ve kırılmış agrega) hazırlanan doğal taş numuneleri üzerinde bazı fiziksel ve mekanik testler gerçekleştirilmiş ve testlerden elde edilen bulgular TS 706 EN 12620+A1 (2009) tarafından belirlenen agrega standartları açısından değerlendirilmiştir. Bulgular, fiziksel ve mekanik özellikler açısından en yüksek performansı sağlayan bazalt kayacının beton agregası olarak kullanımının uygun olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Doğu Karadeniz bölgesi, Doğal taş, Agrega, Beton

Investigation of the Usability of Eastern Black Sea Region Natural Stones as Aggregate in Concrete Production

ABSTRACT

Aggregate is found in a very high amount (65-80%) in concrete, which is one of the most substantial building materials of the construction sector. In this sense, this research was designed on the investigation of the usability of natural stones (andesite, basalt, mudstone and travertine) brought from different locations of the Eastern Black Sea Region as aggregates in concrete production. Within this scope, some physical and mechanical tests were implemented on the natural stone samples prepared at different sample shapes (cylindrical core, cube and crushed aggregate), and the findings obtained from tests were evaluated in terms of aggregate standards determined by TS 706 EN 12620+A1 (2009). The findings showed that basalt rock, which provides the most favorable physical and mechanical performance, is suitable for usage as concrete aggregate.

Keywords: Eastern Black Sea region, Natural stones, Aggregate, Concrete

I. GİRİŞ

Çimento, agrega, su ve katkı maddelerinin (priz hızlandırıcı, akışkanlaştırıcı vb.) belirli oranlarda karıştırılmasıyla üretilen beton, i) onu oluşturan malzemelerin doğada fazlaca bulunması ve/veya kolay ve ucuz bir şekilde temin edilebilmesi, ii) gelişmiş bir teknolojiye ihtiyaç duyulmadan kolayca üretilebilmesi, iii) işlenerek istenilen şeklin kolayca verilebilmesi, iv) priz aldıktan sonra dayanımının yüksek olması ve v) çelik ve ahşap malzemelere kıyasla hem daha ekonomik hem de dış etkilere karşı daha dirençli olması gibi avantajlarından dolayı günümüzde inşaat endüstrisinin olmazsa olmaz malzemelerinden birisidir [1], [2]. Ülkemiz nüfusunun artmasına paralel olarak şehirleşme ve dolayısıyla yapılaşma hızının giderek artması yapıların kapasitesinde bir artışa sebep olmakta ve böylece deprem, sel, vb. doğal afetlere karşı yapıların güvenliği açısından betonun kalitesi kritik önem taşımaktadır [3], [4]. İnşa edilen yapıların dayanım ve durabilite açısından üst seviyede performans sergilemesi, üretilen betonun fiziksel, kimyasal, mineralojik özelliklerine ve bunların etkileyeceği en önemli özellik olan mekanik özelliklerine bağlıdır [2].

Üretilen betonun performans özellikleri (mukavemet, durabilite, işlenebilirlik, vb.) üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahip olan malzeme ise beton hacminin yaklaşık olarak %65-80'ini kapsayan agregadır [5]. Agregada, organik yapıda olmayan ve genellikle -100 mm boyutlu kırılmış ve/veya kırılmamış doğal veya yapay tanelerin (kum, çakıl ve kırmataş karışımı) oluşturduğu malzeme yığınıdır [3], [6], [7]. Agregada malzemeleri direkt taneli olarak deniz kıyıları, alüvyon deltaları, akarsu yatakları gibi yerlerden ya da büyük boyutlu kaya kütleleri için delme-patlatma işlemi ve ardından kırma-eleme-boyutlandırma işlemleri (yani taşocağı işletmeciliği yöntemi) kullanılarak elde edilebilir [3], [8]. Beton hacminin büyük bir kısmını oluşturan agreganın kullanım amacı sadece daha ekonomik bir beton üretmek değil, aynı zamanda teknik anlamda kaliteli bir beton üretimine katkı sağlamaktır. Şöyle ki; çimentoya kıyasla daha ucuz olan ve daha kolay temin edilebilen agrega, atmosferik koşullara, farklı kimyasal etkilere ve aşınma problemlerine karşı daha dayanıklıdır ve ayrıca çimentonun priz alma sürecinde oluşması muhtemel olumsuz hacimsel değişiklikler (şişme-rötre vb.) agregada oluşmaz [1]. Mekanik yönden kaliteli bir beton üretimi konusunda agreganın fiziksel (sertlik, dayanıklılık, özgül ağırlık, birim hacim ağırlık, gözeneklilik, boşluk oranı, tane şekli, en büyük tane boyutu, nem durumu, vb.), kimyasal ve mineralojik özellikleri ve petrografik yapısı oldukça etkili parametrelerdir [7], [9].

Beton karışımları içerisinde doğal agrega olarak çoğunlukla kum, çakıl ve kırmataştan yararlanılırken, yüksek fırın cürufu, perlit, pişmiş kil ve uçucu kül gibi yapay agregaların kullanımı epey yaygınlaşmıştır [5], [10]. Bununla birlikte, günümüze kadar granit [5], bazalt [9], genleşmiş kil [11], atık beton [12], pomza [13], mermer [5], [14], kireçtaşı [3], [15]-[17] ve daha birçok farklı malzemenin beton agregası olarak kullanılabilirliğine yönelik çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda elde edilen bulguların TS 706 EN 12620+A1 [18] standardına göre değerlendirilmesi sonucunda incelenen agrega malzemelerinin betonda kullanılabilir olduğu belirlenmiştir. Manisa bölgesinden alınan kayaların sınıflandırılması ve beton agregası olabilirliğini araştıran Solak [2], agrega sınıfının dolomitik kireçtaşı olduğunu ve yıkanmış agrega içeren betonun dayanımının yıkanmamış agregalı betona kıyasla daha yüksek olduğunu bildirmiştir. Diğer bir araştırma çalışmasında, kendiliğinden yerleşen betonda andezit, granit ve mermer malzemelerinin agrega olarak kullanım potansiyelleri incelenmiş ve bulgular; beton performansının söz konusu agregaların kullanım oranı ve bağlayıcı miktarına göre değiştiğini, taze beton özelliklerini olumsuz etkilediğini, buna rağmen, agregaların düşük oranlarda (%25 gibi) kullanımının dayanımı olumlu etkilediğini göstermiştir [5].

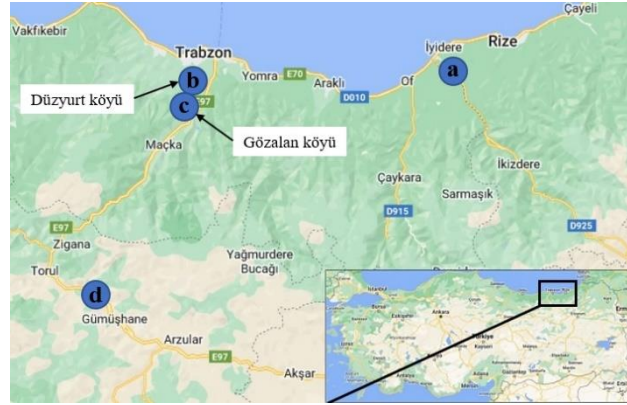
Farklı jeolojik oluşumlar bakımından oldukça zengin konumda bulunan ülkemiz agrega konusunda hammadde ihtiyacını rahatlıkla karşılayabilmektedir. Bu bağlamda, inşaat sektöründe, hızlı şehirleşmenin (yapılaşmanın) yol açtığı daha fazla agrega ihtiyacı hem hammaddenin yakın çevrelerde rahatlıkla bulunabilmesi hem de maliyetleri en düşük seviyede tutma gayretleri sebebiyle çoğunlukla bölgedeki (yöredeki) kaynaklardan karşılanmaktadır [5]. Bu anlamda, bu çalışma, Doğu Karadeniz Bölgesi sınırlarında yer alan farklı bölgelerden temin edilen doğal taşların (andezit, bazalt, çamurtaşı ve traverten) fiziksel ve mekanik testlerinin gerçekleştirilerek TS 706 EN 12620+A1 [18] tarafından

önerilen kriterler uyarınca beton üretiminde agrega olarak kullanılabilirliğinin incelenmesini içermektedir.

II. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

A. MALZEMELER

Bu çalışmada kullanılan doğal taşlar; Şekil 1’de sunulan yer bulduru haritasında gösterildiği üzere sırasıyla Rize-İyidere ilçesi (andezit) (a), Trabzon-Düzyurt köyü (bazalt) (b), Trabzon-Gözalın köyü (çamurtaş) (c) ve Gümüşhane’de (traverten) (d) bulunan sahalardan ve ocaklardan her kayaç grubundan yeterli miktarda (ortalama 50 kg’lık 3’er tane kaya bloğu) olacak şekilde temin edilmiş ve laboratuvara getirilmiştir.



Şekil 1. Numunelerin alındığı bölgelerin lokasyon haritası

B. KAYAÇ NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI

Lokasyon haritasında (Şekil 1) gösterilen saha ve/veya ocaklardan getirilen 4 farklı doğal taşın (andezit, bazalt, çamurtaş ve traverten) agrega olarak kullanılabilirliğini araştırmak üzere gerçekleştirilecek yoğunluk, birim hacim ağırlık (BHA), tek eksenli basınç dayanımı (TEBD), ultrasonik P-dalga hızı (UPV) ve donma-çözülme direnci (D-ÇD) deneyleri için her kayaçtan 5 adet NX çaplı silindirik karot numuneleri alınmış ve alınan karot numunelerinin alt-üst yüzeyleri kaya kesme testeresi kullanılarak düzeltilmiştir. Ayrıca, böhme aşınma dayanımı (BAD) deneyi için her kayaç türünde 4’er adet küp (7x7x7 cm) numune hazırlanmıştır. Silindirik ve küp numunelerinin hazırlanmasının ardından her kayaç grubunda kalan malzemeler agrega üzerinde gerçekleştirilecek fiziksel ve mekanik testler (tane yoğunluğu, su emme, gevşek yığın yoğunluğu, ince madde oranı, mikro-deval aşınma dayanımı ve kırılmalık direnci) için kırma-eleme-boyutlandırma işlemlerine tabi tutulmuştur. Beton üretiminde kullanılması planlanan doğal taşların agrega olarak kullanılabilirliğini araştırmak üzere kayaçların sahip oldukları yapısal özelliklerin belirlenmesi için silindirik, küp ve agrega numuneleri üzerinde Tablo 1’de verilen testler/analizler gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Kayaçlar üzerinde gerçekleştirilen testler

Fiziksel testler	Mekanik testler
1) Yoğunluk ve birim hacim ağırlık	1) Ultrasonik P-dalga hızı
2) Tane yoğunluğu ve su emme	2) Tek eksenli basınç dayanımı
3) Gevşek yığın yoğunluğu ve boşluk hacmi	3) Böhme aşınma dayanımı
4) İnce madde oranı	4) Mikro-deval aşınma dayanımı
5) Donma-çözülme direnci	5) Kırılmalık (Parçalanma) direnci

C. FİZİKSEL TESTLER

C. 1. Yoğunluk-Birim Hacim Ağırlık

Betonda agrega olarak kullanılabilirlikleri araştırılan 4 farklı doğal taşın ISRM [19] tarafından önerilen yöntemle göre yoğunluk (Y) ve birim hacim ağırlık (BHA) testlerinin gerçekleştirilmesi için önceden hazırlanan silindirik karot numunelerinin boy (L) ve çap (D) değerleri kumpas yardımıyla ölçülmüş ve bu değerler kullanılarak numunelerin hacimleri (V) hesaplanmıştır. Ardından tüm karot numunelerinin ağırlıkları (W) hassas terazide tartılmıştır. Hacimleri ve ağırlıkları belirlenen numunelerin Y ve BHA sonuçları sırasıyla Eş. 1 ve 2 vasıtasıyla hesaplanmıştır. Bu testlerde her bir doğal taş numunesi için 3 adet karot numunesi kullanılmış ve bunların ortalaması sonuçları oluşturmuştur.

$$Y \text{ (g/cm}^3\text{)} = W \div V \quad (1)$$

$$\text{BHA (kN/m}^3\text{)} = \rho \times 9.81 \quad (2)$$

C. 2. Tane Yoğunluğu ve Su Emme

DeneySEL çalışmalarda kullanılan doğal taşlardan elde edilen iri (4-31.5 mm) ve ince (0-4 mm) agregaların tane yoğunluğu (TY) ve su emme (SE) testleri TS EN 1097-6 [20] standardı çerçevesinde tel sepet ekipmanı ve piknometre kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İri agregaların TY ve SE testleri için öncelikle tel sepetin boş ağırlığı (W_1) tartılmış, ardından hazırlanan agrega numuneleri su dolu kap içerisine doldurularak yabancı maddelerin ve tozun uzaklaştırılması için yıkanmış ve 24 saat boyunca oda sıcaklığında bekletilmiştir. Sonrasında agrega tanelerinin yüzeyi kurutularak doymuş kuru yüzey ağırlıkları (W_2) belirlenmiştir. Ardından her bir agrega numunesi su dolu kova içerisinde bulunan tel sepete doldurulmuş ve tel sepet kova içerisinde suya (≥ 5 cm) batırılarak suya doymuş numunelerin sudaki ağırlıkları (W_3) ölçülmüştür. Son olarak sepette alınan numuneler etüvde kurutularak kuru ağırlıkları (W_4) tartılmıştır. İnce agregalar için ise sırasıyla piknometre boş ağırlığı (P_1), piknometre + numune ağırlığı (P_2), piknometre + numune + saf su ağırlığı (P_3), ve piknometre + saf su ağırlığı (P_4) ölçülmüştür. Son olarak, ilgili eşitlikler yardımıyla her bir doğal taşta ait iri ve ince agrega numunesinin TY ve SE değerleri hesaplanmıştır.

$$\text{TY}_{\text{iri}} \text{ (g/cm}^3\text{)} = W_4 \div [W_2 - (W_3 - W_1)] \quad (3)$$

$$\text{TY}_{\text{ince}} \text{ (g/cm}^3\text{)} = [(P_2 - P_1) \times \rho_{\text{su}}] \div [(P_4 + P_2) - (P_1 + P_3)] \quad (4)$$

$$\text{SE (\%)} = [(W_2 - W_4) \div W_4] \times 100 \quad (5)$$

C. 3. Gevşek Yığın Yoğunluk ve Boşluk Hacmi

TS 1097-3 [21] standardında önerildiği üzere gerçekleştirilen gevşek yığın yoğunluk (GY) ve boşluk hacmi (BH) testleri için önceden hazırlanmış 4 farklı doğal taşta ait agrega malzemeleri $110 \pm 5^\circ\text{C}$ sıcaklığa sahip etüvde kurutulmuştur. Ardından deneyde kullanılacak ölçü kabının (kuru ve temiz) boş ağırlığı (W_1) tartılmış, deneyde gerekli olan ağırlığın %120-150'si arasında bir ağırlığa sahip her bir agrega numunesi ölçü kabına sırayla doldurulmuş, kabın üst yüzeyindeki fazla malzemeler uzaklaştırılarak yüzey düzeltilmiş ve son olarak tartım işlemleri (W_2) yapılmıştır. Malzemelerin GY ve BH değerleri aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{GY} (\rho_p; \text{g/cm}^3) = (W_2 - W_1) \div V_k \quad (6)$$

$$\text{BH (\%)} = [(\rho_p - \rho_b) \div \rho_p] \times 100 \quad (7)$$

Eşitliklerde bulunan bilinmeyenler aşağıda açıklanmıştır.

W_1 : Boş ölçü kabı kütlesi (kg)

V_k : Ölçü kabının hacmidir (L)

W_2 : Ölçü kabı ve numune kütlesi (kg)

ρ_b : Kurutulmuş tane yoğunluğu (g/cm^3)

C. 4. İnce Madde Oranı

TS EN 933-8+A1 [22] standardı çerçevesinde gerçekleştirilen agrega ince madde oranı tayini; 0.063 mm kare göz açıklığına sahip elekten geçen malzeme ağırlığının yüzdesinin toplam agrega ağırlığı yüzdesine oranı olarak ifade edilmektedir ve Eşit. 8 vasıtasıyla hesaplanmaktadır.

$$\text{İMO (\%)} = W_{-0.063} \div W_T \quad (8)$$

Eşitliklerde bulunan bilinmeyenler aşağıda açıklanmıştır.

$m_{\text{İMO}}$:Agrega ince madde oranı (%)

$W_{-0.063}$:0.063 mm'lik elekten geçen malzeme ağırlığı (kg)

W_T :Toplam agrega ağırlığı (kg)

C. 5. Donma-Çözülme Direnci

Bu deney kapsamında TS EN 12371 [23] standardı uyarınca uygulanan genel prosedür; i) hazırlanan silindirik numunelerin donma-çözülme kabine yerleştirilmeden önce etüvde (4 saat) kurutulmasını ve soğutulmasını, ii) numunelerin hassas terazi vasıtasıyla ağırlıklarının (W_1) ölçülmesini, iii) numunelerin saf su dolu beherler içerisinde 12 saat boyunca bekletilmesini, iv) numunelerin -18 ve +32°C sıcaklık aralığında programlanan donma-çözülme kabinde (1 döngü= 12 saat ve toplam 10 döngü) kalmasını, v) donma-çözülme kabinden çıkarılan numunelerin etüvde (24 saat) kurutulmasını ve soğutulmasını ve vi) numunelerin hassas terazi vasıtasıyla deney sonundaki ağırlıklarının (W_2) ölçülmesini içermektedir. Deney sonrasında numunelerde meydana gelmesi muhtemel ağırlık kaybı (AK, %) sonuçları aşağıda belirtilen formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{AK (\%)} = [(W_1 - W_2) \div W_1] \times 100 \quad (9)$$

D. MEKANİK TESTLER

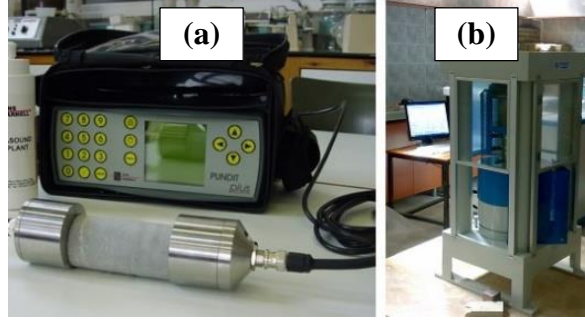
D. 1. Ultrasonik P- Dalga Hızı Testi

Beton üretiminde agrega olarak kullanılabilirliği araştırılan 4 farklı doğal taşın (andezit, bazalt, çamurtaşı ve traverten) ultrasonik P- dalga hızı (UPV) testleri, her doğal taş için hazırlanan 5 adet karot numunesi üzerinde ASTM D 2845 [24] standartlarına uygun olarak Pundit-Plus model (sinyal süresi hassaslığı= 0.1 μs ve sinyal frekansı= 54 kHz) test cihazı ile doğrudan iletim (geçiş) tekniği kullanılarak yapılmıştır (Şekil 2a). Testler öncesinde her karot numunesinin boyu (uzunluk= L) kumpas ile ölçülmüştür. Ardından okumalar alınarak en düşük geçiş süresi (t) test sonucu olarak kaydedilmiş ve aşağıdaki eşitlik yardımıyla her doğal taşın UPV değerleri belirlenmiştir. Sonuçlar Tablo 2'de verilen UPV sınıflamasına göre değerlendirilmiştir.

$$\text{UPV (m/s)} = L / t \quad (10)$$

Tablo 2. Ultrasonik P- dalga hızı [25] ve basınç dayanımı [26] testine göre kayaçların sınıflandırılması

UPV değeri (m/s)	Hız sınıfı	TEBD değeri (MPa)	Dayanım sınıfı
<2500	Çok düşük	1-25	Çok düşük dayanımlı
2500-3500	Düşük	25-50	Düşük dayanımlı
3500-4000	Orta	50-100	Orta dayanımlı
4000-5000	Yüksek	100-200	Yüksek dayanımlı
>5000	Çok yüksek	>200	Çok yüksek dayanımlı



Şekil 2. Ultrasonik P- dalga hızı (UPV) (a) ve tek eksenli basınç dayanımı (TEBD) (b) testlerinin görünümü

D. 2. Tek Eksenli Basınç Dayanımı

UPV ölçümleri yapılan ve NX (54.7 mm) tipi (boy: L)/çap: D)= 2.5) karot numuneleri üzerinde bilgisayar kontrollü pres (maksimum yük kapasitesi= 3000 kN ve yükleme hızı= 1kN/s) ünitesi vasıtasıyla tek eksenli basınç dayanımı (TEBD) testleri gerçekleştirilmiştir [27] (Şekil 2b). Her doğal taş için 5 adet karot numunesi test edilmiş ve sonuçlar ortalama değer olarak sunulmuştur.

D. 3. Böhme Aşınma Dayanımı

Kayaçların yüzeyindeki aşındırıcı maddeler ve sürtünmeler kaynaklı meydana gelen aşınmaya karşı gösterdikleri direncin tespit edilebilmesi amacıyla gerçekleştirilen böhme aşınma dayanımı (BAD) deneyi için 4 farklı doğal taş grubuna ait 3'er tane küp (7x7x7 cm) numune hazırlanmıştır [28]. Ardından böhme aşındırma diski üzerine aşındırıcı malzeme dökülmüş ve her numune 294±3 N'luk aşındırma kuvveti altında 30±1 devir/dakika hızla 22 tur ve 20 aşınma periyodu (toplam 440 tur) boyunca döndürülerek hacimlerdeki azalma ölçülmüştür. Hacimdeki azalmaya bağlı olarak her bir doğal taşın BAD değeri aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$\Delta V (\text{cm}^3/50 \text{ cm}^2) = \Delta m / P \quad (11)$$

Formülde; $\Delta V (\text{cm}^3/50 \text{ cm}^2)$, toplam hacim kaybını, $\Delta m (\text{g}/50 \text{ cm}^2)$, toplam ağırlık kaybını ve $P (\text{g}/\text{cm}^3)$, numune yoğunluğunu ifade etmektedir.

D. 4. Mikro-Deval Aşınma Dayanımı

Hem kaba hem de ince agregalar üzerinde uygulanabilen Mikro-Deval aşınma deneyi; agreganın aşınma dayanımını belirlemek için yapılmaktadır [29]. Deneyde kullanılmak üzere her doğal taş grubu için 10-14 mm aralığında (%30-40'ı <11.2 mm) tane boyutuna sahip 500 g ağırlıklı 2 deney numunesi hazırlanmıştır. Her deney numunesi, 5000 g ağırlığında çelik bilye içeren tambur içerisine yerleştirilerek üzerine 2.5 L su eklenmiştir. Mikro-Deval cihazına yerleştirilen tamburlar 12000 devir (100 devir/dakika) olacak şekilde döndürülmüştür. Deney tamamlandıktan sonra tambur içindeki bilyeler uzaklaştırılmış, agrega numuneleri titizlikle yıkanmış ve ardından 110±5°C sıcaklığa sahip etüvde kurutulmuştur. Her bir doğal taş grubuna ait kurutulmuş 2 deney numunesi ayrı bir şekilde 1.6 mm göz açıklıklı elek vasıtasıyla elenerek elek üstünde kalan numune (m) tartılmıştır. Aşınma dayanımı testlerine tabi tutulan agrega numunelerinin mikro-deval aşınma değerleri Eş. 12 kullanılarak belirlenmiştir.

$$\text{M-DA} (\%) = (500 - m) \div 5 \quad (12)$$

D. 5. Kırılgenlik (Parçalanma) Direnci

Kayaçların kırılgenlik direncinin belirlenmesi amacıyla TS EN 1097-2 [30] standardı çerçevesinde her kayaç için çeneli kırıcıdan geçirilen ve -16 mm +11.2 mm arasında kalan malzemeden 2.65 g/cm³

eşdeğer yoğunlukta 500 g (daha yüksek yoğunluk için daha fazla malzeme) numune hazırlanmış ve havan içine yerleştirilmiştir. 14 kg'lık çekiç 25 cm yükseklikten 20 kez havan içerisine düşürülmüş ve sonrasında havadaki numune 11.2 mm açıklıklı elek kullanılarak elenmiştir. Elek altına geçen malzeme tartılarak miktarı kaydedilmiş ve Eşit. 13 yardımıyla her kayaç grubunun kırılma (S₂₀, %) değeri hesaplanmıştır. Ayrıca Tablo 3'te gösterilmiş olan sınıflama ile kayaçların kırılma sınıflaması belirlenmiştir.

$$S_{20} (\%) = (11.2 \text{ mm'lik elek altı malzeme miktarı} \div \text{Toplam malzeme miktarı}) \times 100 \quad (13)$$

Tablo 3. Kayaçların kırılma (S₂₀) sınıflandırılması [31]

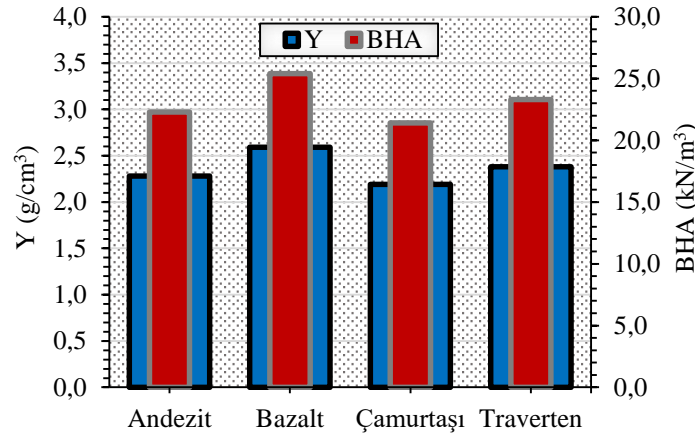
S ₂₀ (%) değeri	Kırılma sınıfı	S ₂₀ (%) değeri	Kırılma sınıfı
≥66.0	Oldukça yüksek	35.0-40.9	Düşük
60.0-65.9	Çok yüksek	29.1-34.9	Çok düşük
51.0-59.9	Yüksek	≤29.0	Oldukça düşük
41.0-50.9	Orta		

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

A. FİZİKSEL TEST SONUÇLARI

A. 1. Yoğunluk-Birim Hacim Ağırlık

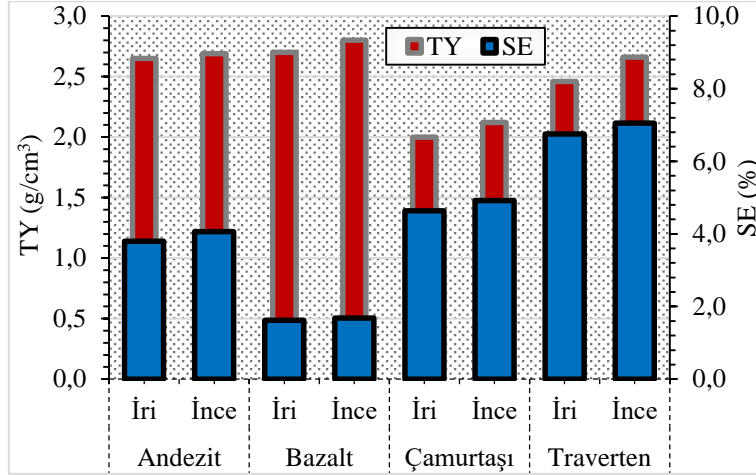
4 farklı doğal taşın (andezit, bazalt, çamurtaşı ve traverten) yoğunluk (Y) ve birim hacim ağırlık (BHA) testleri sonuçları Şekil 3'te gösterilmiştir. Beton agregası olarak kullanılabilirliği değerlendirilen malzemelerin yoğunluk ve birim hacim ağırlık sonuçlarında çok fazla fark olmadığı gözlemlenmiştir. Y ve BHA değerlerinin sırasıyla 2.19-2.59 g/cm³ ve 21.4-25.4 kN/m³ arasında değiştiği tespit edilmiştir. Doğal taşlar içerisinde en düşük Y ve BHA değerleri çamurtaşında görülürken, bazaltın yoğunluğu ve birim hacim ağırlığının diğer kayaçlara kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Şekil 3). Önceki bir çalışmada, Yılmaz [32] Trabzon-Maçka bölgesinden getirdiği bazalt kayacından hazırladığı karot numuneleri üzerinde gerçekleştirmiş olduğu BHA deneyi sonucunda bazaltın BHA değerini bu çalışma ile uyumlu olarak 25 kN/m³ olarak bulmuştur. Altınsoy vd. [33] betonda kullanılacak agregaların düşük oranda keskin köşe ve kusur içermesinin BHA değerinin yüksek olmasını sağlayacağını ve böylece betonun daha yüksek mekanik özellikler göstereceğini rapor etmişlerdir. Bu bağlamda, BHA değerleri nispeten daha yüksek olan bazaltın diğer doğal taşlara kıyasla aynı karışım özelliklerinde hazırlanacak betonun dayanımına daha fazla katkı sağlayacağı söylenebilir.



Şekil 3. Doğal taşların yoğunluk (Y) ve birim hacim ağırlık (BHA) testlerinin sonuçları

A. 2. Tane Yoğunluğu ve Su Emme

Şekil 4, agrega olarak kullanılabilirliği araştırılan doğal taşlardan hazırlanan iri (4.0-31.5 mm) ve ince (0-4.0 mm) agrega numunelerinin tane yoğunluğu (TY) ve su emme (SE) sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4 incelendiğinde, iri ve ince tane yoğunlukları sırasıyla 2.0 ve 2.12 g/cm³ olarak belirlenen çamurtaşının en düşük TY değerlerine sahip olduğu, buna karşın, diğer doğal taşların (andezit, bazalt ve traverten) TY değerleri nispeten daha yüksek (>2.4 g/cm³) olarak tespit edilmiştir. TS EN 206+A2 [34] standardında belirtilen sınır değerler (2.50-2.70 g/cm³) ile oldukça uyumlu TY sonuçları gösteren doğal taşların (çamurtaşı hariç) boşluksuz ve dayanıklı olmalarından dolayı betonda kullanılacakları ifade edilebilir [9].



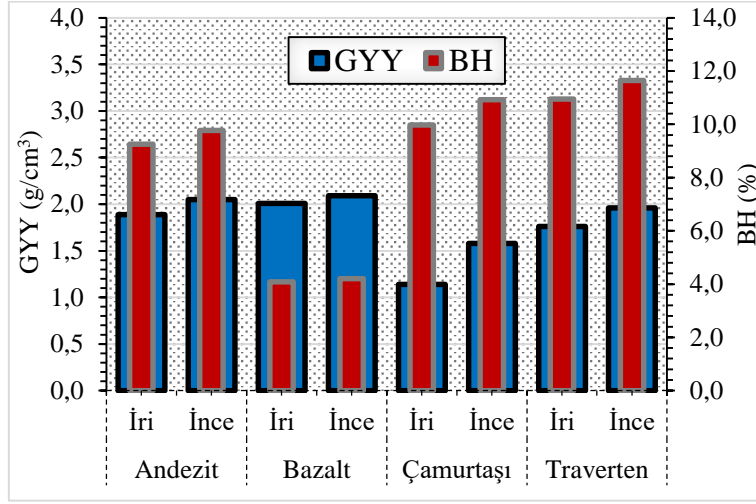
Şekil 4. Doğal taşların tane yoğunluğu (TY) ve su emme (SE) sonuçları

Dona karşı dayanıklılık, büzülme ve dayanım gibi beton parametreleri üzerinde oldukça etkili olan [9] doğal taşlara ait su emme değerleri incelendiğinde, yüksek TY sonuçları ile uyumlu olarak bazalta ait iri ve ince agrega numunelerinin SE değerlerinin gözle görülür biçimde düşük (%1.62-1.68) olduğu belirlenmiştir (Şekil 4). Beton agregası olarak kullanılacak doğal taşların TS EN 1097-6 [20] standardının önerdiği SE sınır değerinin altında (%1.62-7.05<%10.0) olduğu Şekil 4'ten açıkça görülmektedir. Ayrıca, tüm doğal taşların SE değerlerinin sınır değerinin altında olmasına rağmen, SE değeri nispeten daha yüksek olan traverten ve çamurtaşı agregalarının betonun mekanik özelliklerini olumsuz etkileyeceği açıktır [33]. Bu çalışmayla uyumlu olarak, bazaltın beton agregası olarak araştırıldığı bir çalışmada [9], iri (11.2-22.4 mm) agregaların SE değerinin %1.55 olarak tespit edildiği bildirilmiştir.

A. 3. Gevşek Yığın Yoğunluğu ve Boşluk Hacmi

Doğal taşların betonda kullanılabilirliğinin incelendiği bu çalışmada, 4 farklı kayaçtan elde edilen iri ve ince agrega numuneleri üzerinde gerçekleştirilen gevşek yığın yoğunluğu (GY) ve boşluk hacmi (BH) sonuçları Şekil 5'te özetlenmiştir. GY değerleri agrega boyutundan bağımsız olarak 1.14-2.09 g/cm³ arasında değişmekle birlikte en yüksek GY değerleri bazalt kayacına ait agrega numunelerinden (2.01-2.09 g/cm³) elde edilirken, en düşük GY değerleri (1.14-1.58 g/cm³) çamurtaşı kullanılarak hazırlanan agregalarda ölçülmüştür. BH değerleri incelendiğinde, agrega boyutundan bağımsız olarak doğal taşların %4.08-11.65 arasında boşluk hacmine sahip oldukları belirlenmiştir (Şekil 5). GY değerleri ile uyumlu olarak bazalt kayacı agregalarının diğer doğal taşlardan hazırlanan agregalara kıyasla %56-64 oranlarında daha düşük BH değerleri ürettiği tespit edilmiştir. Ayrıca, çamurtaşının GY değerleri diğer agrega numunelerinden daha düşük olmasına rağmen en yüksek BH değerleri (%10.95-11.65) traverten agregalarında ölçülmüştür (Şekil 5). Agregata tane yoğunluğu ve tane şeklinin oldukça etkilediği GY, agrega karışımı içerisindeki kusurlu tanelerin artmasıyla birlikte azalırken, BH, tam tersi bir eğilim göstermektedir [35]. Bu bağlamda, sonuçlar en düşük GY ve en yüksek BH değerlerinin

sırasıyla çamurtaşı (1.14-1.58 g/cm³) ve traverten (%10.95-11.65) kullanılarak hazırlanan agregalarda ölçüldüğünü göstermiştir ve bundan dolayı çamurtaşı ve traverten agregalarından hazırlanacak betonun dayanımının diğer agregalardan (özellikle bazalt) üretilecek betona kıyasla daha düşük olacağı muhtemeldir.



Şekil 5. Doğal taşların gevşek yığın yoğunluğu (GY) ve boşluk hacmi (BH) sonuçları

A. 4. İnce Madde Oranı

Beton içerisinde kullanılan agregaların bünyesinde oldukça düşük miktarda bulunması istenen ince maddelerin fazlaca bulunmasının betonun farklı özellikleri (mukavemet, karma suyu ihtiyacı, işlenebilirlik, bağlayıcı-agrega arası bağ, vb.) üzerinde olumsuz etkisi vardır [3], [33]. 4 farklı doğal taş (andezit, bazalt, çamurtaşı ve traverten) kullanılarak hazırlanan ince (0-4 mm) agrega numuneleri bünyesindeki ince madde oranı (İMO) miktarları Tablo 4'te gösterilmiştir. Agrega numunelerinin İMO değerlerinin %0.69-1.10 arasında değiştiği ve tüm doğal taşların TS 706 EN 12620+A1 [18] standardının önerdiği sınır değerinin oldukça altında kaldığı için betonda kullanımı açısından herhangi bir sorun teşkil etmeyeceği ifade edilebilir.

Tablo 4. Doğal taşlardan hazırlanan ince agrega numunelerinin ince madde oranı (İMO) ve ağırlık kaybı (AK) sonuçları

Test	Andezit	Bazalt	Çamurtaşı	Traverten	Sınır değer
İMO (%)	0.69	0.88	1.10	0.77	3.0
AK (%)	3.31	2.61	4.10	12.70	4.0

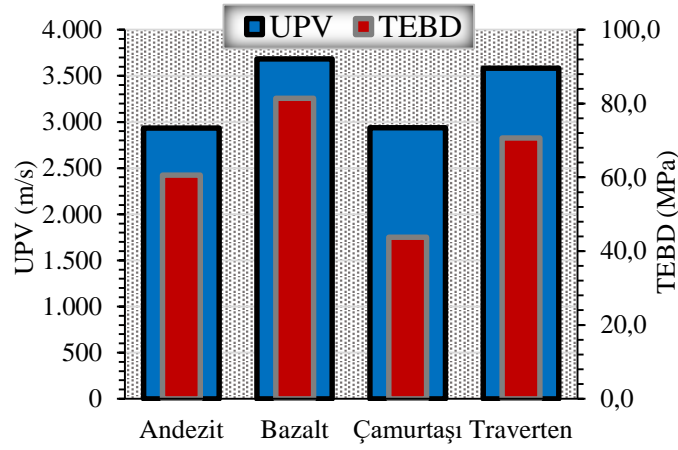
A. 5. Donma-Çözülme Direnci

4 farklı doğal taşta ait silindirik karot numunelerinin 120 saatlik (toplam 10 döngü) donma-çözülme testleri sonucunda ortaya çıkan ağırlık kaybı (AK) sonuçları Tablo 4'te verilmiştir. Doğal taşların donma-çözülme (D-Ç) döngüleri sonucunda AK değerlerinin %2.61-12.70 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Mevsimsel koşullar kaynaklı olarak betonun kalitesini etkileyen fiziksel özelliklerden birisi betonun donma-çözülme maruziyetidir ve bu maruziyet, beton karışımında kullanılan agreganın su emme, taneler arası boşluk ve gözeneklilik gibi özellikleri ile yakından ilişkilidir [9]. Bu bağlamda, bazalt kayacı; tespit edilen düşük su emme (%1.62-1.68) ve boşluk hacmi (%4.08-4.20) değerleri ile oldukça uyumlu olarak %2.61 oranında AK değeri göstererek D-Ç etkisine karşı direnci en yüksek doğal taş olmuştur. Buna karşın, travertenin diğer doğal taşlara kıyasla D-Ç'ye karşı oldukça dirençsiz (%12.70) olduğu belirlenmiştir. Doğal taşların (traverten hariç) TS 706 EN 12620+A1 [18] tarafından hazırlanan D-Ç testi sonrası AK sınır değerini (%4.0) karşıladığı ve beton üretiminde kullanılmalarında D-Ç testleri açısından herhangi bir sorun olmadığı söylenebilir (Tablo 4).

B. MEKANİK TEST SONUÇLARI

B. 1. Ultrasonik P- Dalga Hızı Testi

Şekil 6, beton üretiminde agrega olarak kullanım potansiyelleri araştırılan doğal taşların (andezit, bazalt, çamurtaşı ve traverten) ultrasonik P-dalga hızı (UPV) sonuçlarını göstermektedir. Doğal taşlardan hazırlanan karot numunelerinin 2933-3685 m/s arasında UPV değerleri ürettiği belirlenmiştir. En düşük UPV değerlerinin andezit ve çamurtaşı numunelerinde ölçüldüğü, buna karşın, bazalt numunelerinin diğer doğal taş grubundaki (andezit, çamurtaşı ve traverten) numunelere kıyasla %25.8'e kadar daha yüksek UPV değerleri üreterek en yüksek ultrasonik hız ulaştığı tespit edilmiştir (Şekil 6). Geçmişte gerçekleştirilen bir çalışmada [32], Trabzon-Maçka yöresine ait bazalt kayacı kullanılarak üretilen 10 farklı karot numunesi üzerinde UPV ölçümleri yapılmış ve bu çalışmaya kıyasla bazalt kayacının daha yüksek ortalama UPV değeri (4867 m/s) ürettiği saptanmıştır. Bunlara ek olarak, Anon [25] tarafından kayaların UPV değerine göre oluşturulan hız sınıflaması çizelgesi, andezit ve çamurtaşının düşük hız sınıfında ($2500 \text{ m/s} < 2933-2938 \text{ m/s} < 3500 \text{ m/s}$) yer aldığını, bazalt ve travertenin ise orta hız sınıfına ($3500 \text{ m/s} < 3584-3685 \text{ m/s} < 4000 \text{ m/s}$) girdiğini göstermiştir (Tablo 2).



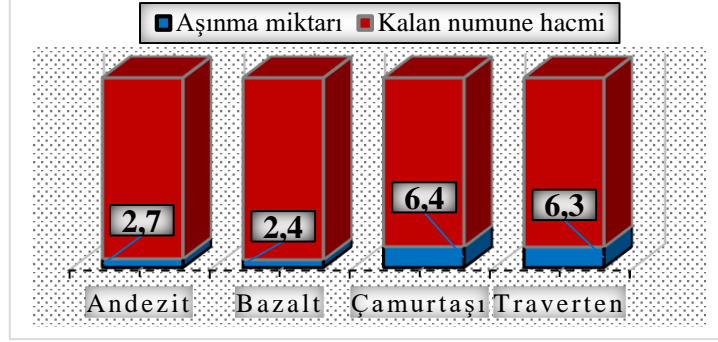
Şekil 6. Doğal taşların ultrasonik P- dalga hızı (UPV) ve tek eksenli basınç dayanımı (TEBD) sonuçları

B. 2. Tek Eksenli Basınç Dayanımı

4 farklı doğal taşın silindirik karotlar alınarak hazırlanan numunelerin tek eksenli basınç dayanımı (TEBD) sonuçları Şekil 6'da açıklanmıştır. UPV sonuçları ile uyumlu bir şekilde en yüksek basınç dayanımı bazalt (81.4 MPa) kayacında elde edilirken, en düşük dayanımı; fiziksel özellikler bakımından diğer doğal taşlara oranla daha zayıf karaktere sahip olan çamurtaşı (43.8 MPa) göstermiştir. Diğer doğal taşlardan (andezit ve traverten) üretilen karot numunelerinin TEBD değerleri ise sırasıyla 60.6 ve 70.7 MPa olarak tespit edilmiştir (Şekil 6). Yılmaz [32] tarafından bazalt kayacına ait karot numuneleri üzerinde gerçekleştirilen TEBD testleri, bu çalışmaya kıyasla daha yüksek UPV değerleri ile uyumlu olarak nispeten daha yüksek basınç dayanımı ($99.1 \text{ MPa} > 81.4 \text{ MPa}$) göstermiştir. Ayrıca, kayaların TEBD sonuçları baz alınarak hazırlanan dayanım sınıflaması incelendiğinde (Tablo 2), çamurtaşı dışında diğer kayaların "orta dayanımlı" ($50 \text{ MPa} < 60.6-81.4 \text{ MPa} < 100 \text{ MPa}$) oldukları belirlenmiştir.

B. 3. Böhme Aşınma Dayanımı

4 farklı doğal taşta ait küp numunelerin böhme cihazı kullanılarak gerçekleştirilen aşınma testi sonucu meydana gelen aşınma miktarları Şekil 7'de verilmiştir. Doğal taşların aşınma miktarlarının $2.4-6.4 \text{ cm}^3$ arasında değiştiği belirlenmiştir. Test sonuçları en düşük ve en yüksek aşınma miktarlarının sırasıyla bazalt (2.4 cm^3) ve çamurtaşı (6.4 cm^3) numunelerinde meydana geldiğini göstermiştir.



Şekil 7. Doğal taşların böhme aşınma sonuçları (cm³)

B. 4. Mikro-Deval Aşınma Dayanımı

Her doğal taş grubu (andezit, bazalt, çamurtaşı ve traverten) için hazırlanan iki farklı agrega numunesinin mikro-deval aşınma (M-DA) sonuçlarının ortalaması Tablo 5’te sunulmuştur. Kayaçların M-DA oranları %6.1-14.0 arasında değişmekle birlikte aşınmaya karşı en dirençli doğal taş gruplarının andezit ve bazalt olduğu belirlenmiştir. Çamurtaşı ve travertenin mikro-deval aşınma oranları ise diğer kayaç gruplarına kıyasla oldukça yüksek çıkmıştır. Beton üretiminde kullanılacak agregaların mekanik etkilere karşı dayanıklı olmasının yolunun aşınmaya karşı dirençlerinin mümkün olduğunca yüksek olmasından geçtiği dikkate alınarak M-DA oranının %35’ten düşük olması istenmektedir [3]. Bu bağlamda, TS 706 EN 12620+A1 [18] tarafından sunulan M-DA oranı kategorisine göre andezit ve bazalt M_{DE}10 (%6.1-6.2≤%10) kategorisinde yer alırken, çamurtaşı ve travertenin M_{DE}15 (%12.3-14.0≤%15) kategorisine girdiği tespit edilmiştir (Tablo 5). Bu değerler ışığında çalışmaya konu doğal taşların aşınma, parçalanma vb. etkilere karşı dirençlerinin yüksek olduğu ifade edilebilir.

Tablo 5. Agrega numunelerinin mikro-deval aşınma (M-DA) dayanımı ve kırılma direnci (S₂₀) sonuçları

Test	Andezit	Bazalt	Çamurtaşı	Traverten
M-DA (%)	6.1	6.2	14.0	12.3
S ₂₀ (%)	32.0	30.5	35.7	43.8

B. 5. Kırılma Direnci (Parçalanma) Direnci

Tablo 5, beton agregası potansiyelleri incelenen doğal taşların kırılma direnci (S₂₀) sonuçlarını göstermektedir. Doğal taşlardan hazırlanan numunelerin kırılma değerlerinin %30.5-43.8 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Parçalanmaya karşı direnci en yüksek doğal taş, diğer mekanik özellikleri ile uyumlu olarak bazalt kayacı olmuştur. Ayrıca, Dahl vd. [31] tarafından önerilen sınıflama uyarınca bazalt kayacının kırılma sınıfı "çok düşük" olarak belirlenmiştir (Tablo 3). Doğal taşlar içerisinde en fazla kırılma ise %43.8 oranı ile traverten kayacından hazırlanan numunelerde meydana gelmiştir. Diğer kayaçların kırılma sınıflamasına bakıldığında, bazalt ve andezitin "çok düşük" kırılma sınıfına ve çamurtaşının ise "düşük" kırılma sınıfına sahip oldukları tespit edilmiştir (Tablo 3 ve 5).

IV. SONUÇ

Bu araştırma çalışmasında, Doğu Karadeniz Bölgesi’nin farklı lokasyonlarından temin edilen doğal taşlar (andezit, bazalt, çamurtaşı ve traverten) üzerinde fiziksel ve mekanik olmak üzere çeşitli testler gerçekleştirilmiş ve bu kayaçların TS 706 EN 12620+A1 [18] standardı uyarınca beton üretiminde agrega olarak kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Doğal taşlar üzerinde gerçekleştirilen fiziksel testler, bazalt ve andezit kayaçlarının beton agregası olarak kullanılabilir olduğunu, buna karşın, çamurtaşının tane yoğunluğu ve travertenin donma-çözülme karşı direnç konusunda istenilen performansı gösteremediğini ortaya koymuştur. Mekanik testler değerlendirildiğinde, bazalt ve travertenin UPV

açısından orta hız sınıfında, andezit ve çamurtaşının ise düşük hız sınıfında yer aldığı belirlenmiştir. TEBD değerlerinin 43.8-81.4 MPa arasında ölçüldüğü doğal taşlar (çamurtaşı hariç) orta sınıf dayanım göstermiştir. Doğal taş gruplarının aşınma ve kırılma test sonuçları; çok düşük kırılma gösteren andezit ve bazaltın aşınmaya karşı en dirençli kayalar olduğunu, buna karşın, çamurtaşı ve travertenin aşınma ve kırılma açısından daha düşük performans ürettiğini ortaya çıkarmıştır. Tüm testler sonucu edinilen bulgular, TS 706 EN 12620+A1 [18] tarafından beton agregaları için önerilen kriterler de dikkate alındığında özellikle bazalt kayacından elde edilecek agreganın beton üretiminde başarılı bir şekilde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

V. KAYNAKLAR

- [1] S. Usta, "Agrega granülometrisinin beton bileşimindeki teorik malzeme miktarları ile betonun kompakte ve porozite değerleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi," *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, c. 8, s. 1, ss. 1-15, 2012.
- [2] A. Solak, "Manisa-Gürle köyü yöresinde bulunan kayaların sınıflandırılarak beton agregası olarak kullanılabilirliğinin araştırılması," *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 11, s. 4, ss. 974-981, 2022. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1123351>
- [3] H. Akyıldırım ve A. Karakaş, "Kocaeli-Gebze Tavşanlı bölgesi kireçtaşlarının beton agregası olarak kullanılabilirliğinin araştırılması," *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 9, s. 4, ss. 1088-1108, 2021. <https://doi.org/10.36306/konjes.925801>
- [4] A. Çuçen ve Y. T. Altuncı, "Yüksek yapıların yapım tekniklerinin incelenmesi," *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi*, c. 5 s. 1, ss. 20-32, 2022. <https://doi.org/10.51764/smutgd.1039161>
- [5] C. Özel, "Kendiliğinden yerleşen betonda mermer-granit ve andezit'in agregası olarak kullanılabilirliğinin araştırılması," *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, c. 10, s. 1, ss. 19-30, 2018.
- [6] E. Koç, "Trabzon ili ve çevresinden alınan doğal taşların agregası malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması," Yüksek Lisans Tezi, Maden Mühendisliği Bölümü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 2014.
- [7] K. Güçlüer, O. Günaydın, Ö. F. Tekin ve M. F. Şahan, "Farklı tipte agregası kullanımının betonun mekanik özelliklerine etkisinin araştırılması," *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 6, s. 1, ss. 107-114, 2017. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.297962>
- [8] İ. Çobanoğlu, S. B. Çelik, O. Çam, H. Etiz ve M. Kurşun, "Denizli bölgesi traverten artıklarının beton agregası olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi," *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 20, s. 3, ss. 92-99, 2014. <https://doi.org/10.5505/pajes.2014.52824>
- [9] M. Y. Çelik ve A. Şahbaz, "Ilıca (Kütahya) bazaltının beton agregası olarak kullanılabilirliğinin araştırılması," *Politeknik Dergisi*, c. 20, s. 4, ss. 887-898, 2017. <https://doi.org/10.2339/politeknik.369061>
- [10] T. Yılmaz, "Agregası elek analizi ve granülometri eğrisi," Maden İşletme Laboratuvarı Deney Föyü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 2017.
- [11] L. Gündüz, N. Şapcı, M. Bekar ve S. Yorgun, "Genleşmiş kilin hafif agregası olarak kullanılabilirliği," *Kil Bilimi ve Teknolojisi Dergisi*, c. 1, s. 2, ss. 43-49, 2006.

- [12] A. Köken, M. A. Köroğlu ve F. Yonar, "Atık betonların beton agregası olarak kullanılabilirliği," *Selçuk-Teknik Dergisi*, c. 7, s. 1, ss. 86-97, 2008.
- [13] A. Tolgay, E. Yaşar ve Y. Erdoğan, "Nevşehir pomzasının agrega olarak betonda kullanılabilirliğinin araştırılması," 5. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*. İzmir, Türkiye, 2004, ss. 345-354.
- [14] H. Ceylan ve S. Mança, "Mermer parça atıklarının beton agregası olarak değerlendirilmesi," *Teknik Bilimler Dergisi*, c. 3, s. 2, ss. 21-25, 2013.
- [15] A. Yılmaz, M. Saltan ve A. Akıllı, "Göller yöresinde işletilen kireçtaşı agregalarının yol inşaatı malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması," *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 18, s. 3, ss. 199-207, 2012. <https://doi.org/10.5505/pajes.2012.41636>
- [16] E. Tuncay, F. Yağmurlu ve H. Ceylan, "Karaöz (Antalya-Türkiye) civarındaki dolomitik kireçtaşlarının beton agregası olarak kullanılabilirliği," *Teknik Bilimler Dergisi*, c. 5, s. 1, ss. 48-57, 2015.
- [17] O. O. Varol, M. Türkmenoğlu ve Z. F. Türkmenoğlu, "Van ili tabanlı mevkii kireçtaşlarının agrega olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi," *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 21, s. 2, ss. 146-151, 2016.
- [18] *Beton agregaları*, Türk Standartları Enstitüsü TS 706 EN 12620+A1, 2009.
- [19] *Rock characterization, testing and monitoring*, ISRM Suggested Methods, ISRM, 1981.
- [20] *Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler, Bölüm 6: Tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini*, Türk Standartları Enstitüsü TS EN 1097-6, 2013.
- [21] *Agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri için deneyler, Bölüm 3: Gevşek yığın yoğunluğunun ve boşluk hacminin tayini*, Türk Standartları Enstitüsü TS EN 1097-3, 1999.
- [22] *Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 8: İnce tanelerin tayini-Kum eşdeğeri tayini*, Türk Standartları Enstitüsü TS EN 933-8+A1, 2015.
- [23] *Doğal taşlar-Deney yöntemleri-Dona dayanım tayini*, Türk Standartları Enstitüsü TS EN 12371, 2011.
- [24] *Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock*, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, ASTM D2845, 2017.
- [25] O. H. Anon, "Classification of rocks and soils for engineering geological mapping. Part 1-rock and soil materials," *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, vol. 19, pp. 364-371, 1979.
- [26] D. U. Deere and R. P. Miller, "Engineering classifications and index properties of intact rock," University of Illinois, Urbana, Illinois, Tech. Memo. AFWL-TR 65-116, Dec. 01, 1966.
- [27] *Standard test methods for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures*, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, ASTM D 7012, 2014.
- [28] *Zemin döşemesi için beton kaplama blokları-Gerekli şartlar ve deney metotları*, Türk Standartları Enstitüsü TS 2824 EN1338/AC, 2009.



- [29] *Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler-Bölüm 1: Aşınmaya karşı direncin tayini (mikro- Deval)*, Türk Standartları Enstitüsü EN 1097-1, 2011.
- [30] *Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler-Bölüm 2: Parçalanma direncinin tayini için yöntemler*, Türk Standartları Enstitüsü TS EN 1097-2, 2020.
- [31] F. Dahl, A. Bruland, P. D. Jakobsen, B. Nilsen and E. Grøv, "Classifications of properties influencing the drillability of rocks, based on the NTNU/SINTEF test method," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 28, pp. 150-158, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.10.006>
- [32] T. Yılmaz, "Bazalt kayacının tek eksenli sıkışma dayanımının tahribatsız test yöntemleri ile tahmini: Trabzon-Maçka bölgesi," *8. Uluslararası Kırmataş Sempozyumu*, Kütahya, Türkiye, 2016, ss.2-8.
- [33] F. Altınsoy, N. Ş. Karahan, R. Çankaya ve A. Karabayır, "Çanakkale Elmacık yöresi kalker taşlarının beton agregası olarak uygunluğunun araştırılması," *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 3, s. 1, ss. 48-58, 2017. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1123351>
- [34] *Beton-Özellik, performans, imalat ve uygunluk*. Türk Standartları Enstitüsü TS EN 206+A2, 2021.
- [35] F. Yılmaz, S. Koltka ve E. Sabah, "Emirdağ-Adaçal (Afyonkarahisar) kireçtaşlarının beton agregaları standardına uygunluğunun araştırılması," *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 11, s. 1, ss. 1-12, 2011.



Düzce University Journal of Science & Technology

Research Article

Thermo-Fluidic Analysis of Pulsating Heat Pipes Charged with Water-Based Immiscible Fluid Pairs

 Burak MARKAL ^{a,*},  Ramazan VAROL ^b

^a Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Karadeniz Technical University, Trabzon, TURKEY

^b Department of Energy Systems Engineering, Institute of Graduate Studies, Recep Tayyip Erdogan University, Rize, TURKEY

* Corresponding author's e-mail address: burakmarkal@ktu.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1115581

ABSTRACT

Immiscible fluids may provide operational flexibility for pulsating heat pipes (PHPs) due to thermo-hydrodynamic diversity lead by each pure component. In this regard, present paper focuses on the thermo-fluidic analysis of non-uniform pulsating heat pipes charged with water-based immiscible fluid pairs. Research parameters cover gravity effect via the inclination angles (IA) of 0° and 90°, and fluid pair effect via two different water-based immiscible binary fluids as Water (W) – Hexane (H), and Water (W) – Pentane (P). The volumetric mixing ratios are W:H=1:1, 1:4, 4:1, 1:0, 0:1, and W:P=1:1, 1:4, 4:1, 1:0, 0:1; and the non-uniform flat plate type pulsating heat pipe (FP-CLPHP) has alternating-sequence parallel channels. The experiments are performed at the filling ratio of 40% (FR=40%), and flow phenomena is visualized. As some conclusions; at vertical orientation, the FP-CLPHPs having binary fluids of water-pentane show better thermal performance compared to the pure counterparts. Especially, the heat transfer characteristics of W:P=1:1 are the best ones among all the pure and binary fluids. On the other hand, as a conclusion of combination of non-uniform design and suitable thermophysical properties, the FP-CLPHPs charged with pure pentane, pure hexane or binary fluid of W:P=1:4 can work independent from gravitational force.

Keywords: Immiscibility, Pulsating heat pipe, Fluid pairs, Thermo-fluidic analysis

Su Bazlı Karışmayan Akışkan Çiftleriyle Yüklü Atımlı Isı Borularının Termo-Akış Analizi

ÖZ

Birbiriyle karışmayan akışkanlar, her bir saf bileşenin sebep olabileceği termo-hidrokinamik farklılık nedeniyle, atımlı ısı boruları (PHP'ler) için çalışma esnekliği sağlar. Bu kapsamda, bu çalışma su bazlı karışmayan akışkan çiftleri ile yüklenmiş üniform olmayan atımlı ısı borularının termo-akışkan analizine odaklanmaktadır. Araştırma parametreleri; 0° ve 90° eğim açıları (IA) aracılığıyla yer çekimi etkisini ve su (W) – heksan (H) ve su (W) – pentan (P) olmak üzere iki farklı su bazlı karışmayan ikili akışkanlar aracılığıyla akışkan çifti etkisini kapsamaktadır. Hacimsel karışım oranları; W:H=1:1, 1:4, 4:1, 1:0, 0:1 ve W:P=1:1, 1:4, 4:1, 1:0, 0:1'dir ve üniform olmayan düz plaka tipi atımlı ısı borusu (FP-CLPHP) alternatif sıralı paralel kanallara sahiptir. Deneyler %40 doluluk oranında (FR=40%) yapılmıştır ve akış olayları görüntülenmiştir. Bazı sonuçlar şu şekildedir: düşey konumda, su-pentan ikili akışkanlarına sahip FP-CLPHP'ler, saf akışkanlı olanlara kıyasla daha iyi ısı performans göstermiştir. Özellikle, W:P=1:1'in ısı transfer karakteristikleri bütün saf ve ikili akışkanlar arasında en iyidir. Diğer taraftan, üniform olmayan tasarım ve uygun termo-fiziksel özelliklerin birleşiminin bir sonucu

olarak, saf pentan, saf hekzan veya W:P=1:4 ikili akışkanıyla yüklü FP-CLPHP'ler yer çekimi kuvvetinden bağımsız çalışabilir.

Anahtar Kelimeler: Karışımama, Atımlı ısı borusu, Akışkan çifileri, Termo-akış analizi

I. INTRODUCTION

After introduction to the scientific community by Akachi [1] at the ends of 20th century, the pulsating heat pipes have drawn much attention; and thus, especially for the last two decades, the PHPs with their different forms are widely studied. One of the basic reasons of this attention is the available potential of these unique devices regarding cooling of future micro electronic systems for space applications in addition to earth counterparts. In this context, some efforts are performed in the literature [2, 3]. Also, cooling of LED chips or CPUs [4, 5], and practices in solar and cryogenic fields [6, 7] are among the other examples for utilization of PHPs. Other reason can be linked to working principle of the PHPs. PHSs are the passive devices and do not need any external force for operation. In this way, they provide advantages against micro-flow boiling [8, 9]. Also, the PHPs noiselessly operate, and thus they gain an advantage over other promising techniques such as vortex tubes [10] and impinging jets [11, 12]. In addition to operational advantageous, the complexity and unsolved physical facts in thermo-fluid-geometric framework keep the interest alive for future scientific research.

In recent years, especially researchers dealt with non-uniform pulsating heat pipes, and various working fluid types such as mixtures. First known study focusing on non-uniform flat-plate closed loop pulsating heat pipes was conducted by Chien et al. [13]. In that study, the success of the alternating sequence of parallel channels on solving of the failure of PHPs having less turns with the lack of gravity support was introduced to the literature. They used pure water as the fluid; and they reported that at horizontal position the heat pipe only worked for the filling ratio of greater than 50%. Tseng et al. [14] focused on non-uniform PHPs; however, they obtained the nonuniformity by pressing one the consecutive circular passages. In this way, different cross-sectional areas were obtained in alternating sequence. The PHP was charged with only pure fluids of HFE-7100, water and methanol. They concluded that at horizontal orientation non-uniform design was better; however, with increasing heat input thermal resistance began to significantly increase after a minimum for both of the PHP types. For high heating powers, greater than namely 60W, water presented the lowest thermal resistance, while, for low heat inputs, HFE-7100 showed lower thermal resistance. Kwon and Kim [15] studied on five-turn FP-CLPHP charged with pure fluids of Ethanol and FC-72. Via dual diameter channel characteristics, the heat pipe could operate at horizontal orientation; and they attributed this to dominance of capillary pressure difference over the viscous pressure drop. The conditions corresponding to the greater values than 2×10^5 of this ratio were addressed as the gravity-independent operation case. Jang et al. [16] fully dealt with influence of geometrical characteristics on PHP performance. In this regard, they investigated ratio of the cross-sectional area of neighboring channels (asymmetric ratio; 1 – 4), and aspect ratio (2 .5 – 5) of channel pair. Based on their results, it can be concluded that effect of asymmetric ratio strongly depended on heat input level. Also, for a given asymmetric ratio, the lowest value of aspect ratio provided lowest thermal resistance, especially from medium to high heat inputs. Aref et al. [17] adapted a dual-diameter CLPHP to a solar collector. Difference in diameter was provided between the condensation region and other regions. In other words, the parallel channels in all regions had same diameter; however, the ones in the condenser section were different from the ones in evaporator and adiabatic sections. For medium (50% - 60%) and high filling ratio (60% - 70%), the dual diameter one showed better thermal characteristics than the single diameter one; however, for lower filling ratio both of them showed similar performance. Thermal performance of the solar collector could be increased up to 72.4% via dual diameter heat pipe.

As summarized above, geometric structure has significant influence on operational characteristics of FP-CLPHPs. The main reason is the generation of different forces causing disequilibrium among the

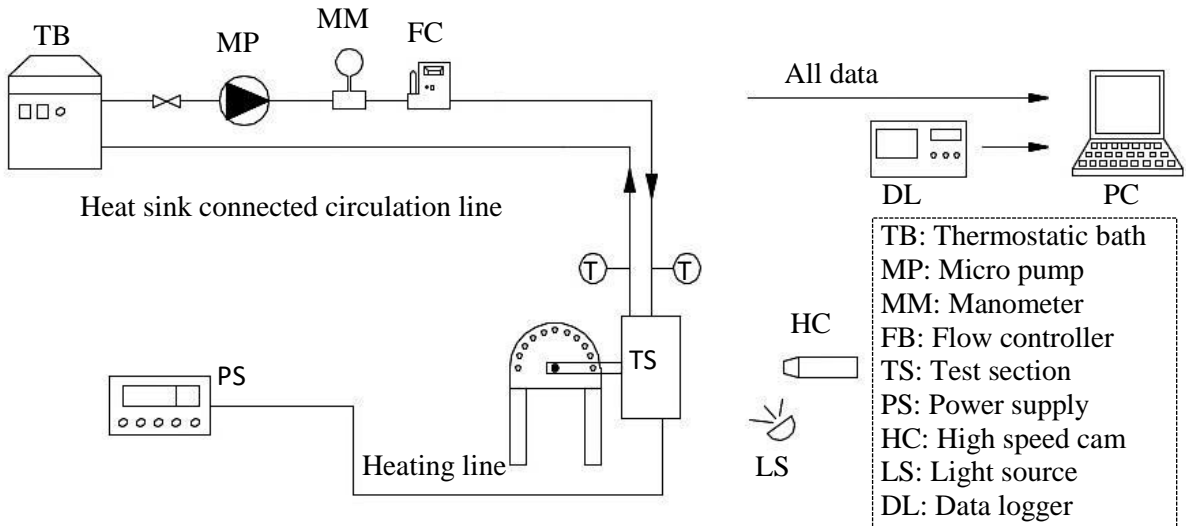
neighboring channels. In addition to the geometry, another key factor for the heat pipe performance is the working fluid. In this regard, in recent years, a special attention is shown to it, especially to different types of mixtures. Shi et al. [18] conducted an experimental study on circular type conventional PHPs charging with ethanol based binary mixtures (ethanol-water; ethanol-methanol; ethanol-acetone). At the filling ratios lower than 62%, mixtures were observed as superior compared to pure counterparts. A complex relation was experienced between mixing ratio and filling ratio (FR). At FR = 45%, ethanol and water mixture at the mixing ratio of 2:1 presented higher thermal performance, while at FR = 55%, ethanol and acetone mixture at the mixing ratio of 4:1 was reported as the best working fluid. Inhibition in the phase-change, level of the pressure-temperature variation at saturation conditions, and dynamic viscosity were addressed as dominant factors on mixture performance. Cui et al. [19] conducted experiments regarding circular type bended PHPs charged with methanol-based mixtures (methanol – water; methanol – acetone; methanol – ethanol). The mixing ratios were 2:1; 4:1; 7:1, and also pure states were studied. At FR = 45%, due to the water, dry-out problem was prevented at relatively high heating powers. Also, in this filling ratio, adding acetone to methanol lead to decrease in thermal resistance compared to pure components. For filling ratios greater than or equal 62%, the FP-CLPHPS charged by mixtures and pure fluids showed similar characteristics. An interesting study focusing on uniform-channel FP-CLPHPS having an immiscible fluid pair of water and HFE-7100 was conducted by Xu et al. [20]. The inclination angles investigated were 30°, 45°, 60°, 75° and 90°. They concluded that fluid pair provided positive contributions to thermal performance of the heat pipe, gravity had significant influence on heat pipe operation, and first boiling components lead to oscillate the other one and increased heat transfer. Bao et al. [21] used sodium stearate as surfactant in water, and experimentally studied PHPs with that fluid. It was reported that using surfactant making the PHP possible to start at lower heating powers. The 20-ppm surfactant solution also provided decrease in thermal resistance by 27.8% at FR = 56.7%, compared to the pure deionized water. Zhou et al. [22] experimentally investigated a circular pipe type PHP charged with graphene oxide nanofluid in which water was the base fluid. It was concluded that there was a strong relation between graphene oxide (GO) concentration and filling ratio. At high filling ratios such as 80%, using GO nanofluid could not improve startup performance; while at lower filling ratio start up performance was able to be improved. At optimum filling ratio and concentration, an enhancement up to 54.34% was obtained in thermal performance.

In above paragraphs, the great attention to the non-uniform PHPs and mixture type fluids are summarized. It should be stated that the combination of non-uniform FP-CLPHPS and mixtures have been introduced to the literature by only the authors [23 – 25] of the present paper, recently. However, different combinations of the pure fluids have a great potential to present different results. Thus, the goal of the present paper is to experimentally investigate the thermal characteristics of non-uniform FP-CLPHPS charged with water based immiscible binary fluids. To the best of the authors' knowledge, this is the first study focusing on experimental investigation of non-uniform (alternating sequence of channels) FP-CLPHPS charged by Water – Hexane and Water – Pentane. Also, effect of gravity support and mixing ratio are examined, and flow physics is interpreted via flow visualization.

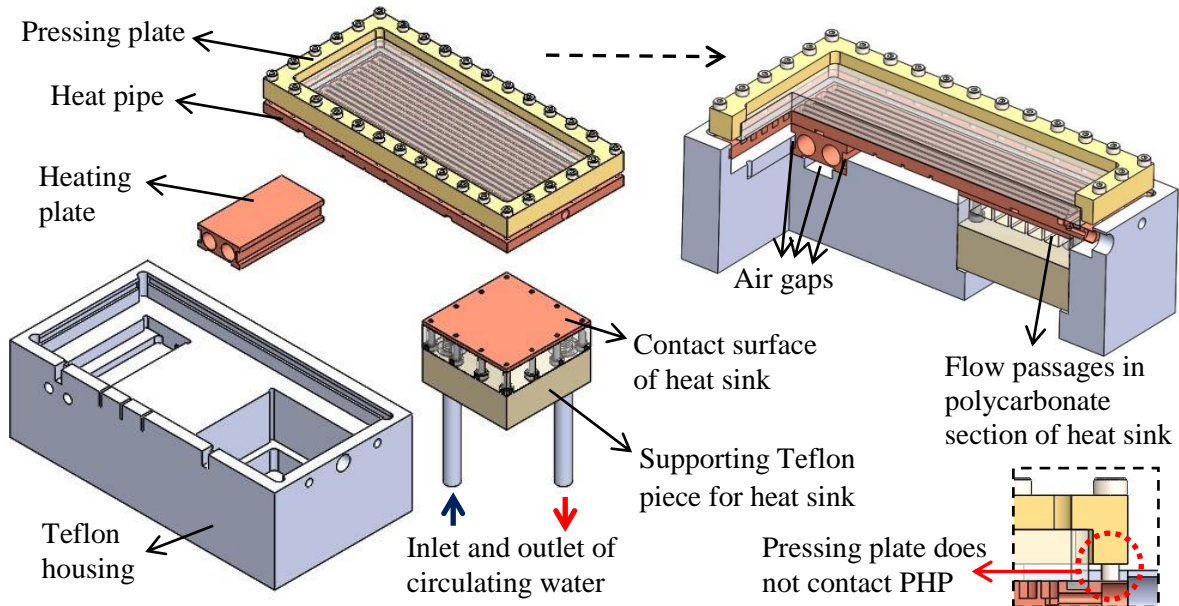
II. EXPERIMENTAL PART WITH RELEVANT EQUATIONS

A. INTRODUCTION OF EQUIPMENT USED IN EXPERIMENTS

Both the schematic of the experimental setup and exploded view with sectional details of test section are clearly presented in Fig. 1a and b. Description of the relevant parts and explanations are performed as below:



(a)



(b)

Figure 1. (a) Schematic of the experimental setup, and (b) exploded view with sectional details of test section

The setup may be divided into five subsections as circulation line regarding heat sink (for condenser section of PHP), test section, heating line regarding heating plate, visualization unit, and data processing unit. The main part is the test section, and the others are auxiliary parts. Test section includes a flat plate type pulsating heat pipe, a heating plate, a heat sink, and Teflon housing. Test section is designed so as to minimize the heat loss. Thermal conductivity of Teflon housing is nearly $0.25 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Two groves are engraved into the Teflon to place the heating plate and heat sink. Heating plate includes two cartridge heaters connected to heating line, in other words, power supply. To affectively transfer heat to the evaporator section of the PHP, a copper block (high conductivity material) is preferred. To minimize the heat loss, air gaps are engraved at bottom and side surfaces of the heating plate, whose top surface directly contacts evaporator section of the PHP (see Fig. 1b). To effectively transfer heat from the condenser section, and to calculate the relevant heat value, a special-designed-heat sink is used. Heat sink has two sub-parts as 2 mm thick copper top surface, and (nearly) 10 mm thick bottom piece. Material of the top surface is copper, while the bottom piece is made of

polycarbonate (nearly $0.2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$). Flow passages are engraved into the polycarbonate piece. Top copper surface directly contacts condenser section of the PHP; thus heat can be effectively transferred from condenser to water supplied via circulation line. In the circulation line, there are a set of devices (clearly defined in Fig. 1a) to control the operational conditions (to provide constant temperature at the inlet of heat sink and constant flowrate throughout the heat sink). The heat pipe is placed over the heating plate and heat sink (evaporator section to heating plate, and condenser section to heat sink). Between evaporator and condenser sections, there is adiabatic section exposed to thin air gap (see Fig. 1b).

In pulsating heat pipes, there are dominant and effective phase-change phenomena. To clearly analyze physical phenomena, and to understand complex relations between geometry, flow, and heat transport, a visualization study should be conducted. Therefore, upper surface of the PHP should be covered by a transparent material. Also, the relevant material should be strongly resistant against working fluids (mostly alcohols). Thus, a tempered glass (thermal conductivity is nearly $1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) has been chosen as the cover plate in the present paper. To operate the heat pipe, a leak-proof and closed internal volume should be obtained; and for this, the glass plate is compressed to the PHP via a brass-frame by 32 miniature bolts. However, the brass frame does not directly contact with the PHP (clearly seen, in Fig. 1b). After placement of all the components, the test section is located on a platform, and then, side surfaces of Teflon housing are covered via insulation materials (extruded polystyrene (XPS) sheets, thermal conductivity of nearly $0.033 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Some other details such as real photographs of the experimental setup or thermocouple locations can be found in the recent articles of the authors [23 – 25].

A. 1. Steps Followed in Experiments

There are five different mixing ratios (including pure states), two different immiscible binary fluids, two different angles and heat load interval in the experimental range. The reason of using two different angles is actually to investigate the effect of gravity support on the heat pipe performance. Also, heat inputs are applied with 5 W intervals up to the evaporator section reaching nearly 110°C mean temperature. The followed procedure can be briefly summarized as follows:

- The ambient air is conditioned to 24°C
- Heat pipe is vacuumed. The gauge pressure read from the manometer screen is -1.012 bar which corresponds to 125 Pa as absolute value (note that atmospheric pressure is 1.01325 bar).
- Circulation line starts up.
- The desired working fluid is charged into the heat pipe at the content of 40% of heat pipe internal volume. Volume of working fluid to internal volume of heat pipe is the filling ratio.
- The mechanism on which the FP-CLPHP placed is a movable one, and thus, it can be adjusted to the desired position, in the present paper, namely, horizontal or vertical orientation.
- Heat input is supplied via the cartridge heaters. The first value is 5W , and it increases at 5W steps. At each heat input, at the steady-state, temperature readings are logged. When temperature of the evaporator section reaches approximately 110°C , the system is ended; and for a new research parameter the defined procedure is repeated.

A. 2. Data Reduction

The formulas or equations used in determination of the thermal performance of a pulsating heat pipe are well-known in the open literature. One of the main performance indicators of the FP-CLPHP is the thermal resistance which is shown as below:

$$R_{th} = \frac{(T_e - T_c)}{Q_{ac}} \quad (1)$$

where, T_e is the average evaporator temperature, T_c is the average condenser temperature and Q_{ac} is the actual heating power. Here, it should be stated that Q_{ac} is commonly used in the literature [13, 26, 27], and this expression also includes heat loss as stated by Spinato et al. [27]. The explicit form of the Q_{ac} is presented below:

$$Q_{ac} = \frac{Q_i + Q_o}{2} \quad (2)$$

The heating power applied via the AC power supply is denoted with Q_i , while the heat removed via the cooling water passing through the heat sink is denoted with Q_o . One each T-type thermocouples are placed at the inlet and outlet of the heat sink component. The inlet temperature for heat sink is set to 20 °C, while the outlet temperature is read depending on the experimental conditions. The flow rate of the cooling water is set to the desired value of 20 ml min⁻¹. Thus, the heat removed via heat sink (Q_o) can be simply determined as in the following:

$$Q_o = \dot{m}c_p (T_{he} - T_{hi}) \quad (3)$$

In Equation (3), mass flow rate and specific heat of cooling water are denoted with \dot{m} and c_p , respectively. On the other hand, exit and inlet temperatures at the heat sink are represented as T_{he} and T_{hi} . It should be underlined that thermal resistance is not the unique performance indicator of a PHP. In addition to it, evaporator temperature and start-up characteristics are also important in the performance-evaluation. In this regard, all the mentioned tools are considered in the result and discussion part.

In a recent article of the authors [24], a comprehensive analysis regarding uncertainty was performed. In this context, explicit form for thermal resistance was presented. By following the same procedure, in the present paper (based on the present data), the maximum uncertainty of the thermal resistance is obtained as $\pm 5.4\%$. It should be noted that the uncertainty in temperature readings as a measured parameter is $\pm 0.1^\circ\text{C}$ (after calibration).

III. RESULTS AND DISCUSSION

In this section, experimental results obtained for the conditions of five different mixing ratio (1:1, 1:4, 4:1, 1:0; 0:1), two different immiscible binary fluids (Water-Hexane, Water-Pentane), two different angles (0°, 90°), and a wide range of heating power are presented. The filling ratio is constant as 40%, and flow is visualized via high-speed camera. For pulsating heat pipes, operational parameters have complex and combined effects on thermal performance. Therefore, the results are presented in an interrelated manner, as follows:

A. EVALUATION OF THE BEHAVIOR OF PURE FLUIDS REGARDING FP-CLPHPs

In the present study, it is focused on immiscible binary fluids, and in this regard, two different binary working fluids are investigated. To get useful information before discussion of the results belonging to the fluid-pairs, behavior of the FP-CLPHPs charged with pure fluids is presented in Figs. 2a-d. For the relevant experimental conditions, at vertical, namely bottom heat operation mode, the lowest thermal resistance and evaporator temperature values are obtained for the FP-CLPHP charged with water. In addition, at relatively high heat inputs (> 30W), thermal resistance of pentane charged heat pipe drops

below the one of hexane charged. On the other hand, when the gravity effect is removed, other words, the heat pipe is placed horizontally, results completely change. Thermal resistance values for the pentane and hexane cases significantly drops with increasing heat input, which means successful operation of the heat pipe. On the other hand, trend of thermal resistance of water case is relatively horizontal, for more precisely, from 5 W to 25 W, there is a relatively small drop, and then nearly horizontal distribution is obtained. This kind of trend means that heat pipe does not properly operate at the relevant conditions; and relatively small drops in thermal resistance signify only some weak and discontinuous pulsations.

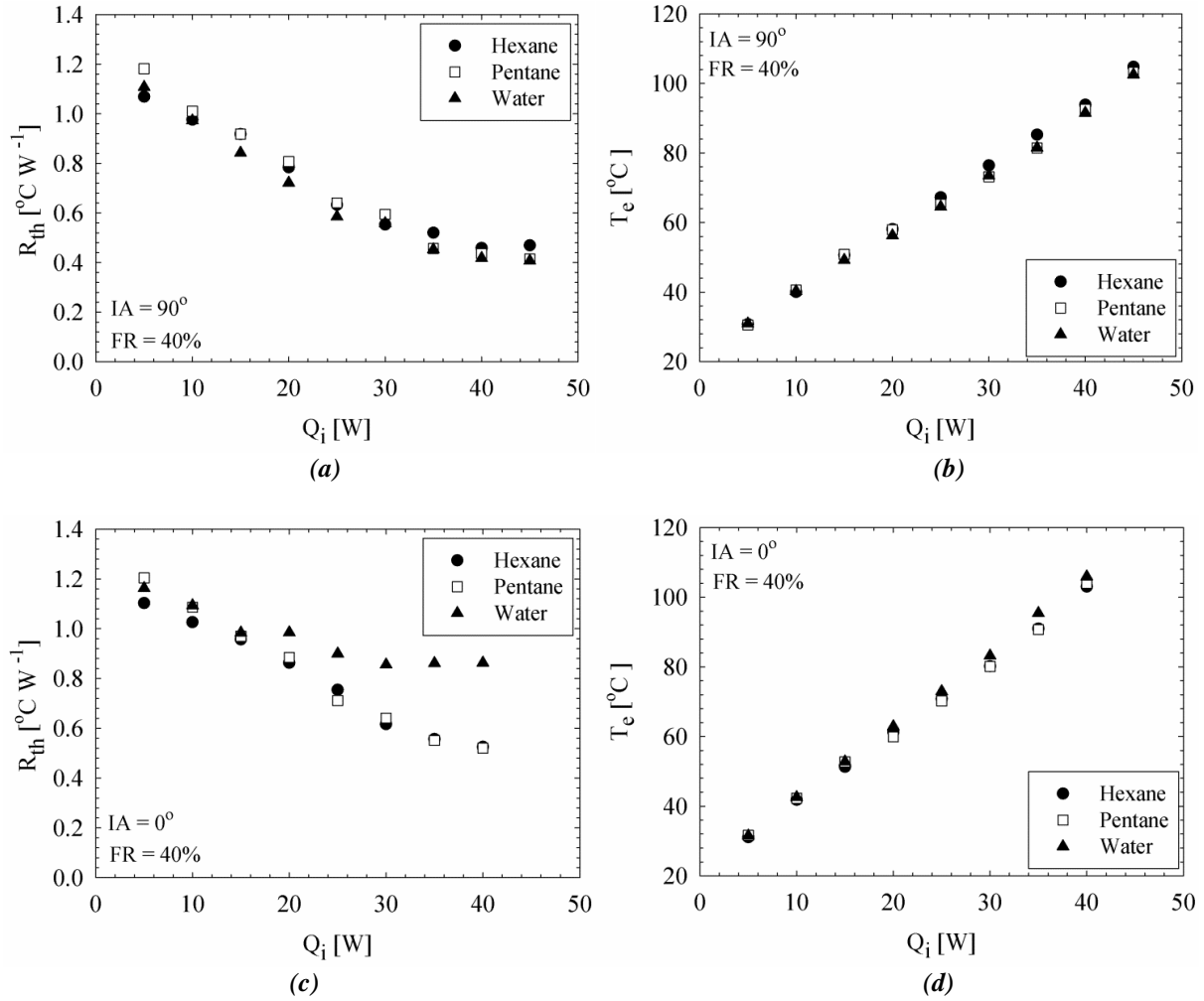


Figure 2. Thermal resistance and evaporator temperature variation of pure fluids with heat load for both the vertical and horizontal orientations.

B. SCRUTINIZING OF THE RESULTS OBTAINED FOR FP-CLPHPs CHARGED BY BINARY FLUIDS

In Figure 3, the results regarding the binary fluid of water-pentane are presented. As seen from Fig. 3a, at vertical orientation, in other words, at the condition of full gravity support, the FP-CLPHPs having binary fluids of water-pentane show better thermal performance compared to the pure counterparts. Especially, the heat transfer characteristics of W:P=1:1 are the best ones among all the pure and binary fluids. In this regard, thermal resistance and evaporator temperature of the heat pipe charged with W:P=1:1 are significantly lower than the other cases, and startup performance is the highest. At the heat input of 10 W ($HI = 10W$), a sharp drop is obtained in thermal resistance data for W:P=1:1, which means starting of the relevant heat pipe to operation in active manner. At vertical position, thermal resistance in the case of W:P=1:1 reaches the minimum value of $0.38 \text{ }^{\circ}\text{C W}^{-1}$, and in the whole heat

input range it is provided decrease in thermal resistance nearly by 40.4% compared to worst case (W:P=0:1, pure pentane, 15W). On the other hand, from Fig. 3b, as compatible with the thermal resistance, average evaporator temperature is generally lower for the FP-CLPHP charged with W:P=1:1; and in this case, for the whole heat input range approximately up to 6.3 °C temperature drop is obtained. As a conclusion, at vertical orientation, the FP-CLPHPs charged with W:P=1:1 provides significant advantages for safe and stable operating conditions, and prevents thermal stress based problems. When the support of the gravity is removed, results completely change as seen in Figs. 3c and d. In horizontal condition, only the FP-CLPHPs charged with pure pentane (W:P=0:1) or W:P=1:4 properly operate, and the FP-CLPHPs charged with other fluids collapse. The common characteristic of the unsuccessful working fluids is that they contain only water or relatively high volumetric content of water. These important results should be discussed or scrutinized with the help of fluid thermo-physical properties, non-uniform design of the heat pipes and flow images, as in the following:

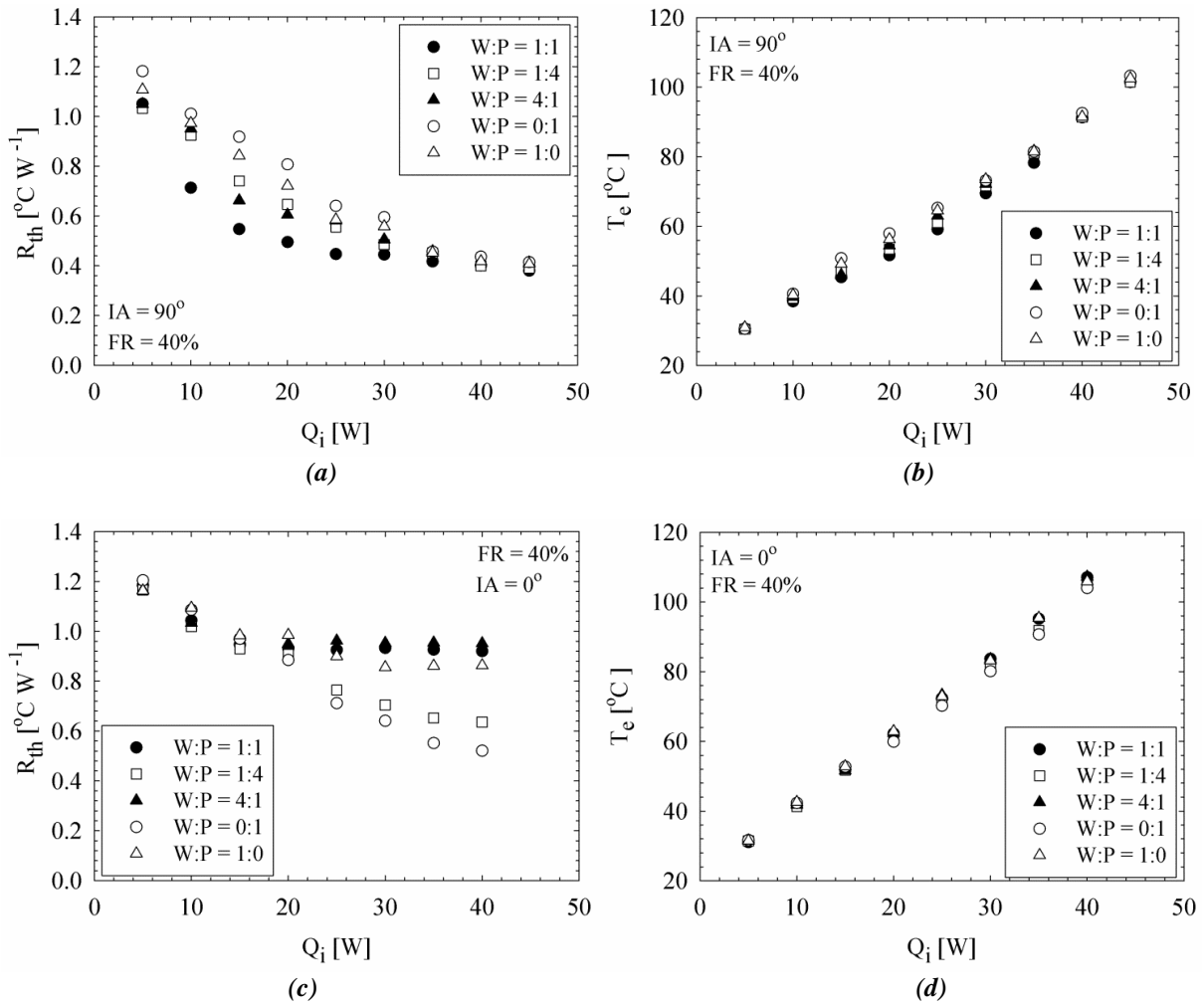


Figure 3. Thermal resistance and evaporator temperature variation of water/pentane binary fluid with heat load for both the vertical and horizontal orientations.

In Table 1, some important properties of the fluids are presented. In this regard, Table 1, Fig. 2 and Fig. 3 are evaluated together with the support of flow images. It should be stated that properties in Table 1 are presented at 20 °C (and 80 °C for $(dP / dT)_{sat}$) as compatible with the literature [32]. Except $(dP / dT)_{sat}$, other properties presented in Table 1 do not significantly change with temperature for the temperature range considered in this study. On the other hand, dependence of $(dP / dT)_{sat}$ on temperature is more significant. Therefore, considering the nearly average of the working temperature range, 80 °C was preferred for this property. However, it should be noted that temperature changes based on operational conditions; and the relevant values presented for 20 °C or 80 °C are used to

perform a qualitative analysis as also underlined by Han et al. [32]. From Fig. 2a and Fig. 3a, it is seen that, at vertical orientation, the performance of pure water or water based immiscible fluids are generally better than the other ones. However, when the support of gravity is removed (see Fig. 2c and Fig. 3c) pure water and the cases including water content greater than 50% of total volume cannot actively operate. The probable main reasons are high density, high boiling point and high viscosity of water compared to the other fluids. Also, the inhibition in the phase change of the fluid having relatively higher boiling point is the other major reason. It should be stated that Han et al. [32] defined this process as phase-change-inhibition effect. In the present FP-CLPHP, the neighboring channels have different cross-sectional area; and at vertical orientation, with the support of non-uniform channel design, pressure perturbations increase, nucleating water bubbles rise in the flow passages, and due to higher density of water component, water droplets flow down towards the evaporator region, again. Also, boiling point of water is higher, and early boiling component, for example pentane, increases internal pressure and easily prevents nucleation of water. Therefore, water collects at the evaporator region, and it is mainly in the liquid phase. It should be noted that at vertical orientation, evaporator region corresponds to the bottom side of the heat pipe. Figures 4a and b represent the flow images of W:P=1:1 and W:P=4:1, respectively. As seen in Fig. 4a, at the side walls of the channels in the evaporator and adiabatic region, there are wavy liquid films; such that they are actually liquid drops flowing down to the U bends of the evaporator region. The reasons of this dropwise type back flow are relatively high density of water, relatively high pressure applied to water by pentane vapor (or vapor pressure of the component having low boiling point), different pressure forces existed in consecutive channels due to non-uniform channel design, and capillary effect due to sharp corners of the rectangular channels. As a result, for immiscible fluids, water as a component is prone to keep in liquid state and collect at bottom region and increasing water content begins to restrict flow flexibility in the flow passages, which may lead to decrease in thermal performance. However, at vertical orientation, due to gravity support and non-uniform structure of the heat pipe, collected water in the bottom moves as liquid columns in U bends or performs a reciprocating motion in the columns of the relevant channel.

Table 1. Some properties of the pure fluids at atmospheric pressure: water [18], pentane [28, 29], and hexane [30].

Thermo-physical properties	Pentane	Deionized water	Hexane	Temperature [°C]
Boiling point [°C]	36.06	100	68.7	
Latent heat of vaporization [kJ kg ⁻¹]	366.9	2257	335	
Surface tension (x 10 ³) [N m ⁻¹]	15.8	72.8	18.5	
Liquid density [kg m ⁻³]	625.5	998	659	20
Liquid dynamic viscosity (x 10 ³) [Pa s]	0.242	1.01	0.3	
Liquid specific heat [kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹]	2.33	4.18	2.24	
Liquid thermal conductivity [W m ⁻¹ °C ⁻¹]	0.138	0.599	0.128	
Saturation pressure variation with temperature (dP / dT) _{sat} (x 10 ³) [Pa °C ⁻¹]	10.1	1.9	4.27	80

Notes:

Clapeyron Equation [31] is used to obtain the values of (dP / dT)_{sat}. The required values for (dP / dT)_{sat} can be obtained from the Ref. [28].

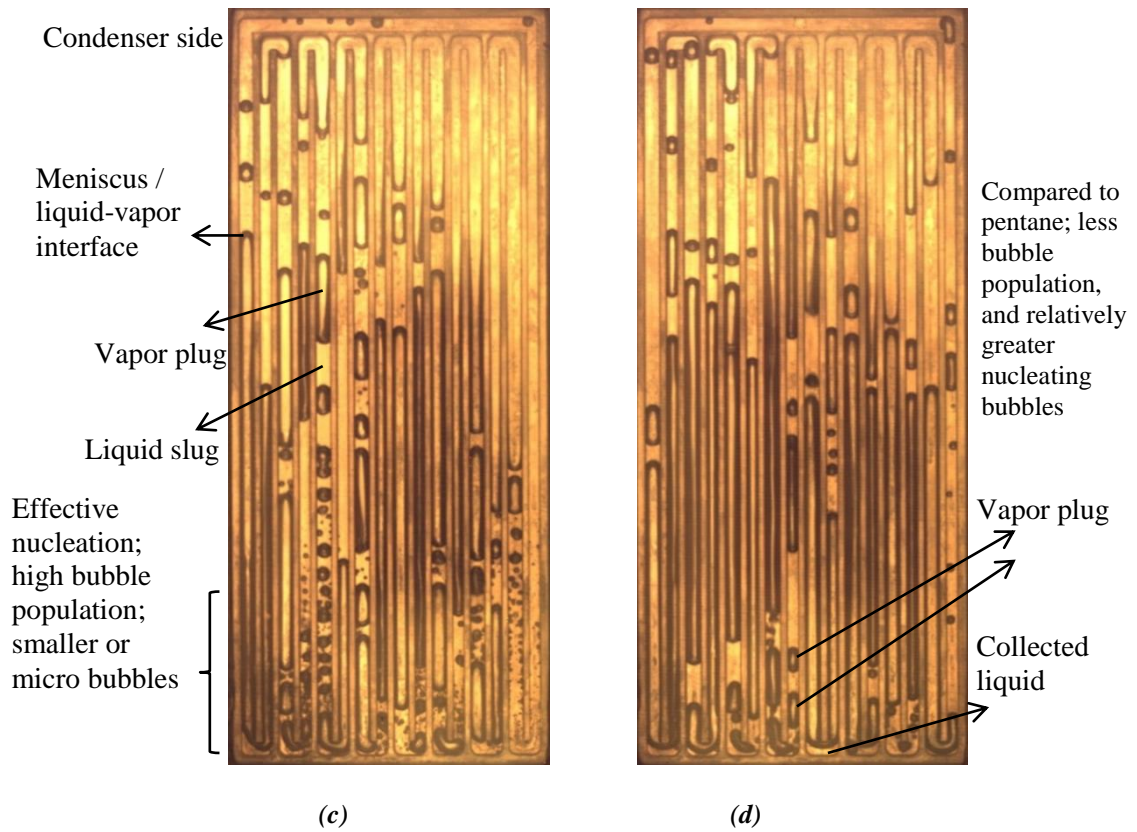
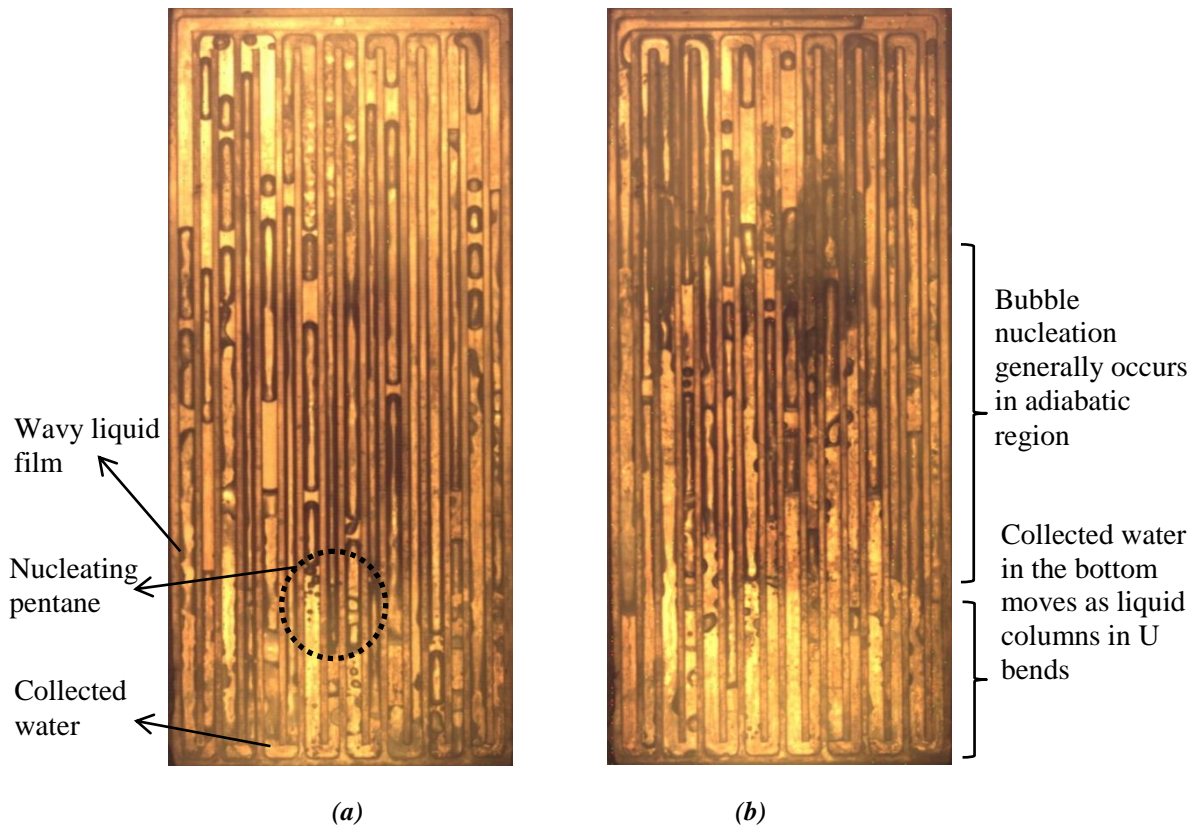


Figure 4. Flow images at $HI=30W$, $IA=90^\circ$, and $FR=40\%$: $W:P=1:1$ (a), $W:P=4:1$ (b), $W:P=0:1$ (c), and $W:H=0:1$ (d).

Also, micro liquid droplets can be carried from evaporator to adiabatic or condenser region by pressure perturbations, advancing vapor plug of other component and friction between two components (as mist flow). Despite limitations in the circulation of the flow, combination of this type of flow with the superior thermal characteristics of water presents successful results in terms of thermal performance. From Table 1, latent heat of evaporation of water is nearly seven times of the ones of pentane and hexane, liquid specific heat of water is nearly two times of the others, and thermal conductivity of water is nearly five times of the others. Also, it should be stated that liquid droplets flowing down throughout the channel side walls rewet the hot surface and decrease wall temperature.

Regarding pure fluids, Figs. 4c and d are presented. As seen in Fig. 4c, pentane provides many smaller, even, micro bubble nuclei in the evaporator region. The reason of high populated and smaller type bubbles is the relatively low surface tension of pentane. Nucleating bubbles transform to larger bubbles under heat load, also, the bubbles coalescing each other form larger ones, too. Also, viscosity of pentane is the lowest among the available ones in Table 1, and the value of $(dP/dT)_{sat}$ of pentane is the highest. Low viscosity makes the flow motion easier, and high $(dP/dT)_{sat}$ makes the pressure fluctuations stronger. Therefore, when the optimum volume or volumetric ratio of water and pentane is brought together, optimum thermal performance is obtained at vertical orientation.

In spite of the results presented regarding vertical orientation, when the heat pipe is placed horizontally, the results of water and pentane immiscible binary fluids (W:P) completely change, as seen in Figs. 3c and d. Based on the results, at horizontal condition, only the FP-CLPHPs charged by pure pentane (W:P=0:1) and binary fluids of W:P=1:4 successfully operate. Other ones collapse. In horizontal position, effect of gravity and the positive role of high density disappear. The additional unbalanced forces being generated depending on non-uniform channel design are insufficient to drive high viscosity and relatively weightier fluid. Of course, this may also be related to the filling ratio or mass content. Therefore, the FP-CLPHPs having greater than or equal 50% volumetric ratio of water cannot work at horizontal orientation. On the other hand, the heat pipes having pure pentane or the binary fluids of W:P=1:4 properly operate in the lack of gravity support. As reported in the literature [13, 27], the uniform heat pipes having few turns collapse in the lack of gravity support. However, non-uniform design of pulsating heat pipes provides additional unbalanced forces such as evaporation momentum force, capillary force and shear force [24]; and thus, as a conclusion of combination of suitable thermophysical properties and geometry, the FP-CLPHPs charged with pure pentane or binary fluids of W:P=1:4 can work independent from gravitational force.

As additional information obtained via flow visualization results regarding binary fluids is that: as seen in Figs. 4a and b, the fluid having low boiling point in the binary ones nucleates towards outlet of the evaporator region or at the adiabatic region; and thus, separate vapor plugs and liquid slugs distribute in the flow passages (adiabatic and condenser regions). Increasing water content (see Fig. 4b) means higher liquid volume collecting in the evaporator region, and thus nucleation sites are shifted towards condenser side.

After the binary fluids of water and pentane, the results of binary fluids of water and hexane are presented in Figs. 5a-d. Detailed underlying physical mechanisms and geometric characteristics are stated in the above paragraphs, and thus, here, differences are presented in comparative manner. As seen in Figs. 5a and b, at vertical orientation, water as a pure fluid is better in terms of heat transfer performance than both the pure hexane and any other water-hexane binary combinations. On the other hand, at horizontal orientation, only the FP-CLPHP charged by pure hexane (W:H=0:1) properly works (see Fig. 5c). As a result, the heat pipes having any of the water-hexane binary fluids cannot operate at the lack of gravity support, and at vertical condition, they perform lower thermal performance compared to pure water or pure hexane. These results are obviously different from the ones of water-pentane binary fluids. As remembered from Fig. 3a, water-pentane binary fluids work better than pure counterparts, and even at horizontal orientation (see Fig. 3c), the FP-CLPHP charged with W:P=1:4 successfully operates in addition to pure pentane. In spite of using same geometry, obtaining these results can be explained with differences in the thermo-physical properties of pentane and hexane. This information also provides important knowledge regarding key properties. From

Table 1, it is seen that the main difference between pentane and hexane is related to the value of $(dP / dT)_{sat}$. Zhu et al. [33] associated high values of this parameter with stronger pressure impulses, and also, present results support the importance of $(dP / dT)_{sat}$. High value of $(dP / dT)_{sat}$ of pentane improves pressure perturbations and triggering of water.

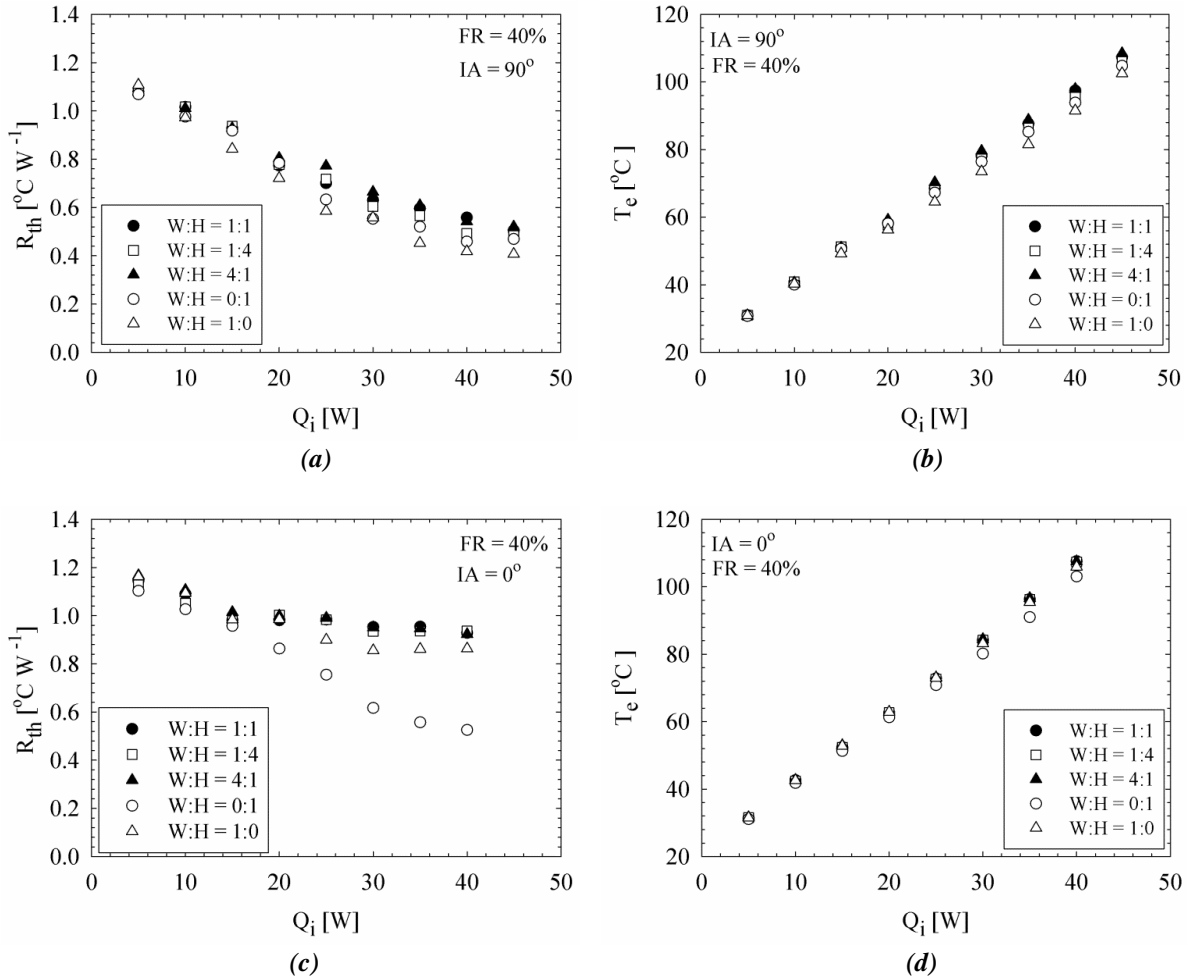


Figure 5. Thermal resistance and evaporator temperature variation of water/hexane binary fluid with heat load for both the vertical and horizontal orientations.

C. SCRUTINIZING OF THE RESULTS OBTAINED FOR FP-CLPHPs CHARGED BY BINARY FLUIDS

Influence of gravity on performance of the FP-CLPHPs charged with pure and binary fluids is presented in Fig. 6 and Fig. 7, respectively. Actually, physical mechanisms regarding vertical and horizontal orientations are well reported in the previous section. However, in this section, the graphs are presented directly over $IA = 90^{\circ}$ and $IA = 0^{\circ}$. In Figure 6a, it is seen that trend of the thermal resistance data with increasing heat input is very different for vertical and horizontal conditions. At vertical location, thermal resistance data significantly decreases with increasing heat input, which means effective working of the relevant heat pipe. Increasing heat input improves nucleation characteristics, speed up the flow, increases pressure pulsations and pressure-based forces. However, one of the most influential sources of internal pressure perturbations is the turn number, and at horizontal position, collapsing of heat pipes having few turns is an important obstacle for miniaturization. To solve this problem, in the present paper a non-uniform FP-CLPHP is used. However, it is seen that thermo-physical properties, or in other words, fluid selection has key importance, and operational or geometrical characteristics of heat pipes cannot be considered separately from each other.

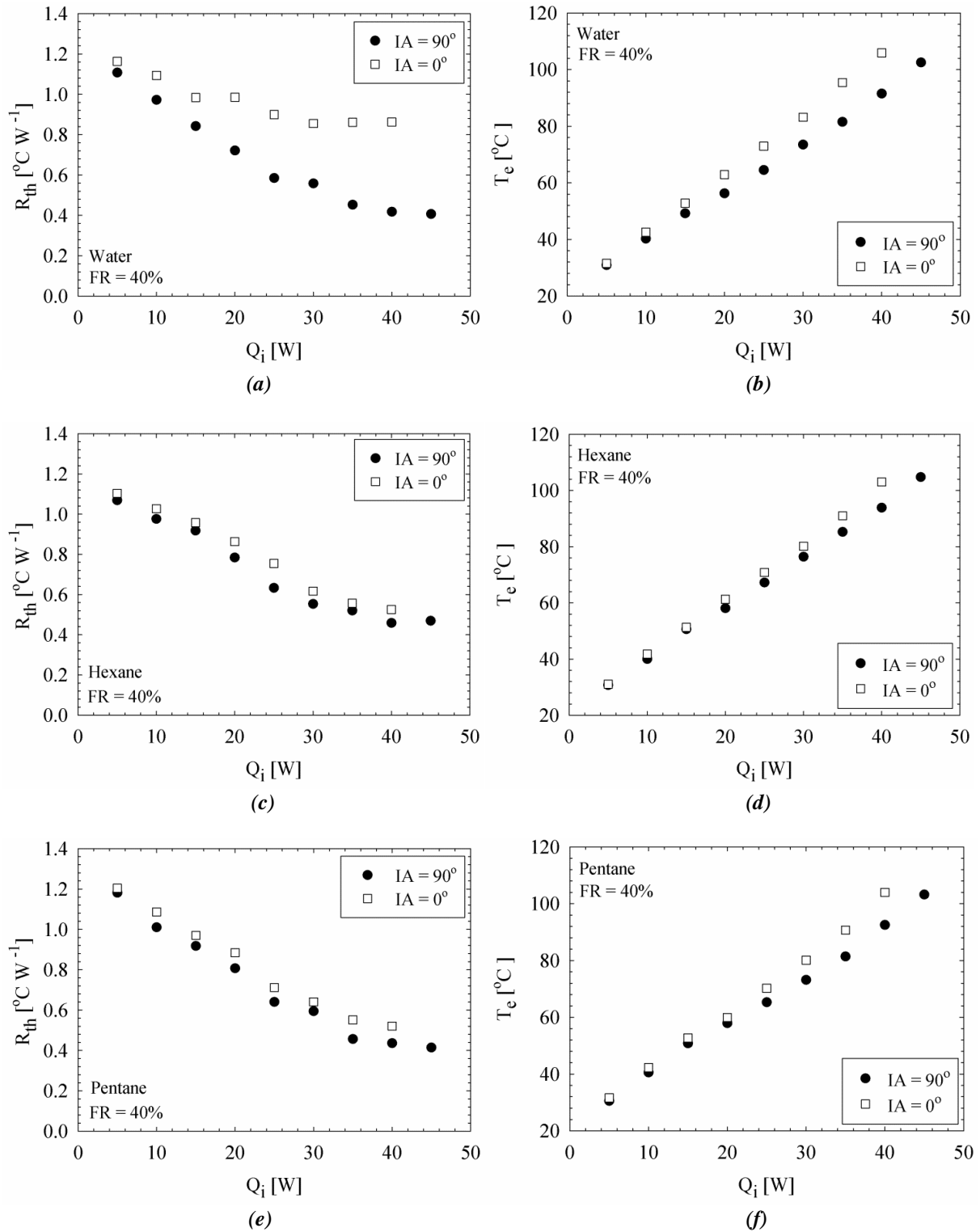


Figure 6. Influence of gravity on performance of the FP-CLPHPs charged with pure fluids.

In this regard, when one of the pure pentane, pure hexane or the binary fluid of W:P=1:4 is used as the working fluid, non-uniform heat pipe can successfully operate at horizontal position in spite of having only eight turn numbers (see Figs. 6c and e, and Fig. 7e). Additional unbalanced forces such as evaporation momentum force, capillary force and shear force [24] provided via the usage of non-uniform FP-CLPHP, high value of $(dP / dT)_{sat}$, low viscosity and low surface tension (in terms of easy nucleation, and thus better pressure perturbation) are all responsible for successful operation in the lack of gravity support. On the other hand, it should be stated that higher values of latent heat of

evaporation, specific heat and thermal conductivity gain extra importance when the flow motion starts in the channels.

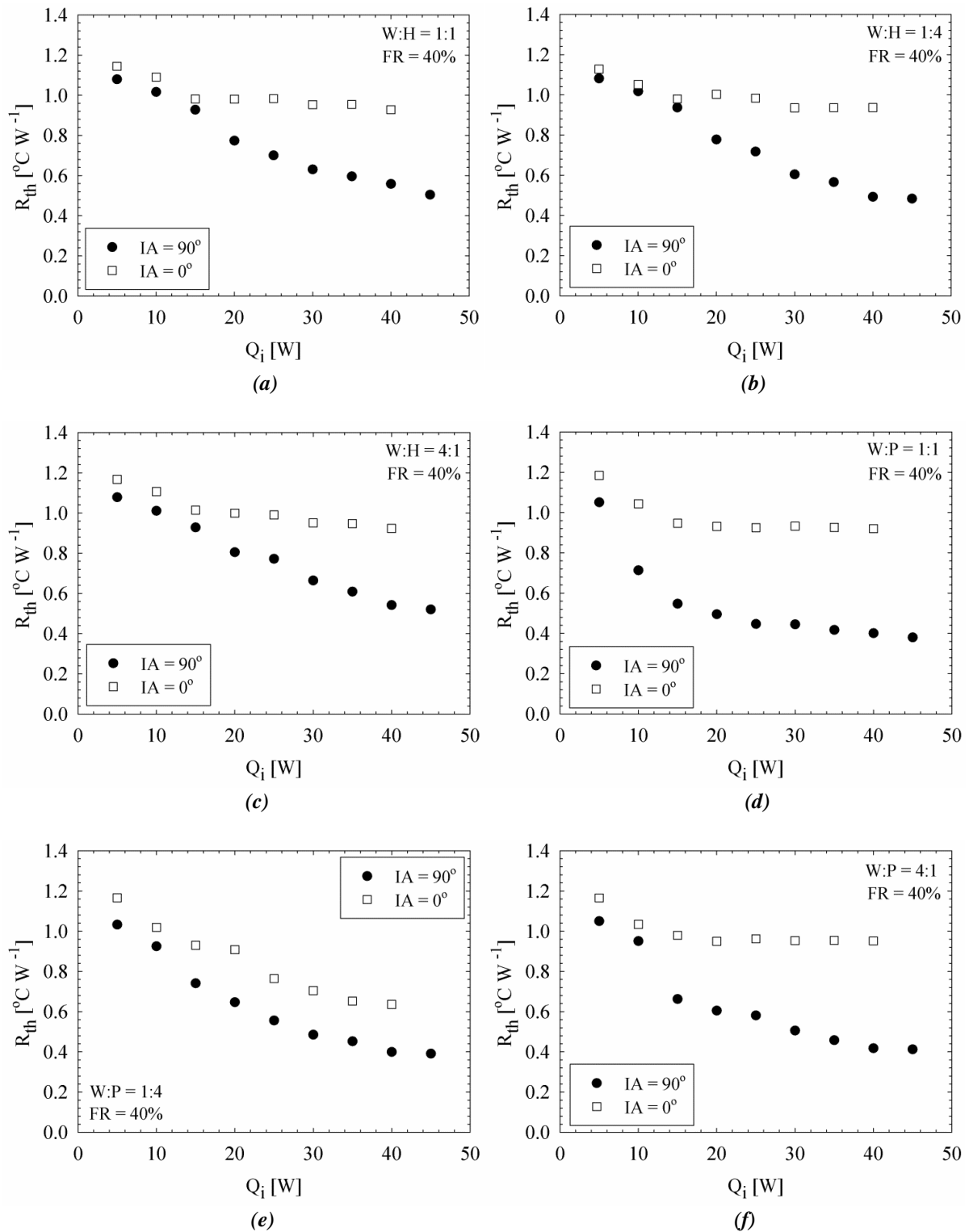


Figure 7. Influence of gravity on performance of the FP-CLPHPs charged with binary fluids.

IV. CONCLUSION

Present paper focuses on thermo-hydrodynamic evaluation of non-uniform FP-CLPHPs charged with immiscible binary fluids. An experimental effort is conducted in a wide range of parameter. Main conclusions and remarks are stated as below:

- Regarding the pure fluids, at vertical orientation, the lowest thermal resistance and evaporator temperature are obtained for the FP-CLPHP charged with water. On the other hand, at high heat inputs ($> 30W$), thermal resistance of pentane charged-heat-pipe drops below the one of hexane charged. At horizontal orientation, thermal resistance values for pentane and hexane cases significantly drop with increasing heat input, which means successful operation of the heat pipe. On the other hand, the water charged FP-CLPHP cannot operate with the lack of gravity support.
- At the condition of full gravity support, the FP-CLPHPs having binary fluids of water-pentane show better thermal performance compared to the pure counterparts. Especially, the heat transfer characteristics of $W:P=1:1$ are the best ones among all the pure and binary fluids. Thermal resistance in the case of $W:P=1:1$ reaches the minimum value of $0.38\text{ }^{\circ}\text{C W}^{-1}$, and in the whole heat input range it is provided decrease in thermal resistance nearly by 40.4% compared to worst case ($W:P=0:1$, pure pentane, 15W).
- Regarding the pure states or the binary fluids of water and pentane, at horizontal condition, only the FP-CLPHPs charged with pure pentane ($W:P=0:1$) or the binary fluid of $W:P=1:4$ properly operate, and the FP-CLPHPs charged with other fluids collapse. The common characteristic of the unsuccessful working fluids is that they contain only water or relatively high volumetric content of water (equal or greater than 50% of total fluid volume). The probable main reasons are high density, high boiling point and high viscosity of water, and phase-change inhibition phenomenon.
- The heat pipes having any of the water-hexane binary fluids cannot operate at the lack of gravity support, and even, at vertical condition, they show lower thermal performance compared to pure water or pure hexane. These results are obviously different from the ones of water-pentane binary fluids.
- Non-uniform design of pulsating heat pipes provides additional unbalanced forces such as evaporation momentum force, capillary force and shear force; and thus, as a conclusion of combination of suitable thermophysical properties and geometry, the FP-CLPHPs charged with pure pentane, pure hexane or binary fluid of $W:P=1:4$ can work independent from gravitational force.
- Additional unbalanced forces such as evaporation momentum force, capillary force and shear force provided via the usage of non-uniform FP-CLPHP, high value of $(dP / dT)_{\text{sat}}$, low viscosity and low surface tension (in terms of easy nucleation, and thus better pressure perturbation) are all responsible for successful operation in the lack of gravity support. On the other hand, it should be stated that higher values of latent heat of evaporation, specific heat and thermal conductivity gain extra importance when the flow motion starts in the channels.

ACKNOWLEDGEMENTS: The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) supported this study with the project number of 217M341.

V. REFERENCES

- [1] H. Akachi, "Structure of a heat pipe," U.S. Patent 4 921 041, May, 1, 1990.
- [2] D. Mangini, M. Mameli, A. Georgoulas, L. Araneo, S. Filippeschi and M. Marengo, "A pulsating heat pipe for space applications: Ground and microgravity experiments," *International Journal of Thermal Science*, vol. 95, pp. 53-63, 2015.

- [3] V. Ayel, L. Araneo, A. Scalambra, M. Mameli, C. Romestant, A. Piteau, M. Marengo, S. Filippeschi, and Y. Bertin, "Experimental study of a closed loop flat plate pulsating heat pipe under a varying gravity force," *International Journal of Thermal Science*, vol. 96, pp. 23–34, 2015.
- [4] L. Lv, J. Li, and G. Zhou, "A robust pulsating heat pipe cooler for integrated high power LED chips," *Heat and Mass Transfer*, vol. 53, pp. 3305–3313, 2017.
- [5] F. Xie, X. Li, P. Qian, Z. Huang and M. Liu, "Effects of geometry and multisource heat input on flow and heat transfer in single close-loop pulsating heat pipe," *Applied Thermal Engineering*, vol. 168, Art. no. 114856, 2020.
- [6] M. A. Nazari, M. H. Ahmadi, R. Ghasempour, M. B. Shafii, O. Mahian, S. Kalogirou and S. Wongwises, "A review on pulsating heat pipes: From solar to cryogenic applications," *Applied Energy*, vol. 222, pp. 475-484, 2018.
- [7] Y. Lipei, Z. Ping, X. Hui, M. Wei and S. Jiang, "Visualization of Thermo-Hydrodynamic Behavior in Flat-Plate Pulsating Heat Pipe with HFE-347," *Journal of Thermal science*, vol. 30, pp. 926-938, 2021.
- [8] B. Markal, O. Aydin and M. Avci, "Prediction of heat transfer coefficient in saturated flow boiling heat transfer in parallel rectangular microchannel heat sinks: An experimental study," *Heat Transfer Engineering*, vol. 38, pp. 1415-1428, 2017.
- [9] B. Markal, A. Candan, O. Aydin and M. Avci, "Experimental investigation of flow boiling in single minichannels with low mass velocities," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 98, pp. 22-30, 2018.
- [10] B. Markal, O. Aydin and M. Avci, "Exergy analysis of a counter-flow Ranque-Hilsch vortex tube having different helical vortex generators," *International Journal of Exergy*, vol. 10, pp. 228-238, 2012.
- [11] B. Markal and O. Aydin, "Experimental investigation of coaxial impinging air jets," *Applied Thermal Engineering*, vol. 141 pp. 1120-1130, 2018.
- [12] B. Markal, "The effect of total flowrate on the cooling performance of swirling coaxial impinging jets," *Heat and Mass Transfer*, vol. 55, pp. 3275-3288, 2019.
- [13] K. H. Chien, Y. T. Lin, Y. R. Chen, K. S. Yang, and C. C. Wang, "A novel design of pulsating heat pipe with fewer turns applicable to all orientations," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 55, pp. 5722–5728, 2012.
- [14] C. Y. Tseng, K. S. Yang, K. H. Chien, M. S. Jeng and C. C. Wang, "Investigation of the performance of pulsating heat pipe subject to uniform/alternating tube diameters," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 54, pp. 85–92, 2014.
- [15] G. H. Kwon, and S. J. Kim, "Experimental investigation on the thermal performance of a micro pulsating heat pipe with a dual-diameter channel," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 89, pp. 817–828, 2015.
- [16] D. S. Jang, J. S. Lee, J. H. Ahn, D. Kim and Y. Kim, "Flow patterns and heat transfer characteristics of flat plate pulsating heat pipes with various asymmetric and aspect ratios of the channels," *Applied Thermal Engineering*, vol. 114, pp. 211–220, 2017.
- [17] L. Aref, R. Fallahzadeh, S. R. Shabaniyan and M. Hosseinzadeh, "A novel dual-diameter closed-loop pulsating heat pipe for a flat plate solar collector," *Energy*, vol. 230, Art. no.120751.

- [18] S. Shi, X. Cui, H. Han, J. Weng, and Z. Li, "A study of the heat transfer performance of a pulsating heat pipe with ethanol-based mixtures," *Applied Thermal Engineering*, vol. 102, pp. 1219–1227, 2016.
- [19] X. Cui, Z. Qiu, J. Weng, and Z. Li, "Heat transfer performance of closed loop pulsating heat pipes with methanol-based binary mixtures," *Experimental Thermal Fluid Science*, vol. 76, pp. 253–263, 2016.
- [20] R. Xu, C. Zhang, H. Chen, Q. Wu, and R. Wang, "Heat transfer performance of pulsating heat pipe with zeotropic immiscible binary mixtures," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 137, pp. 31–41, 2019.
- [21] K. Bao, X. Wang, Y. Fang, X. Ji, X. Han and G. Chen, "Effects of the surfactant solution on the performance of the pulsating heat pipe," *Applied Thermal Engineering*, vol. 178, Art. no. 115678, 2020.
- [22] Y. Zhou, H. Yang, L. Liu, M. Zhang, Y. Wang, Y. Zhang and B. Zhou, "Enhancement of start-up and thermal performance in pulsating heat pipe with GO/water nanofluid," *Powder Technology*, vol. 384, pp. 414-422, 2021.
- [23] B. Markal, and R. Varol, "Thermal investigation and flow pattern analysis of a closed-loop pulsating heat pipe with binary mixtures," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering*, vol. 42, 2020, Art. no. 549.
- [24] B. Markal, and R. Varol, "Experimental investigation and force analysis of flat-plate type pulsating heat pipes having ternary mixtures," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 121, 2021, Art. no. 105084.
- [25] B. Markal and R. Varol, "Investigation of the effects of miscible and immiscible binary fluids on thermal performance of pulsating heat pipes," *Heat and Mass Transfer*, vol. 57, pp. 1527-1542, 2021.
- [26] K. S. Yang, Y. C. Cheng, M. C. Liu, and J. C. Shyu, "Micro pulsating heat pipes with alternate microchannel widths," *Applied Thermal Engineering*, vol. 83, pp. 131–138, 2015.
- [27] G. Spinato, N. Borhani, and J. R. Thome, "Operational regimes in a closed loop pulsating heat pipe," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 102, pp. 78–88, 2016.
- [28] D. A. Reay, P. A. Kew and R. J. McGlen, "Appendix 1 Working Fluid Properties", in *Heat Pipes: theory, desing and applications*, 6th ed., Oxford, United Kingdom: Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2014, pp. 229.
- [29] J. F. Messerly, G. B. Guthrie, S. S. Todd and H. L. Finke, "Low-temperature thermal data for n-pentane, n-heptadecane, and n-octadecane. Revised thermodynamic functions for the n-alkanes, C₅-C₁₈," *Journal of Chemical and Engineering Data*, vol. 12, pp. 338–346, 1967.
- [30] *NIST Chemistry WebBook*, Thermophysical properties of fluid systems, Natinal Institute of Standards and Technology U.S. Department of Commerce, 2021. [Online]. Available: <https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>. Accessed: August 20, 2021.
- [31] Y. A. Cengel and M. A. Boles, "Thermodynamic Property Relations", in *Thermodynamics: an engineering approach*, 8th ed., New York, USA: McGraw-Hill Education, 2015, pp. 662–664.

[32] H. Han, X. Cui, Y. Zhu, T. Xu, Y. Sui and S. Sun, “Experimental study on a closed-loop pulsating heat pipe (CLPHP) charged with water-based binary zeotropes and the corresponding pure fluids,” *Energy*, vol. 109, pp. 724–736, 2016.

[33] Y. Zhu, X. Cui, H. Han, and S. Sun, “The study on the difference of the start-up and heat-transfer performance of the pulsating heat pipe with water-acetone mixtures,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 77, pp. 834–842, 2014.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Research Article

Generation of Coherent XUV Radiation in N₂ molecule and its Mixture with Ne Gas using Sub-terawatt Laser System

 Muhammed SAYRAC^{a,*}

^a Nanotechnology Engineering Department, Faculty of Engineering, Sivas Cumhuriyet University, Sivas, Türkiye

* Corresponding author email: muhammedsayrac@cumhuriyet.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.799153

ABSTRACT

High harmonic generation (HHG) in pure nitrogen (N₂) and its mixture with neon (Ne) gas was produced. The external laser field producing 6mJ optical pulse energy with 50fs pulse duration at 10Hz repetition rate was focused into a gas jet producing high harmonics. The N₂ and Ne gas have different ionization potentials. The strong harmonic signal in pure N₂ was produced, and a weak harmonic signal in a mixture of N₂-Ne was generated compared to that in pure N₂. The increase of Ne contribution in the N₂-Ne mixture resulted in a decrease in harmonic signal. Harmonic signal increase and decrease were observed for different N₂:Ne ratios. The harmonic generation mechanism was discussed in that the ionization of Ne is difficult compared to N₂, and the neutral Ne atom leads to neutral atomic dispersion (phase mismatch), so the harmonic yield decreases.

Keywords: Extreme ultraviolet radiation, High harmonic generation, Three-step model, Femtosecond laser, Gas mixtures, Absorption

N₂ Molekülünden ve Bunun Ne Gazı ile Karışımından Sub-terawatt Lazer Sistemi kullanılarak Uyumlu XUV Radyasyonu Üretilmesi

Öz

Saf nitrojen (N₂) gazından ve bunun neon (Ne) gazı ile karışımından yüksek harmonik mertebeler (HHG) üretildi. 10Hz tekrarlanma hızında 50fs optik darbe süresi ile 6mJ optik darbe enerjisi üreten lazer alanı, yüksek harmoniklerin üretildiği bir gaz jetine odaklandı. N₂ ve Ne gazı farklı iyonlaşma potansiyellerine sahip olduğu için saf N₂ gazında güçlü harmonik sinyali ve saf N₂'ye kıyasla N₂-Ne karışımında zayıf harmonik sinyali elde edildi. N₂-Ne karışımında Ne katkısının artması harmonik sinyalin zayıflamasına neden oldu. Farklı N₂:Ne oranı için harmonik sinyal artışı ve düşüşü gözlemlendi. Harmonik üretimi mekanizması, Ne iyonlaşmasının N₂'ye kıyasla zor olduğu tartışıldı, ve nötr Ne atomunun, nötr atomik dispersiyona yol açtığı (faz uyumsuzluğu) ve böylece harmonik sinyalin azalmasına neden olduğu açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Aşırı ultraviyole radyasyonu, Yüksek mertebeli harmoni üretimi, Üç-adım modeli, Femtosaniye lazer, Gaz karışımı, Soğurma

I. INTRODUCTION

There is a strong desire to measure the physical system with high spatial and temporal resolution for accurate measurements. The development of ultrashort laser sources makes it possible to achieve such a desire. The state-of-the-art laser system finds applications from pump-probe spectroscopy [1] to the study of laser beam shape [2-5], and from terahertz science [6, 7] to fragmentation [8, 9]. Moreover, it paves the way for high-intensity physics (high harmonic generation) [10-16]. There are facilities producing high photon energy such as free electron lasers and synchrotron sources [17, 18], but these facilities have some disadvantages such as high cost to operate and not reachable by the researchers working in moderate laboratories. Thanks to the ultrashort tabletop laser system, high harmonic generation (HHG) is an alternative compact radiation source to such immoderate facilities since the HHG emits coherent short wavelength radiation with high brightness [19].

The high harmonic generation arises when an atom is illuminated with short laser pulses ($<10^{-12}$ s) at high focused intensities ($>10^{13}$ Wcm $^{-2}$) [20, 21]. HHG produces optical pulses in the extreme ultraviolet spectral region (XUV) [22]. HHG source is a powerful tool in optical spectroscopy. This spectral region allows to study photoionization of many atoms or molecules [23]. In addition, XUV radiation produced by the harmonic generation process releases sub-femtosecond pulses leading to the generation of attosecond pulses (1 as= 10^{-18} s) [24-27].

Although high harmonic generation has the potential candidate provide bright short optical pulses, it suffers from its low conversion efficiency [28, 29]. Optimization of harmonic generation yield has been studied by several researchers [12-15, 30-33]. The brightness of such a light source is a benchmark for studying light-matter interaction.

The mechanism of high harmonic generation has been explained by a three-step model; ionization, acceleration, and recombination of an electron, respectively [34]. Ionization: an electron exposed to a strong laser field leaves from the atom through a tunneling process. Acceleration: the freed electron propagates in the continuum with the oscillating laser field and gains kinetic energy. Recombination: the electron is driven back by the laser field, and it recombines with its atomic core. After recombination, the kinetic energy of the electron gained during the laser oscillation is released in the form of high photon energy.

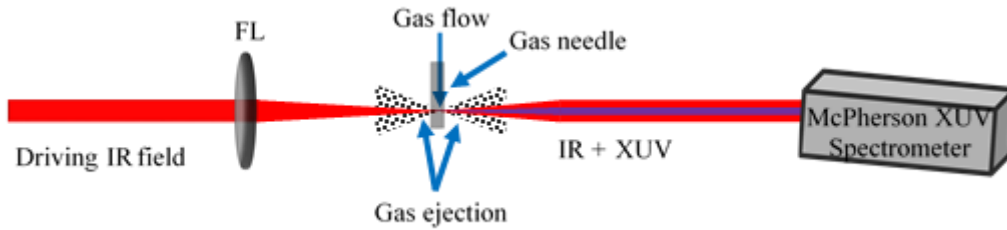


Figure 1. Schematic of high harmonic generation setup. FL: focusing lens, IR: infrared radiation, XUV: extreme ultraviolet

Initially, the electron is confined with the Coulomb potential. The strong laser field tilts the potential, and the electron tunnels to the continuum. The electron gains kinetic energy under the oscillating laser field. The kinetic energy of the electron is called the ponderomotive energy, $U_p = e^2 E^2 / (4m_e \omega^2)$, where e and m_e represent the charge and the mass of the electron. ω and E (E^2 corresponds to the intensity of the laser^I field) are the angular frequency and the electric strength of the laser field, respectively. Recombination of the electron with its parent ion releases the energy in the form of high photon energy. The maximum harmonic photon energy E_{max} is determined by cutoff law $E_{max} = I_p + 3.17U_p$ [34, 35], here I_p is the ionization potential of the medium, and U_p is the ponderomotive energy.

In this paper generation of optical pulses in the extreme ultraviolet (XUV) spectral range having photon energies from 26 eV to 48 eV (from 47 nm down to 25 nm in terms of wavelength) has experimentally produced in N₂ and its mixture with Ne gas. The harmonic yield in pure N₂ is stronger than that in the N₂:Ne mixture. The N₂:Ne mixture ratio of 82%-18% gives more output signal

compared to that of the 50%-50% mixture ratio.

II. EXPERIMENTAL SETUP

Ti: Sapphire laser system having a pulse energy of 6mJ with pulse duration of 50fs at 10Hz repetition rate is used as a driving laser source. The central wavelength of the driving laser field is centered at 800nm (IR). The radiation is focused by using a 40cm focal length lens (FL), and the focused intensity of the field is $1 \times 10^{15} \text{W/cm}^2$. The radiation is focused on a gas needle (gas jet) containing pure N_2 gas or its mixture with Ne. The pressure value inside the gas needle is $\sim 40 \text{mbar}$ [16].

N_2 gas is provided to the gas tube from a high-pressure N_2 cylinder. The mixture of N_2 with Ne is mixed in a small-size lecture bottle, Fig. 1. The mixture cylinder and the gas line are evacuated by a roughing pump (exhaust) to eliminate residual gas and contamination in the gas line. After the gas mixture is prepared in the small-size lecture cylinder, it flows to a 1mm thickness nickel gas tube. The gas flow intensifies the gas pressure inside the tube. The strong laser field makes holes as an input and an output hole (about $60 \mu\text{m}$ size) on the tube. A detailed demonstration of the experimental setup, Fig. 1, is described in Ref. [36]. The pressurized gas ejects through the holes. The interaction of the laser field with the gas medium results in high order harmonic of the fundamental radiation. Generated harmonics propagate to the McPherson XUV spectrometer.

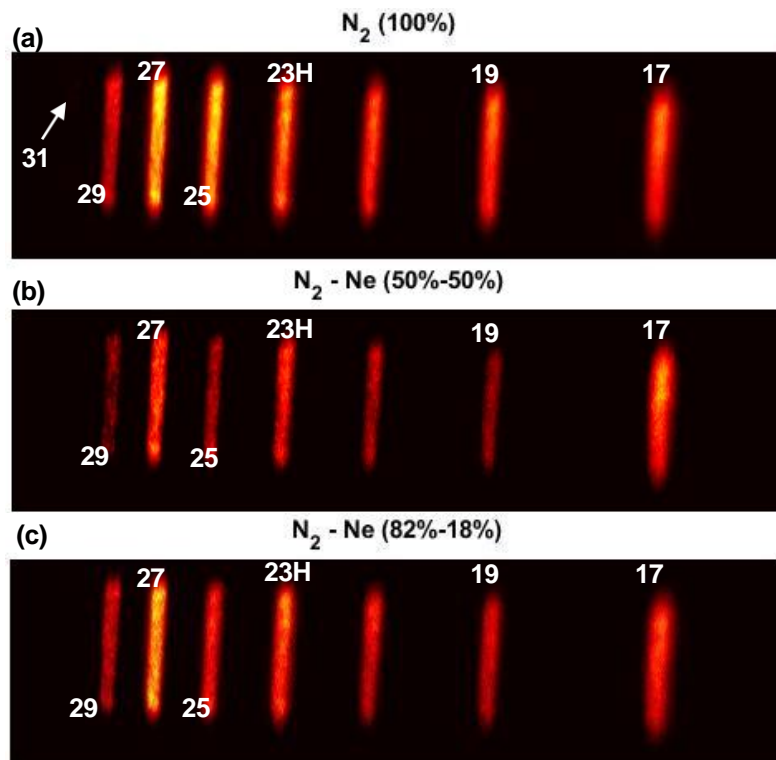


Figure 2. Raw data of high harmonic spectrum (a) in pure N_2 (100%), (b) N_2 -Ne (50%-50%), and (c) N_2 -Ne (82%-18%)

III. RESULTS AND DISCUSSION

A high harmonic spectrum is obtained in N_2 and its mixture with Ne gas. The raw data of high harmonics is presented in Fig. 2. The captured high harmonics (100% N_2 , N_2 -Ne mixture of 50%-50%, and of 82%-18% ratio) are presented, and harmonic orders from 17H to 31H are well resolved in Fig. 2. The corresponding backing pressure (gas flow into the gas needle) is ~ 2.8 bar for pure N_2 , and ~ 1.4 bar:1.4bar for 50%-50% N_2 -Ne mixture, and ~ 2.2 bar:0.6bar for 82%-18% N_2 -Ne mixture. The harmonic spectrum in pure N_2 is stronger than that in the mixture at two different concentrations.

The 31H orders are not well resolved, Fig. 2. However, it is observed when the images of Fig. 2 (raw data) are processed (background subtracted), Fig. 3. The lowest harmonic signal is produced in 50%-50% N_2 -Ne ratio. The harmonic yield produced in the N_2 -Ne (82%-18%) mixture is stronger than the harmonic yield produced in the N_2 -Ne mixture (50%-50%), Fig. 3. The greater contribution of Ne gas in the mixture leads to the decrease of the harmonic signal. The HHG in pure Ne is difficult and not observed at used experimental parameters because of the higher ionization potential of Ne gas ($I_p=21.5$ eV [37]), and HHG in pure N_2 is stronger since the ionization of N_2 ($I_p=15.7$ eV for N_2 , [38]) is easy compared to ionization of Ne gas.

The harmonic yield produced in the N_2 -Ne (50%-50%) mixture has decreased by a factor of 1.7 to 3.9 compared to that produced in pure N_2 . The harmonic spectrum in the N_2 -Ne (82%-18%) mixture has decreased by a factor of 1.4 to 2.1 compared to the harmonic signal in pure N_2 . The harmonic signal in N_2 -Ne (82%-18%) mixture is stronger compared to that in N_2 -Ne (50%-50%) mixture. The enhancement factors (ratio of harmonic yield produced in N_2 -Ne (82%-18%) mixture to harmonic yield produced in N_2 -Ne (50%-50%) mixture) are varied from 1.2 to 2.1. Enhancement and decrement factors for each harmonic order (from 17H to 31H) are presented in Table 1.

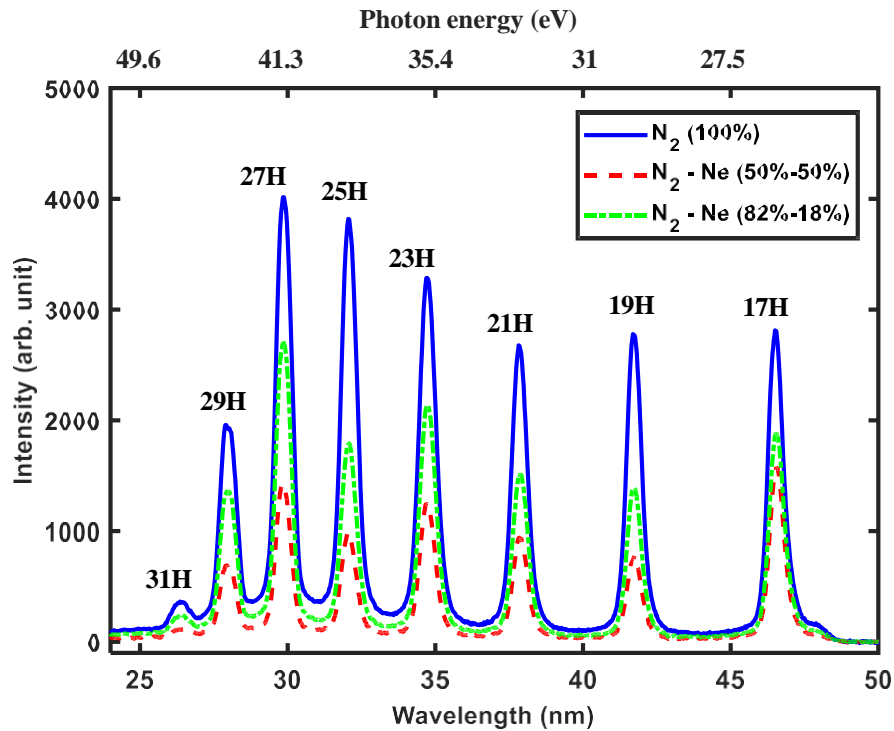


Figure 3. Harmonic spectrum from 17H to 31H in N_2 and its mixture with Ne gas. The solid blue line is for pure N_2 . Dashed red line is N_2 -Ne (50%-50%). The dashed-dotted green line is for N_2 -Ne (82%-18%)

Table 1. Harmonic generation yield decrement and enhancement factors for each harmonic orders

a= N ₂ (100%), b=N ₂ -Ne (50%-50%), c=N ₂ -Ne (82%-18%)			
Harmonic orders	Signal decrement (a/b)	Signal decrement (a/c)	Signal enhancement (c/b)
17H	1.7	1.4	1.2
19H	3.8	2.0	1.7
21H	2.7	1.7	1.6
23H	2.5	1.5	1.7
25H	3.9	2.1	1.8
27H	2.6	1.4	1.9
29H	2.9	1.4	2.0
31H	3.2	1.4	2.1

In this experimental work, the harmonic spectrum in pure N₂ and its mixture with Ne gas have been analyzed by using a sub-terawatt laser system producing optical pulses with 50fs pulse duration at a 10Hz repetition rate. High harmonic yield in pure N₂ has been well resolved since the ionization of N₂ gas is easy due to its low ionization potential ($I_p=15.7\text{eV}$) [38]. However, the harmonic spectra produced in Ne gas have not been obtained since Ne gas has a high ionization potential ($I_p=21.5\text{eV}$) [37]. The harmonic signal decreased or increased depending on the Ne contribution in the mixture ratio. When the strong laser fields interact with the medium, not all atoms are ionized. The ionization depends on the ionization potential of the medium. In the current experimental configuration, the medium is a mixture of neutral and ionized atoms. The neutral atom results in the atomic dispersion [12, 14, 16]. An increase of Ne gas concentration in the mixture results in the non-ionized Ne atoms in the medium increase because the ionization of Ne is difficult compared to that of N₂. The neutral Ne atoms increase the neutral atomic dispersion, and the neutral Ne atoms absorb the generated harmonics produced in N₂ gas. Thus, the HHG signal decreases.

When the Ne ratio is 18% in the gas mixture the harmonic signal increases because harmonics produced in N₂ gas with IR radiation contribute to ionization of Ne gas. Thus, a small amount of Ne contribution into N₂ gas results in a harmonic signal increase. However, an increase in the Ne contribution in the gas mixture makes the interaction region have unionized Ne atoms, which absorb the generated harmonics. Thus, the harmonic yield decreases. The absorption of Ne gas has a negative effect on the generated harmonic signal when the Ne contribution is higher in the gas mixture. Non-ionized Ne atoms in the medium result in to increase of the phase mismatch and lead decrement of harmonic signal produced in the gas mixture.

IV. CONCLUSION

Generation of high-order harmonics is produced by using a strong laser field having a pulse energy of 6mJ with a pulse duration of 50fs at a 10Hz repetition rate. Harmonic orders from 17H to 31H are obtained. The strong harmonic signal is obtained in pure N₂. The mixture of N₂-Ne gas leads to a decrement in the harmonic signal compared to that generated in pure N₂. When the Ne contribution increases, the harmonic signal decreases, Fig. 3. The mechanism of this decrement is that non-ionized Ne atoms in the medium have a negative effect on the generated harmonics produced in pure N₂. The neutral atomic dispersion from Ne gas leads to a low HHG signal. The decrease of Ne concentration in the gas mixture increases the harmonic yield. The harmonic signal decreases and the 31H order yield almost disappears when the Ne contribution is 50% in the gas mixture. The small ratio of Ne contribution leads to an increase in the harmonic signal, and the 31H order appears. The factors of signal enhancement and decrement are presented in Table 1. The optimized harmonic source has the potential to reach a short wavelength region from 47nm to 25nm (corresponding photon energy from

26eV to 48eV). The powerful light source has broad application areas, i.e. nonlinear optic in XUV region and enabling imaging of nanoscale objects in coherent short wavelength pulses.

ACKNOWLEDGMENTS: I am thankful to A. Kolomenski and H. Schuessler for providing the opportunity to perform the experiments described in this paper at Texas A&M University.

V. REFERENCES

- [1] H. Cai *et al.*, "Spectral modulation of femtosecond laser pulse induced by molecular alignment revivals," *Opt. Lett.*, vol. 34, pp. 827-829, 2009.
- [2] C. Ma *et al.*, "Extending optical filaments of annular beams via square root spatial phase modulation," *Opt. Commun.*, vol. 458, pp. 124828, 2020.
- [3] M. A. Porras *et al.*, "Stationary and stable light-beam propagation in Kerr media with nonlinear absorption with controllable dissipation patterns," *Phys. Rev. A*, vol. 95, pp. 043816, 2017.
- [4] S. R. Fairchild *et al.*, "Free-Space Nonlinear Beam Combining for High Intensity Projection," *Sci. Rep.*, vol. 7, pp. 10147, 2017.
- [5] J. Zeng *et al.*, "Partially coherent fractional vortex beam," *Opt. Express*, vol. 26, pp. 26830-26844, 2018.
- [6] B. Urbanek *et al.*, "Femtosecond terahertz time-domain spectroscopy at 36 kHz scan rate using an acousto-optic delay," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 108, pp. 121101, 2016.
- [7] J. Zhao *et al.*, "Strong Spatial Confinement of Terahertz Wave inside Femtosecond Laser Filament," *ACS Photonics*, vol. 3, pp. 2338-2343, 2016.
- [8] T. Yatsunami and N. Nakashima, "Multiple ionization and Coulomb explosion of molecules, molecular complexes, clusters and solid surfaces," *J. Photochem.*, vol. 34, pp. 52-84, 2018.
- [9] M. I. A. Parkes *et al.*, "Ionization of acetonitrile," *Int. J. Mass Spectrom.*, vol. 438, pp. 97-106, 2019.
- [10] C. Vozzi *et al.*, "Probing two-centre interference in molecular high harmonic generation," *J. Phys. B*, vol. 39, pp. 457-466, 2006.
- [11] C. Vozzi *et al.*, "Controlling Two-Center Interference in Molecular High Harmonic Generation," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 95, pp. 153902, 2005.
- [12] M. Sayrac *et al.*, "Pressure dependence of high order harmonic generation in nitrogen molecular gas and atmospheric air," *Optik*, vol. 179, pp. 994- 1000, 2019.
- [13] M. Sayrac *et al.*, "Generation of enhanced even harmonics of fundamental radiation in temporally separated two-color laser fields," *J. Electron Spectros. Relat. Phenomena*, vol. 233, pp. 22-27, 2019.
- [14] M. Sayrac *et al.*, "Pressure optimization and phase matching of high harmonics generation in CO₂ and C₂H₂ molecular gases," *J. Electron Spectros. Relat. Phenomena*, vol. 229, pp. 1-6, 2018.
- [15] M. Sayrac *et al.*, "High Harmonic Generation in Ne and H₂ Gas Mixtures," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 32, pp. 2400-2405, 2015.

- [16] M. Sayrac *et al.*, "Pressure optimization of high harmonic generation in a differentially pumped Ar or H₂ gas jet," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 86, pp. 043108, 2015.
- [17] K. Nakajima, "Towards a table-top free-electron laser," *Nat. Phys.*, vol. 4, pp. 92-93, 2008.
- [18] T. Liu *et al.*, "Compact beam transport system for free-electron lasers driven by a laser plasma accelerator," *Phys. Rev. Accel. Beams*, vol. 20, pp. 020701, 2017.
- [19] R. Spitzeneifel *et al.*, "Enhancing the brilliance of high-harmonic generation," *Appl. Phys. A*, vol. 96, pp. 69, 2009.
- [20] A. L'Huillier *et al.*, "Higher-order harmonic generation in xenon at 1064 nm: The role of phase matching," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 66, pp. 2200-2203, 1991.
- [21] A. L'Huillier *et al.*, "Calculations of high-order harmonic-generation processes in xenon at 1064 nm," *Phys. Rev. A*, vol. 46, pp. 2778-2790, 1992.
- [22] T. Ditmire *et al.*, "Spatial Coherence Measurement of Soft X-Ray Radiation Produced by High Order Harmonic Generation," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 77, pp. 4756-4759, 1996.
- [23] T. Pfeifer *et al.*, "Femtosecond x-ray science," *Rep. Prog. Phys.*, vol. 69, pp. 443-505, 2006.
- [24] E. Goulielmakis *et al.*, "Single-Cycle Nonlinear Optics," *Science*, vol. 320, pp. 1614-1617, 2008.
- [25] T. Popmintchev *et al.*, "The attosecond nonlinear optics of bright coherent X-ray generation," *Nat. Photon.*, vol. 4, pp. 822-832, 2010.
- [26] H. J. Wörner *et al.*, "Conical Intersection Dynamics in NO₂ Probed by Homodyne High-Harmonic Spectroscopy," *Science*, vol. 334, pp. 208-212, 2011.
- [27] A. N. Pfeiffer *et al.*, "Recent attoclock measurements of strong field ionization," *Chem. Phys.*, vol. 414, pp. 84-91, 2013.
- [28] E. Takahashi *et al.*, "Generation of highly coherent submicrojoule soft x rays by high-order harmonics," *Phys. Rev. A*, vol. 66, pp. 021802, 2002.
- [29] A. D. Shiner *et al.*, "Wavelength Scaling of High Harmonic Generation Efficiency," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 103, pp. 073902, 2009.
- [30] P. Zeitoun *et al.*, "Recent developments in X-UV optics and X-UV diagnostics," *Appl. Phys. B*, vol. 78, pp. 983-988, 2004.
- [31] J. Gautier *et al.*, "Optimization of the wave front of high order harmonics," *Eur. Phys. J. D*, vol. 48, pp. 459-463, 2008.
- [32] J. Lohbreier *et al.*, "Maximizing the brilliance of high-order harmonics in a gas jet," *New J. Phys.*, vol. 11, pp. 023016, 2009.
- [33] S. Eyring *et al.*, "Improving high-order harmonic yield using wavefront-controlled ultrashort laser pulses," *Opt. Express*, vol. 20, pp. 5601-5606, 2012.
- [34] P. B. Corkum, "Plasma Perspective on Strong-Field Multiphoton Ionization," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 71, pp. 1994-1997, 1993.
- [35] J. L. Krause *et al.*, "High-Order Harmonic Generation from Atoms and Ions in the High Intensity Regime," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 68, pp. 3535-3538, 1992.



- [36] M. Sayrac, "High Harmonic Generation in Ar and N₂ Gas Mixture Using Ultrashort High Power Laser System," *J. Institute of Sci. Tech.*, vol. 10, pp. 1659-1665, 2020.
- [37] R. Womer, "Ionization of helium, neon, and argon," *Phys. Rev.*, vol. 38, pp. 454-456, 1931.
- [38] J. T. Tate and P. T. Smith, "The Efficiencies of Ionization and Ionization Potentials of Various Gases Under Electron Impact," *Phys. Rev.*, vol. 39, pp. 270-277, 1932.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Pandemi Sürecinde Uzaktan Eğitimde Senkron, Asenkron Ve Hibrit Yapılmış Derslerde Veri Madenciliği İle Öğrenci Performans Analizi

 Serdar KIRIŞOĞLU ^{a,*},  Mehmet YILDIRIM ^b

^a Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

^b Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: serdarkirisoglu@duzce.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1067122

ÖZ

Günümüzde üniversite öğrencilerinin eğitime ve eğitim materyallerine internetten erişim oranları oldukça artmıştır. Eğitimde internetin kullanılması ve ders materyallerine erişimin artmasına bağlı olarak analiz edilebilecek veri setinde artış meydana gelmiştir. Bu veri setlerinden bir tanesi de (planlı veya acilen) uzaktan eğitim sürecine geçen üniversitelerin, uzaktan eğitim sistemlerinde biriken ödev, sınav, proje, performans, devam notları ve benzeridir. Yeni Korona Virüs (Covid-19) pandemisinde Yüksek Öğretim Kurumu'nun (YÖK) tavsiyesi ile üniversiteler eğitimlerine uzaktan Asenkron, Senkron ve Hibrit yöntemlerini kullanarak devam etmiş, hatta sınavları uzaktan eğitim sisteminde yapmak zorunda kalmışlardır. Bu çalışmada, Kayseri Üniversitesinin Uzaktan Eğitim Uygulama ve Araştırma Merkezi (KAYUZEM) sisteminden alınmış veriler kullanılmıştır. Araştırma kapsamında 8319 işlenmiş veri bulunmaktadır. Bu veriler üzerinde Veri Madenciliği (VM) alanında kullanılan RapidMiner programının otomatik modelleme özelliği kullanılarak varsayılan algoritmalarla geleceğe yönelik tahminleme işlemi yapılmıştır. Varsayılan algoritmalar arasından en iyi sonucu veren Derin Öğrenme, Naive Bayes, Gradient Boosted Trees, Lojistik Regresyon kullanılmış ve bu otomatik modelleme de yer almayan k-En Yakın Komşu (k-NN) algoritması da çalışmaya dahil edilmiştir. Bu 5 algoritmanın parametreleri üzerinde değişiklikler yapılarak daha iyi sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Öğrenci başarısına göre en iyi tahminleme sonucunu, Lojistik Regresyon ile kurulan model vermiştir. Derse katılma yöntemlerinin tümünün (Senkron, Asenkron ve Hibrit) öğrenci başarısına etkisi Karışıklık Matrisi yöntemiyle karşılaştırılmıştır ve en güvenilir yöntemin Hibrit olduğu görülmüştür. Bu çalışma ile üniversitelerde derse katılma yöntemlerinden hangisinin, öğrenciler açısından daha güvenilir olacağına yönelik çıkarımlarda bulunulmuştur. Dolayısıyla yapılan çıkarımlar ile birlikte bir dahaki akademik dönem için öğrenci başarı düzeyinin artması yönünde, derse katılma yöntemlerinden hangisinin daha güvenilir olduğu konusunda tahminleme mümkün olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Veri madenciliği, Uzaktan eğitim, Pandemi, Covid-19, RapidMiner

Student Performance Analysis With Data Mining In Distance Education Synchronous, Asynchronous And Hybrid Courses In The Pandemic Process

ABSTRACT

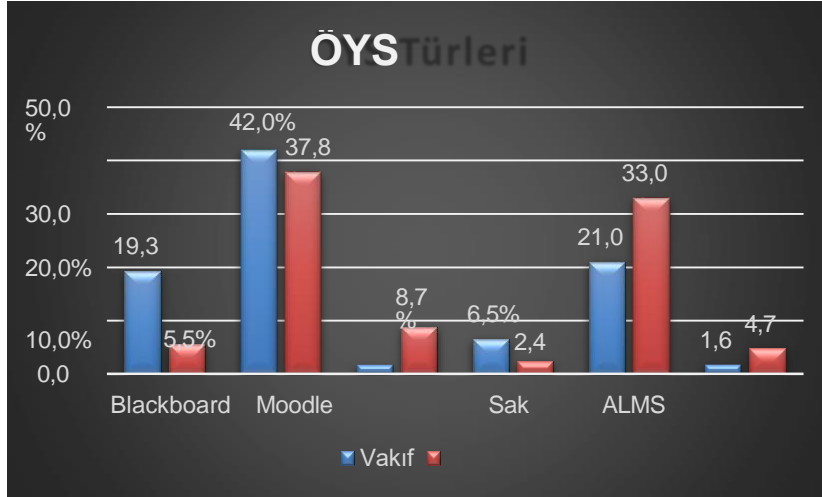
Today, the rate of university students' access to education and training materials from the internet has increased

considerably. There has been an increase in the data set that can be analyzed due to the use of the internet in education and the increase in access to course materials. One of these data sets (planned or urgently) is the homework, exam, project, performance, attendance grades and the like accumulated in the distance education systems of the universities that started the distance education process. In the new Corona Virus pandemic, with the recommendation of the Higher Education Council, universities continued their education by using Asynchronous, Synchronous and Hybrid methods and even had to take the exams in the distance education system. In this research, data obtained from the Distance Education Application and Research Center system of Kayseri University was used. There are 8319 processed data within the scope of the research. Using the automatic modeling feature of RapidMiner program, which is used in Data Mining field, on these data, predictions for the future were made with default algorithms. Deep Learning, Naive Bayes, Gradient Boosted Trees, Logistic Regression, which gave the best results among the default algorithms, were used and the k-NN algorithm, which is not included in this automatic modeling, was also included in the study. It has been tried to obtain better results by making changes on the parameters of these 5 algorithms. The model established with Logistic Regression gave the best estimation result according to student success. The effect of all the participation methods (Synchronous, Asynchronous and Hybrid) on student achievement was compared with the Confusion Matrix method and it was seen that the most reliable method was Hybrid. With this research, inferences were made about which of the methods of attending lectures in universities would be more reliable for students. Therefore, with the inferences made, it has been possible to predict which of the methods of participation in the course is more reliable in order to increase the level of student achievement for the next academic term.

Keywords: Data mining, Distance education, Pandemic, Covid-19, RapidMiner

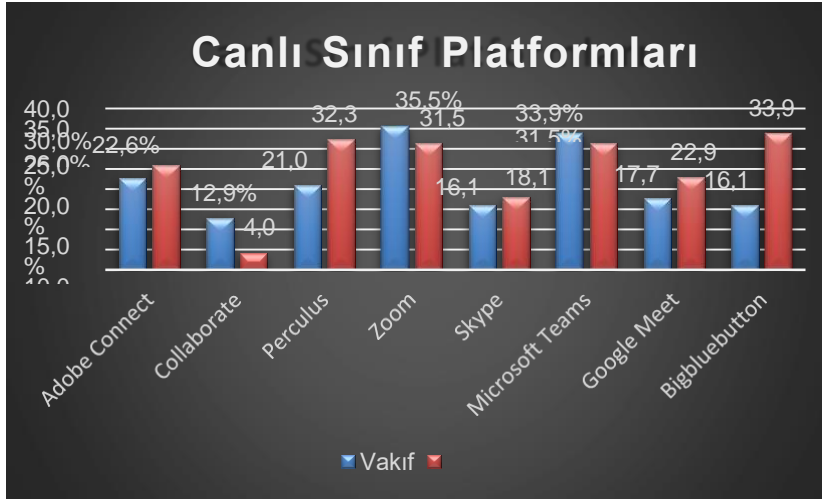
I. GİRİŞ

2019 yılının sonlarında Çin'in Vuhan Eyaleti'nde Covid-19 hastalığı tespit edilmiş ve dünyadaki diğer ülkelere de bu virüs yayılmıştır [1]. Ülkemizde ilk Covid-19 virüsü vakası 11 Mart 2020 tarihinde görüldükten sonra Dünya Sağlık Örgütü pandemi ilan etmiş ve bu tarihten itibaren vaka sayıları belirli bir oranda artış göstermiştir [2]. Vakaların artışıyla birlikte YÖK 16 Mart 2020 tarihinde eğitime 3 hafta ara verileceğini duyurmuştur [3]. Eğitim ve öğretim süreçlerinin kesintiye uğramaması için 18.03.2020 tarihinde YÖK tarafından yapılan açıklamada mevzuatta uzaktan öğretim ile ilgili değişikliğe gidilmiş ve "Uygulama konusuna gelince; üniversitelerimiz senkron (eş zamanlı) ya da asenkron (eş zamanlı olmaksızın) uzaktan öğretim yöntemlerini kullanabilir. İçinde bulunulan ortamda senkron uygulamaların güçlüğü göz önüne alındığında üniversitelerimizin özellikle önlisans ve lisans programlarında asenkron uygulamalara ağırlıklı yöneleceği tahmin edilmekte olup daha çok etkileşim içeren senkron uygulamalar da YÖK tarafından teşvik edilecektir." kararı alınmıştır [4]. Pandemi koşullarının uzayacağı öngörüldükten sonra YÖK tarafından üniversitelerde 2019 – 2020 bahar yarıyılında eğitim ve öğretimin tamamen uzaktan yapılmasına karar verilmiştir [5]. Daha sonra yapılan çalışmalar pandeminin seyrine göre değişiklik göstermiştir. Örneğin; 04.06.2020 tarihli karar ile birlikte derslerin uzaktan eğitimde verilme oranı %30'dan %40'a çıkmıştır. Bunun yanında üniversitelerdeki mevcut Uzaktan Eğitim Araştırma ve Uygulama Merkezi (UZEM) sayısı 120'den 140'a çıkmıştır [6]. Bu merkezlerin kullandığı platformlar çeşitlilik göstermiştir. YÖK'ün üniversitelerimizde küresel salgın sürecinde uzaktan eğitim uygulamaları anket sonuçlarına göre, Şekil 1'de gösterildiği üzere çoğunlukla kullanılan Öğrenme Yönetim Sistemi (ÖYS) türleri Blackbord, Moodle, Canvas, Sakai, Advancity Learning Management System (ALMS) ve Edmodo'dur [7]. Üniversiteler de en çok kullanılan ÖYS türü Şekil 1'de gözüktüğü üzere Moodle olmuştur. Bu çalışmada kullanılan veri seti (Asenkron dersler için) ALMS ÖYS Türü üzerinden temin edilmiştir.



Şekil 1. Pandemi Döneminde Üniversitelerde Kullanılan ÖYS Türleri.

Aynı anket sonuçlarına göre canlı derslerde (Senkron) çoğunlukla kullanılan Şekil 2’de gösterilen canlı sınıf platformları ise Adobe Connect, Collaborate, Perculus, Zoom, Skype, Microsoft Teams, Google Meet ve Bigbluebutton’dır [7]. Üniversiteler de en çok kullanılan canlı ders platformu Şekil 2’de görüldüğü üzere Zoom’dur. Bu çalışmada kullanılan veri seti (Senkron dersler için) Perculus canlı sınıf platformu üzerinden temin edilmiştir.



Şekil 2. Pandemi Döneminde Üniversitelerde Kullanılan Canlı Sınıf Platformları.

YÖK 30.07.2020 tarihinde “Küresel Salgında Yeni Normalleşme Süreci” rehberi yayınlamış ve salgının bölgesel seyrine göre yapılacak olan uygulamalara yönelik hususlarda yetkiyi üniversitelerin ilgili kurullarına bırakmıştır. Salgının devam ettiği yeni normal süreçte harmanlanmış (hibrit) öğrenme yöntemini tavsiye etmiştir. Dolayısıyla uzaktan öğretimde kullanılan senkron, asenkron (açık ders malzemelerinin önden verilmesi) ve yüz yüze eğitimin bir arada yapılabileceğini yani hibrit yöntemini tavsiye etmiştir [8]. 2021 – 2022 eğitim ve öğretim yılından itibaren üniversitelerde uzaktan eğitimin pandemi koşullarına göre hibrit olarak devam edebileceği ve bunun yine üniversitelerinin kendi kurul kararlarına bırakıldığı YÖK tarafından Ağustos 2021 de yayınlanan Küresel Salgında Eğitim ve Öğretim Süreçlerine Yönelik Uygulamalar Rehberi’nde belirtilmiştir [9].

Pandemi sürecinde sadece uzaktan eğitimin verilme kararı alındığı 2019 – 2020 bahar yarıyılında KAYUZEM biriminin kullandığı ÖYS türlerinden ALMS ve canlı sınıf platformu Perculus de VM çalışabilecek kadar verinin biriktiği tespit edilmiştir. Bu verilere bakılarak Senkron, Asenkron ve

Hibrit uzaktan öğrenme yöntemlerinin öğrencilerin başarılarındaki etkisi bu araştırmanın konusunu oluşturmaktadır. Bu yönüyle de VM alanında yeni bir yol açacağı öngörülmektedir.

Veri tabanı bilgi keşfi kısaca VTBK süreci olarak tanımlanan, bir veri tabanından faydalı bilginin seçimini, ön değerlendirilmesini, dönüştürülmesini, veri kazıma işlemini ve sentez-yorum adımlarını içeren süreçtir [10]. Bir üniversitede uzaktan eğitimde verilen derslerin önemli çıktıları olan öğrenci notlarını içeren büyük veriler içerisinde veri sürecinin yürütülebilmesi için VM metotları ve algoritmaları kullanılmaktadır. Bu çalışmanın metod ve analiz bölümünde benzer bir süreç işlemiştir.

VM, büyük veri yığınları içerisinde modeller ve araçlar kullanarak faydalı bilgiye ulaşma sürecidir. Bu faydalı bilgilere belirli kurallar ve modeller uygulayarak sınıflandırma yapılabilir. Aynı zamanda bu bilgilerin analizlerini yorumlayarak ve değerlendirerek herhangi bir kullanıcıya ve/veya kuruluşa yarar sağlayabiliriz.

Son yıllarda VM konusunda yapılan çalışmalardan bir tanesi de Türkiye’deki bir üniversite de 3 öğretim üyesinin verdiği derslerle ilgili öğrenci memnuniyetlerini ölçen bir anketteki verileri kullanan bir çalışmadır. Can ve arkadaşları [11], çalışmada da öğretim üyelerinin başarı değişkenlerine göre oluşturulan iki ayrı tahmin modeli kullanılmış ve beklentileri karşılayan bulgular elde edilmiştir. Bu çalışma ile öğrencilerin derse katılımları ve derslerin zorluk dereceleri öğretim üyelerinin başarılarını aynı yönde etkilediği görülmüştür. Bunun yanında VM sayesinde farklı tutum davranışların da başarı algısına olan etkisi de incelenebilmiştir. Görüldüğü gibi bu tür çalışmalar üniversitenin hem öğrenci hem de öğretim üyelerinin eğitimdeki başarı oranlarının daha ayrıntılı değerlendirilmesini veya ölçülmesini sağlamaktadır. Buda bu tür teknolojilerin getirdiği en önemli faydalardan birisidir.

VM konusu Türkiye’deki çalışmalarda şimdiye kadar genelde sınıflamalar ve risk tahminleri üzerinden ilerlemiştir. Ancak 2019 yılında Gushchina ve Ochepovsky [12] tarafından yapılan bir çalışmada uzaktan eğitimdeki öğrenme çıktıları üzerindeki tahmini etkilerinin, VM ile ölçülebildiği ortaya konulmuştur. Burada söz konusu tahmini etkileri azaltmada eğitimi iyileştirmeye yardımcı olmuştur. Çalışmada öncelikle veriler üzerinden risk yönetimi planlanmış ve tüm dinamikler hesaplanmıştır. Çalışmanın sonucunda matematiksel yöntemlerin yetersiz kaldığı yerlerde VM yöntemlerini kullanarak daha iyi sonuç alınabileceği kanısına varılmıştır.

Üniversite öğrencilerinin belirli bir dersteki başarı oranlarının öğrenme yönetim sistemleri hareketliliği ölçülerek başarı düzeyleri arasındaki ilişkinin ortaya konulduğu Özbay ve Ersoy [13] tarafından ele alınan makale bu araştırma için çıkış noktası olmuştur. Özbay ve Ersoy’un bu çalışmalarında, bu tür ölçümlerde kullanılacak olan algoritmalarda doğru çıktı için hangi oranların kullanılacağı ve hangi gruplandırmaların yapılacağı hakkında bilgi verilmiştir. VM de kullanılacak algoritmaların kriter seçiminde bu çalışma yol gösterici olmuştur.

Ülkemizde çalışmamızla ilgili konular ele alınmış olsa da bu araştırmaya en yakın güncel çalışmalar genellikle yurt dışında yapılmaktadır. Örneğin, Abe [14], üniversitenin eğitimsel büyük verilerini VM ve makine öğrenmesinin uygulamaları ile ele almıştır. Ciddi bir sorun teşkil eden mezuniyet erteleme veya okul terki durumlarının daha önceden tahmin edilmesi ve azaltılması için faydalı yöntemler önermiştir. Benzer çalışmalardan yola çıkılarak mevcut araştırmamızda hangi alanların boşluklar bıraktığını ve nasıl doldurulabileceği bu araştırmanın sorularından bazılarıdır.

Ati Jain ve arkadaşları [15] çalışmalarında, pandemi süreci nedeniyle yüz yüze eğitimin sahip olduğu avantajlardan uzaklaşan çevrimiçi ve uzaktan eğitimin, video ve ses analizi yaparak daha başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermişlerdir. Çevrimiçi yapılan öğrenme ve öğretme etkinliklerinde, öğrencilerin gerçek zamanlı olarak yüz ifadeleri ve seslerini kullanarak analiz yapmışlar, bu sisteme yenilikçi bir bakış açısı kazandırmışlardır. Bu yeni ve geliştirici yaklaşımla, kalem ve kâğıt yönteminin normal geri bildirim prosedürünü iyileştiren ve ona bir çözüm olarak hareket eden çeşitli öğretim, eğitim, koçluk ve danışma hizmetlerinde kalitenin iyileştirilmesine yardımcı olacağını aktarmışlardır. Konsantrasyon İndeksi kullanılarak tüm kullanıcılara öğrenme ve öğretme tekniklerini geliştirmelerinde etkili olacağını açıklamışlardır. Bu çalışmayla derin öğrenme algoritmasında

eğitimdeki kaliteyi belirleyen verilerin de işlenebileceği ve çeşitli verilerden elde edilen tahminlerden yararlanılabileceği görülmüştür.

Benzer şekilde, Villegas-Ch ve arkadaşları [16] eğitim kalitesinin artırılması amacıyla, veri algoritmalarının yönetilerek her öğrencinin ihtiyacına uygun bir eğitim sağlayacak şekilde değerlendirilmesinin yapıldığı, başka bir çalışmada da benzer şekilde VM kullanmıştır. Bu çalışmada da öğrenme yönetim sistemleri gibi platformlarda öğrencilerin eğilimleri, başarı tahminleri ve gelişim göstergelerinin sadece veriler üzerinden izlenebileceği ortaya konmuştur.

Byers ve arkadaşları [17] çalışmalarında geleneksel sınıflar ile modern sınıflarda verilen eğitime göre değişiklik gösteren ders başarı verilerini kullanmışlardır. Byers ve arkadaşlarının bu çalışması geleneksel veya uzaktan öğrenme ortamlarındaki değişkenlerin etkilerini hesaplayarak farklı sınıf düzeylerinin öğrenci notlarını etkilediğini ortaya koymuştur. Araştırmada farklı öğrenme alanlarından biri olan uzaktan eğitim sistemindeki verilerin gelecekteki eğitim yöntemlerini de etkileyeceği ön görülmektedir.

Blagojević ve Micić [18], çalışmalarında öğrenim çıktılarının analizinde en doğru sonucu elde etmek için birden fazla parametrenin doğru işlenmesi gerektiğini anlatmışlardır. Doğru analiz için üç farklı denetimli makine öğrenimi tekniği kullanılmış, her tekniğin hesaplama gereksinimleri farklı girdilerle test edilmiş, tahminlerin gerçekleştirilmesi için yapay sinir ağı modeli her durumda ve ihtiyaç duyulan sürede değerlendirilmiştir. Öğrenci performans tahminleri ve sonucunda da yüksek riskli öğrencilerin kursa devam etmeme ihtimallerinin tespiti bu yolla sağlanmıştır.

Bir önceki çalışmada olduğu gibi Hussain [19] çalışmasında “Sınırlı bir veri kümesi boyutu kullanarak bir öğrencinin notunu adil ve anlamlı bir doğruluk oranıyla tahmin etmek için en iyi makine öğrenimi sınıflandırma modeli nedir?” ve “Öğrencilerin notlarını tahmin etmek için bir sınıflandırma modelinin tasarımına yardımcı olabilecek en önemli özellikler nelerdir?” sorularını araştırmış. Bunun için Qassim Üniversitesinin verileri kullanmış ve 17 adet öznitelik verisi ön işleme işlemini yaparak, 13 adet öznitelik (ağırlıklı not ortalaması, kayıtlı dersler, lise notu, öğretim üyesi etkisi, e-öğrenme yöntemi etkisi, değerlendirme etkisi, donanım ve internet hızı, çevrimiçi öğrenme aracı kullanılabilirliği, e-öğrenme kursu uygunluğu, ikamet yeri, kurs adı, öğrenci yaşı ve öğrenci seviyesi) verisini dikkate almıştır. Weka programında BayesNet-D, NativeBayes, J48 algoritmalarını kullanmış. Bu algoritmalar arasında en iyi sonucu J48 algoritması %95,0617 oranını vermiş. Sonuç olarak araştırmacı bu çalışmada, öğrencilerin notlarını tahmin etmek için öznitelikleri belirlemiş ve sınırlı bir veri kümesi boyutu kullanarak bir öğrencinin notunu adil ve anlamlı bir doğruluk oranıyla tahmin etmek için en iyi algoritmayı belirlemiştir. Bu her iki çalışmada görüldüğü üzere tahminlemelerin doğru bir şekilde elde edilmesi için ilk başta ön işleme işlemlerinin detaylı bir şekilde yapılması ve sonrasında algoritmaların parametreleri en iyi sonucu verecek şekilde ayarlanması gerekmektedir. Bu araştırma içinde aynı yol izlenmiştir.

Yaacob ve arkadaşları [20] çalışmalarında öğrenci performansını tahmin etmek için sınıflandırma algoritmalarını kullanarak tahmine dayalı modeller geliştirmişler. Bunun için ilk başta CRISP-DM (Veri madenciliği için sektörler arası standart süreleri) modelini kullanmışlar. İlk adım olarak, öğrencilerin performansını tahmin etme iş problemini veri madenciliği problemine dönüştürmeyi içeren iş faaliyetlerini ve problemlerini anlamışlar. İkinci adımda, verilerin toplanmasını yapmışlar. Üçüncü adımda, toplanan verileri ön işleme işlemine tabi tutmuşlar. Son olarak dördüncü adımda da k- NN, Naive Bayes, Decision Tree ve Lojistik Regresyon algoritmaları ile tahminler yapmışlar ve bu tahminlerin ROC eğrisinde değerlendirmişler. Çalışmanın sonunda öğrenci performansını en iyi tahmin eden algoritma %85,4 ile Naive Bayes olmuştur. Bu yönüyle çalışma bu araştırmadaki veri işleme adımları açısından benzerlik göstermektedir.

Chen Tan ve arkadaşları [21] bu makalede, veri madenciliği kullanan çevrimiçi eğitim sistemlerinde öğretme ve e-öğrenmenin teknik yönlerini tespit etmek amacıyla yeni bir tahmin modeli sunmuşlardır. Öğretim görevlileri ve öğrenciler arasındaki öğretim ve eğitimin davranışsal yönlerinin önemli olması sebebiyle, çevrimiçi eğitim sistemlerinde deneyim kalitesinin tahmini kritik bir konu olduğuna

vurgulamışlardır. Çevrimiçi eğitim sistemlerinde deneyim kalitesinin verimli faktörlerini tespit etmek için birliktelik kuralları madenciliği ve denetimli teknikler uygulamışlardır. Önerilen tahmin modelinin, çevrimiçi eğitim sistemlerinde öğrenciler için öğretim ve e-öğrenmenin davranışsal yönlerini tahmin etmek için uygun doğruluk, kesinlik ve hatırlama faktörlerini karşıladığını açıklamışlardır. Çevrimiçi eğitim sistemlerinin performansını değerlendirmek için Deneyim Kalitesi tabanlı yeni bir tahmin modeli önermişlerdir.

Başka bir çalışmada, Lonia Masangu ve arkadaşları [22], öğrencilerin çevrimiçi öğrenme etkinlikleri ve demografik bilgilerinden oluşan verilerden öğrenci performansını tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Öğrencilerin akademik performansını tahmin etmek için toplam 480 kayıttan oluşan veri setini, Perceptron Sınıflandırıcı, Destek Vektör Makinesi, Decision Tree, Lojistik Regresyon ve Random Forest olmak üzere beş makine öğrenme tekniği ile değerlendirmişlerdir. Destek vektör makinesi algoritmasının verileri %70.8 doğrulukla en iyi şekilde ele alarak, öğrencinin akademik performansını tahmin etmek için en uygun olduğunu kanıtlamışlardır. Elde ettikleri sonuçlarla, öğrencilerin devamsızlıklarının akademik performanslarını etkilediğini, diğer yandan öğrenci sınıf notlarının ise akademik performansı etkilemediğini ortaya koymuşlardır.

Delali Kwasi Dake ve arkadaşları [23], çalışmalarında Winneba Üniversitesinin Bilgi ve İletişim Teknolojisi Bölüm öğrencilerinin pandemi döneminde sınav puanlarını etkileyecek olan öznitelikler cinsiyeti, yaşı, oturduğu bölge, evinin internet bağlantısı, evindeki öğrenme ortamı, kişisel bilgisayar, evde akademik çalışma imkânı, kardeşlerinin rahatsız ediciliği, Covid-19 ve ruh hali, evde genel öğretim görevlisi desteği ve genel aile desteği olarak belirlemişler. Google form kullanarak 637 adet öğrenci verisi örneği toplamışlar. Toplamış oldukları verileri ön işleme işlemi yaptıktan sonra çalışmalarında 536 adet veriyi kullanılabilir duruma getirmişler. Bu verilerle Weka programında Random Forest, Random Tree, Naive Bayes ve J48 Decision Tree algoritmalarını kullanarak tahminleme işlemi yapmışlar. Bu tahminleme işleminde her algoritmanın karışıklık matrisini de hesaplamışlardır. Aynı zamanda algoritmalarda en az performansı gösteren öznitelikleri kaldırılarak tekrardan hesaplamaları yapılmış ve algoritmaların performanslarını bu şekilde arttırmaya çalışmışlardır. Algoritmaların performansını daha fazla değerlendirmek için ROC eğrisini kullanmışlar. Sonuç olarak çalışmalarında en iyi sonucu Naive Bayes ve Random Forest algoritmaları vermiştir. Bu çalışma bizim çalışmamız gibi öğrencinin performansını arttırmaya yöneliktir. Bizim çalışmamızdan farklı öğrencilerin öznitelik verilerini kullanarak öğrenci performansını incelemiş olmasıdır. Biz çalışmamızda öğrencilerin performansını derse katılma yöntemlerine göre incelemekteyiz.

Alsammak ve arkadaşları [24] üç tür anket kullanarak 1120 örnek içeren veri toplamış, verileri ön işleme işlemine tabi tutmuşlardır. Veri seti 35 öznitelikli ve 1000 örnek olarak düzenlemiştir. Düzenlenen bu veri setinde e-öğrenmede öğrenci performansı üzerinden veri madenciliği algoritmaları WEKA programı yardımıyla uygulamıştır. Uyguladıkları algoritmalar Decision Tree, Random Tree, Naive Bayes, Random Forest, REP Tree, Bagging ve k-NN'dir. 35 öznitelikle yapılan tahminleme sonucunda en iyi sonucu %96,8'le k-NN algoritması vermiştir. Araştırmacılar öznitelikleri Ranker Search Metodunu kullanarak en iyi öznitelikleri seçmiş ve bu özniteliklere göre tahminleme işleminde en iyi sonucu %77 ile yine k-NN algoritması vermiştir. Aynı zamanda algoritmaların parametrelerinde yapılan değişikliklerle birlikte yine en iyi sonucu %100'le k-NN algoritması vermiştir. Öğrencilerin e- öğrenmede olumlu memnuniyetleri %61, istenmeyen memnuniyetleri %39 olarak tespit edilmiştir. Öznitelikler arasında en önemli nitelikler; öğrencinin annesinin vasfı, öğrencinin babasının vasfı, ebeveynin birlikte yaşamaları, aile çalışması desteği, geçmiş sınıf başarısızlıkları, haftalık çalışma süresi, ekstra ücretli dersler, müfredat dışı etkinlikler, okul sonrası serbest zamanı, sağlık durumu, Daha yüksek çalışma istenmesi, zamanında mezun olma olasılığı, giriş sınav puanı, yıllık değerlendirme ve final notu olarak belirlenmiştir. Bu çalışma ile öğrencilerin e-öğrenmeden ve özel olarak e-öğrenme sisteminden daha az memnun olduğu, ideal eğitim tekniğinin, durum normale döner dönmez başlanması gereken kombinasyon eğitimi olduğu tespit edilmiştir.

Pandemi döneminde uzaktan eğitimin avantajları ve dezavantajları konusu üzerinde yapılan çalışmalara bakıldığında, genel olarak; öğrencilerin sürekli bilgiye erişim sağlayabilmeleri, hastalıktan

korunmaları, mekandan bağımsız dersleri takip edebilmeleri ve asenkron ders materyallerine istedikleri zaman ulaşabilmeleri uzaktan eğitim sisteminin avantajları arasında yer alsa da, öğrencilerin uzaktan eğitim sistemlerinde teknik sorunlar yaşaması, internet altyapısından ve teknolojiye sahip olma durumlarından dolayı fırsat eşitsizliğinin meydana gelmesi ve öğrencilerde duyuşsal eksikliklerin yaşanması uzaktan eğitim sisteminin dezavantajları arasında yer almaktadır [25, 26]. Her ne kadar uzaktan eğitimde genellikle dezavantaj olarak teknoloji konulu sorunlardan bahsedilse de geleceğe yönelik tahminlerde bulunmak, yukarıda bahsedilen çalışmalarda olduğu gibi ancak bu teknolojilerle mümkündür.

Bu çalışmalardan da anlaşılacağı üzere öğrencileri ilgilendiren çeşitli verilerin kullanıldığı veri kümeleriyle tahminlerde bulunulması ve bunun üzerinden eğitim kalitesinin artırılmasına yönelik tavsiyeler ve çözüm önerileri üretilmesi mümkündür.

Özellikle Pandemi zamanlarında eğitimde fırsat eşitliği yaratmak adına her şeyin uzaktan ve çevrimiçi yapılmaya evrildiği dijital dünyada öğrenci başarılarının, öğrenciyi fiziksel olarak gözlemek üzerinden yapılmayacağı ya da bunun yeterli olmayacağı fütüristlerin gelecek tahminleri arasında yer almaktadır. Bu araştırmanın eğitimin gelecekteki tahaülünü somut olarak göstermesi açısından literatüre önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. Bu çalışmayı literatürdeki benzer çalışmalardan ayıran en önemli etken birincisi veri seti, ikincisi ise veri setindeki pandemi dönemi ile önem kazanmış olan uzaktan derse katılma yöntemlerinin (Senkron, Asenkron, Hibrit) öğrenci başarısı üzerindeki etkilerinin geleceğe yönelik VM modellerinin tahmin başarısıdır.

II. METOT VE ANALİZ

Bu çalışmada, bir üniversitesinin UZEM'in öğrenci, fakülte, ders ve başarı kriterleri üzerinde VM yöntemleri uygulanarak, gelecek dönemde öğrencilerin en başarılı olabileceği uzaktan eğitim modelleri hakkında tahminlerde bulunulmuştur.

Araştırmada KAYUZEM'in 06.04.2020 ve 15.08.2020 tarihleri arasındaki verileri kullanılmıştır.

VTYS den alınan verilerin araştırmaya katkısı göz önünde bulundurularak çeşitli elemeler ve düzenleme işlemleri yapılmıştır. Bu düzenleme işleminde ilk olarak verilerin Fakülte/MYO Adı, Bölüm Adı, Ders Adı, Ders İşleme Yöntemi, Öğrenci Başarı Durumu Başlıkları altında toplanmıştır. Bir öğrencinin derse canlı katılım dakikası fazla ise derse katılma yöntemi "Senkron", öğrenci dersi kayıttan izlediye "Asenkron" ve öğrenci dersi hem canlı hem kayıttan izlediye "Hibrit" olarak tanımlanmıştır. "Öğrenci Başarı Durumu" sütunu için öğrencilerin bahar dönemi sonunda aldığı notların verilere dönüştürülmesinde Kayseri Üniversitesinin ön lisans ve lisans eğitimi ve öğretim yönetmeliğindeki not baremi baz alınmıştır. Çalışmada kullanılan not baremi Tablo 1'de görülmektedir.

Tablo 1. Not baremi tanımlama çizelgesi

Başarılı	Başarısız
100-70	69-0

Düzenlemesi yapılan veriler RapidMiner VM programına aktarılmış ve yukarıda adı geçen üç yöntemin öğrencinin başarı durumu üzerindeki etkisinin analizi yapılmıştır. Veri setinde toplamda 8319 işlenmiş veri bulunmaktadır.

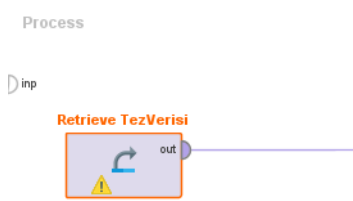
Verilerin analizinde Rapidminer yazılımı kullanılmıştır. Açık kaynak kodlu bir yazılımdır. Akademik çalışmalarda ücretsiz olarak bütün özellikleriyle birlikte kullanılabilir.

VTBK süreçleri doğrultusunda problem tanımlama, veri hazırlama, veri toplama, birleştirme ve temizleme, seçme işlemlerinden geçirilip hazır hale getirilen veriler, Tablo 2’de gösterilmiştir. Fakat kişisel veri alanı olan “Kullanıcı Adı” ve “Adı Soyadı” özelliklerinin entropilerinin çok düşük olmasından dolayı modellerin sonuçlarını etkilemeyeceği için çıkarılmıştır.

Tablo 2. RapidMiner programına aktarılmadan önceki veri seti.

Kullanıcı Adı	Adı ve Soyadı	Fakülte ve MYO	Bölüm	Ders Adı	Derse Katılma Yöntemi	Öğrenci Başarı Durumu
10*****64	A***** B*****	Develi İslami İlimler Fakültesi	İslami İlimler	İslam Tarihi I	Asenkron	Başarılı
10*****64	A***** B*****	Develi İslami İlimler Fakültesi	İslami İlimler	Yabancı Dil I Yaz Okulu	Senkron	Başarılı
10*****67	A***** K*****	Develi İslami İlimler Fakültesi	İslami İlimler	İslam Tarihi I	Hibrit	Başarılı
10*****67	A***** K*****	Develi İslami İlimler Fakültesi	İslami İlimler	Arapça Okuma Anlama I	Senkron	Başarılı
10*****67	A***** K*****	Develi İslami İlimler Fakültesi	İslami İlimler	Tefsir Usulü	Senkron	Başarısız
10*****29	A***** S***** D*****	Develi İslami İlimler Fakültesi	İslami İlimler	Arapça Okuma Anlama I	Asenkron	Başarılı
10*****29	A***** S***** D*****	Develi İslami İlimler Fakültesi	İslami İlimler	Arapça Sarf-Nahiv I	Asenkron	Başarılı
10*****29	A***** S***** D*****	Develi İslami İlimler Fakültesi	İslami İlimler	Eğitim Psikolojisi	Asenkron	Başarılı

RapidMiner programına geçmiş veriden geleceğe yönelik tahmin yapmak üzere aktarılmıştır. Aktarılan veri seti Şekil 3’de gösterilmiştir.

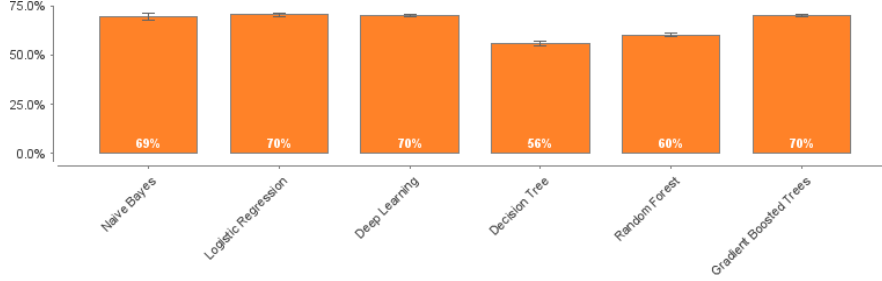


Fakülte/MYO	Bölüm Adı	Ders Adı	Derse Katılma Yöntemi	Öğrenci Başarı Durumu
DEVELİ İSLAMİ...	İSLAMİ İLİM...	İSLAM İBA...	ASENKRON	BAŞARILI
DEVELİ İSLAMİ...	İSLAMİ İLİM...	İSLAM TA...	ASENKRON	BAŞARILI
DEVELİ İSLAMİ...	İSLAMİ İLİM...	İSLAM İBA...	ASENKRON	BAŞARILI
DEVELİ İSLAMİ...	İSLAMİ İLİM...	İSLAM TA...	ASENKRON	BAŞARISIZ
DEVELİ İSLAMİ...	İSLAMİ İLİM...	İSLAMİ TÜ...	ASENKRON	BAŞARILI
DEVELİ İSLAMİ...	İSLAMİ İLİM...	TEFSİR U...	ASENKRON	BAŞARILI

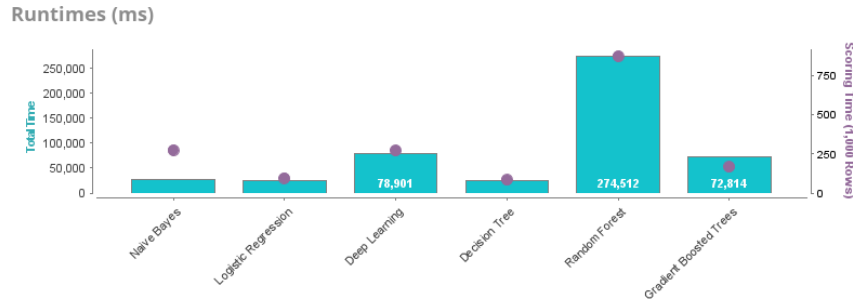
Şekil 3. RapidMiner programına aktarılan veri seti.

Aktarılan veri seti üzerinde, RapidMiner yazılımının bir özelliği olan ve en sık kullanılan algoritmalar ile otomatik olarak tahmin ve analizi yapılmıştır. Yapılan otomatik tahminleme analizinde doğruluk oranı Şekil 4’de gösterildiği gibi %69 olarak çıkan Naive Bayes, %70 olarak çıkan Logistic Regression, %70 olarak çıkan Deep Learning ve %70 olarak çıkan Gradient Boosted Trees algoritmaları daha detaylı olarak incelenmiştir. Decision tree ve Random Forest algoritmaları işlem

hızı ve doğruluk oranları çalışmamız için belirlediğimiz eşik değerinin altında kaldığı için çalışmaya dahil edilmemiştir. Otomatize edilmiş modellerin içerisinde olmayan ancak literatürde bu tip veriler üzerindeki başarısını ispat etmiş olan k-NN algoritması da karşılaştırılacak algoritmalar arasına dahil edilmiştir.



Şekil 4. Auto Model doğruluk oranı.

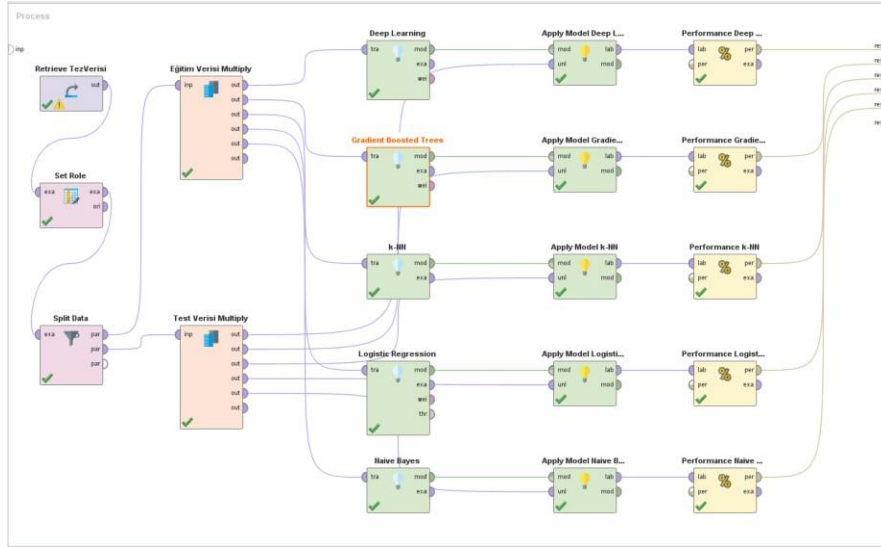


Şekil 5. Auto Model işlem süresi (ms).

Şekil 6’da oluşturulmuş modellerin ve operatörlerin yardımcı program üzerindeki grafiksel arayüzü gösterilmektedir. Veri seti solda, model sonuçları sağda olacak şekilde veriler soldan sağa doğru işlenerek yönlendirilmektedir. Burada kullanılan modüller ve görevleri kısaca aşağıdaki gibidir;

1. Retrieve: Modelde veri setini temsil eder. Çalışmanın ileri aşamasında veri setiyle ilgili detaylı bilgi verilecektir.
2. Set Role: Veri setinde tahmin yapılacak olan alan (Öğrenci Başarı Durumu) etiketlenmiştir.
3. Split Data: Verilerin ne kadarının eğitim ve test verisi olacağını belirler. Bu belirleme işlemi yapılırken Split Data operatörünün sampling type parametresinden “stratified sampling” seçilmiştir. Çalışmanın ileri aşamasında verilerin ne kadarının test ve ne kadarının eğitim verisi olduğuyula ilgili bilgi verilmiştir.
Stratified Sampling (Tabakalı Örnekleme): Rastgele alt kümeleri oluşturur ve alt kümelerdeki sınıf dağılımlarını tüm örnek kümesi ile aynı olmasını sağlar.
4. Multiply: Birden fazla algoritmaya bağlantı yapılabilmesi için kullanılmıştır.
5. Deep Learning (Derin Öğrenme), Gradient Boosted Trees, k-NN, Logistic Regression (Lojistik Regresyon), Naive Bayes: Algoritmalar ile ilgili detaylı bilgi verilecektir.
6. Apply Model: Eğitilmiş veriye göre test verisinin tahmin işlemini yapar.
7. Performance: Tahmin edilmiş olan verinin anlamlı bir duruma gelmesine yardımcı olur.

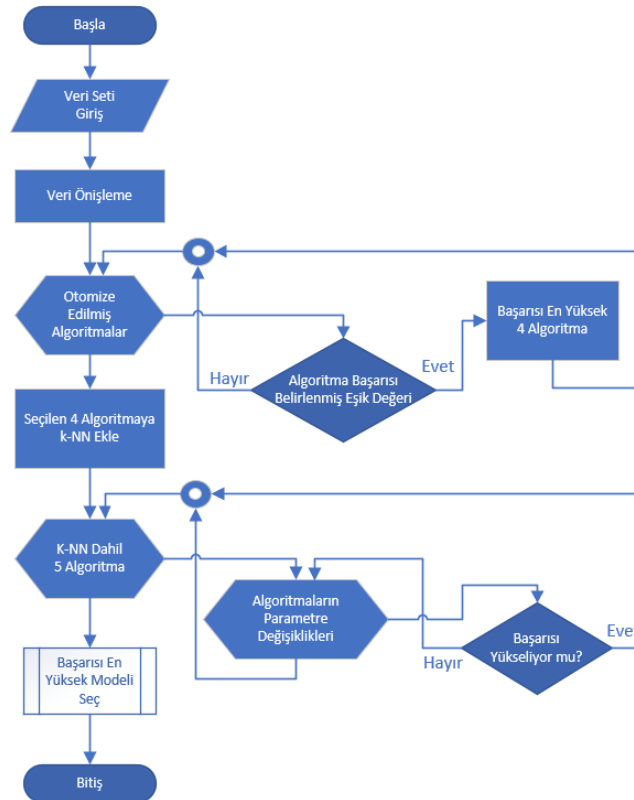
Rapidminer programının içerisine aktarılan veri seti otomatik model ile işleme tabi tutulduktan sonra içerlerinden en yüksek başarı yüzdesine sahip 4 algoritma ve bu algoritmalar arasında olmayan k-NN algoritması ile aşağıdaki şekilde verilen model oluşturulmuştur.



Şekil 6. Çalışmada kullanılan operatörler.

Bu modeldeki kullanılan algoritmaların başarı oranlarının artırılması için parametrelerinde yapılan değişiklikler ve sonuçlar sınıflandırma yöntemleri bölümünde detaylı olarak verilecektir.

Çalışmanın sınıflandırma süreci Şekil 7’de gösterilmiştir.



Şekil 7. Sınıflandırma süreci.

Şekil 7’deki süreçte verileri önleme sürecinde veri hazırlama, birleştirme, temizleme vb. işlemleri yapılır. Sonrasında RapidMiner programının özelliği olan otomatik modelleme işleminin sonunda en iyi çıkan algoritmalar belirlenir. Algoritmaların içerisine iyi bir sonuç vereceğini düşündüğümüz k-NN algoritması da eklenir. Bu algoritmalarından maksimum doğruluk oranını almak için parametrelerinde

değişiklikler yapılır. Algoritmaların en yüksek doğruluk oranlarını belirledikten sonra aralarında en yüksek model seçilir.

A. ÇALIŞMADA KULLANILAN SINIFLANDIRMA YÖNTEMLERİ

RapidMiner programında otomatize edilmiş modellerden en iyi sonuç veren 4 algoritma ve içlerinde bulunmayan k-NN (literatürde buna benzer veri setlerinde daha önce kullanılmış ve iyi sonuçlar verdiği bildirildiği için) algoritmalarının veri seti üzerindeki başarısı ile beraber bu bölümde detaylı olarak incelenmiştir. Algoritmalarda detaylı işleme yapılırken varsayılan olarak verilerin %80'ni eğitim verisi geri kalan %20'si ise test verisi olarak kullanılmıştır.

RapidMiner programı algoritmaların özelliklerine göre verilerin tiplerinde kodlama (encoding) işlemini otomatik olarak gerçekleştirmektedir. Yani kategorik değişkenler sayısal değişkenlere RapidMiner programı ile otomatik olarak dönüşmektedir. Oluşturulacak model sayısal verilerle çalışması gerektiği takdirde normalizasyon (değerlerin 0 ile 1 arasına çekmek) yapılması gerekmektedir. Örneğin Tablo 3'deki cinsiyet sütunundaki erkek ve kadın verileri veri ön işleme aşamasında iki kategoriye sahip olduğu için veriler 1 ve 0'a dönüştürülebilir. Ancak veri setinde kullanılacak olan özellikler ikiden fazla kategoriye sahipse kodlama işlemi yapılır. Örneğin Tablo 3'deki kişinin yaşadığı şehir bu sefer her kategori farklı bir kolon oluşturulacak şekilde kodlanır. Naive Bayes algoritması olasılıklar üzerine hesap yaptığı için kategorik verilerle çalışır. Bu nedenle bu çalışmada kategorik veriden dönüşüm Naive Bayes algoritmasını kullanan diğer modellerde RapidMiner programı tarafından otomatik olarak yapılmıştır.

Tablo 3. Kategorik değişkenlerin sayısal değişkenlere dönüştürülmesi süreci.

Cinsiyeti	Şehir	Cinsiyet1	Şehir1	Şehir2	Şehir3
Erkek	Ankara	1	1	0	0
Kadın	İstanbul	0	0	1	0
Kadın	İzmir	0	0	0	1

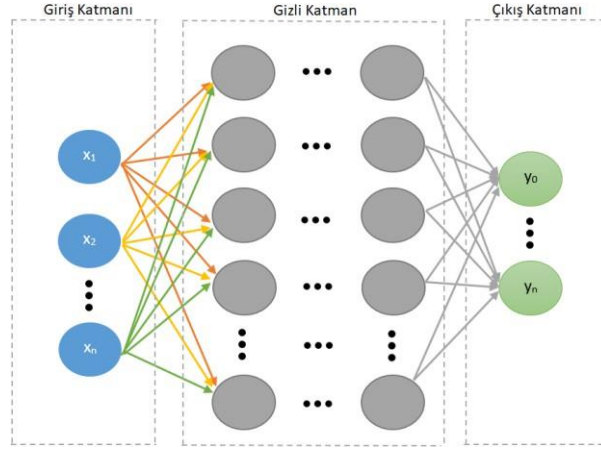
Bu çalışmada giriş bilgileri olarak Fakülte/MYO, Bölüm Adı, Ders Adı, Derslere Katılma Yöntemleri kullanılmaktadır. Bu kategorik bilgiler sayısal bilgilere dönüştürüldüğünde;

- Fakülte/MYO bilgileri için toplamda 4 kolon oluşur.
- Bölüm Adı bilgileri için toplamda 23 kolon oluşur.
- Ders Adı bilgileri için toplamda 143 kolon oluşur.
- Derse katılma Yöntemleri için toplamda 3 kolon oluşur.

Algoritma sayısal bir veri kullanıyorsa, bu çalışmada toplamda 173 giriş kolonu oluşur. RapidMiner programı bu kodlama işlemini otomatik olarak gerçekleştirmektedir.

A. 1. Derin Öğrenme ile Sınıflandırma

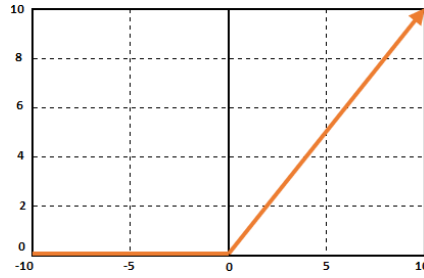
Derin Öğrenme bir makine öğrenme yöntemidir. Verilen bir veri kümesi ile çıktıları tahmin edecek yapay zekayı eğitmeye olanak sağlar. Yapay zekayı eğitmek için hem denetimli hem de denimsiz öğrenme kullanılabilir [27]. Derin öğrenme sınıflandırıcısı Şekil 8'de gözüktüğü gibi 3 tip (Giriş, Gizli ve Çıkış) katman içerir. Her katman en az bir adet birbirine bağlı düğüm içerir. Veri setinde sınıflandırıcı karmaşık yapıyı algılar ve önceki katmanları hesaplamak için kendi iç parametrelerini değiştirir [28].



Şekil 8. Derin Öğrenme Şeması.

Yapay sinir ağlarına doğrusal olmayan gerçek dünya özelliklerini tanıtmak için aktivasyon fonksiyonuna ihtiyaç duyulur. Temel olarak basit bir yapay sinir ağında x girdiler, w ağırlıklar olarak tanımlanır ve ağına çıkışına aktarılan değere $f(x)$ yani aktivasyon işlemi uygulanır. Daha sonra bu, nihai çıkış ya da bir başka katmanın girişi olacaktır [29]. Bu çalışmada aktivasyon fonksiyonu olarak Rectifier kullanılmıştır.

Rectifier: X 'in giriş değeri olduğu maksimum $(0, x)$ değerini seçer [30].



Şekil 9. Rectifier grafiği.

Hidden Layer Sizes: Gizli katman sayısını ve bu katmanlardaki nöronların sayısını ayarlamaya yardımcı olur. Tablo 4'de gizli katman ve nöron sayılarını değiştirerek en iyi sonuç 1 Gizli katmanda 30 nöron olarak bulunmuştur.

Tablo 4. Derin öğrenme gizli katman ve nöronların karşılaştırılması.

1 Gizli Katman		2 Gizli Katman		3 Gizli Katman
30 Nöron	50 Nöron	50 x 50 Nöron	100 x 100 Nöron	50 x 50 x 50 Nöron
71,33%	67,67%	69,05%	70,31%	67,61%

RapidMiner programının Derin Öğrenme operatörünün Epochs parametresinde veri kümesinin kaç kez tekrarlanacağını ayarlanması yapılır. Tablo 5'de değişik tekrarlar durumlarına bakılmıştır. En iyi tahmin değerinin 10 olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 5. Derin öğrenme veri kümesi yinelenmesi karşılaştırılması.

Tekrar Sayısı	Tahmin Oranı
5	68,45%
7	67,25%
10	71,33%
20	69,41%
100	69,41%

Bu çalışmadaki derin öğrenme algoritmasında değişiklik yapılan parametreler Tablo 6’da gösterilmiştir. Sonucu etkilemediği görülen bazı parametreler varsayılan olarak bırakılmıştır. RapidMiner programı verileri otomatik olarak sayısal değere dönüştürdüğü için derin öğrenmedeki giriş katmanı 173, gizli katman sayısı 30 nöron ve çıkış katmanı 1 adettir.

Tablo 6. Derin öğrenme algoritması için kullanılan parametreler.

Özellik Adı	Değer
173 Adet Giriş	Fakülte/MYO (4), Bölüm Adı (23), Ders Adı (143), Derse Katılma Yöntemi (3)
1 Adet Çıkış	Öğrenci Başarı Durumu
Eğitim için Veri Setinin Tekrarlanma Sayısı	10
Gizli Katmanlarda Kullanılan Aktivasyon Fonksiyonu	Rectifier
Gizli Katman Sayısı	1
Gizli Katmanlarda Kullanılan Nöron Sayısı	30

Derin Öğrenme algoritmasının veri seti üzerindeki başarısı Tablo 7’de verilmiştir.

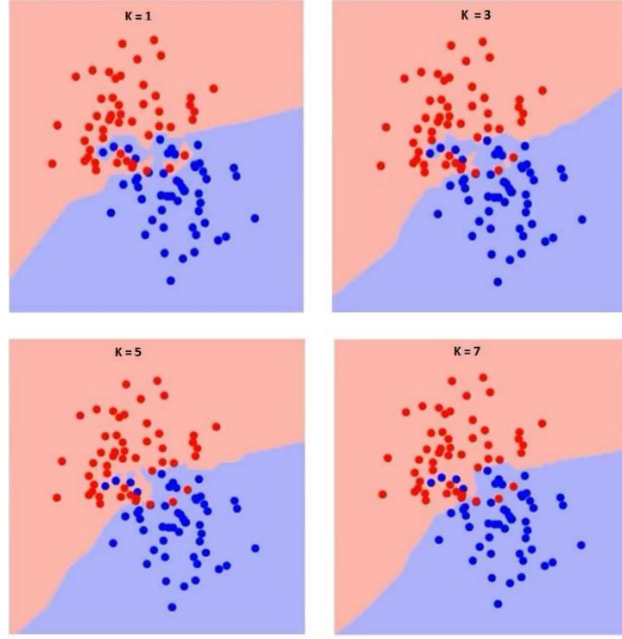
Tablo 7. Derin öğrenme algoritması karşılaştırması.

	Gerçek Başarılı	Gerçek Başarısız	Doğruluk
Tahmin Başarılı	602	147	80,37%
Tahmin Başarısız	330	585	63,93%
Hatırlama	64,59%	79,92%	

Tabloda “Gerçek Başarılı” sayısı toplamda 932 veriyken modelimiz bunun 602 verisini doğru tahmin etmiştir. 330 adet veriyi ise “Tahmin Başarısız” olarak yanlış tahmin etmiştir. Bu şekilde bütün çizelgedeki başarılı ve başarısız tahminler oranlandığı zaman Derin Öğrenme algoritmasındaki toplamdaki başarı oranı ortalaması %71,33 olarak hesaplanmıştır. Daha yüksek doğruluk oranına ulaşmak için diğer algoritmalar üzerinde çalışmalara devam edilmiştir.

A. 2. k-NN ile Sınıflandırma

k-NN algoritması, öznitelik alanındaki yakın eğitim örneklerine dayalı olarak nesnelere sınıflandırır. Yakınlık, öklid uzaklığı adı verilen bir uzaklık metriği cinsinden tanımlanır. Böylece, nesne komşusunun çoğunluk oyu ile sınıflandırılır ve nesne en yakın k komşusu arasında en yaygın olan sınıfa atanır [20]. k değerinin tek sayı verilmesine dikkat edilmesi gerekir. k değerine çift sayı verildiğinde komşulukların çift sayıda ve aynı uzaklıkta olmasından dolayı hangi sınıfta olacağı belirlenemez [31]. k-NN algoritmasında farklı k değerlerine göre iki sınıfa ayıran sınırlar Şekil 10’da gösterilmiştir [32].



Şekil 10. Farklı k değerine sahip iki sınıfı ayıran farklı sınırlar [32].

Tablo 8’de k parametresi değerlerinin karşılaştırması yer almaktadır. Burada en iyi sonucu veren k değeri 13’tür.

Tablo 8. k-NN algoritmasının k değerinin karşılaştırılması.

k Değeri	Tahmin Oranı
1	61,90%
5	67,49%
13	70,13%
19	68,93%
79	66,23%

K-NN algoritmasının veri seti üzerindeki başarısı Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. K-NN algoritması karşılaştırması.

	Gerçek Başarılı	Gerçek Başarısız	Doğruluk
Tahmin Başarılı	678	233	74,42%
Tahmin Başarısız	254	499	66,27%
Hatırlama	72,75%	68,17%	

Tabloda “Gerçek Başarılı” sayısı toplamda 932 veriyken modelimiz bunun 678 verisini doğru tahmin etmiştir. 254 adet veriyi ise “Tahmin Başarısız” olarak yanlış tahmin etmiştir. Bu şekilde bütün çizelgedeki başarılı ve başarısız tahminler oranlandığı zaman k-NN algoritmasının toplamdaki başarı oranı ortalaması %70,33 olarak hesaplanmıştır. Daha yüksek doğruluk oranına ulaşmak için otomatik modellemeyle belirlediğimiz diğer algoritmalar üzerinde çalışmalara devam edilmiştir.

A. 3. Naive Bayes ile Sınıflandırma

Naive Bayes algoritması, belirli bir veri kümesindeki değerlerin frekansını ve kombinasyonlarını sayarak bir olasılık kümesini hesaplayan basit bir olasılık sınıflandırıcısıdır [33]. Naive

Bayes sınıflandırıcısının temeli Bayes teoremine¹ dayanır. Naive Bayes algoritması basit bir algoritma olmasına rağmen genellikle karmaşık sınıflandırma yöntemlerinde iyi performans gösterebilir [32]. Çalışma için Naive Bayes algoritmasının parametresinde herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Varsayılan parametre kullanılmıştır. Naive Bayes algoritması kategorik verilerle çalışır. Bu veri seti için herhangi bir kategorik – numerik dönüşümüne ihtiyaç duyulmamıştır.

Naive Bayes algoritmasının veri seti üzerindeki başarısı Tablo 10’da verilmiştir.

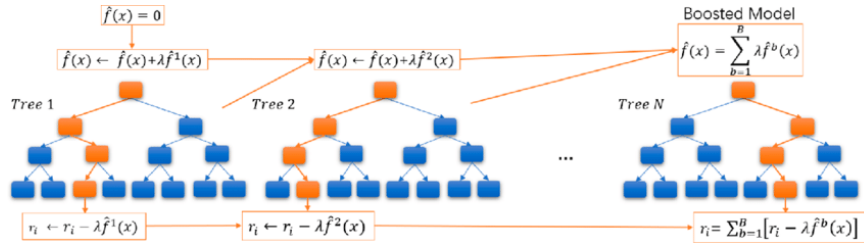
Tablo 10. Naive Bayes algoritması karşılaştırması.

	Gerçek Başarılı	Gerçek Başarısız	Doğruluk
Tahmin Başarılı	622	189	76,70%
Tahmin Başarısız	310	543	63,66%
Hatırlama	66,74%	74,18%	

Tabloda “Gerçek Başarılı” sayısı toplamda 932 veriyken modelimiz bunun 622 verisini doğru tahmin etmiştir. 310 adet veriyi ise “Tahmin Başarısız” olarak yanlış tahmin etmiştir. Bu şekilde bütün çizelgedeki başarılı ve başarısız tahminler oranlandığı zaman Naive Bayes algoritmasındaki toplamdaki başarı oranı ortalaması %70,01 olarak hesaplanmıştır. Daha yüksek doğruluk oranına ulaşmak için diğer algoritmalar üzerinde çalışmalara devam edilmiştir.

A. 4. Gradient Boosted Trees ile Sınıflandırma

Gradient Boosted Trees, bir grup zayıf tahmin modelleri biçimindeki regresyon ve sınıflandırma sorunları için bir makine öğrenimi yöntemidir. Bu yöntem, modelleri aşamalı olarak oluşturur ve isteğe bağlı türevlenebilir bir kayıp fonksiyonunun optimizasyonuna izin vererek modelleri geliştirir [34].



Şekil 11. Gradient Boosted Trees algoritması örneği [34].

Gradient Boosted Trees algoritmasında değişiklik yapılan parametrelerin açıklamaları aşağıda verilmiştir.

Number of trees: Bu parametre ile kullanılacak ağaç sayısını belirler.

Min Split improvement: Bu parametrede bir bölünmenin gerçekleşmesi için karesel hata azaltmada minimum ilgili gelişmeyi belirtir.

Learning rate: Bu parametrede öğrenme oranı belirlenir. Her döngüde hata sonucu learning rate oranı kadar tekrar hesaplama yapılır.

Bu çalışmadaki Gradient Boosted Trees algoritmasında değişiklik yapılan parametreler Tablo 11’de

¹ Bayes Teoremi: $P(A|B) = \frac{P(A) \cdot P(B|A)}{P(B)}$ [32]

gösterilmiştir. Sonucu etkilemediği görülen bazı parametreler varsayılan olarak bırakılmıştır.

Tablo 11. Gradient Boosted Trees algoritması için kullanılan parametreler.

Özellik Adı	Değer
Ağaç Sayısı	25
Minimum Bölünmüş İyileştirme Değeri	1.0E-4
Eğitim için Veri Setinin Tekrarlanma Sayısı	10
Öğrenme Oranı	0,191

Gradient Boosted Trees algoritmasının veri seti üzerindeki başarısı Tablo 12’de verilmiştir.

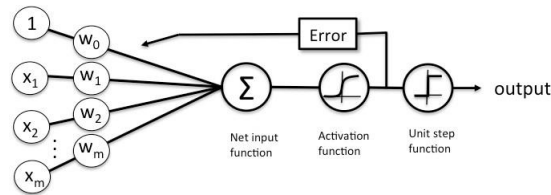
Tablo 12. Gradient Boosted Trees algoritması karşılaştırması.

	Gerçek Başarılı	Gerçek Başarısız	Doğruluk
Tahmin Başarılı	591	158	78,91%
Tahmin Başarısız	341	574	62,73%
Hatırlama	63,41%	78,42%	

Tabloda “Gerçek Başarılı” sayısı toplamda 932 veriyken modelimiz bunun 591 verisini doğru tahmin etmiştir. 341 adet veriyi ise “Tahmin Başarısız” olarak yanlış tahmin etmiştir. Bu şekilde bütün çizelgedeki başarılı ve başarısız tahminler oranlandığı zaman Gradient Boosted Trees algoritmasındaki toplamdaki başarı oranı ortalaması %70,01 olarak hesaplanmıştır. Daha yüksek doğruluk oranına ulaşmak için diğer algoritmalar üzerinde çalışmalara devam edilmiştir.

A. 5. Lojistik Regresyon ile Sınıflandırma

Lojistik Regresyon bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkileri araştıran sınıflandırma algoritmasıdır. Lojistik Regresyon analizi ile verilerin hangi sınıfa ait olduğunu tahmin eden bir regresyon işlevi oluşturulur. Yani bağımlı değişkenlerin sürekli çıkış değerleri yerine sınıf üyelikleri tahmin edilir. Bu sürecin hepsi lojistik regresyon olarak tanımlanabilir [35]. Lojistik regresyonun Şekil 12’de şeması görülmektedir.



Şekil 12. Lojistik Regresyon Şeması [36].

Şekil 13’de lojistik regresyonun modeli görülmektedir.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 \times x_i + hata(e_i)$$

Bağımlı Değişken y_i ← Kesme Terimi (intercept) β_0 + Katsayı (coef., slope) $\beta_1 \times$ Bağımsız Değişken x_i + hata(e_i)

Şekil 13. Lojistik Regresyon modeli [37].

Lojistik Regresyon algoritmasında parametreler sonucu değiştirmediğinden dolayı varsayılan değerler kullanılmıştır.

Lojistik Regresyon algoritmasının veri seti üzerindeki başarışı Tablo 13’de verilmiştir.

Tablo 13. Lojistik Regresyon algoritması karşılaştırması.

	Gerçek Başarışlı	Gerçek Başarışsız	Doğruluk
Tahmin Başarışlı	699	208	77,07%
Tahmin Başarışsız	233	524	69,22%
Hatırlama	75,00%	71,58%	

Tabloda ‘‘Gerçek Başarışlı’’ sayısı toplamda 932 veriyken modelimiz bunun 699 verisini doğru tahmin etmiştir. 233 adet veriyi ise ‘‘Tahmin Başarışsız’’ olarak yanlış tahmin etmiştir. Bu şekilde bütün çizelgedeki başarışlı ve başarışsız tahminler oranlandığı zaman Lojistik Regresyon algoritmasındaki toplamdaki başarış oranı ortalaması %73,50 olarak hesaplanmıştır.

III. TARTIşMA

A. ALGORİTMALARIN KARşILAşTIRILMASI ve VM’DE BAşARI KRİTERLERİ

Literatürdeki çalışmaların çoğunluğunda ğrenci performansını farklı aıllardan hesaplamalar yer almaktadır. Bizim alışmamızda derse katılma yöntemleri ğrenci performans tahminlerine göre yorumlanmıştır. Derse katılma yöntemlerine göre ğrenci performansı literatürde rastlanmamıştır. Aynı zamanda literatürde çoğunlukla Weka programının kullanıldığı grşmştir. Çalışmamızda açık kaynak kodlu ve akademiye ücretsiz olan RapidMiner programı kullanılmıştır.

Derin ğrenme, k-NN, Naive Bayes, Gradient Boosted Trees ve Lojistik Regresyon algoritmaları karşılaştırıldığında en iyi performansı sırasıyla %73,50 ile Lojistik Regresyon, %71,33 ile Derin ğrenme, %70,73 ile k-NN, %70,01 ile Naive Bayes ve Gradient Boosted Trees algoritmaları vermiştir.

Tablo 14’de algoritmaların eğitim ve tahmin için kullanılan oranların başarış oranına ve çalışma süresine etkileri verilmiştir. Literatür genelinde yapılan çalışmalarda algoritmaların çalışma süreleri belirtilmemiştir. Çalışmamızda bu srelerde belirtilmiştir.

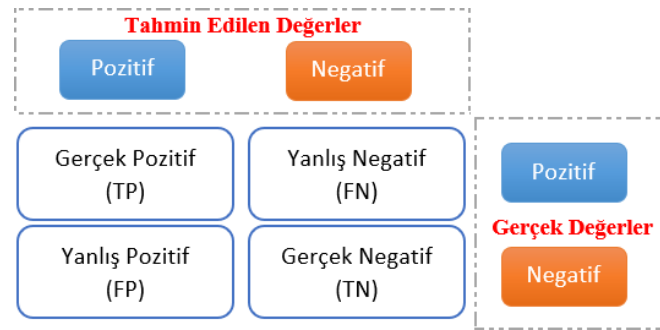
Tablo 14. Algoritmaların karşılaştırması.

Eğitim Verisi / Test Verisi	Tahmin Oranları / alışma Süresi				
	Derin ğrenme	k-NN	Naive Bayes	Gradient Boosted Trees	Lojistik Regresyon
%20 / %80	67,24% / 0 saniyeden az	65,41% / 2 saniye	68,38% / 0 saniyeden az	67,84% / 0 saniyeden az	59,85% / 0 saniyeden az
%40 / %60	64,58% / 1 saniye	67,97% / 2 saniye	68,79% / 0 saniyeden az	69,21% / 0 saniyeden az	71,49% / 0 saniyeden az
%50 / %50	68,74% / 1 saniye	67,37% / 3 saniye	68,53% / 0 saniyeden az	68,67% / 0 saniyeden az	71,12% / 0 saniyeden az
%60 / %40	70,36% / 1 saniye	68,95% / 3 saniye	69,46% / 0 saniyeden az	69,34% / 0 saniyeden az	72,23% / 0 saniyeden az
%80 / %20	71,33% / 2 saniye	70,73% / 2 saniye	70,01% / 0 saniyeden az	70,01% / 0 saniyeden az	73,50% / 0 saniyeden az

Tablo 14’de en başarılı tahmin oranının %80 eğitim ve %20 test verisiyle olduğu anlaşılmıştır. Doğruluk oranı ve çalışma süresine bakıldığında en iyi performansı Lojistik Regresyon algoritması vermiştir.

Çoğu literatürde olduğu gibi çalışmamızda da modellerin performansını belirlemek için karışıklık matrisi baz alınmıştır. Derse katılma yöntemlerine göre en iyi sonucun hesaplanması ise en yüksek model başarısına sahip Lojistik Regresyon algoritmasındaki sonuçların Senkron, Asenkron ve Hibrit için filtrelenerek bu filtreler sonucu elde edilen veriler üzerinde Karışıklık Matrisi hesaplanmıştır. Yani en başta veri setinde Asenkron, Senkron ve Hibrit yöntemler birlikte modellere verilmiş, tahmin performansı en iyi model olan Lojistik Regresyon sonucu bu veriler, bu üç özellik için ayrı ayrı Karışıklık Matrisi hesabı yapılmıştır. Bunların sonuçları Tablo 16,17,18,19’da detaylı bir şekilde verilmiştir.

Karışıklık Matrisi, modellerin tahmin performanslarının belirlenmesi için kullanılır [38]. Diğer bir deyişle tahmin edilen değerleri ve gerçek değerler üzerinde algoritmanın performansını belirlemek için kullanılır. Şekil 14’de ikili sınıflandırıcı karışıklık matrisinin bir örneği bulunmaktadır. Bu çalışmada ikili sınıflandırıcı karışıklık matrisi kullanılmıştır.



Şekil 14. İkili Sınıflandırıcı Karışıklık Matrisi.

Şekil 12’de gösterilen ikili sınıflandırıcı karışıklık matrisi verileri elde edildikten sonra, sınıflandırma modellerinin performansını belirlemek için Tablo 15’de gösterilen metrikler kullanılmıştır.

Tablo 15. Performans karşılaştırma metrikleri [39].

Metrik	Formül	Açıklama
Doğruluk Oranı (Accuracy Rate)	$\frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$	Genel olarak ne kadar doğru tahmin ettiğinin oranını verir.
Yanlış Sınıflandırma Oranı (Misclassification Rate)	$\frac{FP + FN}{TP + TN + FP + FN}$	Genel olarak hata oranını verir.
Gerçek Pozitif Değerlerin Oranı (True Positive Rate veya Recall)	$\frac{TP}{TP + FN}$	Gerçek pozitif değerlerini ne kadar doğru tahmin ettiğinin oranını verir.
Gerçek Negatif Değerlerin Oranı (True Negative Rate veya Specificity)	$\frac{TN}{TN + FP}$	Gerçek negatif değerlerini ne kadar doğru tahmin ettiğinin oranını verir.
Kesinlik Oranı (Precision)	$\frac{TP}{TP + FP}$	Doğru tahminlerin ne kadar kesin olduğu oranını verir.
F Skoru (F Score)	$\frac{2TP}{2TP + FP + FN}$	Dengesiz sınıflar için yararlı hibrit sokurunu verir.

Lojistik Regresyon algoritmasıyla en iyi tahmin değerlerine ulaşılmışken, karışıklık matrisiyle derse katılma yöntemlerinden hangisinin daha verimli olduğu hesaplanmıştır.

Tablo 16. Karışıklık matrisi tablosu (Asenkron).

Asenkron	Başarılı (Tahmin)	Başarısız (Tahmin)
Başarılı (Gerçek)	298 (TP)	157 (FN)
Başarısız (Gerçek)	105 (FP)	321 (TN)

Tablo 16’da asenkron yönteminin karışıklık matrisinin tablosu oluşturulmuştur. Bu tabloya göre hesaplamalar yapılmış ve Tablo 19’da verilmiştir.

Tablo 17. Karışıklık matrisi tablosu (Senkron).

Senkron	Başarılı (Tahmin)	Başarısız (Tahmin)
Başarılı (Gerçek)	133 (TP)	68 (FN)
Başarısız (Gerçek)	51 (FP)	175 (TN)

Tablo 17’de senkron yönteminin karışıklık matrisinin tablosu oluşturulmuştur. Bu tabloya göre hesaplamalar yapılmış ve Tablo 19’da verilmiştir.

Tablo 18. Karışıklık matrisi tablosu (Hibrit).

Hibrit	Başarılı (Tahmin)	Başarısız (Tahmin)
Başarılı (Gerçek)	268 (TP)	8 (FN)
Başarısız (Gerçek)	52 (FP)	28 (TN)

Tablo 18’de hibrit yönteminin karışıklık matrisinin tablosu oluşturulmuştur. Bu tabloya göre hesaplamalar yapılmış ve Tablo 19’da verilmiştir.

Tablo 19. Karışıklık matrisi derse katılma yöntemlerinin karşılaştırılması.

Karışıklık Matrisi Hesaplamaları	Derse Katılma Yöntemleri		
	Asenkron	Senkron	Hibrit
Doğruluk Oranı	70,26%	67,39%	83,14%
Yanlış Sınıflandırma Oranı	29,73%	26,03%	16,85%
Gerçek Pozitif Değerlerin Oranı	68,49%	66,16%	97,10%
Gerçek Negatif Değerlerin Oranı	75,35%	77,43%	35,00%
Hassasiyet Oranı	73,94%	72,28%	83,75%
F Skoru	69,46%	69,09%	89,93%

Tablo 19’da derse katılma yöntemlerinin karışıklık matrisi hesaplamalarının karşılaştırması yapılmıştır. Bu karşılaştırmadaki değerler göz önüne alındığında, en iyi sonucu veren derse katılma yöntemi sırasıyla Hibrit, Asenkron ve Senkron olarak görülmektedir. Bir dersten gerçekte başarılı iken tahminde başarılı olma durumunun en yüksek performansı (öğrenci başarı durumu) Hibrit yöntem ile işlenmiş derslerde alınmıştır. Bir dersten gerçekte başarısız iken tahminde başarısız olma durumunun en yüksek performansı (öğrenci başarı durumu) Senkron yöntem ile işlenmiş derslerde alınmıştır.

IV. SONUC

Bütün dünyayı etkisi altına alan Covid-19 pandemisiyle birlikte üniversitelerin uzaktan eğitim sistemlerinde biriken verileri odağına alan bu çalışmada, bir üniversiteye ait uzaktan eğitim sisteminden elde edilmiş veriler üzerinden öğrenciler için gelecek dönemlerde en güvenilir olabilecek uzaktan eğitim modeli, VM yoluyla tahmin edilmeye çalışılmıştır. Öğrencilerin uzaktan eğitim sisteminde derse Senkron, Asenkron ve Hibrit katılma biçimlerinin öğrenci başarısına etkilerinin VM

yoluyla tahmin edilip edilmeyeceği sorusu araştırmanın temel problemidir. Bu problem çerçevesinde yürütülen araştırmada RapidMiner yardımcı programı ile tahmin edici metotlarla inceleme ve analizler yapılmıştır.

Araştırmanın sonucunda VM modellerinden Lojistik Regresyon algoritması kullanılarak elde edilen sonuçlar doğrultusunda, üniversite öğrencilerinin başarı durumları tahmin edilmek istendiğinde uzaktan eğitim sürecinde en güvenilir sonucu veren derse katılma yöntemi olan “Hibrit” olarak seçilmesi tavsiye edilmektedir.

Gelecekte yapılacak çalışmalar için, üniversitelerin Fakülte, MYO, Bölüm ve ders bazlı olarak bu VM modelleri uygulanarak çalışmalar yapılabilir. Bu alanda yapılacak somut çalışmalar şu şekilde sıralanabilir;

1. Çalışmalar ders bazlı yapılarak hangi yöntemin en güvenilir olduğunun tahmin edilmesi
2. Çalışmalar bölüm bazlı yapılarak hangi yöntemin en güvenilir olduğunun tahmin edilmesi
3. Çalışmalar Fakülte/MYO bazlı yapılarak hangi yöntemin en güvenilir olduğunun tahmin edilmesi
4. Yukarıdaki maddeleri tekrar baz alarak öğrencilerin cinsiyeti, yaşı, evinin internet bağlantısı, oturduğu bölge, evindeki öğrenme ortamı, kişisel bilgisayar vb. öznitelikler de çalışmaya dahil edilerek tahminler yapılabilir.

IV. KAYNAKLAR

[1] World Health Organization. (2021, November 26). *Rolling updates on coronavirus disease (COVID-19)*. World Health Organization [Online]. Available: <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/events-as-they-happen>.

[2] T.C. Sağlık Bakanlığı. (2021, 26 Kasım). *Pandemi*. T.C. Sağlık Bakanlığı [Çevrimiçi]. Erişim: <https://covid19.saglik.gov.tr/TR-66494/pandemi.html>.

[3] T.C. Yükseköğretim Kurulu. (2020, 13 Mart). *Koronavirüs (Covid-19) Bilgilendirme Notu: 1*. T.C. Yükseköğretim Kurulu [Çevrimiçi]. Erişim: <https://covid19.yok.gov.tr/Documents/alinan-kararlar/02-coronavirus-bilgilendirme-notu-1.pdf>.

[4] T.C. Yükseköğretim Kurulu. (2020, 6 Mart). *Basın Açıklaması Yükseköğretim Kurulu Başkanı Prof. Dr. M. A. Yekta Saraç* [Çevrimiçi]. Erişim: <https://covid19.yok.gov.tr/Documents/alinan-kararlar/03-uzaktan-egitime-iliskin-alinan-karar.pdf>.

[5] T.C. Yükseköğretim Kurulu. (2020, 26 Mart). *Basın Açıklaması Yükseköğretim Kurulu Başkanı Prof. Dr. M. A. Yekta Saraç* [Çevrimiçi]. Erişim: <https://covid19.yok.gov.tr/Documents/alinan-kararlar/04-uzaktan-egitim-ve-yks-ertelenmesine-iliskin.pdf>.

[6] T.C. Yükseköğretim Kurulu. (2020, 4 Haziran). *YÖK'ten Küresel Salgın ile Mücadele Sürecinde Yeni Düzenlemeler-II* [Çevrimiçi]. Erişim: <https://covid19.yok.gov.tr/Documents/alinan-kararlar/23-kuresel-salgin-ile-mucadele-gerceklesen-yapisal-duzenlemeler-2.pdf>.

[7] T.C. Yükseköğretim Kurulu. (2020, 3 Mayıs). *Üniversitelerimizde Küresel Salgın Sürecinde Uzaktan Öğretim Uygulamaları Anket Sonuçları* [Çevrimiçi]. Erişim: <https://covid19.yok.gov.tr/Documents/AnaSayfa/uzaktan-ogretim-anketi.pdf>.

- [8] T.C. Yükseköğretim Kurulu. (2020, 30 Temmuz). *Küresel Salgında Yeni Normalleşme Süreci* [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.yok.gov.tr/Documents/Yayinlar/Yayinlarimiz/2020/kuresel-salginda-yeni-normallesme-sureci-2020.pdf>.
- [9] T.C. Yükseköğretim Kurulu. (2021, 3 Eylül). *Küresel Salgında Eğitim ve Öğretim Süreçlerine Yönelik Uygulamalar Rehberi* [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.yok.gov.tr/Documents/Yayinlar/Yayinlarimiz/2021/K%C3%BCresel%20Salg%C4%B1nda%20E%C4%9Fitim%20ve%20%C3%96%C4%9Fretim%20S%C3%BCre%C3%A7lerine%20Y%C3%B6nelik%20Uygulamalar%20K%C4%B1lavuzu%202021.pdf>.
- [10] A. Koyuncuğil ve N. Özgülbaş, "Veri Madenciliği: Tıp ve Sağlık Hizmetlerinde Kullanımı ve Uygulamaları", *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, c. 2, sayı. 2, Tem. 2010.
- [11] Ş. Can, T. Özdiil ve C. Yılmaz, "Üniversite Eğitiminde Öğretim Üyesi Tutumunun Ders Başarısına Etkisinin Veri Madenciliği Teknikleriyle Araştırılması," *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Yönetim ve Ekonomi Dergisi*, c. 26, s. 2, ss. 609-623, 2019.
- [12] O. Gushchina, and A. Ochepovsky, "Data Mining for the e-Learning Risk Management," *Anadolu University Turkish Online Journal of Distance Education*, vol. 20, no. 3, pp. 181-196, 2019.
- [13] Ö. Özbay ve H. Ersoy, "Öğrenme Yönetim Sistemi Üzerindeki Öğrenci Hareketliliğinin Veri Madenciliği Yöntemleriyle Analizi," *Gazi Üniversitesi Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi*, c. 37, sayı. 2, ss. 523-558, Ağu. 2017.
- [14] K. Abe, "Data Mining and Machine Learning Applications for Educational Big Data in the University," *2019 IEEE Intl Conf on Dependable, Autonomic and Secure Computing, Intl Conf on Pervasive Intelligence and Computing, Intl Conf on Cloud and Big Data Computing, Intl Conf on Cyber Science and Technology Congress (DASC/PiCom/CBDCCom/CyberSciTech)*, 2019, pp. 350- 355, doi: 10.1109/DASC/PiCom/CBDCCom/CyberSciTech.2019.00071.
- [15] A. Jain and H. Ram Sah, "Student's Feedback by emotion and speech recognition through Deep Learning," *2021 International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems (ICCCIS)*, 2021, pp. 442-447, doi: 10.1109/ICCCIS51004.2021.9397145.
- [16] W. Villegas-Ch, S. Luján-Mora, D. Buenaño-Fernandez and M. Román-Cañizares, "Analysis of web-based learning systems by data mining," *2017 IEEE Second Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*, Salinas, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/ETCM.2017.8247553.
- [17] H. C. Hung, I. F. Liu, C. T. Liang and Y. S. Su, "Applying educational data mining to explore students' learning patterns in the flipped learning approach for coding education," *Symmetry*, vol. 12, no. 2, 2020.
- [18] M. Blagojević and Ž. Micić, "A web-based intelligent report e-learning system using data mining techniques," *Computers and Electrical Engineering*, vol. 39, no. 2, pp. 465 – 474, 2013.
- [19] H. Mohammad, "Application of decision tree algorithm for predicting students' performance via online learning during coronavirus pandemic," *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. 99, no. 19, pp. 4546 – 4556, 2021.
- [20] W. F. W. Yaacob, S. Nasir, "Supervised data mining approach for predicting student performance," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 16, no. 3, pp. 1584 – 1592, 2019.
- [21] C. Tan, J. Lin, "A new QoE-based prediction model for evaluating virtual education systems with COVID-19 side effects using data mining." *Soft Computing*, pp. 1 – 15, 2021.

- [22] L. Masangu, A. Jadhav, R. Ajoodha, "Predicting student academic performance using data mining techniques," *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 153 – 163, 2021.
- [23] D. K. Dake, D. D. Essel and J. E. Agbodaze, "Using Machine Learning to Predict Students' Academic Performance During Covid-19," *2021 International Conference on Computing, Computational Modelling and Applications (ICCMA)*, 2021, pp. 9-15, doi: 10.1109/ICCMA53594.2021.00010.
- [24] I. L. H. Alsammak, A. H. Mohammed, I. S. Nasir, "E-learning and covid-19: Predicting student academic performance using data mining algorithms," *Webology*, vol. 19, no. 1, pp. 3419 – 3432, 2022.
- [25] Ö. Şen ve G. Kızılcıoğlu, "COVID-19 PANDEMİ SÜRECİNDE ÜNİVERSİTE ÖĞRENCİLERİNİN VE AKADEMİSYENLERİN UZAKTAN EĞİTİME YÖNELİK GÖRÜŞLERİNİN BELİRLENMESİ", *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, c. 4, sayı. 3, ss. 239-252, Ara. 2020, doi:10.46519/ij3dptdi.830913.
- [26] M. Keskin ve D. Özer Kaya, "COVID-19 Sürecinde Öğrencilerin Web Tabanlı Uzaktan Eğitime Yönelik Geri Bildirimlerinin Değerlendirilmesi", *İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi Dergisi*, c. 5, sayı. 2, ss. 59-67, Haz. 2020.
- [27] N. Y. Şimşek. (2019 24 Şubat). *Derin Öğrenme (Deep Learning) Nedir ve Nasıl Çalışır?*. nyilmazsimsek.medium.com. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://nyilmazsimsek.medium.com/derin-%C3%B6%C4%9Frenme-deep-learning-nedir-ve-nas%C4%B1l-%C3%A7al%C4%B1%C5%9F%C4%B1r-2d7f5850782>.
- [28] B. Kotan, "Network monitoring system using machine learning comparative analysis of classification techniques for network traffic monitoring," *M.S. thesis, Electronics And Computer Engineering, Hasan Kalyoncu University, Gaziantep, Turkey*, 2019.
- [29] A. Kızrak. (2019, May 9). *Comparison of Activation Functions for Deep Neural Networks* [Online]. Towards Data Science. Available: <https://towardsdatascience.com/comparison-of-activation-functions-for-deep-neural-networks-706ac4284c8a>.
- [30] RapidMiner. (2022, April 13). *Deep Learning* [Online]. Available: https://docs.rapidminer.com/latest/studio/operators/modeling/predictive/neural_nets/deep_learning.html.
- [31] S. Kırıçoğlu ve A. Yakupoğlu, "Veri Madenciliği ile Üniversite Bilişim Teknik Servis Hizmetleri Analizi", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 8, sayı. 1, ss. 326-333, Oca. 2020, doi:10.29130/dubited.593830.
- [32] K. Kotan, "Comparative analysis of classification techniques for network anomalies management," *M.S. thesis, Electronics And Computer Engineering, Hasan Kalyoncu University, Gaziantep, Turkey*, 2019.
- [33] M. Saritas and A. Yasar, "Performance Analysis of ANN and Naive Bayes Classification Algorithm for Data Classification," *IJISAE*, vol. 7, no. 2, pp. 88-91, Jun. 2019.
- [34] Z. Jiao, P. Hu, H. Xu, Q. Wang, "Machine learning and deep learning in chemical health and safety: a systematic review of techniques and applications," *ACS Chemical Health & Safety*, vol. 27, no. 6, pp. 316 – 334, 2020.

- [35] U. Çelik, E. Akçetin ve M. Gök, Editörler, *RapıMiner ile Uygulamalı Veri Madenciliği*, 1. baskı, İstanbul, Türkiye: Pusula 20 Teknoloji ve Yayıncılık A.Ş., 2017, böl. 6, ss. 81-94.
- [36] B. Aksoy ve D. Boztosun, "Diskriminant ve Lojistik Regresyon Yöntemleri Kullanılarak Finansal Başarısızlık Tahmini: BIST İmalat Sektörü Örneği," *İstanbul Okan Üniversitesi Finans Politik ve Ekonomik Yorumlar*, s. 646, ss. 9-32, 2018.
- [37] C. Erden, *Python ile Veri Madenciliği*, 1. baskı, İstanbul, Türkiye: KODLAB Yayın Dağıtım Yazılım Ltd. Şti., 2021, böl. 8-9, ss. 185-225.
- [38] M. Hasnain, M. F. Pasha, I. Ghani, M. Imran, M. Y. Alzahrani and R. Budiarto, "Evaluating Trust Prediction and Confusion Matrix Measures for Web Services Ranking," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 90847-90861, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2994222.
- [39] A. Amidi and S. Amidi. (2021, December 27). *Machine Learning tips and tricks cheatsheet. Stanford University* [Online]. Available: <https://stanford.edu/~shervine/teaching/cs-229/cheatsheet-machine-learning-tips-and-tricks>.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

İnsan Femurunda Eksenel ve Yanal Darbe Yüküne Maruz Kalan Kemik-İmplant Sisteminin Analizi

 Okan MADEN ^a,  Kenan TÜFEKÇİ ^{b,*}

^a Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa, TÜRKİYE

^b Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: kenantufekci@uludag.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1096478

Öz

Bu çalışmada uyluk (femur) kemiği gövdesinde meydana gelen kırıkları tedavi etmek için halihazırda kullanılan implanta alternatif olarak yeni tasarım implant sunulmuş ve implant-kemik sistemindeki kemik üzerine gelen gerilme azaltılmaya çalışılmıştır. Halihazırda kullanılan implant, üretici katalogdan seçilmiştir. ANSYS 19.2 programında dinamik ve statik analizler gerçekleştirilerek her iki implantın mekanik performansı karşılaştırılmıştır. İmplant-kemik sistemine yatay ve dikey yönlerde 3 m/s, 4 m/s ve 5 m/s hızlarında 80 kg olduğu varsayılan ağırlığın darbe modellemeleri yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre alternatif yeni tasarım implant kullanılarak eksenel yönden gelen kuvvetin kemikte oluşturduğu gerilme sağlam kemiğe göre %38,7 oranında, eksene dik yönden gelen kuvvetin kemikte oluşturduğu gerilme ise %28,3 oranında azaltılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Biyomekanik, Dinamik ve statik analiz, İmplant

Analysis of Human Femur-Implant System Subjected to Axial and Lateral Impact Loading

ABSTRACT

In this study, proposed alternative implant design that can be used for the treatment of femoral fractures in order to decrease stress distribution on the bone-implant interface especially in the condition of impact loading. The numeric analysis of the most commonly using implant design in orthopedic operations and alternative implant design proposed in this study were performed by ANSYS 19.2, and compared the mechanical performances, both static and dynamic loading conditions. In the analyses, impactor weight were assumed to be 80 kg and impact velocity were chosen as 3 m/s, 4 m/s, 5 m/s. The best performance were obtained in Design 1 as the stresses due to vertical force were reduced in the rate of 38,7% and the stresses due to horizontal force were reduced in the rate of 28,3%.

Keywords: Biomechanic, Dynamic and static analysis, Implant

I. GİRİŞ

Kemikler, insan vücudunun daha yumuşak kısımlarını destekleyen, insan vücudunun korunmasından sorumlu olan, kas yüklerinin, yer çekiminin, genel olarak iç ve dış kuvvetlerin etkisine maruz kalan, doğal, bileşik, canlı dokulardır [1]. Kemik kırığı dış yüklerin oluşturduğu stres birikmesi, sürünme, yorgunluk, bazı hastalıklar (osteoporoz gibi) ve aşırı yüklenme koşullarında (spor kazası, motorlu araç kazası, düşme gibi) meydana gelen kemik bütünlüğünün bozulmasıdır [2], [3].

Kemik kırık tedavisi geliştirmek için yapılan analizlerin birçoğunda statik deneylerden elde edilen veriler ve statik gerilme analizleri kullanılmaktadır. İmplantlarla sabitlenmiş kemikler tedavi sürecinde de darbe yüklerine maruz kalmaktadır. Bu durumda yapılan statik analizler gerçek durumu tam olarak yansıtmamakta ve öngörülmeyen hasarlar meydana gelebilmektedir.

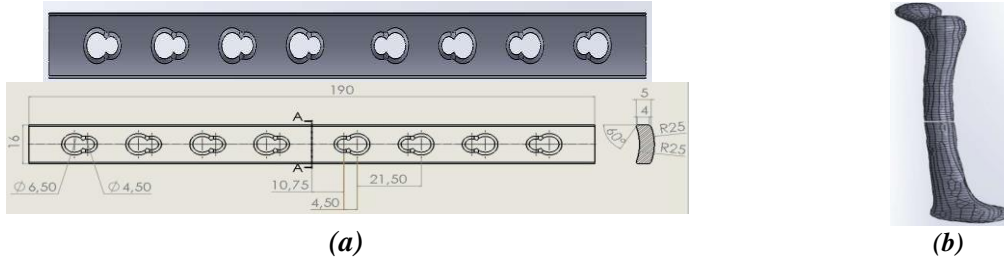
Kemiğin canlı bir doku olması ve kemiğe gerinim ölçer yerleştirip ölçüm yapmaya çalışmanın hem masraflı hem de içerdiği riskler bakımından (enfeksiyon gibi) uygun olmaması nedeniyle kemik-implant sisteminin maruz kaldığı darbe yükleri neticesinde oluşacak gerilme-gerinme değerleri in-vivo deneylerle belirlemek zorlaşmaktadır. Bu yüzden birçok araştırmacı sonlu elemanlar modelleri üzerinde işlem yapmayı tercih etmektedir.

Uyluk (Femur) kemiği, vücuttaki leğen kemiğinden dize uzanan, tek bir parçadan oluşan, insan vücudundaki boyu en fazla, en kuvvetli ve en ağır kemiktir. Bir kişinin farklı vücut duruşu modlarında kalça eklemi ile diz eklemi arasında ayakta kalması veya yürümesi için stabilite ve destek sağlar. Vücudun bütün yükü, bu kemikler aracılığı ile daha aşağıya intikal eder. İnsan vücudundaki maksimum deformasyona ve baskı gerilmelerine maruz kalan kemiktir. Boyu insan boyunun yaklaşık %26'sı ve kütlesi yaklaşık 0,455 kg'dır [4]. Femur gövdesi uzun, ince ve yapı olarak neredeyse silindriktir. Alt ucu üst uçtan daha büyüktür. Kemik ucu yumrusu olarak bilinen iki dikdörtgen tepeden oluşur. Kemiğin duruşu yukarıdan aşağı ve dıştan içe doğrudur. Alt ucu üst ucundan daha arka planda bulunur. Konveksliği öne bakan bir eğrilik gösterir. Kemiğin bir gövdesi, üst ve alt olmak üzere iki ucu vardır. Kemiğin gövdesi kalibre olarak oldukça düzgündür ancak iki ucu oldukça düzensizdir [5].

II. MALZEME VE YÖNTEM

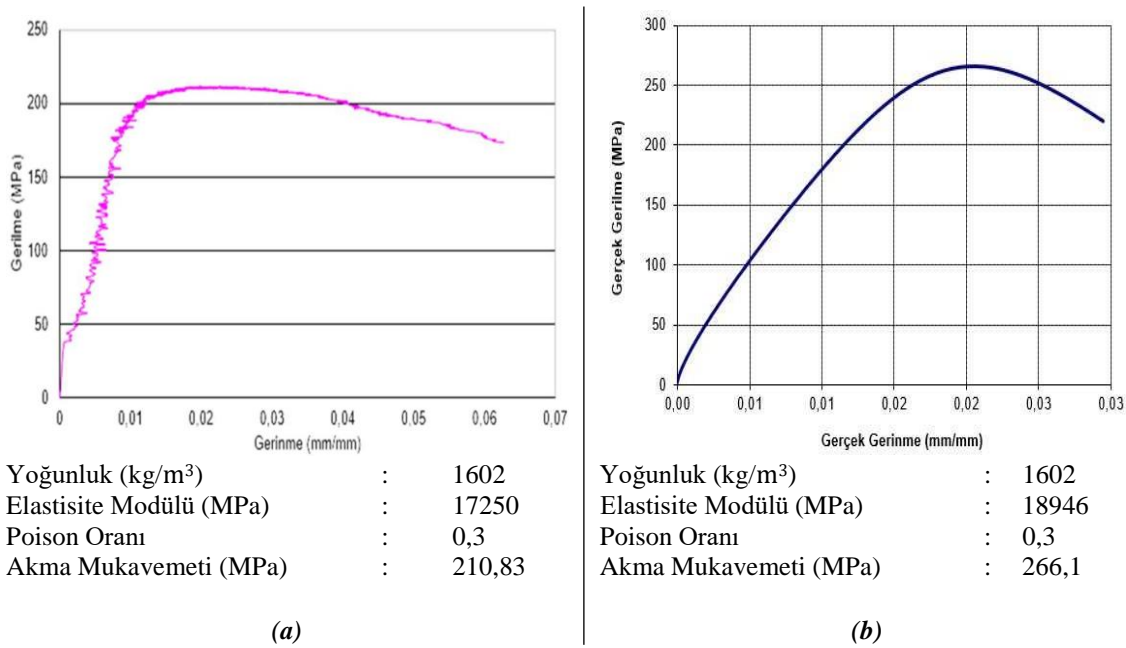
Halihazırda kullanılan implant, üretici kataloglarından seçilmiş [6] ve Mevcut implant olarak adlandırılmıştır. Bu implant kataloglarda verilen ölçüler doğrultusunda Solidworks programında tasarlanarak kırık femur kemiğine dış açılmamış basit vidalar ile montajı yapılmıştır. ATO/AO kırık sınıflandırmasına göre kemiğin gövde kısmından Basit-A tipi transvers olarak kırıldığı varsayılmıştır (Şekil 1b) [7]. Mevcut implant, incelenen kemiğin boyuna uygun olarak toplam uzunluğu 190 mm ve 8 delikli olarak seçilmiştir. İmplant genişliği 16 mm ve kalınlığı 5 mm'dir. Vida yuvaları Ø4,5 mm ve Ø6,5 mm çaplarında ve birbirlerine geçmiş şekilde olup eğrilik yarıçapı 25 mm'dir (Şekil 1a) [8].

Femur kemik geometrisi bilgisayarlı tomografi (BT) verilerinin DICOM (Tıpta Dijital Görüntüleme ve İletişim) formatında kaydedilip Mimics (Materialize Interactive Medical Image Control System) yazılımına aktararak oluşturulur [9]. Oluşturulan model Solidworks programına aktarılmıştır. Femur kemik modeli 15014 düğüm ve 75138 elementten oluşmuştur. Ayrıca kemik diyafiz açısı 140°, mekanik eksen ölçüsü yaklaşık 5,5° olup maksimum uzunluk 413 mm ve gövde çapı ortalama 85,5 mm'dir.



Şekil 1. (a) Mevcut İmplant model ve teknik resmi, (b) Kırık kemik modeli

Analizlerde kullanılacak kemik malzemesi özelliklerini belirlemek için insan femur kemiğine osteonel olarak benzeyen at kemiği kullanılarak Split Hopkinson Pressure Bar deney sistemi ile dinamik basma ve konvensiyonel cihazlar kullanılarak statik basma deneylerinden elde edilmiş veriler kullanılmıştır (Şekil 2) [10]. Tüm implant ve vidalarda malzeme olarak Ti-6Al-4V kullanılmıştır (Tablo 1) [11].

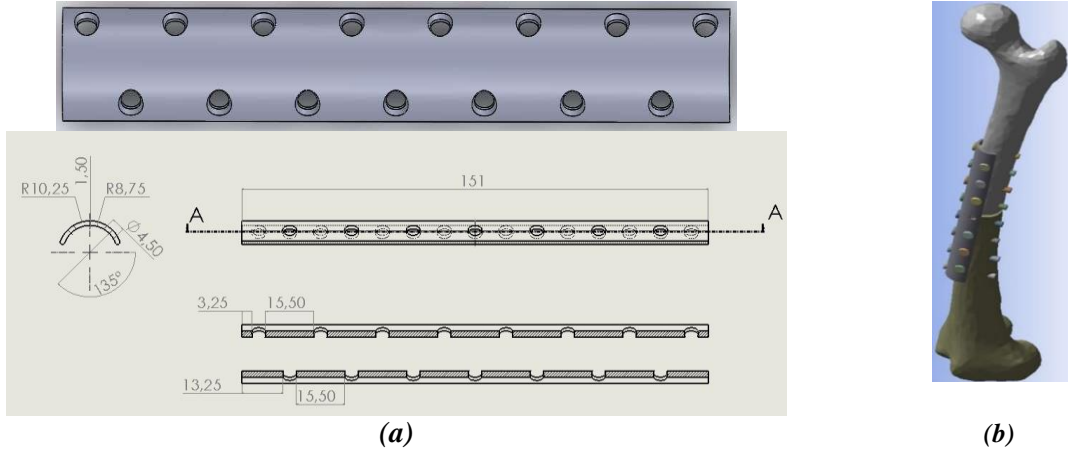


Şekil 2. Kemik malzeme özellikleri (a) Statik basma eğrisi, (b) Dinamik basma eğrisi.

Tablo 1. Ti-6Al-4V malzeme özellikleri.

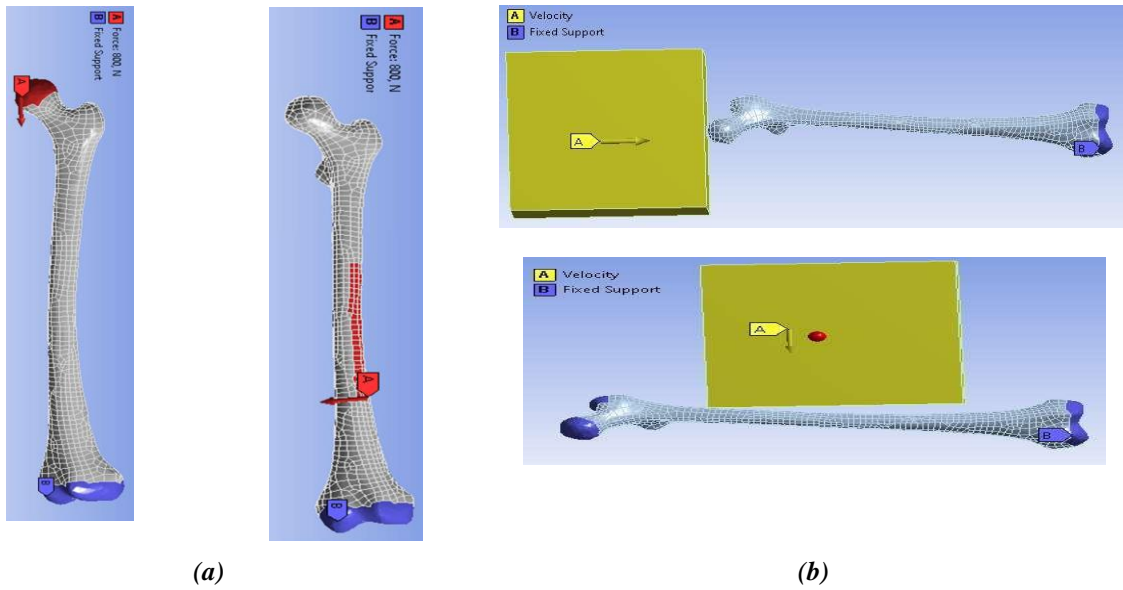
Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Elastisite Modülü (MPa)	Poiss— on Oranı	Akma Mukavemeti (MPa)	Kopma Mukavemeti (MPa)
Ti-6Al-4V	4419	113800	0,342	880	950

Mevcut tasarıma alternatif olarak geliştirilen implant tasarımı Solidworks programında tasarlanmış ve Alternatif tasarım implant olarak adlandırılmıştır. Mevcut tasarımda vidalar kemiğe aynı eksen üzerinde ve aynı açı ile montajlanırken yeni alternatif tasarımda vidalar kemiğe iki farklı eksen üzerinde ve simetrik açılarla montajlanmıştır. Böylece daha sıkı bağlama ve hareket sırasında çözülme özellikleri kazandırılması amaçlanmıştır. Yeni tasarım implant; toplam boyu 151 mm, et kalınlığı 1,5 mm ve eğrilik yarıçapı 10,25 mm, vida delik çapları 4,5 mm, delikler arası uzaklık 15,5 mm ve vida yuvaları merkez eksen ile 45° yapacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Yeni tasarım implant (a) model ve teknik resmi, (b) Montajlı hali.

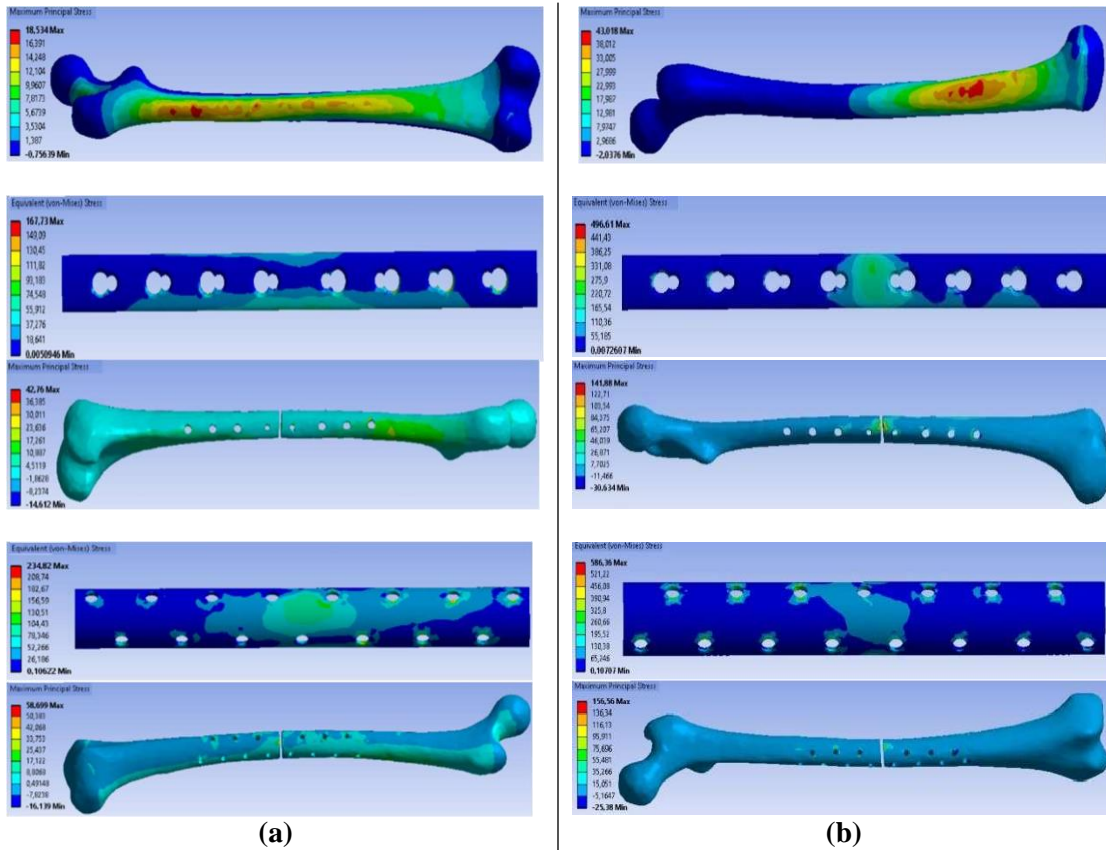
Kırık kemik-implant sistemlerini oluşturan bileşenlerin aralarındaki kontak ilişkisi olarak birbirine bağlı, temas yüzeyleri birbiri üzerinden kayabilir ama birbirlerinden ayrılamaz olarak tanımlanmıştır. Mesh özelliği olarak tetragonal, 3 boyutlu, 8 düğümlü yüzey temas elemanı olarak tanımlanmıştır. Mesh boyutu implantlar için en küçük 2 mm, kemik için en küçük 4 mm, vidalar için en küçük 3 mm olarak belirlenmiştir. Toplam mesh eleman sayısı 150000 ve düğüm sayısı 105000 civarı olmaktadır. Oluşturulan sistemlerin statik ve dinamik analizleri ANSYS Workbench 19.2 programında yapılmıştır. Analizler için insan ağırlığı 80 kg ve insan ayakta durduğunda bu kuvvetin direkt femur kemiğine geldiği kabul edilmiştir. Statik analiz modelinde kuvvet (800 N) aksel ve eksene dik olarak ayrı ayrı uygulanmıştır. Solak [12] yaptığı çalışmada, uyluk ve kaval kemiklerinin araç çarpması sonucu kemiklerde meydana gelen değişimlerini inceleyerek aracın yaya bacak koruma aparatı için sonuçlar elde etmiştir. Analiz modellemesini kuvvet, kemik gövdesine gelecek şekilde ve tek noktadan sabitleyerek belirlemiştir. Bu modelleme şekli, incelenen kemik-implant sistemlerinin eksene dik gelen kuvvetin etkisi analiz edilirken uygulanmış olup mesnetleme şartı olarak proximal epifiz serbest bırakılmış, distal epifiz ise sabitlenmiştir. Aksel kuvvetin kemik-implant sistemine etkisini incelemek için ise kuvvet, femur baş kısmından uygulanmış olup distal kısımdan mesnetleme yapılarak modellenmiştir. (Şekil 4a). Dinamik analiz modelinde kırık kemik-implant sistemine çarpan cismin ağırlığı 80 kg olarak kabul edilmiştir ve cismin hızı 3 m/s, 4 m/s, 5 m/s, zaman 60 ms alınmıştır (Şekil 4b). Bu hızlarda femur başı çatlamadan veya kırılmadan önceki gerilme değerleri görülmüştür.



Şekil 4. a) Statik modelleme, b) Dinamik modelleme

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

İncelenen sistemlerin ve sağlam kemiğin ANSYS 19.2 programında yapılan statik analiz görsel sonuçları Şekil 5’te, sayısal analiz sonuçları Tablo 2’de gösterilmiştir. Statik analiz sonuçlarına göre kırık kemik-implant sistemlerinde aksel ve eksene dik uygulanan kuvvetin kemik üzerinde oluşturduğu gerilmeler sağlam kemikte oluşan gerilme değerinin üzerinde değerler ortaya çıkarmıştır. Aksel ve eksene dik uygulanan statik kuvvetin oluşturduğu gerilmeler, implant-kemik sistemlerini oluşturan elemanların tümünün kendi akma gerilmelerinden daha az gerilme oluşturduğunu göstermektedir.

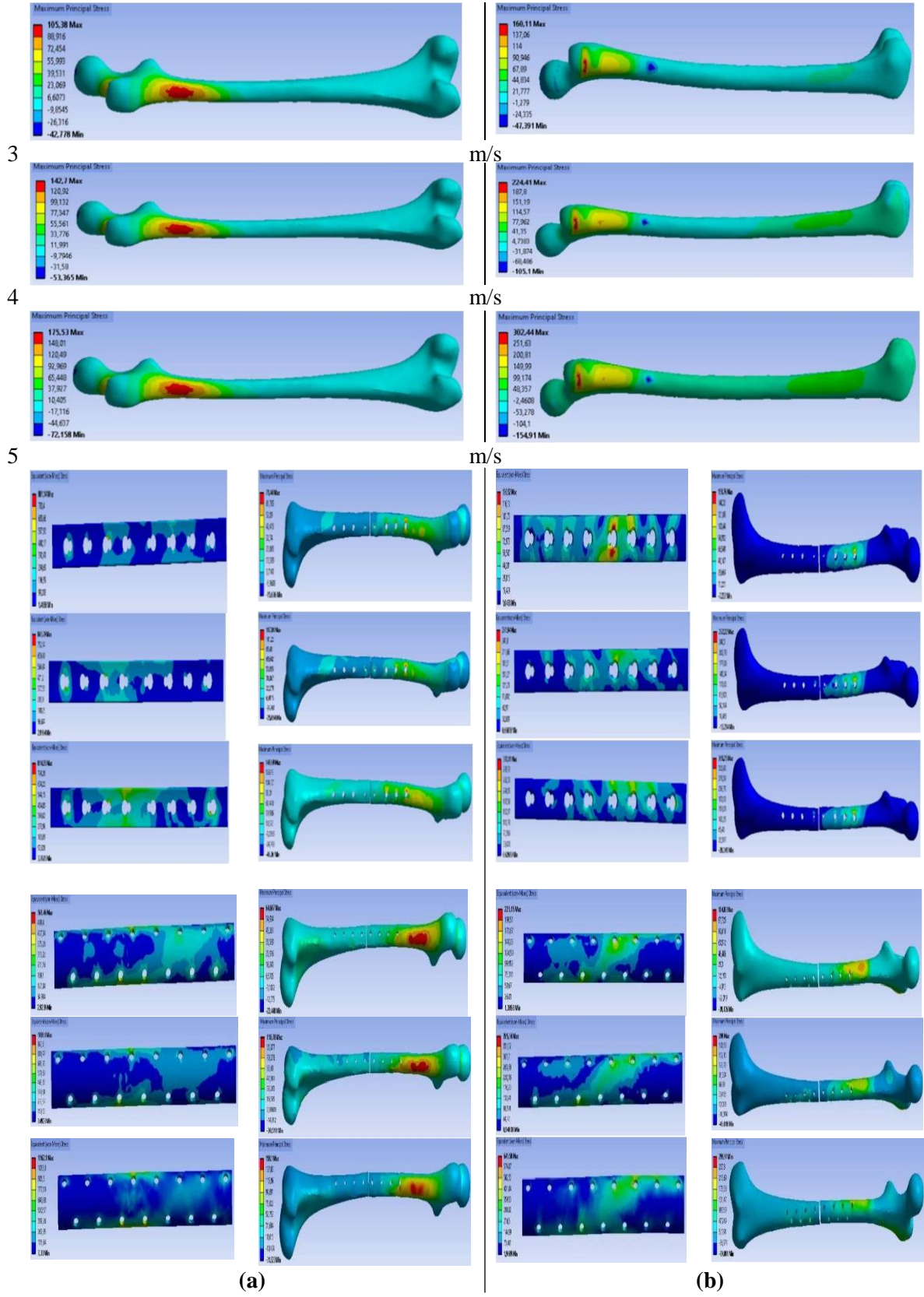


Şekil 5. a) Aksel yüklemeye, b) Eksene dik yüklemeye statik analiz sonuçları.

Tablo 2. Sistemlerin statik analiz sonuçları.

Statik Analiz	Eksenel Kuvvet		Eksene Dik Kuvvet	
	İmplant von-Mises Gerilme (MPa)	Kemik Asal Gerilme (MPa)	İmplant von-Mises Gerilme (MPa)	Kemik Asal Gerilme (MPa)
Mevcut İmplant- Kemik Sistemi	167,73	42,76	496,61	141,88
Alternatif Tasarım İmplant-Kemik Sistemi	234,82	58,699	586,36	156,56
Sağlam Kemik	-	18,534	-	43,018

İncelenen mevcut implant sistemlerinin ve sağlam kemiğin 3 m/s, 4 m/s ve 5 m/s çarpma hızlarındaki dinamik analiz sonuçları Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Sistemlerin (a) Eksenel yükleme, (b) Eksene dik yükleme dinamik analiz sonuçları.

Kemik-implant sistemleri ve sağlam kemiğin dinamik analiz sonuçları Tablo 3 ve Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Kemik-implant sistemlerin aksel yüklemeye dinamik analiz sonuçları.

Dinamik Analiz	Eksenel Kuvvet Etkisi					
	İmplant (von-Mises Gerilmesi-MPa)			Kemik (Asal Gerilme-MPa)		
	3 m/s	4 m/s	5 m/s	3 m/s	4 m/s	5 m/s
Mevcut İmplant-Kemik Sistemi	881,14*	845,79	814,35	71,44	117,01	147,69
Alternatif Tasarım İmplant-Kemik Sistemi	561,46	1038,8*	1162,1*	64,607	110,78	158,1
Sağlam Kemik	-	-	-	105,38	142,7	175,53

*Malzeme akma mukavemetini geçen değerler.

Mevcut implant-kemik sistemindeki hali hazırda kullanılan implantın üzerinde oluşan gerilmenin çarpma hızı arttıkça azaldığı görülmüştür. Mevcut İmplant düşük çarpma hızında kemiğe aktarılan yükü daha fazla absorbe edebilmektedir. İmplantın çarpma hızı 4 m/s'de kemik üzerinde oluşan gerilmeyi %18 oranında azaltmıştır. Alternatif tasarım implant-kemik sisteminde tasarlanan implantın 3 m/s çarpma hızında kemikte oluşan gerilmeyi %38,7 oranında azalttığı görülmüştür. İmplantın 4 m/s ve 5 m/s çarpma hızlarında oluşan gerilmelerin akma gerilmesini aştığı görülmüştür.

Tablo 4. Sistemlerin eksene dik yüklemeye dinamik analiz sonuçları.

Dinamik Analiz	Eksene Dik Kuvvet Etkisi					
	İmplant (von-Mises Gerilme-MPa)			Kemik (Asal Gerilme-MPa)		
	3 m/s	4 m/s	5 m/s	3 m/s	4 m/s	5 m/s
Mevcut İmplant-Kemik Sistemi	130,52	271,94	337,11	158,76	272,22*	365,25*
Alternatif Tasarım İmplant-Kemik Sistemi	223,15	395,34	645,58	117,83	209	299,91*
Sağlam Kemik	-	-	-	160,11	224,41	302,44*

*Malzeme akma mukavemetini geçen değerler.

İmplant-kemik sistemdeki hali hazırda kullanılan implant monte edildiği kırık kemiği 4 m/s ve 5 m/s çarpma hızlarında koruyamadığı ve bu iki çarpma hızında kemikte oluşan gerilmeler akma gerilmesini (266,1 MPa) aştığı görülmüştür. Alternatif tasarım implant-kemik sisteminde 3 m/s çarpma hızında kemik üzerinde oluşan gerilme değeri sağlam kemikte oluşan gerilmeye göre %28,3 oranında azaldığı görülmüştür.

IV. SONUC

Bu çalışmada hali hazırda kullanılan implanta alternatif olabilecek yeni bir implant tasarımı gerçekleştirilmiş ve her iki implantın statik ve dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Statik analiz sonuçlarına göre mevcut implant-kemik sisteminde aksel yönde kemik üzerine gelen gerilme 42,76 MPa ve eksene dik yönde kemik üzerine gelen gerilme 141,88 MPa iken alternatif tasarım implant-kemik sisteminde aksel yönde kemik üzerine gelen gerilme 58,699 MPa ve eksene dik yönde kemik

üzerine gelen gerilme 156,56 MPa'dır. Mevcut implant statik kuvvet altında alternatif tasarım implanta göre daha iyi bir performans göstermektedir. Dinamik analizler sonucunda ise mevcut implant-kemik sisteminde eksenel yönde 4 m/s çarpma hızında kemik üzerine gelen gerilme 117,01 MPa ve eksene dik yönde 3 m/s çarpma hızında kemik üzerine gelen gerilme 158,76 MPa iken alternatif tasarım implant-kemik sisteminde eksenel yönde 3 m/s çarpma hızında kemik üzerine gelen gerilme 64,607 MPa, eksenel yönde 4 m/s çarpma hızında kemik üzerine gelen gerilme 110,78 MPa ve eksene dik yönde 3 m/s çarpma hızında kemik üzerine gelen gerilme 117,83 MPa'dır. Alternatif tasarım implant dinamik kuvvet altında mevcut implanta göre daha iyi bir performans göstermektedir.

V. KAYNAKLAR

- [1] P. S. Senthil Maharaj, R. Maheswaran, A. Vasanthanathan, "Numerical analysis of fractured femur bone with prosthetic bone plates," *Procedia Engineering*, vol. 64, pp. 1242-1251, 2013.
- [2] A. Bettamer, "Prediction of proximal femur fracture: finite element modeling based on mechanical damage and experimental validation," Ph.D. dissertation, Doctorale School for Sciences and Technology, University of Orleans, France, 2013.
- [3] S. Das and S. K. Sarangi, "Finite element analysis of femur fracture fixation plates," *International Journal of Basic and Applied Biology*, vol. 1, no. 1, pp. 1-5, 2014.
- [4] U. Mughal, H. A. Khawaja, M. Moatamedi, "Finite element analysis of human femur bone," *International Journal of Multiphysics*, vol. 9, no. 2, pp. 101-108, 2015.
- [5] W. Chang, "Computer aided stress analysis of the femur with prosthetic hip stem utilizing computed tomography," PhD dissertation, Department of Mechanical and Industrial Engineering, New Jersey Institute of Technology, USA, 1994
- [6] Tipmed Medikal. (2022, 16 Mart). *Traditional plate systems* [Çevrimiçi]. Erişim: http://www.tipmed.com/catalogue/6-celik_plak/celik_plak.html?iframe=true&width=980&height=600
- [7] F. Bayram, "Femur kemik kırıklarının bilgisayar destekli sınıflandırılması," Doktora tezi, Elektronik-Bilgisayar Eğitimi Bölümü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2016.
- [8] Medikal EXPO. (2022, 16 Mart). *Femur compression plate* [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.medicalexpo.com/prod/tst-orthopedic-implants/product-70382-702198.html>
- [9] P. K. Satapathy, B. Sahoo, "Finite element analysis of functionally graded bone plate at femur bone fracture site," *Materials Science and Engineering*, vol. 330, 012027, 2017.
- [10] K. Tüfekçi, "Gerinim hızının kortikal kemiğin mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi," Doktora tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 2008.
- [11] D. S. Angadi, "Biomechanical analysis of femoral fracture fixation using the expert adolescent lateral femoral nail system," PhD dissertation, School of Clinical and Experimental Medicine, University of Birmingham, England, 2017.



[12] H. A. Solak, "Taşıt bölge tasarım parametrelerinin yaya bacak koruma performansına etkileri," Yüksek Lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü Otomotiv Programı, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2017.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Düşey Elektrik Sondajı Verilerinin Genelleştirilmiş Regresyon Sinir Ağları ile Ters Çözümü

 Doğukan DURDAĞ^{a,*},  Ertan PEKŞEN^a

^a Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: dogukan.durdag@kocaeli.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1100533

ÖZ

Düşey elektrik sondajı (DES) verilerinin ters çözümü doğrusal olmayan bir problem olması nedeniyle zor bir işlemdir. Bu çalışmada, genelleştirilmiş regresyon sinir ağlarının özdirenç problemine uygulanabilirliği araştırılmıştır. Genelleştirilmiş regresyon sinir ağları (GRNN) ile düşey elektrik sondajı verilerinin ters çözümü test edilmiştir. Sinir ağı düz çözüm ile oluşturulan yapay verilerle eğitilmiştir. Ağ hem eğitim seti içinde bulunmayan diğer yapay veriler ile hem de arazi verisi ile test edilmiştir. Ayrıca GRNN parametresi olan yayılım parametresi de farklı değerler kullanılarak karşılaştırılmıştır. En düşük hata oranını veren yayılım parametresi kullanılmıştır. Yapay veriler 3 tabakalı modellerdir. Arazi verisi ise 4 tabakalı olarak değerlendirilmiştir. GRNN çıktısı yapay verilerde 3 tabakalı model için 3 özdirenç ve 2 tabaka kalınlığı olmak üzere 5 parametredir. Arazi verisinde ise 4 tabakalı bir model için 4 özdirenç ve 3 tabaka kalınlığı olmak üzere 7 parametredir. GRNN ile ters çözüm sonuçları çok düşük hata oranları ile başarılı olmuştur. DES verilerinin kalınlık ve özdirenç kestirimleri için GRNN yöntemi performansı yüksek bir oranda başarılı olmuştur.

Anahtar Kelimeler: *Yapay Sinir Ağları, Özdirenç, GRNN, DES*

Inversion of Vertical Electrical Sounding Data by Using General Regression Neural Network

ABSTRACT

The inversion of vertical electrical sounding (VES) data is a difficult task, since it is a non-linear problem. In this study, the general regression neural network approach was investigated to solve vertical electrical sounding inverse problems. The general regression neural network (GRNN) was tested to inversion of vertical electrical sounding data. The neural network was trained with synthetic data sets created by forward modeling. The network was tested both with another set of synthetic data and with field data. In addition, the spread parameter which is the GRNN parameter was compared using different values. The spread parameter giving the lowest error rate was used. Synthetic data are 3 layers models. Field data was inverted as 4 layers. The GRNN output is 5 parameters which are 3 resistivity and 2 layer thickness for the 3-layer model in synthetic data. In field data, there are 7 parameters which are 4 resistivity and 3 layer thickness for a 4-layer model. Inversion results of GRNN were successful with very low error rates. The GRNN method was successful with a high performance rate for estimation of the thickness and resistivity of VES data.

Keywords: *Artificial Neural Networks, Resistivity, GRNN, VES*

I.GİRİŞ

Düşey elektrik sondajı (DES) ilk olarak Conrad Schlumberger tarafından 1900'lü yılların başlarında uygulanmıştır [1]. DES yöntemi hidrojeolojik, jeotermal, çevre ve mühendislik problemlerini çözmek için yaygın olarak kullanılır. Kosinski [2] akifer özelliklerini tahmin etmek için DES yöntemini kullanmıştır. Zohdy [3] birçok farklı örnekle DES verilerini değerlendirmiştir. Maiti [4] sismik aktivitelerin yüksek olduğu bir bölgede DES verilerini kullanarak yeraltının yapısını ortaya koymuştur. DES'in amacı derinlikle birlikte değişen tabakaların öz dirençlerini belirlemektir [1]. Tabakaların öz dirençlerini belirlemek için görünür öz direnç verilerinin ters çözümünün yapılması gerekir. DES ters çözümü, görünür öz direnç veri sayısı, parametre sayısından fazla olduğu için aşırı tanımlı ve doğrusal olmayan bir problemdir. Problemin doğrusal olmayan bir problem olmasından dolayı yeraltı parametrelerini yani tabakaların öz direnç ve kalınlık değerlerini belirlemek zor bir işlemdir. Bu problemin çözümü için farklı ters çözüm teknikleri ile çalışmalar yapılmıştır. Pekeris [5] DES verilerinin yorumlanması için uyguladığı doğrudan yorum yöntemi ilk uygulamalardan biridir. Daha sonrasında Argilo [6], Kunez ve Rocroi [7] DES verilerinin yorumlanması için yapılmış sayısal hesaplamalar ve algoritmalar veren çalışmalardır. Ghosh [8] ise doğrudan yorumlama yöntemine doğrusal filtre teorisi katkısını yapmıştır. Inman [9] DES verilerine ridge regresyonunu ilk kez uygulamıştır. Johansen [10] ise kabaca ölçülen eğriyi verecek şekilde deneme-yanılma yöntemi ile en küçük kareler tabanlı bir sistem sunmuştur. Szaraniec [11] ise Pekeris'in [5] yaklaşımını iki nokta yöntemi ve çok katmanlı yöntem olarak adlandırdığı iki yeni yaklaşımla modifiye etmiştir. Chyba [12] en küçük kareler yöntemi ile DES verilerini değerlendirmiştir. Meju [13] ridge regresyonunu elektrik yöntemlerinden manyetotellürik (MT) ve geçici elektromanyetik (TEM) yöntemlerine uygulamıştır. Yapılan çalışmaların birçoğunda gözlenen veri ile hesaplanan veri arasındaki uyum genellikle yerel optimizasyon yöntemleri ile yapılmaktadır. Türev tabanlı parametre kestirimi uygulayan yerel optimizasyon yöntemlerinde çözüm başlangıç modelinin seçimine bağlıdır. Global optimizasyon yöntemlerinin başlangıç modeline ihtiyaç duymaması yerel optimizasyon yöntemlerine göre bir avantajdır. Yaygın olarak bilinen global optimizasyon yöntemlerinden bazıları Benzetimli Tavlama (SA), Genetik Algoritma (GA), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)'dur. DES verilerinin ters çözümü için global optimizasyon yöntemleriyle birçok çalışma yapılmıştır. Bhattacharya ve Sen [15] çok hızlı benzetimli tavlama yöntemini hem DES verilerine hem de İndüklenmiş Polarizasyon (IP) yöntemine uygulamıştır. Jha ve diğerleri [16] GA ile DES verilerinin ters çözümünü gerçekleştirmiştir. Martinez ve diğerleri [17] ise DES verilerinin ters çözümünü PSO yöntemi ile gerçekleştirmiştir. DES verilerinin ters çözümü için global optimizasyon yöntemlerinin başarılı sonuçlar verdiği ortaya konulmuştur.

Yukarıda bahsedilen yöntemlerin dışında, biyolojik sinir ağlarından esinlenerek tasarlanmış olan Yapay Sinir Ağları (YSA) uzun yıllardır ilişkilendirme, sınıflandırma, genelleme, özellik belirleme ve optimizasyon amacıyla birçok farklı alanda kullanılan bir yöntemdir [18]. Bu yüzden YSA jeofizik problemlerin çözümünde de kullanılmaktadır. El-Kaliouby ve diğerleri [19] TEM verilerinin değerlendirilmesi için modüler sinir ağlarını uygulamışlardır. Calderon-Macias ve diğerleri [20] DES ve sismik verilerinin ters çözümü için ileri beslemeli yapay sinir ağlarını uygulamışlardır. Spichak ve Popova [21] MT verilerinin ters çözümü için yapay sinir ağları tabanlı bir çalışma yapmışlardır. Van der Baan ve Jutten [22] jeofizikte sinir ağları başlıklı çalışmada sinir ağlarının eğitim ve performanslarını sismik yöntem üzerinde göstermişlerdir. Poulton [23] hem sinir ağlarını detaylarıyla işlemekte hem de jeofizik veriler için nasıl kullanıldığını uygulamalarla göstermektedir. Burada YSA ile sismik verilerin dalga formu tanımlama, ilk varış belirleme, hız analizi, gürültü analizi, rezervuar karakterizasyonu gibi konulara değinmektedir. Bunun yanı sıra kuyu logları, gravite, manyetik, elektromanyetik, ve elektrik yöntemlerin de bazı konularını YSA açısından ele almıştır. Poulton [24] bu çalışmada ise kullanım açısından geri yayımlı çok katmanlı mimariler daha yaygın olmasına rağmen, jeofizik problemlerin çözümünde denetimsiz öğrenme için öz düzenleyici haritalar (SOM) veya olasılık tabanlı öğrenme için ise olasılıksal sinir ağları (PNN) gibi alternatif mimarileri daha önemli bulduğunu vurguluyor. Zhang ve diğerleri [25] kuyu içi elektrik verilerinin değerlendirilmesinde modüler sinir ağlarını uygulamışlardır. Bescoby ve diğerleri [26] arkeolojik alanda toplanmış manyetik verilerin değerlendirilmesi için çok katmanlı yapay sinir ağlarını

kullanmıştır. Al-Garni [27] ise manyetik verileri değerlendirirken modüler sinir ağlarını kullanmıştır. Modüler sinir ağları ayrıca El-Kalioubly ve Al-Garni [28] tarafından doğal potansiyel yönteminde uygulanmıştır. DES verilerinin ters çözümünde de YSA birçok çalışmada kullanılmıştır. El-Qady ve Ushijima [29] elektrik verilerinin ters çözümü için geri yayımlı bir sinir ağı kullandıkları çalışmada türev tabanlı yerel optimizasyon yöntemlerine göre sinir ağlarının daha hızlı sonuç verdiğini vurgulamışlardır. Srinivas ve diğerleri [29] ileri beslemeli geri yayımlı (FFBP) bir sinir ağının DES verilerinin ters çözümünde kullanılabilirliğini ortaya koymuştur. Maiti ve diğerleri [31],[32] farklı ortamlardan elde edilmiş arazi verilerini YSA ile değerlendirmiştir. Raj ve diğerleri [33] DES verilerinin ters çözümünde ileri beslemeli geri yayımlı bir sinir ağında Levenberg-Marquardt algoritması eğitiminin performansını açıkça ortaya koymuşlardır. Ayrıca performans kriteri olarak kökortalama kare hatasını (RMSE) kullanmışlardır.

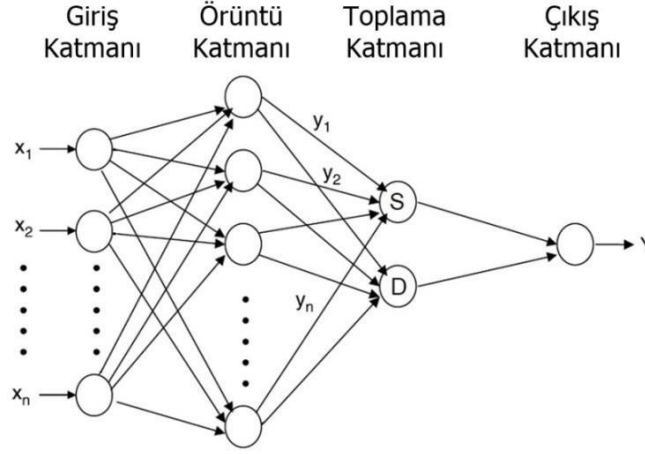
Yukarıda bahsedilen çeşitli çalışmalardan görüldüğü üzere birçok farklı YSA yapısı vardır. Genelleştirilmiş regresyon sinir ağları (GRNN), radyal tabanlı sinir ağlarının (RBNN) türlerinden biridir [23]. GRNN ilk olarak Specht [34],[35] tarafından ortaya atılmış ve geliştirilmiştir. Poulton [23] GRNN ağ yapısını, geri yayımlı çok katmanlı sinir ağları ile karşılaştırmıştır. Çok katmanlı sinir ağlarında eğitim aşamasında eşlenik gradyan, Levenberg-Marquardt, en dik iniş yöntemi gibi benzeri yöntemler kullanılmaktadır. Yapmış olduğu karşılaştırmada eğitim aşamasında yinelemeli yöntemlerle eğitim aşamasının yavaş olduğunu ortaya koymuştur. Kendi çalışmasında en iyi eğitim mimarisini açıkladığı kısımda 120000 yineleme sayısını kullandığını belirtmiştir. Ayrıca, Poulton [23] MATLAB'da GRNN'deki örüntü katmanındaki birimlerin sayısının eğitim setindeki birimlerin sayısına eşit olduğunu vurgulamıştır. Bu durumun GRNN ağ yapısını eğitim aşamasında verimli kıldığını belirtmiştir. Diğer taraftan geri yayımlı çok katmanlı sinir ağlarında, gizli katmandaki nöronsayısı, eşik değer fonksiyonu, öğrenme oranı, momentum, ağırlık başlatma gibi birçok parametre mevcuttur [23]. Bu parametrelerin her birinin optimum değerini bulmak için de ayrıca testler yapılması gereklidir. Bu durum jeofizikte ters çözüm amaçlı kullanılan bir yöntemi zaman açısından dezavantajlı duruma getirmektedir. GRNN ağ yapısı ise çok daha basittir ve sadece bir parametreye bağlıdır. Bu parametre yayılım (σ) parametresidir.

GRNN yöntemi bazı jeofizik problemleri çözmek için kullanılmıştır. Ferahtia ve diğerleri [36] ile Djarfour ve diğerleri [37] sismik verilerden gürültülerin filtrelenmesi için GRNN yöntemini kullanmışlardır. Konate ve diğerleri [38] petrol sahası verilerinde gözenekliliği modellemek için GRNN yöntemini FFBP sinir ağları ile karşılaştırmıştır. Konate ve diğerlerinin [38], bulguları GRNN ağının yaygın olarak kullanılan FFBP ağından daha doğru ve güvenilir gözeneklilik parametre tahmini yapabildiğini kanıtlamıştır. Wiszniowski [39] Polonya'daki bir bakır bölgesinde indüklenen olayların yer hareketi tahmin denklemlerine GRNN yöntemini uygulamıştır. Ji ve diğerleri [40] yakın zamanda GRNN yöntemini yatay-düşey spektral orana (HVSr) dayalı bir zemin sınıflandırmasında kullanmıştır. Garrouch [41] karmaşık dielektrik geçirgenlik ölçümlerinden rezervuar kayalarının katyon değişim kapasitesinin tahmin edilmesinde GRNN yöntemini kullanmıştır. Wiszniowski [42] GRNN yöntemini yer hareketi modellerinin tahmini için uygulamıştır. Zhou ve diğerleri [43] inşaat demiri çapını ve beton kalınlığını tahmin etmek için elektromanyetik indüksiyon veri seti tarafından eğitilmiş GRNN yöntemini uygulamıştır. Jeofizik problemlerinin çözümünde de kullanılan GRNN yönteminin, parametre kestirimini sağlayan ve doğrusal veya doğrusal olmayan problemler için yakınsayan bir yöntem olduğu kabul görmüştür.

Bu çalışmada yeraltındaki tabakaların öz direnç ve kalınlık parametrelerini kestirmek için DES verilerinin ters çözümü GRNN yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Literatür araştırmamıza göre farklı YSA yapıları DES verileri için uygulanmış olmasına rağmen, GRNN yönteminin DES verilerine uygulanmadığı görülmektedir. Bu çalışmanın amacı GRNN yönteminin DES verilerine uyarlanabilir olup olmadığını araştırmaktır. Bulgularımıza göre, yöntemin kabul edilebilir hata oranında yeraltı parametrelerini kestirebilmek için kullanılabilirliğini göstermektedir.

II. GENELLEŞTİRİLMİŞ REGRESYON SİNİR AĞLARI

İnsan beyninden ilham alan YSA, birçok farklı alanda kullanılan oldukça popüler bir yöntemdir [44]. YSA'nın yaygın kullanımı, hem yöntemin gücünden hem de farklı türde problemlere uyarlanabilir olmasından kaynaklanabilir. GRNN, fonksiyon yaklaşımı, tahmin, modelleme ve eşleştirme için kullanılan bir RBNN türüdür. GRNN, diğer doğrusal olmayan sinir ağı tekniklerine göre birçok avantaja sahiptir. GRNN'nin avantajlarından biri, yinelemeli bir eğitim aşaması gerektirmemesidir. Başka bir deyişle, ağ giriş verilerinden doğrudan (tek geçişli öğrenme) öğrenir. Ayrıca, tahmin edilen model parametreleri, giriş verilerinin minimum ve maksimumları ile sınırlıdır. GRNN yöntemi, model parametrelerinin üst ve alt sayısal değerleri arasında doğrusal olmayan bir problemi çözebilir. Gözlenen verinin ters çözüm işleminde, bir eğitim veri seti oluşturmak için gözlem değerlerinin belirli bir oranda alt ve üst sınırlarını belirleyebiliriz. Ayrıca, yerel optimizasyon yöntemleri yerel minimuma karşılık gelen istenmeyen çözümlere yakınsamasına rağmen, GRNN yöntemi bu istenmeyen çözümlere yakınsamaz [35]. GRNN yönteminin genel yapısı Şekil 1'de gösterildiği gibi sırasıyla giriş katmanı, örüntü katmanı, toplama katmanı ve çıkış katmanı olarak adlandırılan dört katmandan oluşur. Her bir katman farklı sayıda nöronlardan oluşur ve katmanlar sırasıyla bir sonraki katman ile bağlantılıdır.



Şekil 1. GRNN'nin şematik gösterimi. GRNN yapısı sırasıyla giriş katmanı, örüntü katmanı, toplama katmanı ve çıkış katmanı olarak adlandırılan dört katmandan oluşur.

Gözlemleri içeren katman, giriş katmanı olarak bilinir. Giriş katmanındaki nöron sayısı verinin boyutuna eşittir. Örüntü katmanı ve toplama katmanı, gizli katman olarak da bilinir. Örüntü katmanındaki nöron sayısı eğitim setindeki veri sayısına eşittir. Bu katmanda bulunan nöronlarda eğitim verisi ile arazi verisi arasındaki uzaklıklar hesaplanır. Daha sonra bu uzaklıklar ve radyaltabanlı fonksiyon ile ağırlık değerleri hesaplanır. Örüntü katmanının verdiği bu ağırlık değerleri, toplama katmanındaki nöronlara iletilir. Toplama katmanında hem tüm ağırlık değerleri toplanır hem de örüntü katmanındaki her nörona gelen ağırlık değerleri ile ilgili nörondaki eğitim verisinin çıkış değeri çarpılarak toplanır. Çıkış katmanında ise toplama katmanında hesaplanan çarpımların toplamı, ağırlıkların toplamına bölünür. Bu sayede çıkış katmanının verdiği değer ağ çıktılarını temsil eder. GRNN'nin çıktısı aşağıdaki şekilde hesaplanır [35].

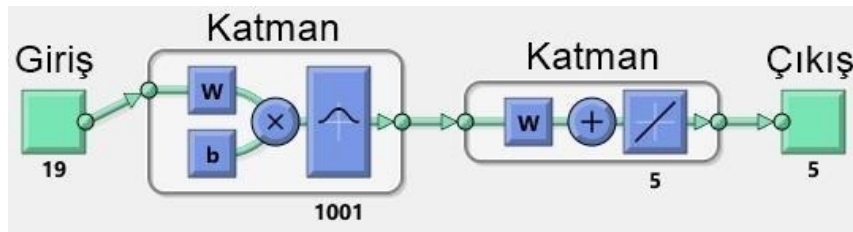
$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \exp(-D(x, x_i))}{\sum_{i=1}^n \exp(-D(x, x_i))} \quad (1)$$

Burada n sinir ağınnın giriş değerlerinin sayısıdır, D skaler bir fonksiyondur, x ve y değişkenlerdir [35].

$$D(x, x_i) = \sum_p \left(\frac{x_j - x_{ij}}{\sigma_j} \right)^2 \quad (2)$$

Burada p giriş vektörünün boyutunu gösterirken, σ yayılım (*spread*) parametresidir. Yayılım değeri eğer çok küçükse Gauss transfer fonksiyonu çok diktir. Bu durumda girişe en yakın olan örüntü birimi, daha uzak bir örüntü biriminden çok daha büyük bir çıktı üretir. Yayılım değeri eğer büyükse, eğim daha yumuşaktır ve birkaç örüntü birimi aynı giriş birimine karşılık gelebilir. Bu çalışmada yayılım parametresi deneme-yanılma yöntemi ile test edilmiştir.

Bu çalışmada Şekil 3'te gösterilen geliştirilmiş regresyon sinir ağı yapısı kullanılmıştır. Yapılan uygulamalar MATLAB yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. MATLAB yazılımının *newgrnn* fonksiyonu kullanılmıştır. Ağ, Şekil 2'teki giriş ve çıkış dışında iki katmana sahiptir. Bu iki katmandan ilki bir radyal tabanlı transfer fonksiyonuna (*radbas*) sahiptir. Öklid uzaklığı ağırlık fonksiyonu (*dist*) ile ağırlıklı girdileri hesaplanırken net girdi fonksiyonu (*netprod*) ile katmanın net girdisi hesaplanır. Diğer katman ise bir doğrusal transfer fonksiyonuna (*purelin*) sahiptir. Normalize nokta çarpım ağırlık fonksiyonu (*normprod*) ağırlıklandırılmış bir girdiyi hesaplarken toplam net giriş fonksiyonu (*netsum*) ise katmanın net girdisini hesaplar [45],[46].



Şekil 2. GRNN ağ yapısının gösterimi. Uygulamadaki yapay verilerin boyutundan dolayı giriş sayısı 19'dur, kestirilen parametrelerin boyutundan dolayı çıkış sayısı 5'dir. Eğitim verisinin boyutundan dolayı da radyal tabanlı katmanda boyut 1001'dir.

III. DÜŞEY ELEKTRİK SONDAJI

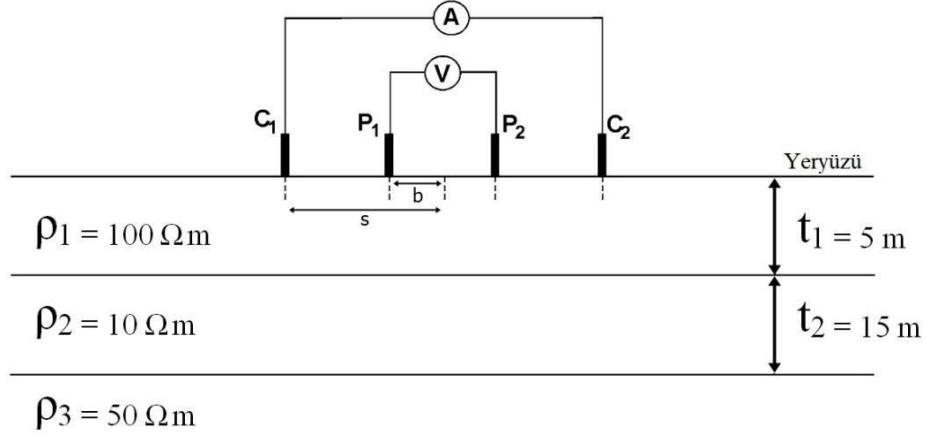
DES yöntemi en düşük maliyetli jeofizik yöntemlerden birisidir. Yöntemde sabit bir noktanın her iki tarafına simetrik olarak iki akım ve iki potansiyel elektrot yerleştirilir (Şekil 3). Merkezi noktaya yakın olan potansiyel elektrotları sabit tutulurken, merkezi noktaya uzak konumda olan akım elektrotları birbirinden uzaklaştırılarak ölçüler alınır. Her bir ölçüm pozisyonunda voltaj farkı ölçülür ve görünür öz direnç hesaplanır [1].

$$\rho_a^0(s; b) = \frac{\pi s^2 - b^2}{2} \frac{\Delta V(s)}{b I} \quad (3)$$

Burada, s akım elektrotları ile orta nokta arasındaki uzaklık iken b potansiyel elektrotları ile orta nokta arasındaki uzaklıktır. ΔV ise voltaj farkıdır. DES modelinde, yeraltının öz dirençleri (ρ_i) ve kalınlıkları (t_i) ile temsil edilen yatay tabakalardan oluştuğu kabul edilir. Yeraltı $2n-1$ boyutlu bir M vektör uzayına ait $m=(\rho_1, t_1, \rho_2, t_2, \dots, \rho_{n-1}, t_{n-1})$ vektörü ile temsil edilir. Düz çözümde m parametrelerinin bilindiği varsayılır ve belirli yüzey konumuna karşılık gelen görünür öz direnç değerleri hesaplanır. Düz çözüm ile ilgili ifade Eş. 4'deki gibidir [1].

$$\rho_a^0(s; b) = \rho_1 + s^2 \int_0^\infty (T_1(\lambda, m) - \rho_1) \cdot J_1(\lambda s) \lambda d\lambda \quad (3)$$

Burada J_1 birinci dereceden Bessel fonksiyonu, T_1 ilk tabakanın dönüşük öz direnci ve λ uzaklığın tersi boyutunda integrasyon değişkenidir. Pekeris [5] bağıntıları, her katman için en alt tabakadan yüzeye doğru dönüşük öz dirençlerin hesaplamasına olanak sağlar.



Şekil 3. Yeryüzünde akım ve potansiyel elektrotlarının dizilimini gösteren şematik. C1, C2 akım elektrotları iken P1, P2 elektrotları ise potansiyel elektrotlarıdır. Şematik ayrıca üç tabakalı yeraltı modelini de gösterilmektedir.

$$T_n(\lambda) = \rho_n \quad \text{ve} \quad T_i(\lambda) = \frac{T_{i+1} + \rho_i \cdot th(\lambda t_i)}{1 + \frac{T_{i+1} \cdot th(\lambda t_i)}{\rho_i}} \quad (4)$$

Burada $T_i(\lambda)$ i. Tabakanın dönüşük öz direncidir. Yüzeye en yakın olan tabaka olan T_1 hesaplanana kadar yinelemeli olarak hesaplama yukarı doğru ilerler. Son olarak Eş. 4'deki integrasyon doğrusal filtre teorisi aracılığıyla bir evrişim işlemi ile hesaplanır [8].

IV. UYGULAMALAR

GRNN yöntemiyle hem yapay verilerle hem de arazi verisiyle DES verilerinin ters çözümü yapılmıştır. Düz çözüm için geliştirilen MATLAB kodu, Başokur [47] tarafından yazılmış diğer bir programlama dilinden çevrilmiştir. Düz çözüm yardımıyla hem gürültüsüz hem de %5 gürültü içeren yapay veriler üretilmiştir. Yapay verilerin oluşturulduğu model 3 tabakalıdır. Tablo 1'de model parametreleri ve hem gürültüsüz hem de %5 gürültülü yapay verinin GRNN yöntemi ile kestirilen sonuçları görülmektedir. Parametrelerin alt indisleri ait oldukları tabakanın numarasını göstermektedir.

Tablo 1. Model parametreleri ve GRNN yöntemi ile yapay veriler için kestirilen sonuçlar

Parametre	Model Parametreleri	GRNN Sonucu (Gürültüsüz)	GRNN Sonucu (%5 Gürültülü)
ρ_1 (ohm.m)	100	99.32	98.44
t_1 (m)	5	5.14	5.10
ρ_2 (ohm.m)	10	9.64	9.50
t_2 (m)	15	15.19	14.70
ρ_3 (ohm.m)	50	51.77	51.70
RMSE (%)		0.53	2.04

Yapay veriler 19 adet ölçüm değerine sahiptir. GRNN yönteminde kullanılmak üzere eğitim aşaması için 1001 adet veri düz çözüm aracılığıyla üretilmiştir. Giriş verisinin boyutu 19x1001'dir. Yapay

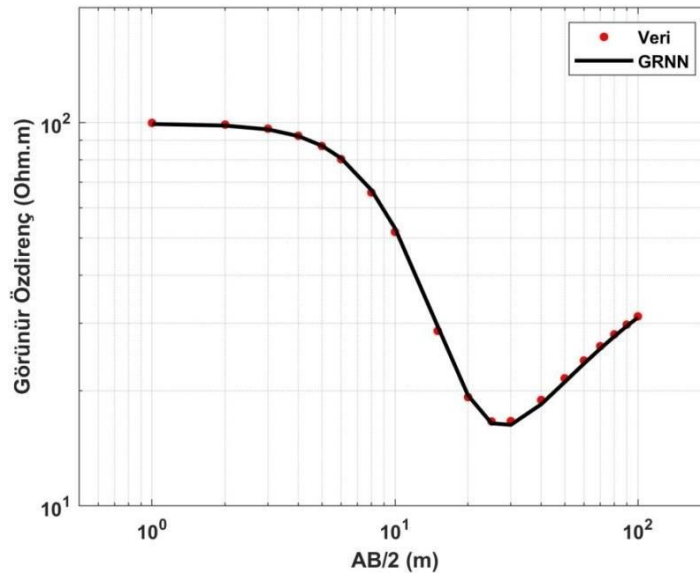
verilerdeki en düşük görünür öz direnç değeri 5 ohm.m iken en yüksek görünür öz direnç değeri 120 ohm.m'dir. Verilerin üretildiği parametrelerin boyutu ise 5×1001 'dir. GRNN yöntemi yapay verilerde çıktı olarak 3 öz direnç 2 kalınlık olmak üzere 5 parametreyi hesaplamaktadır. Yöntem ile farklı veriler için farklı sayıda tabaka parametrelerini kestirmek de mümkündür. Bu çalışmada yayılım parametresi deneme-yanılma yöntemi 0.1, 1, 5, 10, 50 değerleri ile yapılan testlerde optimum değer olarak belirlenen 1 değeri seçilmiştir. Belirlenen 1 değeri bu çalışma için optimum iken farklı yöntemlerde farklı yayılma değerleri optimum olabilir.

A. GÜRÜLTÜSÜZ VERİ

Üç tabakalı yeraltı modeli ile üretilen gürültüsüz veri için test edilen farklı yayılma değerleri ile elde edilen sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir. Kök ortalama kare hatasının en düşük olduğu sonucun yayılma değeri 1 değeridir.

Tablo 2. Gürültüsüz verinin test edildiği farklı yayılma değerleri ile elde edilen sonuçlar

Parametre	0.1 (σ)	1 (σ)	5 (σ)	10 (σ)	50 (σ)
ρ_1 (ohm.m)	99.68	99.32	99.93	98.05	98.64
t_1 (m)	4.97	5.14	4.92	5.13	5.53
ρ_2 (ohm.m)	11.14	9.64	11.30	9.79	13.38
t_2 (m)	15.15	15.19	15.04	14.70	15.40
ρ_3 (ohm.m)	46.17	51.77	45.54	49.21	61.31
RMSE (%)	0.66	0.53	0.71	0.86	5.86



Şekil 4. Gürültüsüz yapay veri ve GRNN sonucu 1 yayılma değeri ile kestirilen parametrelerle hesaplanan eğri. (RMSE = %0.53)

Üç tabakalı yer modeli için üretilen gürültüsüz veri ve GRNN ile ters çözüm sonuçları Şekil 4'te verilmiştir. Model parametreleri 3 tabakanın öz direnç değerleri ve yeryüzüne yakın olan ilk 2

tabakanın kalınlıklarıdır. Tabakaların özdirençleri sırasıyla, 99.32, 9.64 ve 51.77 olarak kestirilmiştir. İlk tabakanın kalınlığı 5.14 iken ikinci tabakanın kalınlığı 15.19 olarak kestirilmiştir. Kök ortalama kare hatası 0.53'dür.

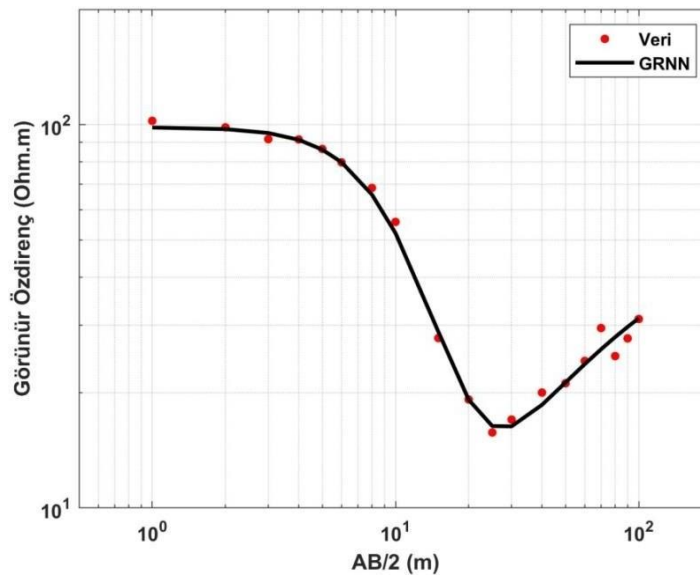
B. GÜRÜLTÜLÜ VERİ

Burada üç tabakalı yeraltı modeli için üretilen gürültüsüz veriye %5 oranında gürültü eklenmiştir. Gürültü içeren veri için test edilen farklı yayılma değerleri ile elde edilen sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir. Kök ortalama kare hatasının en düşük olduğu sonucun yayılma değeri 1 değeridir.

Tablo 3. %5 Gürültülü verinin test edildiği farklı yayılma değerleri ile elde edilen sonuçlar

Parametre	0.1 (σ)	1 (σ)	5 (σ)	10 (σ)	50 (σ)
ρ_1 (ohm.m)	95.64	98.44	99.26	97.49	98.71
t_1 (m)	5.11	5.10	5.09	5.61	5.50
ρ_2 (ohm.m)	12.62	9.50	9.88	9.24	13.35
t_2 (m)	18.95	15.70	18.05	14.06	15.19
ρ_3 (ohm.m)	57.58	51.70	73.16	61.92	61.85
RMSE (%)	3.74	2.04	3.43	4.09	6.86

Gürültülü veri ve GRNN ile ters çözüm sonuçları Şekil 5'te verilmiştir. Model parametreleri 3 tabakanın özdirenç değerleri ve yeryüzüne yakın olan 2 tabakanın kalınlıklarıdır. Tabakaların özdirençleri sırasıyla, 98.44, 9.50 ve 51.70 olarak kestirilmiştir. İlk tabakanın kalınlığı 5.10 iken ikinci tabakanın kalınlığı 15.70 olarak kestirilmiştir. Kök ortalama kare hatası 2.04'tür.



Şekil 5. %5 Gürültülü yapay veri ve GRNN sonucu 1 yayılma değeri ile kestirilen parametrelerle hesaplanan eğri. (RMSE = %2.04)

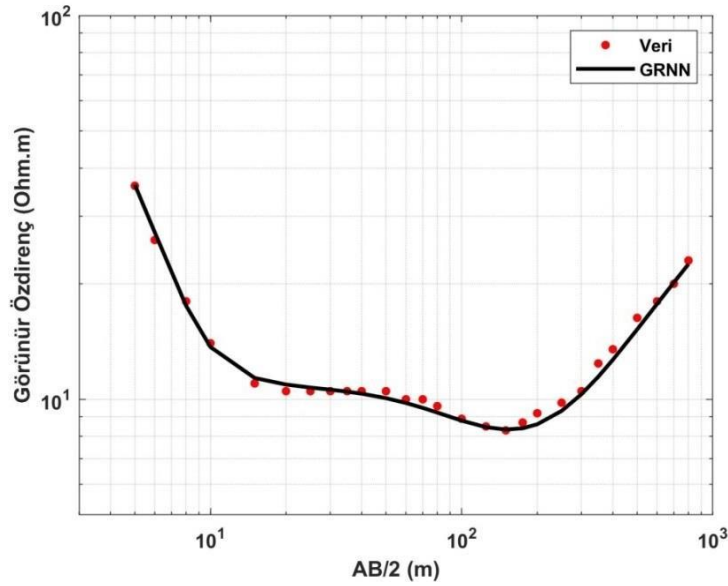
C. ARAZİ VERİSİ

GRNN ile ters çözümü yapılan arazi verisi Pekşen ve diğerleri [48] tarafından alınan T-8 konumundaki DES verisidir. Arazi verisi için test edilen farklı yayılma değerleri ile elde edilen sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir. Kök ortalama kare hatasının en düşük olduğu sonucun yayılma değeri yapay verilerde olduğu gibi arazi verisi için de 1 değeridir.

Tablo 4. Arazi verisinin test edildiği farklı yayılma değerleri ile elde edilen sonuçlar

Parametre	0.1 (σ)	1 (σ)	5 (σ)	10 (σ)	50 (σ)
ρ_1 (ohm.m)	91.03	91.55	69.63	63.26	60.04
t_1 (m)	2.06	2.01	2.33	2.48	4.12
ρ_2 (ohm.m)	10.26	10.62	10.54	10.50	10.49
t_2 (m)	90.10	41.23	54.45	61.43	55.64
ρ_3 (ohm.m)	2.42	6.74	5.29	5.30	4.48
t_3 (m)	54.27	171.81	119.47	116.80	109.78
ρ_4 (ohm.m)	176.24	109.77	119.60	108.85	105.60
RMSE (%)	0.68	0.50	0.74	0.87	6.36

Arazi verisi ve GRNN ile ters çözüm sonuçları Şekil 6'da verilmiştir. Eğri üzerinde 4 tabakalı bir çözüm üzerinde çalışılmıştır. Tabakaların özdirençleri sırasıyla, 91.55, 10.62, 6.74 ve 109.77 olarak kestirilmiştir. Tabakaların kalınlıkları ise sırasıyla, 2.01, 41.23 ve 171.81 olarak kestirilmiştir. Kök ortalama kare hatası 0.50'dir.



Şekil 6. Arazi verisi ve GRNN sonucu 1 yayılma değeri ile kestirilen parametrelerle hesaplanan eğri. (RMSE = %0.50)

V. SONUÇLAR

Bu çalışmada DES verilerinin yorumlanması için yapılan ters çözüm işleminde, yeraltı tabakalarının parametrelerin belirlenmesi için GRNN yöntemi kullanılmıştır. GRNN yöntemini uygularken yerel optimizasyon yöntemlerinde olduğu gibi iyi bir başlangıç modeline ihtiyaç duyulmamıştır. Ayrıca, hem yerel optimizasyon yöntemlerinde hem de eğitim aşamasında yerel optimizasyon yöntemlerini kullanan sinir ağlarında olduğu gibi yinelemeli bir süreç gerekmemiştir. Yöntem 3 tabakalı yapay veriler üzerinde test edilmiştir. Ayrıca yöntem DES arazi verisinin ters çözümü için de uygulanmıştır. Arazi verisi 4 tabakalı olarak değerlendirilmiştir ancak GRNN yöntemiyle farklı DES verileri için farklı sayıda tabaka parametrelerini kestirmek de mümkündür. GRNN çıktısı yapay verilerde 3 tabakalı model için 3 özdirenç ve 2 tabaka kalınlığı olmak üzere 5 parametredir. Arazi verisinde ise 4 tabakalı bir model için 4 özdirenç ve 3 tabaka kalınlığı olmak üzere 7 parametredir. Test çalışmalarında ortaya çıkan parametre kestirim sonuçları gerçek model parametrelerine oldukça yakındır. Nitekim hata oranları gürültüsüz veri için %0.53, gürültülü veri için %2.04 ve arazi verisi için %0.5 olmak üzere çok düşüktür. Hata oranlarının düşük olması ve grafikler üzerindeki gözlenen veri ile hesaplanan veri arasındaki uyumun açıkça görülmesi GRNN yönteminin DES verileri üzerinde başarılı olduğunu göstermektedir. Ayrıca GRNN yönteminde farklı yayılım değerleri için testler yapılarak optimum yayılım değerini veren en küçük hata oranı belirlenmiştir. Bulgularımıza göre GRNN yöntemi DES verilerinin ters çözümü için hızlı ve performansı yüksek olan bir yöntemdir.

VI. KAYNAKLAR

- [1] O. Koefoed, *Geosounding principles, 1. Resistivity sounding measurements*, 1st ed., Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 1979.
- [2] W.K. Kosinski and E.K. William, "Goelectric soundings for predicting aquifer properties." *Groundwater*, vol. 19, no. 2, pp. 163-171, 1981.
- [3] A.A. Zohdy, "A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves." *Geophysics* vol. 54, no. 2, pp. 245-253, 1989.
- [4] S. Maiti, G. Gupta, V.C. Erram and R.K. Tiwari, "Inversion of Schlumberger resistivity sounding data from the critically dynamic Koyna region using the Hybrid Monte Carlo-based neural network approach." *Nonlinear Processes in Geophysics*, vol. 18, no. 2, pp. 179-192, 2011.
- [5] C.L. Pekeris, "Direct method of interpretation in resistivity prospecting." *Geophysics*, vol. 5, no. 1, pp. 31-42, 1940.
- [6] S.M. Argilo, "Two computer programs for the calculation of standard graphs for resistivity prospection." *Geophysical Prospecting*, vol. 15, pp. 71-91, 1967.
- [7] G. Kunetz and J.P. Rocroi. "Traitement Automatique des Sondages Electriques Automatic Processing of Electrical Soundings." *Geophysical Prospecting*, vol. 18, no. 2, pp. 157-198, 1970.
- [8] D.P. Ghosh, "The application of linear filter theory to the direct interpretation of geoelectrical resistivity sounding measurements." *Geophysical Prospecting*, vol. 19, no. 2, pp. 192-217, 1971.
- [9] J. R. Inman, "Resistivity inversion with ridge regression." *Geophysics*, vol. 40, no. 5, pp. 798-817, 1975.
- [10] H.K. Johansen, "A man/computer interpretation system for resistivity soundings over a horizontally stratified earth." *Geophysical Prospecting*, vol. 25, no.4, pp 667-691, 1977.

- [11] E. Szaraniec, "Direct resistivity interpretation by accumulation of layers." *Geophysical Prospecting*, vol. 28, no. 2, pp. 257-268, 1980.
- [12] J. Chyba, "On the interpretation of resistivity soundings by the least-squares method." *Geophysical Prospecting*, vol. 31, no. 5, pp. 795-799, 1983.
- [13] M.A. Meju, "An effective ridge regression procedure for resistivity data inversion." *Computers & Geosciences*, vol. 18, no. 2-3, pp. 99-118, 1992.
- [14] Y. Meheni, R. Guérin, Y. Benderitter and A. Tabbagh, "Subsurface DC resistivity mapping: approximate 1-D interpretation." *Journal of Applied Geophysics*, vol. 34, no. 4, pp. 255-269, 1996.
- [15] B.B. Bhattacharya and M.K. Sen, "Use of VFSA for resolution, sensitivity and uncertainty analysis in 1D DC resistivity and IP inversion." *Geophysical Prospecting*, vol. 51, no. 5, pp. 393-408, 2003.
- [16] M.K. Jha, S. Kumar and A. Chowdhury, "Vertical electrical sounding survey and resistivity inversion using genetic algorithm optimization technique." *Journal of Hydrology*, vol. 359, no. 1-2, pp. 71-87, 2008.
- [17] J.L.F. Martínez, E.G. Gonzalo, J.P.F. Álvarez, H.A. Kuzma and C.O.M. Pérez, "PSO: A powerful algorithm to solve geophysical inverse problems: Application to a 1D-DC resistivity case." *Journal of Applied Geophysics*, vol. 71, no. 1, pp. 13-25, 2010.
- [18] W.A. Sandham and D.J. Hamilton, "Inverse theory, artificial neural networks." in Gupta H.K. (eds) *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, 2021, pp. 796-807.
- [19] H.M. El-Kaliouby, M.M. Poulton and E.A. El Diwany, "Inversion of coincident loop TEM data for layered polarizable ground using neural networks." *In SEG Technical Program Expanded Abstracts*, Society of Exploration Geophysicists, 1999, pp. 259-262.
- [20] C. Calderón-Macías, M.K. Sen and P.L. Stoffa, "Artificial neural networks for parameter estimation in geophysics." *Geophysical Prospecting*, vol. 48, no. 1, pp. 21-47, 2000.
- [21] V. Spichak and I. Popova, "Artificial neural network inversion of magnetotelluric data in terms of three-dimensional earth macroparameters." *Geophysical Journal International*, vol. 142, no.1, pp. 15-26, 2000.
- [22] M. Van der Baan and C. Jutten, "Neural networks in geophysical applications." *Geophysics*, vol. 65, no. 4, pp. 1032-1047, 2000.
- [23] M.M. Poulton, *Computational neural networks for geophysical data processing*. 1st ed., vol. 30, USA, Elsevier, 2001.
- [24] M.M. Poulton, "Neural networks as an intelligence amplification tool: A review of applications." *Geophysics*, vol. 67, no. 3, pp. 979-993, 2002.
- [25] L. Zhang, M.M. Poulton and T. Wang, "Borehole electrical resistivity modeling using neural networks." *Geophysics*, vol. 67, no. 6, pp. 1790-1797, 2002.
- [26] D.J. Bescoby, G.C. Cawley and P.N. Chroston, "Enhanced interpretation of magnetic survey data from archaeological sites using artificial neural networks." *Geophysics*, vol. 71, no. 5, pp. 45-53, 2006.

- [27] M.A. Al-Garni, "Interpretation of some magnetic bodies using neural networks inversion." *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 2, no. 2, pp. 175-184, 2009.
- [28] H.M. El-Kaliouby and M.A Al-Garni, "Inversion of self-potential anomalies caused by 2D inclined sheets using neural networks." *Journal of Geophysics and Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 29-34, 2009.
- [29] G. El-Qady and K. Ushijima, "Inversion of DC resistivity data using neural networks." *Geophysical Prospecting*, vol. 49, no. 4, pp. 417-430, 2001.
- [30] Y. Srinivas, A.S Raj, D.H. Oliver, D. Muthuraj and N. Chandrasekar, "A robust behavior of Feed Forward Back propagation algorithm of Artificial Neural Networks in the application of vertical electrical sounding data inversion." *Geoscience Frontiers*, vol. 3, no. 5, pp. 729-736, 2012.
- [31] S. Maiti, V.C. Erram, G. Gupta and R.K. Tiwari, "ANN based inversion of DC resistivity data for groundwater exploration in hard rock terrain of western Maharashtra (India)." *Journal of Hydrology*, vol. 464, pp. 294-308, 2012.
- [32] S. Maiti, G. Gupta, V.C. Erram and R.K. Tiwari, "Delineation of shallow resistivity structure around Malvan, Konkan region, Maharashtra by neural network inversion using vertical electrical sounding measurements." *Environmental Earth Sciences*, vol. 68 no. 3, pp. 779-794, 2013.
- [33] A.S. Raj, Y. Srinivas, D.H. Oliver and D. Muthuraj, "A novel and generalized approach in the inversion of geoelectrical resistivity data using Artificial Neural Networks (ANN)." *Journal of Earth System Science*, vol. 123, no. 2, pp. 395-411, 2014.
- [34] D.F. Specht, "Probabilistic neural networks." *Neural networks*, vol. 3, no. 1, pp. 109-118 1990.
- [35] D.F. Specht, "A general regression neural network." *IEEE transactions on neural networks*, vol. 2, no. 6, pp. 568-576, 1991.
- [36] J. Ferahtia, K. Baddari, N. Djarfour and A.K. Kassouri, "Incorporation of a non-linear image filtering technique for noise reduction in seismic data." *Pure and Applied Geophysics*, vol. 167, no. 11, pp. 1389-1404, 2010.
- [37] N. Djarfour, J. Ferahtia, F. Babaia, K. Baddari, E.A. Said and M. Farfour, "Seismic noise filtering based on generalized regression neural networks." *Computers & Geosciences*, vol. 69, pp. 1-9, 2014.
- [38] A.A. Konate, H. Pan, N. Khan and J.H. Yang, "Generalized regression and feed-forward back propagation neural networks in modelling porosity from geophysical well logs." *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, vol. 5, no. 2, pp. 157-166, 2015.
- [39] J. Wiszniowski, "Applying the general regression neural network to ground motion prediction equations of induced events in the Legnica-Głogów copper district in Poland." *Acta Geophysica*, vol. 64, no. 6, pp. 2430-2448, 2016.
- [40] K. Ji, Y. Ren, R. Wen, C. Zhu, Y. Liu and B. Zhou, "HVSr-based Site Classification Approach Using General Regression Neural Network (GRNN): Case Study for China Strong Motion Stations." *Journal of Earthquake Engineering*, pp. 1-23, 2021.
- [41] A.A. Garrouch, "Predicting the cation exchange capacity of reservoir rocks from complex dielectric permittivity measurements." *Geophysics*, 83(1), MR1-MR14, 2018.

- [42] J. Wiszniowski, "Application of Focal Plane Directions for Estimating Ground Motion Models with General Regression Neural Networks." *Pure and Applied Geophysics*, 1-11, 2022.
- [43] F. Zhou, Z. Chen, L. Ma, H. Liu, and G. Fang, "Applying machine learning for rapid and automatic characterizations of concrete rebars based on EMI and GPR data." *In Geophysical Research Abstracts*, Vol. 21, 2019.
- [44] S. Haykin, *Neural Networks-A Comprehensive Foundation*, 3rd ed. New Jersey, USA: Pearson Education, Inc., 2009.
- [45] M.H. Beale, M.T. Hagan and H.B. Demuth, *Neural network toolbox. User's Guide*, MathWorks, 2, 77-81, 2010.
- [46] P.D. Wasserman, *Advanced methods in neural computing*. John Wiley & Sons Inc., 1993.
- [47] A.T. Başokur, *Düşey elektrik sondajı verilerinin yorumu*. JFMO Eğitim Yayınları., 2010.
- [48] E. Pekşen, T. Yas and A. Kıyak, "1-D DC resistivity modeling and interpretation in anisotropic media using particle swarm optimization." *Pure and Applied Geophysics*, vol. 171, no. 9, pp. 2371-2389, 2014.



Düzce University Journal of Science & Technology

Review Article

A Review on Vehicle To Vehicle Communication Using BlockChain

 Şükrü OKUL ^{a,*},  Fatih KELEŞ ^b,  M. Ali AYDIN ^b

^a BTE, TÜBİTAK BİLGEM, Kocaeli, TURKEY

^b Department of Computer Engineering, Istanbul University Cerrahpaşa, Istanbul, TURKEY

* Corresponding author's e-mail address: sukruokul@gmail.com

DOI: 10.29130/dubited.1117691

ABSTRACT

In this study, there are theoretical information about security in communication between block chain and vehicles. When talking about block chain, its types, features and content are mentioned. In the light of all this theoretical information, the studies made using block chain in inter-vehicle communication are examined. In addition, information about the methods used and their contents related to these studies are given. The theoretical background of this information is explained under general headings. In addition, the methods used by the studies examined are also categorized and explained together with the studies. In the study, first of all, detailed information is given about the block chain as stated. Afterwards, VANET (Vehicles Ad-hoc Network) security is mentioned. Afterwards, the studies in the literature are explained, and finally, future studies are mentioned in the conclusion section.

Keywords: Block Chain, VANET, Security

Araç Araç Haberleşmesinde Blokzincir Kullanımı Üzerine Bir İnceleme

Öz

Bu çalışmada blokzincir ve araçlar arası iletişimde güvenlik ile alakalı teorik bilgiler yer almaktadır. Blokzincirden bahsedilirken çeşitlerinden, özelliklerinden ve içeriğinden bahsedilmektedir. Tüm bu teorik bilgiler ışığında araçlar arası haberleşmede blok zincir kullanılarak yapılan çalışmalar incelenmektedir. Ek olarak incelenen bu çalışmalar ile alakalı olarak kullanılan yöntemler ve içerikleri hakkında bilgiler verilmektedir. Bu bilgilerin teorik alt yapısı genel başlıklar altında açıklanmaktadır. Ayrıca incelenen çalışmaların kullandıkları yöntemler de çalışmalarla birlikte kategorize edilerek açıklanmaktadır. Sırasıyla çalışmada öncelikle blok zincir ile ilgili belirtildiği üzere detaylı bilgi verilmektedir. Sonrasında VANET(Vehicles Ad-hoc Network) güvenliğinden bahsedilmektedir. Sonrasında literatürde geçen çalışmalar açıklanmakta ve son olarak sonuç bölümünde gelecek çalışmalardan bahsedilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Blokzincir, VANET, Güvenlik

I. INTRODUCTION

There are many studies on vehicle networks, especially recently. Communication between vehicles and the security of these communications are important issues. Blockchain, which is very up-to-date on this important issue, has also been working on it for the last few years. Blockchain is a node-to-node, decentralized, distributed and peer-to-peer technology. It keeps track of transactions made to every node or some nodes that have occurred. In other words, it is called the distribution of central trust in the internet environment by allowing a central server or a trusted authority to be removed. Blockchain technology is commonly known as the technology underlying virtual currencies such as Bitcoin and Ethereum. When the capacity of a block is full, a new block is generated immediately and new data is recorded by going through the same processes that we have explained above. In other words, the new block is added to the previous block. This situation continues in a continuous loop and an infinite chain of interconnected data blocks is formed. The hash of the previous block is one of the data it keeps in the next new block. As a result, it creates a data chain and a blockchain as seen in Figure 1 [1]. Each data has a timestamp. This data is recorded in the blocks in the system, most of the other participants in the network verify this data, and also this data is stored in blocks by end-to-end encryption [2]. Since each block can have limited data capacity, a fixed-length output of the full block, called a hash, is generated corresponding to all the data saved in the block [3]. Each block in blockchain technology consists of a body and a header. Information contained in the block header: Block version, merkle tree root hash, Timestamp, threshold information for a valid block hash, Nonce (usually a 4-byte field that increments for each calculation starting with 0), and Hash field in previous block Corresponding to previous block An incoming 256-bit hash value is kept in the chain [4]. Blockchain has significant advantages and disadvantages. If we look at the advantages of the blockchain; all data is stored as a copy on all stakeholders involved in the blockchain. In this way, both erroneous data and data loss are prevented. In this way, it becomes a structure that can work without a central authority. In addition, thanks to digital signing or verification processes, trust can be provided without intermediaries. Because all stakeholders can see both their own transaction status and the details of all transactions. In addition, the information contained in the blockchain cannot be changed or deleted [5].

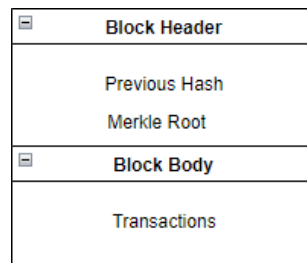


Figure 1. General Block Data Structure

It is important which type of blockchain will be used with the blockchain. Blockchain is of three types when considering access methods. These are Public, Private and Consortium blockchain. Public Blockchain network, anyone can join the network. This system is considered to be a completely independent and central authority-free blockchain system. Private Blockchain system, only authorized users can join the network. Engagement in consensus within the network can be defined publicly or in a permissioned form. If those who are authorized in the private blockchain system and who settle in the system enter the consensus structure without permission, these systems are called partially permission-requiring systems. In these networks, a central authority has the authority to change the rules and reverse transactions based on need. It is used to set up special systems, reduce costs and increase efficiencies. Consortium blockchain networks are considered a mix of public and private blockchain networks. It is a system that the node can pre-select by the authorized person or institution. The data in this blockchain can be public or private. The ability to read and write on a consortium blockchain can be extended to a certain number of nodes. This situation can be used by institutions or organizations that come together and cooperate with each other to develop different models [6,7].

The advantages of the blockchain are provided by its components and digital signature. These components defined as Blockchain, Ledger, Peer Network, Membership Services, Smart Contract, Wallet and Events. If we define the ledger, it is a decentralized and immutable collection of records that stores all transactions of the Blockchain. Depending on the type of blockchain, this ledger is available to all or some members. Peer Network, on the other hand, provides operations such as keeping the ledger and updating it. A copy of the ledger resides on all or some of the nodes in the used blockchain's network. This situation varies according to the type of blockchain used. With each data added to the ledger, in other words, with every ledger update, the nodes that hold the ledger in the network of the blockchain used make an agreement between them. Thanks to this method used, the nodes responsible for keeping the ledger in the used blockchain network can keep a copy of the relevant ledger without a central authority. Membership Services is an authority that all members or some members have, depending on the type of chain. That is, membership services are used by the authorized nodes in the blockchain to verify and authorize blocks. The concept of Smart Contract, on the other hand, can be characterized as a program or script that can be run on the blockchain. Initially, blockchains have limited configurations, so they are designed to record and store financial transactions in the historical ledger. Recently, contracts have been developed for the distributed operation of blockchains. The wallet, on the other hand, stores the identity information of the members in the chain. In Blockchain, the wallet is also used to store and track other details associated with members' accounts. The term defined as events is when the peer-to-peer network and the blockchain ledger update its state on the nodes that hold it. Smart contract notifications in blockchains are also considered events [7].

As for the digital signature side; each user has two different keys, a private key and a public key. A private key is used to sign transactions. All digitally signed transactions are accessed using public keys in a way that can be accessed by anyone in the network. The digital signature consists of two stages: signing and verification. For example, for the transaction of X that wants to sign a hash, a hash value is generated from the transaction. This hash value is then encrypted using the private key and the encrypted hash information is delivered to Y. Y decrypts the encrypted digest with the public key sent by X and generates the hash of the message. The control operation is provided by the transaction received by comparison between the hash value derived from the message of X [8-10].

The last point that we can specify as important in the use of blockchain is consensus algorithms. For the block to be added to the end of the blockchain, the majority of the miners in the network must achieve consensus. After the consensus is reached, the block is added. For this, there are some negotiation methods in the blockchain.

Proof of Work (PoW) As the name suggests, it is a labor-intensive reconciliation method to add blocks. PoW is a method used by the Bitcoin cryptocurrency. It is based on cryptographic riddles that are not easy to calculate. The node in the network trying to solve these riddles is called a miner. The first node to obtain the specified hash value has the right to add a block to the end of the blockchain. A fork occurs if more than one miner simultaneously obtains the same hash value and sends it to the network. In this case, both forks will continue to exist until a new block is produced in one of the forks. In the long fork, whichever a new block is added, miners continue their work. Due to the difficulty of mathematical solutions, it requires a lot of computer power and takes a lot of time [8-10].

Proof of Stake (PoS) PoS consensus has been introduced as an alternative to the PoW algorithm, which consumes a lot of electricity. In this settlement method, those who have a surplus of assets among the miners in the network get the right to add blocks. Therefore, he has to prove the amount of cryptocurrencies. It does not require much processing power, as it does not require solving a cryptographic puzzle like in PoW. However, since the node with the most shares can always be dominant, solutions are presented by looking at information such as the creation time of the assets to propagate the next block. Another alternative solution option is to make the nodes passive by adding a time limit to the digital currencies deposited by the nodes. After a certain period of time, the right to create a block is given and the miner is activated [8-10].

Proof of Authority (PoA) It has several important advantages over other consensus methods. It is more scalable because it has a certain number of block validators compared to PoW and PoS methods. Blocks are validated with digital IDs. So they use their own reputation instead of the amount of cryptocurrency. The time interval during which new blocks are produced can be estimated. This time varies for PoW and PoS reconciliation. It has a high transaction rate. Blocks are created in a sequence in a time interval determined by authorized network nodes. This, in turn, increases the speed of confirmation of transactions. Microsoft Azure is an example where PoA is used. It is offered as an alternative solution to private networks, so there is no need for mining [8-10].

	Public Blockchain	Consortium Blockchain	Private Blockchain
Centralism	No	Partially	Yes
Read Permission	Everyone	Partially User	Partially User
Joint Decision Making	All Nodes	Selected Nodes	One Organisation
Productivity	Low	High	High
Reconciliation Process	Unauthorized	Authorized	Authorized

Figure 2. Comparisons of Blockchain Types

Comparisons of blockchain types are shown in Figure 2. Security is at the forefront in studies on vehicle networks, also called VANET. The security elements that need to be addressed in VANET, as the reason why security is at the forefront, can be listed as Data Consistency, High Mobility, Fault Tolerance, Latency Control and Key Management. Data Integrity is the accidental or other leak of important information. Considering this situation, such structures should be designed to prevent data inconsistency. All information received from various nodes needs to be cross-checked to avoid such malicious transactions. If High Mobility is to be explained: Nodes in wired communication and nodes in inter-vehicle communication are similar in terms of energy source and information processing capabilities. However, due to their high mobility, they need to process transactions in less time by running a security protocol that is shorter than normal as execution time for similar output. In other words, time should be considered as an important factor while developing and designing security protocols. Fault Tolerance: Security protocols must be fault tolerant due to the fast ingest and response action in VANET. Latency Control: All implementations of VANET are latency sensitive. To realize these real-time applications, security algorithms need to be faster and more efficient. Key Management: Cryptographic algorithms used in VANET security depend on keys. In such a dynamic scenario, careful creation, maintenance, and distribution of keys is desirable [11-13].

VANET applications are shaped depending on the interactions between vehicles. During this interaction, mutual information is transferred. Incorrect information contained in the transmitted information may cause problems with the physical or cyber security of the transferred vehicles. Due to the nature of communication in VANET, it has a multi-hop structure. For this reason, security-related information emitted during communication can become problematic by intermediate nodes and cause traffic jams, road accidents, etc. can cause problems. VANET applications should be designed with security algorithms to ensure the protection of data in communication and the confidentiality of user identity information [14].

The attacks that occur in VANET can be classified. This classification is made taking into account the security requirements and the affected layers. To ensure security against all these identified attacks, security standards in the network must be met. The important elements that can be considered related to security can be listed like that: Authentication, Confidentiality, Availability, Non-Repudiation and Data Integrity. Depending on these security requirements, attacks can be divided into some classes as follows [15,16]:

- Authentication attacks
- Attacks on usability
- Attacks on privacy(Confidentially)
- Attacks on data integrity.

II. LITERATURE

Shrestha et al., work is being done to address the immutability security challenge. In his studies, data is obtained through VANET messages. General blockchain is used as blockchain. Mining can be produced in each of the independent elements. Proof of Work is a consensus mechanism used as consensus. To summarize, the scalability of the messages sent to communicate in VANET is seen. At the same time, a native blockchain independent of other related chains was deployed to improve the timing of related messages. This blockchain is the public blockchain. At the same time, it is used to manage and store the reliability of the communication of the nodes in the chain [17].

Chen et al., work is being done to address data tampering, information transparency, data trade security challenges. In his studies, data is obtained through VANET messages. Consortium blockchain is used as blockchain. It can be produced in mining roadside units (RSU). Proof of Work is used as a consensus [18].

Mostafa et al. work to address security challenges of data integrity, authenticity, and non-repudiation. In his studies, data is obtained through VANET messages. General blockchain is used as blockchain. Mining can be produced in each of the independent tools. Proof of Work is used as a consensus [19].

Khan et al., security and privacy, threats such as DDoS, data modification, impersonation, Sybil and replay attacks are working to address security challenges. In their studies, data is obtained from VANET data. As blockchain, public and private blockchains are used. Mining can be produced in roadside units. A distributed consensus is used as a consensus. In summary, blockchain technology is used to increase security and privacy to reduce MAC layer attacks such as DoS, Sybil and data manipulation and transfer attacks [20].

Malik et al. work to address security challenges of data privacy, integrity, non-repudiation, and mutual authentication. In their studies, their data is obtained from VANET data. Private blockchain is used as blockchain. Mining can be produced in a central authority. Proof of Authority is used as a consensus. In a nutshell, by distributed storage A smart contract-based approach is used to update and query stored and maintained nodes [21].

Li et al., work is being done to address the security challenges of usability, authenticity, and undeniability. In their studies, their data is obtained from VANET data. Private blockchain is used as blockchain. Mining can be produced in roadside units. Proof of Authority is used as a consensus. They use the merkle tree with smart contracts to achieve the "proof-of-take-advertising" feature in their vehicle network. The purpose of this is to prevent any tool from cheating or to ensure that it can transact without increasing storage costs. In addition, they can ensure the confidentiality of the vehicles with the method they propose [22].

Zheng et al. have worked to address the security challenges of integrity, non-repudiation, and scalability of data storage. In their studies, their data is obtained from VANET data. General blockchain is used as blockchain. Mining can be produced in roadside units. Proof of Work is used as a consensus [23].

Lai et al. use bulk message authentication code and one-time password technology to reduce delay and cost factors in the authentication process. Thanks to these used ones, they propose a blockchain-based group mobility management. This proposed method is defined as more efficient and safe than its counterparts [24].

Kaur et al. propose a method that includes a lightweight and considered VFC setup. The scheme they propose includes authentication and key scheme between data centers. In the method, elliptic curve cryptography is used together with blockchain. Blockchain is used here to protect information [25].

Gao et al. are trying to ensure the effective operation of VANET systems by using blockchain and SDN technologies. With shared responsibilities between the chain and SDN, the processing load is lightened. A trust-based model is proposed to prevent malicious attacks on the network used [26].

Hu et al. use blockchain technology to complement consensus with authentication. In addition to blockchain technology, a Byzantine consensus algorithm based on time series and gossip protocol is used. The technologies and algorithms used here increase the efficiency and communication security of the nodes [27].

The model proposed by Liu et al features a blockchain-based trust management model for VANETs combined with a conditional privacy-preserving announcement scheme. First, there is an anonymous mass vehicle announcement protocol designed to allow vehicles to send messages anonymously in a completely untrusted environment to ensure vehicle privacy. Secondly, it implements message synchronization and reliability with a blockchain-based trust management model. In addition, roadside units and trusted authority are also used in this model [28].

The model proposed by Singh et al includes a blockchain-based decentralized trust management scheme using smart contracts. Blockchain sharding is used to reduce the load on the original blockchain and increase transaction volume. This model has two important contributions. Its primary contribution is to maintain reliable and consistent values of trust throughout the network. The other is that it performs well compared to its peers [29].

The model proposed by Lu et al increases the credibility of messages based on the reputation of the sender, based on both direct historical interactions and indirect views about the sender [30].

Table 1: Literature Review Summary

Paper	Blockchain Type	Storage or Communication Mechanism
[19]	Consortium	RSU
[20]	Public	RSU
[21]	Public	RSU
[22]	Consortium	RSU
[23]	Consortium	RSU
[24]	Consortium	RSU
[25]	Public	RSU
[26]	Consortium	RSU
[27]	Public	RSU and Data Storage
[28]	Private	RSU and Trusted Authority
[29]	Private	Etherium
[30]	Public	RSU and Vehicles
[31]	Public	Vehicles
[32]	Private	Vehicles and Data Storage
[33]	Private	Data Storage

The blockchain-based V2I authentication (B-TSCA) scheme proposed by Wang et al enables rapid re-authentication of vehicles through secure transfer of ownership between infrastructures. Reliable scalable computing is supported by blockchain to ensure decentralization and immutability of the scalable computing result. Security analysis shows that the B-TSCA scheme is a CDH secure scheme [31].

According to the model proposed by Umoren et al., it is a system that directly connects producers with consumers to meet temporary energy demands. With the support of blockchain technology, it is developing an application to create a reliable energy trading ecosystem and remotely monitor energy trading activities between commercial entities. Experimental results show that the energy trading system is effective in finding, relating and directing consumers to consumers [32].

In their study, Xie et al. investigate the security and privacy issue in the transportation system in 5G-VANET with SDN. The proposed security framework uses blockchain technology for decentralization and immutability while designing vehicle IoT services, i.e. real-time cloud-based video report and trust management in vehicle messages [33].

As can be seen in the table 1, although the type of blockchain used varies, communication and data transfer is generally carried out over the roadside unit.

III. FUTURE WORKS

In future studies, it is foreseen that costly vehicles such as roadside units will be disabled. Roadside units dependency is costly. Because when it comes to communication between vehicles, roadside units are created within the scope of smart city studies. Depending on the length of the wireless technology used in roadside units, the number and naturally the cost of roadside units increase. If roadside units are phased out, a huge cost and dependency on wireless technologies can be avoided. Today, the fact that vehicles have an internet connection and they are described as connected cars paves the way for this situation.

In addition, if future studies will continue on blockchain technology, more efficient consensus algorithms may emerge. We also foresee that the type of blockchain used will be either a consortium or a hybrid model. Because, as can be seen in the literature review, consortium blockchain is a faster and more efficient technology in areas such as communication between vehicles with high mobility.

IV. CONCLUSION

As a result, when we look at the studies put forward, each study tries to create defense mechanisms against certain attack threats. In addition, in these studies, blockchain applications differ according to the types and contents specified under the block chain title.

When we examine the studies in the table in the literature section in detail, while blockchain is used especially in devices with high mobility, consortium blockchain is now used. The reason for this is that the public blockchain is very slow and the private blockchain behaves like a centralized structure. In private blockchain, the collection of the security element in one hand and the fact that all transactions go through a single device may cause some data not to be processed in the large systems. For this reason, consortium blockchain is preferred because it is easy to use in a distributed logic and is very fast when used with lightweight algorithms.

In addition, we are carrying out a study that will ensure a secure communication between vehicles by using light encryption algorithms without units such as roadside units. In this study, we also benefit from blockchain technology. In future studies, we will reveal the similar and different aspects of our study and the studies we examined in this study.

V. REFERENCES

- [1] T.T.A. Dinh, R. Liu, M. Zhang, G. Chen, B.C. Ooi, J. Wang, "Untangling blockchain: a data processing view of blockchain systems", *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering.*, vol. 30, no. 7, pp. 1366-1385, 2018.
- [2] Üstün, Ece Su, *TBK Kapsamında Geleneksel Sözleşmeler ile Mukayeseli Olarak Akıllık*

Sözleşmeler Blokzincir Teknolojisi, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2021, s. 21.

- [3] Bilgili, Fatih/Cengiz M. Fatih, “Bitcoin Özelinden Kripto Paralarının Eşya Niteliği Sorunu”, *Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi*, c. 23, s. 2, ss. 3-23, 2019.
- [4] V. Jindal and P. Bedi, “Vehicular ad-hoc networks: introduction, standards, routing protocols and challenges”, *International Journal of Computer Science Issues*, vol. 13, pp. 44-55, 2016.
- [5] V. Gatteschi, F. Lamberti, C. Demartini, C. Pranteda, V. Santamaria, “To Blockchain or Not to Blockchain: That Is the Question”, *IT Professional*, vol. 20, no. 2, pp. 62–74, 2018.
- [6] V. Buterin. (20.04.2022). *On Public and Private Blockchains*, *Ethereum Blog Crypto renaissance salon* [Online] Available: <https://blog.ethereum.org/2015/08/07/on-public-and-private-blockchains/>
- [7] M. Hajar, C. Soumaya, K. Lyes, “An IoT blockchain architecture using oracles and smart contracts: the use-case of a food supply chain”, in: *2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, IEEE, pp. 1–6, 2019.
- [8] M. Murat, “Blockchain ile güvenli elektronik sağlık sistemi”, Yüksek Lisans, Bilgisayar Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2018.
- [9] S. Kardas, “Blokzincir teknolojisi: Uzlaşma protokolleri”, *DÜMF Mühendislik Dergisi*, c. 10, s. 6, ss. 481–496, 2019.
- [10] D. Meijer, “Consequences of the implementation of blockchain technology”, M.S. thesis, Computer Science, Delft University of Technology, Delf, Netherlands, 2017.
- [11] M. Zhou, L. Han, H. Lu, C. Fu, “Distributed collaborative intrusion detection system for vehicular Ad Hoc networks based on invariant”, *Computer Networks*, vol. 172, pp. 107174, 2020.
- [12] O.A. Wahab, A. Mourad, H. Otok, J. Bentahar, “CEAP: SVM-based intelligent detection model for clustered vehicular ad hoc networks”, *Expert System Applications*, vol. 50, pp. 40–54, 2016.
- [13] D. Kosmanos, A. Pappas, L. Maglaras, S. Moschoyiannis, F.J. AparicioNavarro, A. Argyriou, H. Janicke, “A novel intrusion detection system against spoofing attacks in connected electric vehicles”, *Array* vol. 5, pp. 100013, 2020.
- [14] A.K. Malhi, S. Batra, H.S. Pannu, “Security of vehicular ad-hoc networks: a comprehensive survey”, *Computers & Security* vol. 89, pp. 101664, 2019.
- [15] M.R. Ghorji, K.Z. Zamli, N. Quosthoni, M. Hisyam, M. Montaser, “Vehicular adhoc network (VANET)”, in: *2018 IEEE International Conference on Innovative Research and Development (ICIRD)*, IEEE, pp. 1–6, 2018.
- [16] M. Arif, G. Wang, M.Z.A. Bhuiyan, T. Wang, J. Chen, “A survey on security attacks in vanets: communication, applications and challenges”, *Vehicular Communications* vol. 19, pp. 100179, 2019.
- [17] R. Shrestha, R. Bajracharya, A.P. Shrestha, S.Y. Nam, “A new type of blockchain for secure message exchange in VANET”, *Digital Communications and Networks*. vol. 6, no. 2, pp. 177–186, 2020.
- [18] C. Chen, J. Wu, H. Lin, W. Chen and Z. Zheng, "A Secure and Efficient Blockchain-Based Data Trading Approach for Internet of Vehicles," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 9, pp. 9110-9121, 2019.
- [19] A. Mostafa, “VANET Blockchain: A General Framework for Defecting Malicious Vehicles”, *Journal of Communications*, vol. 14, pp. 356-362, 2019.
- [20] A.S. Khan, K. Balan, Y. Javed, S. Tarmizi, J. Abdullah, “Secure trustbased blockchain architecture to prevent attacks in VANET”, *Sensors*, vol. 19, no. 22, pp. 4954, 2019.
- [21] N. Malik, P. Nanda, X. He and R. Liu, "Trust and Reputation in Vehicular Networks: A Smart Contract-Based Approach," *2019 18th IEEE International Conference On Trust, Security And Privacy*

In Computing And Communications/13th IEEE International Conference On Big Data Science And Engineering (TrustCom/BigDataSE), pp. 34-41, 2019.

[22] M. Li, J. Weng, A. Yang, J. -N. Liu and X. Lin, "Toward Blockchain-Based Fair and Anonymous Ad Dissemination in Vehicular Networks," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 11, pp. 11248-11259, 2019.

[23] D. Zheng, C. Jing, R. Guo, S. Gao and L. Wang, "A Traceable Blockchain-Based Access Authentication System With Privacy Preservation in VANETs," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 117716-117726, 2019.

[24] C. Lai and Y. Ding, "A Secure Blockchain-Based Group Mobility Management Scheme in VANETs," *2019 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*, pp 340–345, 2019.

[25] K. Kaur, S. Garg, G. Kaddoum, F. Gagnon and S. H. Ahmed, "Blockchain-Based Lightweight Authentication Mechanism for Vehicular Fog Infrastructure," *2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, pp. 1-6, 2019.

[26] J. Gao *et al.*, "A Blockchain-SDN-Enabled Internet of Vehicles Environment for Fog Computing and 5G Networks," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 5, pp. 4278-4291, 2020.

[27] W. Hu, Y. Hu, W. Yao and H. Li, "A Blockchain-Based Byzantine Consensus Algorithm for Information Authentication of the Internet of Vehicles," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 139703-139711, 2019.

[28] X. Liu, H. Huang, F. Xiao, and Z. Ma, "A Blockchain-Based Trust Management With Conditional Privacy-Preserving Announcement Scheme for VANETs," *IEEE Internet Things J.*, vol. 7, no. 5, pp. 4101– 4112, May 2020, doi: 10.1109/JIOT.2019.2957421.

[29] P. K. Singh, R. Singh, S. K. Nandi, K. Z. Ghafoor, D. B. Rawat and S. Nandi, "Blockchain-Based Adaptive Trust Management in Internet of Vehicles Using Smart Contract," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 22, no. 6, pp. 3616-3630, 2021.

[30] Z. Lu, Q. Wang, G. Qu and Z. Liu, "BARS: A Blockchain-Based Anonymous Reputation System for Trust Management in VANETs," *2018 17th IEEE International Conference On Trust, Security And Privacy In Computing And Communications/ 12th IEEE International Conference On Big Data Science And Engineering (TrustCom/BigDataSE)*, pp. 98–103, 2018.

[31] C. Wang, J. Shen, J. -F. Lai and J. Liu, "B-TSCA: Blockchain Assisted Trustworthiness Scalable Computation for V2I Authentication in VANETs," in *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, vol. 9, no. 3, pp. 1386-1396, 2020.

[32] I. A. Umoren, S. S. A. Jaffary, M. Z. Shakir, K. Katzis and H. Ahmadi, "Blockchain-Based Energy Trading in Electric-Vehicle-Enabled Microgrids," in *IEEE Consumer Electronics Magazine*, vol. 9, no. 6, pp. 66-71, 2020.


[33] L. Xie, Y. Ding, H. Yang, and X. Wang, "Blockchain-based secure and trustworthy internet of things in sdn-enabled 5g-vanets," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 56 656–56 666, 2019.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Investigation of Mechanical Properties of Ti6Al4V Alloy Foams produced by Powder Metallurgy Method

 İsmail TOPCU

*Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi, Alanya Alaaddin Keykubat
Üniversitesi, Alanya, TÜRKİYE
ismail.topcu@alanya.edu.tr
DOI: 10.29130/dubited.1062744*

ABSTRACT

In this study, it was aimed to production titanium alloy implants, which are widely used in the biomedical industry, as foamed materials under different mechanical alloying and sintering conditions using the powder metallurgy method Ti6Al4V alloy is good mechanical properties, good biocompatibility properties and good corrosion resistance used as hard tissue replacements and implants. Similar mechanic properties with bone are expected from the implant to work coherently for long cycles of use and without any failure. Especially, elastic modulus of implant must be similar with bones, if not, some damages at bone surface and fallowing repeats of implant surgeries are reported. This situation has a destructive effect on health, finance, and comfort of the patient/user of the implant. In this study, powder metallurgy and space holder removal methods were used to produce porous Ti6Al4V specimens. Throughout the project study different space holder materials and binder agents were used. As weight percent, 20%, 30%, 40%, 60%, 70%, 80% porous specimens were pressed at uniaxial press machine, and sintered to the 850 °C at argon atmosphere in furnace to reduce the oxidation to the level as low as possible. The E-Modulus values of the specimens reached the desired values with increasing porosity. It was obtained as 88 MPa in the specimen with 80% porosity, decreasing inversely proportionally, especially from the 60% porosity rate.

Keywords: *Foam, Sintering, Powder metallurgy, Ti6Al4V, Implant*

Toz metalurjisi Yöntemi ile Üretilen Ti6Al4V Alaşımlı Köpüklerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Öz

Bu çalışmada biyomedikal endüstrisinde yaygın olarak kullanılan titanyum alaşımlı implantların toz metalurjisi yöntemi kullanılarak farklı mekanik alaşımlama ve sinterleme şartlarında köpüklü malzeme olarak üretilmesi amaçlanmıştır. Ti6Al4V iyi mekanik özellikleri, biyo-uyumluluğu ve iyi korozyon direnci gibi özellikleri sebebiyle sert doku implantları olarak kullanılmaktadır. Kemik dokusu ile çalışacak implant malzemesinin mekanik özelliklerinin kemiğe benzer olması, kemik ve implantın uyumlu ve uzun döngü süreleri boyunca kullanılabilmesi için tercih edilmektedir. Bilhassa, implantın elastik modülünün kemiğin elastik modülüne yakın olmadığı takdirde, kemiğin zarar gördüğü ve ilişkili ortopedik ameliyat ve operasyonların tekrar edildiği rapor edilmiştir. Bu durum hem ekonomik olarak hem de implant kullanıcısının konforu ve sağlığı açısından yıkıcı etkilere sahip olabilmektedir. Bu çalışmada toz metalurjisi ve boşluk yaratıcı malzemelerin uçurulması prensipleri

kullanılarak poroziteli Ti6Al4V numuneleri hazırlanmıştır. Farklı uçucu malzemeler ve bağlayıcılar denenmiştir. Ağırlıkça yüzde porozite miktarları %20, %30, %40, %60, %70, %80 değerlerinde üretilen numuneler tek eksenli sıkıştırma yöntemiyle presslenerek, oksidasyonu en az değere düşürmek amacıyla argon ortamında 850 °C' ye kadar sinterlenmiştir. Numunelerin E-Modül değerleri artan porozite ile birlikte istenilen değerlere ulaşmıştır. Özellikle %60 porozite oranından itibaren ters orantılı olarak azalarak %80 poroziteye sahip numunede 88 MPa olarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Köpük, Sinterleme, Toz metalurjisi, Ti6Al4V, İmplant

I.INTRODUCTION

Titanium was first discovered as an element in 1790. The element titanium provides low density, good rigidity, and very good biocompatibility. In addition, with its good plasticity, mechanical properties and improved corrosion resistance, its usage areas are quite wide. Titanium and Ti6Al4V alloy are widely used in medicine, biomaterials, automotive, shipbuilding, architecture, aircraft construction [1,2]. It is an element that is needed in many important industries as well as in the pharmaceutical industry. As a result of recent tests on titanium and its alloys, it has been discovered that it has a very good compatibility with the human body due to the thin TiO₂ (titanium oxide) layer formed on the surface. Therefore, these materials are in high demand as biomaterials recently. They are preferred because of their high biocompatibility, very good corrosion resistance and bone-like mechanical properties [3]. In recent years, Ti and Ti6Al4V alloys have been used mostly as rigid and hard bone tissue implants. Again, due to their very good mechanical properties, they are preferred as an alternative implant material for many steel types. It is an important factor that titanium and its alloys give better results than materials used for the same purpose, especially the modulus of elasticity [1,4].

As well-known there is no perfect engineering material for any application, the major issue about hard tissue replacement is called stress shielding effect. Stress transfer of alternative materials to be used instead of bone is very important. Here, titanium alloy implants used instead of bone. It has been determined that they transfer stress close to the properties of the bone. Therefore, stress protection takes place. On the contrary, different stress conditions cause fracture of bone or implant materials in the body [5]. Products are created by Powder metallurgy using the basic process consists of arranging composition by mixing main material and additive materials, mixing them, compacting with some devices like uniaxial pressing and heat treating them [6]. Powder metallurgy has many advantages as well as great economic advantages. The production of these products is carried out using powder molding methods and devices. In addition, the process in question stands out as a manufacturing method that provides a very economical advantage with faster and less wastage in achieving the desired alloy and microstructure for production [7]. Space holder method is the method that is used for creating porous structured materials, by adding volatile materials such as carbamide. After pressing of the material these volatile materials escape from the specimen and leaves porosity behind in their location [8]. Especially in the development of materials to be used as manufacturing for the human body, hollow materials are of great importance. Hollow materials are also referred to as foamed materials in the literature. In this method, there are several steps to obtain a hollow structure. As in the powder metallurgy process: selection of the powder type to be worked on, mixing, compaction, removal of the spacer and sintering processes take place. First, metal and foaming (space-creating) powders should be selected. Then mixing is done with appropriate mechanical alloying parameters to ensure homogeneity. Here, in order for the powders to be mixed well, the mentioned parameters (Mixing time, speed, mixer quality and quantities) are very effective on the process. How well the powders are mixed depends on these parameters. Then, the mixture obtained as a result of mechanical alloying is compressed in the appropriate device under the appropriate pressure and in the appropriate mold. Depending on how and what kind of spacer is used in the mixture obtained because of mechanical alloying, the next stage is passed. This stage is defined by sintering. The spacer is removed with the determined sintering temperature, time, and atmosphere or with some solutions. and space is obtained in the structure [9,2]. Metal foams, which have been produced on account of scientific studies in recent years, have begun to be used in many areas. It is used as a filter in advanced technological processes and as a biomedical implant in the field of health, especially with

its energy absorption and temperature changing feature. Therefore, the spacer technique has begun to be used. This production method is suitable for obtaining a highly porous and open cell structure suitable for medical implants. It exhibits a bone-like structure to be used as an implant instead of the metal foams produced. In addition, by increasing the said porosity, mechanical properties can be obtained according to the desired properties [10]. Advantages of metal foams over other materials; It is to take an active role in the transfer of body fluid by connecting to the surrounding tissues through the condensation of the tissue to be used as an implant towards the cavities. transporting the body fluids in question is a very critical stage. Unsuitable metallic implants cause problems from time to time due to their mechanical properties that are not compatible with bone. Various methods are used to overcome this. By increasing the porosity of said materials, the Young's modulus is reduced. By regulating the porosity rate in foamed metals, the stress protective effect between the implant and the bone is tolerated. Therefore, the hardness value of the material is controlled to the desired rate. For the biocompatibility of Implants to be used in the human body, low density (high porosity), good corrosion resistance, good wear resistance and sufficient strength are. Among these, the most used implant materials are pure titanium and Ti6Al4V alloy [11].

The most ideal implant to be used in the human body should be very biocompatible. In other words, it is expected that the cell density, which we call negative tissue response, should not be low. It should have a low/suitable density, suitable/high mechanical properties and suitable fatigue resistance for various activators, a low modulus of elasticity and very good wear resistance, as is the density of the bone type found in the human body. It is very difficult to meet all these features with only one material. The production of implant material with this feature is very important and groundbreaking [12]. As it is known, the main disadvantage of the metals we use is that they corrode incompatible with the living tissue and do not adapt to the tissue. Many metal materials can be tolerated in the human body in small amounts, even as metallic ions. Tissue incompatibility in the human body, namely corrosion, adversely affects the implant applied to the body, resulting in the fragmentation of the implant, and adversely affecting the surrounding tissues and organs [3,13]. In addition, there is a slow growth of hydrated TiO₂, which leads to the combination of calcium and phosphorus on the surface of the Ti implant. This characteristic feature has led to speculation regarding a potential bioactive behavior. [14,15]. In particular, the formation of a TiO₂ layer on the surface of titanium and its alloys is a factor that increases the biocompatibility between the body and the implant material. (TiO₂) It is an implant with high surface energy. At the end of the implant placement operation, titanium shows a positive response with the direct adaptation of the minerals to the bone-titanium interface. This layer provides a positive body reaction leading to body and implant integration [16]. Especially Ti biomaterials are not rejected by the body and establish good physical connections with the bone. Titanium particles also have specific biological effects on white blood cells in vivo. Highly porous Ti and Ti6Al4V are preferred in the implant industry due to their excellent biocompatibility, low densities, and passive titanium oxide layer formation when in contact with oxidizing media [5,16,17]. Due to these properties, Ti6Al4V alloy is indispensable and widely preferred in implant use [17,18]. As a result, good properties of titanium and its alloys were considered in this study. In addition to these features, considering the positive effect of foam formation on implant application, titanium and its alloys were selected for biomedical applications [19,20].

II.MATERIALS AND METHODS

Titanium powders (Alfa Aesar, USA) to be used for the foams to be produced in the experimental study and space forming powder metallurgy method were produced. The chemical composition of titanium powder is by weight (99.61% Ti, 0.23% O, 0.018% N, 0.03% Fe, 0.01% Mn, 0.01% Mg, 0.009% C, 0.01% Al, 0.01% Cl, 0.01% Na and 237 ppm). H). Average particle size of the powder used particle sizes averaged 44 micrometers. Carbamide (Merck, Germany) with irregular structure and dimensions of 710-1000 µm was used as a spacer. for high density and strength polyvinyl alcohol (PVA) was used as binder (Merck, Germany). The metallic powders were mixed with 1.5% by weight PVA under mechanically determined conditions. For the implants production, to obtain human like bone structure, the production processes were meticulously applied in the literature. The Young's modulus and yield strength values of porous specimens must match those of the human bone tissue, which are stated as being in the ranges of 0.09-1.5 GPa and 40-

150 MPa, respectively, according to the example researchers [20]. Spherical Ti6Al4V alloy powders (average particle size $\sim 40 \mu\text{m}$) were used as a main component in this experiment. Polyacrylonitrile (PAN) (average particle size 100 micron) was chosen as a space holder material polyvinyl alcohol PVA and, paraffin were used as space holder for mixture respectively. Unfortunately, all of the specimens were failed and not formed as a foam. All of the types of space holder and binder mixtures are shown in the table below. The possible reasons for these failures are argued in chapter.

Table 1. Materials used in experiments

Experimental No	Main Component	Space Holder	Binder	Result
1	Ti-6Al-4V	Carbamide	PVA	Fail
2	Ti-6Al-4V	PVA	-	Fail
3	Ti-6Al-4V	PVA	Paraffin	Fail
4	Ti-6Al-4V	Carbamide	PAN	Fail
5	Ti-6Al-4V	PAN	-	Succeed

Experimental Equipments: Used equipments in this thesis work are listed below; one axial pressing machine, Tubular powder mixing device, Sintering furnace (argon atm), Density measurement device, Instron test device. The devices used during the experimental study are shown in Figure 1 (a), (b) and Figure 2 (a), (b), (c).

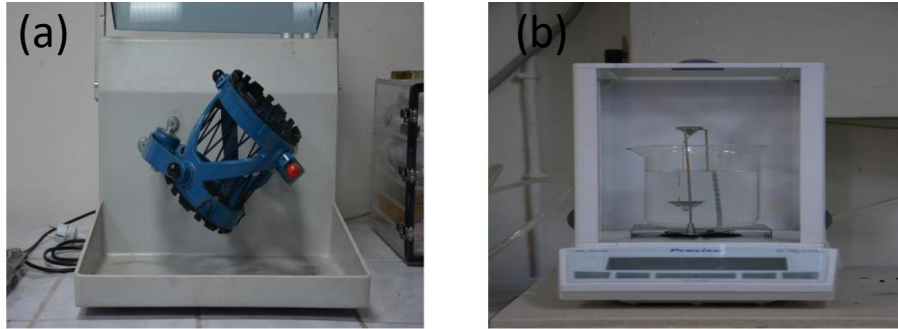


Figure 1. (a)Turbula powder mixing device and, (b) Density measurement device.

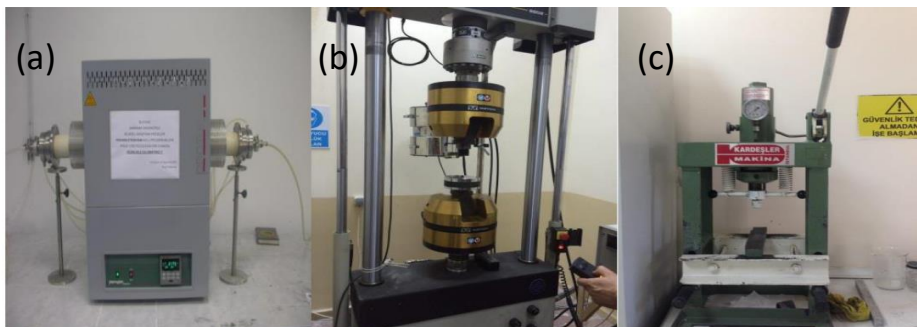


Figure 2. (a) Sintering Furnace, (b) One Axial Pressing and (c) Compression Test Device

III.EXPERIMENTAL PROCEDURE

The obtained metallic implant foam samples, Ti6Al4V alloy powders, space formers and binders were produced by mechanical alloying method and void forming method. The average particle size of the

particles used in sample production is 40 μm . As a space holder PAN (average particle size 100 micron) was used. Ti6Al4V alloy powders are weighed equal amount for each specimens and polyacrylonitrile (Pan) are weighed different proportions according to their porosity ratio for each specimens. As weight percent, 20%, 30%, 40%, 60%, 70%, 80% porous specimens were prepared and mixed. Samples obtained by mechanical alloying; It was compressed into pellets in 10 mm diameter molds under 200 bar pressure in a uniaxial press in a hydraulic molding machine. The void formers and PAN binder in the pellet samples obtained were subjected to sintering in a horizontal tube furnace. Sintering conditions: Firstly, as preheating, it was increased to 200 $^{\circ}\text{C}$ with 2 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ speed and left for 1 hour. then it was increased to 850 $^{\circ}\text{C}$ at a speed of 3 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ and sintered for 1 hour. Specimens were sintered at temperature 850 $^{\circ}\text{C}$ for 1 hour under high purity argon gas atmosphere in a horizontal tube furnace. The diameter of sintered specimens was between 10- and 8.7-mm. The powder metallurgy production method flow chart is shown in Figure 3.

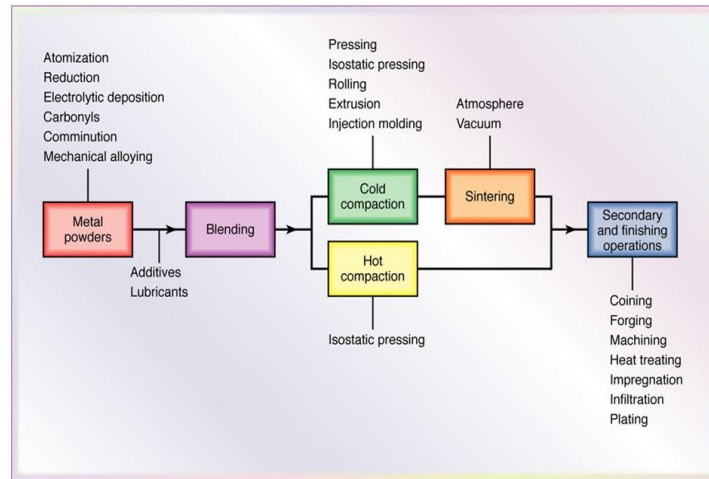


Figure 3. The powder metallurgy production method flow chart

Density and mass of sintered specimens were changed depending on the porosity level. Densities of the produced specimens were determined geometrically from the measured weight and dimensions with the aid of density measurement device. Microstructural characteristics of the sintered foams were examined in Light and Stereo Microscopes. Mechanical characterization of the samples was carried out by compression tests performed on a Instron compression testing machine. The stress strain obtained as a result of the compression test in the calculation of the mechanical properties of the samples obtained by the powder metallurgy method. Curves were used. In these curves, respectively, belong to each sample. Elasticity modular, yield strength values and deformation amounts were obtained. The said values were calculated from the data obtained from the device computer and the stress-strain curves. The sintering process diagram is shown in Figure 4.

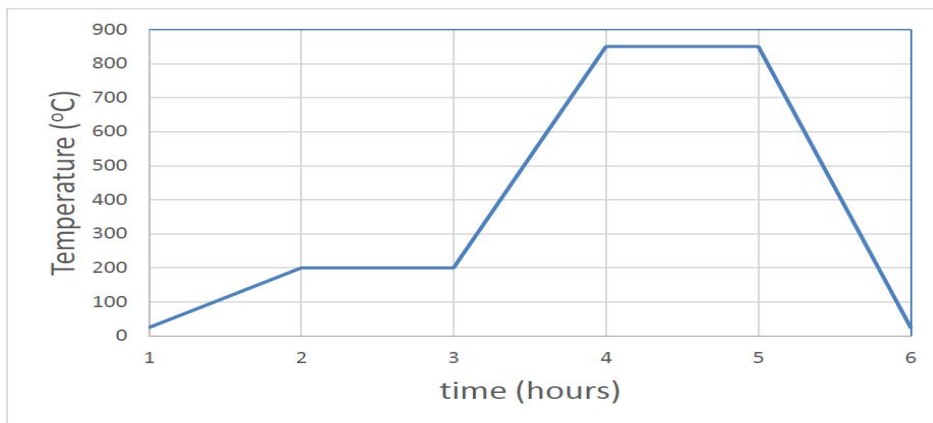


Figure 4. Sintering Temperature-Time

IV. RESULTS AND DISCUSSION

In this study, highly porous Ti6Al4V foams with porosity in the range of 20 – 80 %, were produced by powder metallurgy based on space holder technique. Figure 5 and 6 shows the photographs of the sintered Ti6Al4V foams.

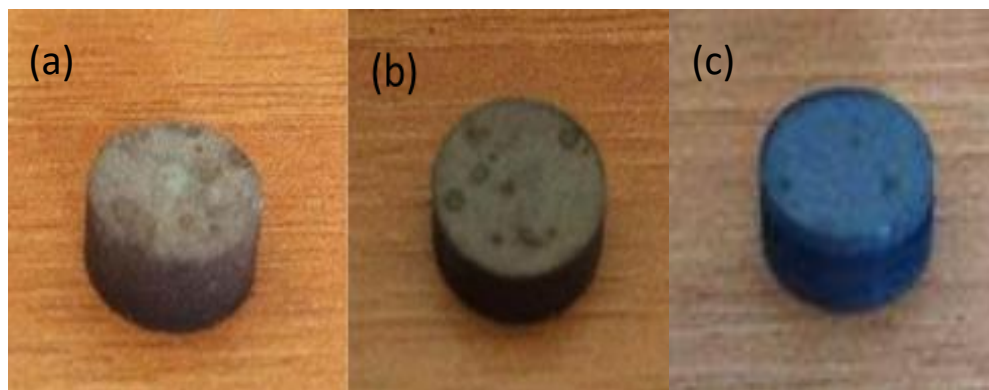


Figure 5. (a) 20%, (b)30% and (c)40% porous specimens

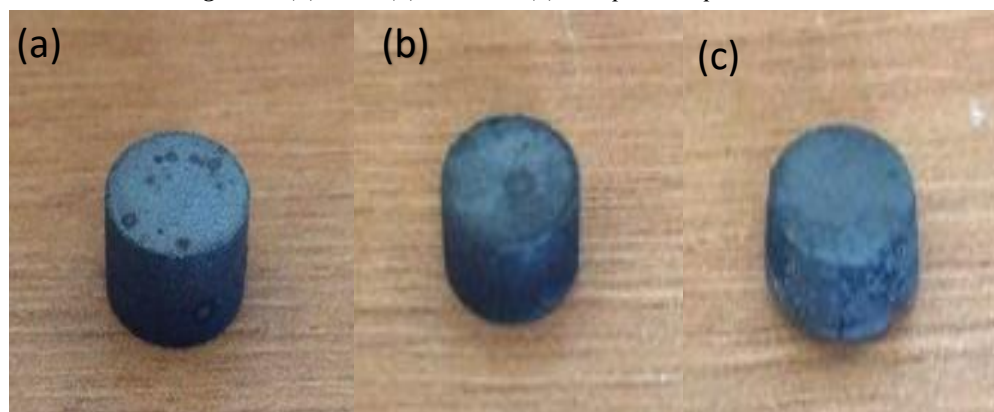


Figure 6. (a) 50%, (b) 70% and (c) 80% porous specimens

A) Results of Density and Porosity Determination

The properties of powders are given in the previous section and the average density values of samples containing different amount of PAN are listed in Table 2.

Table 2. Density of foam samples after sintering

Sample number	1	2	3	4	5	6
Porosity (%)	20	30	40	60	70	80
Diameter (mm)	10	10	10	9	8,8	8,7
Height (mm)	5,35	3,75	7,2	3,95	4,45	3,8
Soaked weight (g)	1,211	0,8	1,469	0,63	0,608	0,354
Suspended weight in	0,908	0,594	1,065	0,431	0,401	0,179
Density g/cm ³)	3,99	3,877	3,6	3,16	2,932	2,019

Table 2 shows that the densities of the samples decrease with increasing porosity percent. And also it can be seen from the Table 2, the values of % porosity, diameter and height of the sintered specimens.

B) Results of Microscopic Examination

The microstructure examination of the foamy samples obtained by powder metallurgy method was carried out with an optical microscope. Metallographic images obtained at X500 magnifications it can be seen in Figure 7.

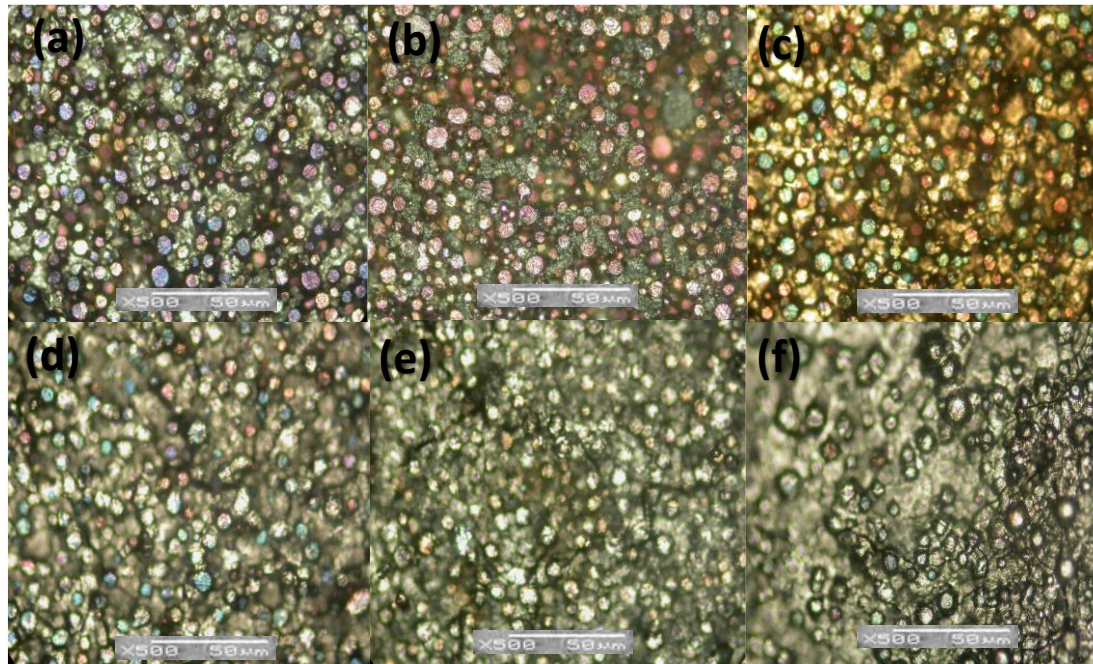


Figure 7. Ti6Al4V foam with (a) 20%, (b) 30%, (c)40%, (d) 60%, (e)70% and (f) 80% porosity (x500 Magnification)

C) Results of Compressive Testing

The data obtained from the tensile and mechanical tests (TSEN 138) performed according to the determined standards on the foamed samples obtained by the powder metallurgy method were given in Table 3.

Table 3. Elastic Modulus of specimens with different porosity percents

Sample Number	Porosity (%)	Load Failure (N)	Strain Failure (N)	Comprassion Max. (N)	Max Stress (MPa)	EModulus (MPa)
1	20	164,36	32,27	509,4	6,5	300
2	30	142,56	24,85	1168	14,8	348
3	40	285,97	22,81	935	11,9	496
4	60	1199,04	38,34	2190	36,0	554
5	70	977,93	36,83	1498	24,5	452
6	80	467,08	52,47	726	12,0	74

Compressive strength and elastic modulus results obtained as a result of tensile tests performed on foamed samples obtained by powder metallurgy method according to the determined standards. It can be seen in Figure 8 (a) and (b).

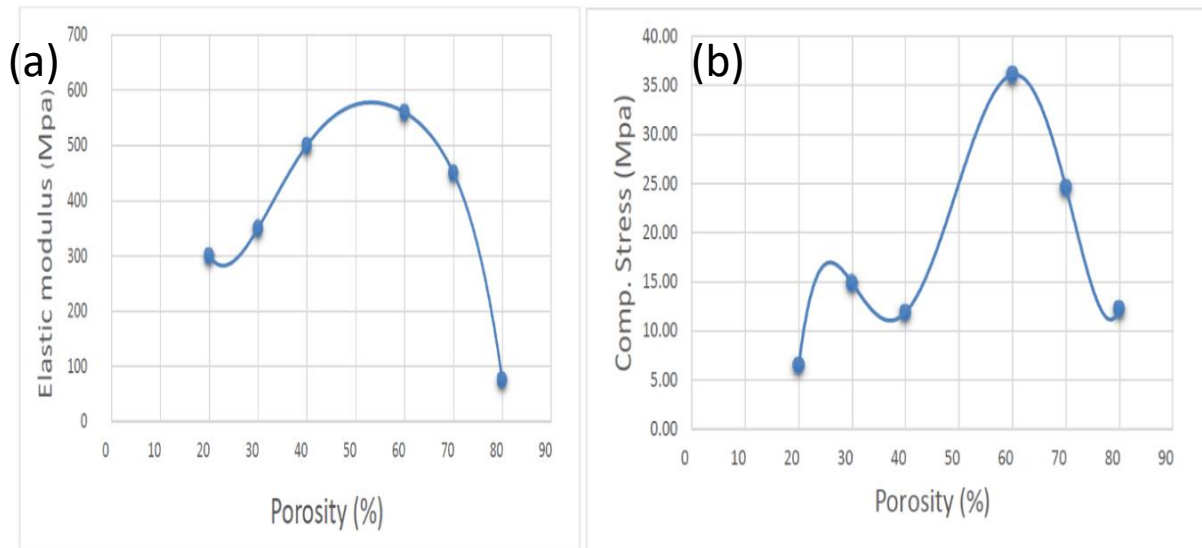


Figure 8. (a) E- Modulus with different porosity ratio and (b) Compression Stress with different porosity ratio

The findings of the compression test on the first three samples were unexpected since, in principle, the porosity ratio should increase as the modulus of elasticity decreases [18], but the first three samples demonstrate the opposite relationship. This inaccuracy is most likely the result of human error and is inconsistent with published study. Yet, the final three samples exhibit the behavior that would be predicted by a diminishing elastic modulus. As a result, the examples 4 and 5 were chosen as healthy specimens to comment on [19,20].

V. CONCLUSIONS

- ✓ There were some problems in this study. In the literature review performed again, the problems in the sample preparation phase in creating a porous structure were overcome [18].
- ✓ The differences in powder particle sizes contributed to obtaining the desired E-Module values. As a result, the elastic moduli of the 40%, 50% and 60% specimens decreased as expected as the porosity content increased.
- ✓ It can be said that the porous Ti6Al4V implant material can be made by employing powder metallurgy techniques and space holder technique to construct porous structure by using these results and the prior studies done on stress shielding problem as a reference.
- ✓ As the porosity increases, elastic moduli will be decreased and this will be closer to the bone's mechanical properties, this may eliminate some problems caused by stress shielding effect.
- ✓ In this work, healthy specimens that gives expected decrease in elastic moduli was in the range of 0,45-0,56 GPa and the known values of human bone tissue was in the range of 0,09 – 1,5 GPa. So, it can be concluded that making porous materials for implantation the stress shielding effect can be decreased or eliminated.
- ✓ In this way the negative effects of bone loosening, implant loosening, economical damage can be minimized for both the patient-user and producer of the implant.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Scientific Research Project Program of Marmara University (FEN-C-DRP- -110412-0098)

REFERENCES

- [1] A. Michael, F. Jones and R.H. David, "Engineering Materials 2" Oxford Pergamon Press. ISBN 0-08-032532-7. Pp.564.1992.
- [2] İ. Topcu and E. Karaman, "Çok Duvarlı Karbon Nanotüp Takviyeli Düzenli/ Düzensiz Şekilli Ti-6Al-4V Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c.7, s.3, ss.249-1260, 2019.
- [3] İ.Topcu and M Ceylan, "Wear behavior of irregular shape Ti6Al4V powder reinforced with carbon nanotubes", *Journal of Ceramic Processing Research*, vol.21, no.5, pp.539-546,2020.
- [4] M. R. Usal , M. Taşlıdere and M. F. Saraç, "Titanyum Karbür (TiC) Takviyeli Epoksi ile Güçlendirilmiş Hibrit Kompozitlerin Çarpma Davranışının Deneysel ve Sayısal İncelenmesi," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c.8, s.1, ss.18-32, 2020.
- [5] M. Niinomi and M. Nakai, "Titanium-Based Biomaterials for Preventing Stress Shielding between Implant Devices and Bone", *International Journal of Biomaterials*, vol. 2011, no.836587, 2011. doi. 10.1155/2011/836587
- [6] İ.Topcu, "Karbon Nanotüp Takviyeli Alüminyum Matriksli AlMg/KNT Kompozitlerinin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi", *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, sayı 4, no 1, 99-109.2018. <https://doi.org/10.28979/comufbed.359796>
- [7] İ.Mutlu, "Sinter-coating method for the production of TiN-coated titanium foam for biomedical implant applications", *Surface and Coating Technology*, vol.232, no.15, pp. 396-402, 2013. doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.05.041
- [8] İ.Topcu and M Ceylan, "Wear behavior of irregular shape Ti6Al4V powder reinforced with carbon nanotubes", *Journal of Ceramic Processing Research*, vol.21, no.5, pp.539-546,2020.
- [9] M. Ashby, A. Evans, N. Fleck, L. Gibson, J. Hutchinson and H. Wadley, "Metal Foams: A Design Guide", eBook ISBN: 9780080511467, *Elsevier Science*, Boston, MA, 2000.
- [10] K. S. Won, J. Hyun-Do, K. Min-Ho, K. Hyoun-Ee, K. Young-Hag and Y. Estrin, "Fabrication of porous titanium scaffold with controlled porous structure and net-shape using magnesium as spacer", *Materials Science and Engineering C*, vol. 33, n.5 pp. 2808–281,2013.
- [11] I. Topcu, "Determination of the mechanical properties of al/mwcnt composites obtained with the reinforcement of cu-coated multiwall carbon nanotubes (MWCNTs)", *Materiali in Tehnologije*, vol.54, n.5, pp.689-695,2020.
- [12] C. Oldani and A. Dominguez, "Titanium as a Biomaterial for Implants," ISSN. 978-953-307-990-5. pp.628, 2012. doi.10.5772/27413
- [13] İ. Topcu,B. N. Çetiner, A. N. Güllüoğlu and G. Özkan, "Investigation of Creep Behavior of CNT Reinforced Ti6Al4V Under Dynamic Loads",*J.Chem.Soc.Pak.*, vol.42, n.1, pp.70-80, 2020.


- [14] İ.Topcu, M Ceylan and E, B Yilmaz, "Experimental investigation on mechanical properties of Multi Wall Carbon Nanotubes (MWCNT) reinforced aluminium metal matrix composites", *Journal of Ceramic Processing Research*, vol.21,n.5, pp.596-601,2021.
- [15] M. Y. Zakaria, A.B. Sulong, M. I. Ramli and M. R. Raza, "Determination of Critical Powder Loading of Titanium-Hydroxyapatite with Powder Space Holder for Powder Injection Molding Feedstocks", *Journal of Mechanical Engineering*, vol. n.1, pp.11-21, 2017.
- [16] O. Bazaka, K. Bazaka, P. Kingshott, R. J. Crawford and E. P. Ivanova, "Metallic-implant biomaterials", *Materials-Science-and-Engineering-Reports.*, ch1, pp.98, 2015.
- [17] A. Mansourighasri, N. Muhamad and A. Sulong."Processing titanium foams using tapioca starch as a space holder" *Journal of Materials Processing Technology*, vol.212, n.1, pp.83-89,2012
- [18] İ.Topcu "Investigation of Wear Behavior of Particle Reinforced AL/B4C Composites under Different Sintering Conditions" *Journal of Technical Glasnic*, vol. 14, n.1, pp. 7-14,2020.
- [19] M. R. Usal, M. Taşlıdere and M. F. Saraç , "Titanyum Karbür (TiC) Takviyeli Epoksi ile Güçlendirilmiş Hibrit Kompozitlerin Çarpma Davranışının Deneysel ve Sayısal İncelenmesi," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c.8, s.1, ss.18-32, 2020. doi:10.29130/dubited.606515
- [20] İ.Topcu "Examination of wear properties of Al/B4C composites reinforced with irregularly shaped B4C" *Journal of Ceramic Processing Research* vol 22 no 3, pp. 276-282, 2021.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Investigation of Mechanical Properties of Ti6Al4V Alloy Foams produced by Powder Metallurgy Method

 İsmail TOPCU

*Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi, Alanya Alaaddin Keykubat
Üniversitesi, Alanya, TÜRKİYE
ismail.topcy@alanya.edu.tr
DOI: 10.29130/dubited.1062744*

ABSTRACT

In this study, it was aimed to production titanium alloy implants, which are widely used in the biomedical industry, as foamed materials under different mechanical alloying and sintering conditions using the powder metallurgy method Ti6Al4V alloy is good mechanical properties, good biocompatibility properties and good corrosion resistance used as hard tissue replacements and implants. Similar mechanic properties with bone are expected from the implant to work coherently for long cycles of use and without any failure. Especially, elastic modulus of implant must be similar with bones, if not, some damages at bone surface and fallowing repeats of implant surgeries are reported. This situation has a destructive effect on health, finance, and comfort of the patient/user of the implant. In this study, powder metallurgy and space holder removal methods were used to produce porous Ti6Al4V specimens. Throughout the project study different space holder materials and binder agents were used. As weight percent, 20%, 30%, 40%, 60%, 70%, 80% porous specimens were pressed at uniaxial press machine, and sintered to the 850 °C at argon atmosphere in furnace to reduce the oxidation to the level as low as possible. The E-Modulus values of the specimens reached the desired values with increasing porosity. It was obtained as 88 MPa in the specimen with 80% porosity, decreasing inversely proportionally, especially from the 60% porosity rate.

Keywords: *Foam, Sintering, Powder metallurgy, Ti6Al4V, Implant*

Toz metalurjisi Yöntemi ile Üretilen Ti6Al4V Alaşımlı Köpüklerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Öz

Bu çalışmada biyomedikal endüstrisinde yaygın olarak kullanılan titanyum alaşımlı implantların toz metalurjisi yöntemi kullanılarak farklı mekanik alaşımlama ve sinterleme şartlarında köpüklü malzeme olarak üretilmesi amaçlanmıştır. Ti6Al4V iyi mekanik özellikleri, biyo-uyumluluğu ve iyi korozyon direnci gibi özellikleri sebebiyle sert doku implantları olarak kullanılmaktadır. Kemik dokusu ile çalışacak implant malzemesinin mekanik özelliklerinin kemiğe benzer olması, kemik ve implantın uyumlu ve uzun döngü süreleri boyunca kullanılabilmesi için tercih edilmektedir. Bilhassa, implantın elastik modülünün kemiğin elastik modülüne yakın olmadığı takdirde, kemiğin zarar gördüğü ve ilişkili ortopedik ameliyat ve operasyonların tekrar edildiği rapor edilmiştir. Bu durum hem ekonomik olarak hem de implant kullanıcısının konforu ve sağlığı açısından yıkıcı etkilere sahip olabilmektedir. Bu çalışmada toz metalurjisi ve boşluk yaratıcı malzemelerin uçurulması prensipleri

kullanılarak poroziteli Ti6Al4V numuneleri hazırlanmıştır. Farklı uçucu malzemeler ve bağlayıcılar denenmiştir. Ağırlıkça yüzde porozite miktarları %20, %30, %40, %60, %70, %80 değerlerinde üretilen numuneler tek eksenli sıkıştırma yöntemiyle presslenerek, oksidasyonu en az değere düşürmek amacıyla argon ortamında 850 °C' ye kadar sinterlenmiştir. Numunelerin E-Modül değerleri artan porozite ile birlikte istenilen değerlere ulaşmıştır. Özellikle %60 porozite oranından itibaren ters orantılı olarak azalarak %80 poroziteye sahip numunede 88 MPa olarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Köpük, Sinterleme, Toz metalurjisi, Ti6Al4V, İmplant

I.INTRODUCTION

Titanium was first discovered as an element in 1790. The element titanium provides low density, good rigidity, and very good biocompatibility. In addition, with its good plasticity, mechanical properties and improved corrosion resistance, its usage areas are quite wide. Titanium and Ti6Al4V alloy are widely used in medicine, biomaterials, automotive, shipbuilding, architecture, aircraft construction [1,2]. It is an element that is needed in many important industries as well as in the pharmaceutical industry. As a result of recent tests on titanium and its alloys, it has been discovered that it has a very good compatibility with the human body due to the thin TiO₂ (titanium oxide) layer formed on the surface. Therefore, these materials are in high demand as biomaterials recently. They are preferred because of their high biocompatibility, very good corrosion resistance and bone-like mechanical properties [3]. In recent years, Ti and Ti6Al4V alloys have been used mostly as rigid and hard bone tissue implants. Again, due to their very good mechanical properties, they are preferred as an alternative implant material for many steel types. It is an important factor that titanium and its alloys give better results than materials used for the same purpose, especially the modulus of elasticity [1,4].

As well-known there is no perfect engineering material for any application, the major issue about hard tissue replacement is called stress shielding effect. Stress transfer of alternative materials to be used instead of bone is very important. Here, titanium alloy implants used instead of bone. It has been determined that they transfer stress close to the properties of the bone. Therefore, stress protection takes place. On the contrary, different stress conditions cause fracture of bone or implant materials in the body [5]. Products are created by Powder metallurgy using the basic process consists of arranging composition by mixing main material and additive materials, mixing them, compacting with some devices like uniaxial pressing and heat treating them [6]. Powder metallurgy has many advantages as well as great economic advantages. The production of these products is carried out using powder molding methods and devices. In addition, the process in question stands out as a manufacturing method that provides a very economical advantage with faster and less wastage in achieving the desired alloy and microstructure for production [7]. Space holder method is the method that is used for creating porous structured materials, by adding volatile materials such as carbamide. After pressing of the material these volatile materials escape from the specimen and leaves porosity behind in their location [8]. Especially in the development of materials to be used as manufacturing for the human body, hollow materials are of great importance. Hollow materials are also referred to as foamed materials in the literature. In this method, there are several steps to obtain a hollow structure. As in the powder metallurgy process: selection of the powder type to be worked on, mixing, compaction, removal of the spacer and sintering processes take place. First, metal and foaming (space-creating) powders should be selected. Then mixing is done with appropriate mechanical alloying parameters to ensure homogeneity. Here, in order for the powders to be mixed well, the mentioned parameters (Mixing time, speed, mixer quality and quantities) are very effective on the process. How well the powders are mixed depends on these parameters. Then, the mixture obtained as a result of mechanical alloying is compressed in the appropriate device under the appropriate pressure and in the appropriate mold. Depending on how and what kind of spacer is used in the mixture obtained because of mechanical alloying, the next stage is passed. This stage is defined by sintering. The spacer is removed with the determined sintering temperature, time, and atmosphere or with some solutions. and space is obtained in the structure [9,2]. Metal foams, which have been produced on account of scientific studies in recent years, have begun to be used in many areas. It is used as a filter in advanced technological processes and as a biomedical implant in the field of health, especially with

its energy absorption and temperature changing feature. Therefore, the spacer technique has begun to be used. This production method is suitable for obtaining a highly porous and open cell structure suitable for medical implants. It exhibits a bone-like structure to be used as an implant instead of the metal foams produced. In addition, by increasing the said porosity, mechanical properties can be obtained according to the desired properties [10]. Advantages of metal foams over other materials; It is to take an active role in the transfer of body fluid by connecting to the surrounding tissues through the condensation of the tissue to be used as an implant towards the cavities. transporting the body fluids in question is a very critical stage. Unsuitable metallic implants cause problems from time to time due to their mechanical properties that are not compatible with bone. Various methods are used to overcome this. By increasing the porosity of said materials, the Young's modulus is reduced. By regulating the porosity rate in foamed metals, the stress protective effect between the implant and the bone is tolerated. Therefore, the hardness value of the material is controlled to the desired rate. For the biocompatibility of Implants to be used in the human body, low density (high porosity), good corrosion resistance, good wear resistance and sufficient strength are. Among these, the most used implant materials are pure titanium and Ti6Al4V alloy [11].

The most ideal implant to be used in the human body should be very biocompatible. In other words, it is expected that the cell density, which we call negative tissue response, should not be low. It should have a low/suitable density, suitable/high mechanical properties and suitable fatigue resistance for various activators, a low modulus of elasticity and very good wear resistance, as is the density of the bone type found in the human body. It is very difficult to meet all these features with only one material. The production of implant material with this feature is very important and groundbreaking [12]. As it is known, the main disadvantage of the metals we use is that they corrode incompatible with the living tissue and do not adapt to the tissue. Many metal materials can be tolerated in the human body in small amounts, even as metallic ions. Tissue incompatibility in the human body, namely corrosion, adversely affects the implant applied to the body, resulting in the fragmentation of the implant, and adversely affecting the surrounding tissues and organs [3,13]. In addition, there is a slow growth of hydrated TiO₂, which leads to the combination of calcium and phosphorus on the surface of the Ti implant. This characteristic feature has led to speculation regarding a potential bioactive behavior. [14,15]. In particular, the formation of a TiO₂ layer on the surface of titanium and its alloys is a factor that increases the biocompatibility between the body and the implant material. (TiO₂) It is an implant with high surface energy. At the end of the implant placement operation, titanium shows a positive response with the direct adaptation of the minerals to the bone-titanium interface. This layer provides a positive body reaction leading to body and implant integration [16]. Especially Ti biomaterials are not rejected by the body and establish good physical connections with the bone. Titanium particles also have specific biological effects on white blood cells in vivo. Highly porous Ti and Ti6Al4V are preferred in the implant industry due to their excellent biocompatibility, low densities, and passive titanium oxide layer formation when in contact with oxidizing media [5,16,17]. Due to these properties, Ti6Al4V alloy is indispensable and widely preferred in implant use [17,18]. As a result, good properties of titanium and its alloys were considered in this study. In addition to these features, considering the positive effect of foam formation on implant application, titanium and its alloys were selected for biomedical applications [19,20].

II.MATERIALS AND METHODS

Titanium powders (Alfa Aesar, USA) to be used for the foams to be produced in the experimental study and space forming powder metallurgy method were produced. The chemical composition of titanium powder is by weight (99.61% Ti, 0.23% O, 0.018% N, 0.03% Fe, 0.01% Mn, 0.01% Mg, 0.009% C, 0.01% Al, 0.01% Cl, 0.01% Na and 237 ppm). H). Average particle size of the powder used particle sizes averaged 44 micrometers. Carbamide (Merck, Germany) with irregular structure and dimensions of 710-1000 µm was used as a spacer. for high density and strength polyvinyl alcohol (PVA) was used as binder (Merck, Germany). The metallic powders were mixed with 1.5% by weight PVA under mechanically determined conditions. For the implants production, to obtain human like bone structure, the production processes were meticulously applied in the literature. The Young's modulus and yield strength values of porous specimens must match those of the human bone tissue, which are stated as being in the ranges of 0.09-1.5 GPa and 40-

150 MPa, respectively, according to the example researchers [20]. Spherical Ti6Al4V alloy powders (average particle size $\sim 40 \mu\text{m}$) were used as a main component in this experiment. Polyacrylonitrile (PAN) (average particle size 100 micron) was chosen as a space holder material polyvinyl alcohol PVA and, paraffin were used as space holder for mixture respectively. Unfortunately, all of the specimens were failed and not formed as a foam. All of the types of space holder and binder mixtures are shown in the table below. The possible reasons for these failures are argued in chapter.

Table 1. Materials used in experiments

Experimental No	Main Component	Space Holder	Binder	Result
1	Ti-6Al-4V	Carbamide	PVA	Fail
2	Ti-6Al-4V	PVA	-	Fail
3	Ti-6Al-4V	PVA	Paraffin	Fail
4	Ti-6Al-4V	Carbamide	PAN	Fail
5	Ti-6Al-4V	PAN	-	Succeed

Experimental Equipments: Used equipments in this thesis work are listed below; one axial pressing machine, Tubular powder mixing device, Sintering furnace (argon atm), Density measurement device, Instron test device. The devices used during the experimental study are shown in Figure 1 (a), (b) and Figure 2 (a), (b), (c).

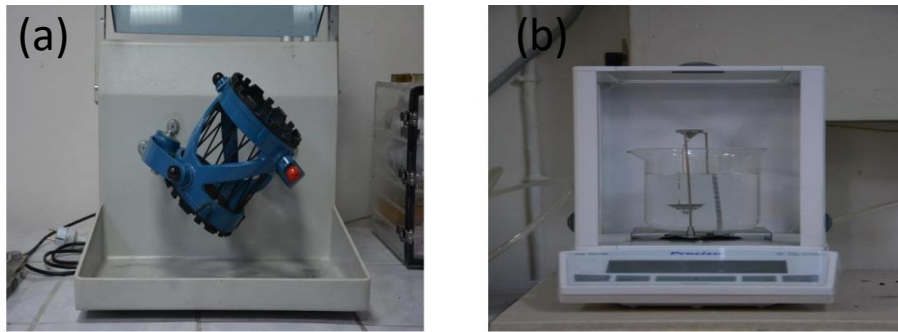


Figure 1. (a)Turbula powder mixing device and, (b) Density measurement device.

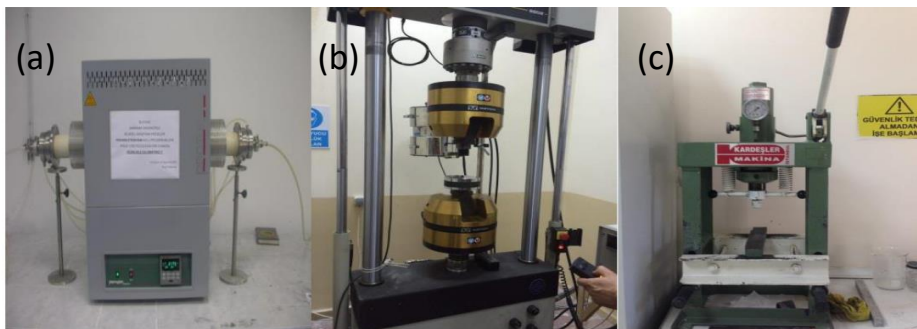


Figure 2. (a) Sintering Furnace, (b) One Axial Pressing and (c) Compression Test Device

III.EXPERIMENTAL PROCEDURE

The obtained metallic implant foam samples, Ti6Al4V alloy powders, space formers and binders were produced by mechanical alloying method and void forming method. The average particle size of the

particles used in sample production is 40 μm . As a space holder PAN (average particle size 100 micron) was used. Ti6Al4V alloy powders are weighed equal amount for each specimens and polyacrylonitrile (Pan) are weighed different proportions according to their porosity ratio for each specimens. As weight percent, 20%, 30%, 40%, 60%, 70%, 80% porous specimens were prepared and mixed. Samples obtained by mechanical alloying; It was compressed into pellets in 10 mm diameter molds under 200 bar pressure in a uniaxial press in a hydraulic molding machine. The void formers and PAN binder in the pellet samples obtained were subjected to sintering in a horizontal tube furnace. Sintering conditions: Firstly, as preheating, it was increased to 200 $^{\circ}\text{C}$ with 2 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ speed and left for 1 hour. then it was increased to 850 $^{\circ}\text{C}$ at a speed of 3 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ and sintered for 1 hour. Specimens were sintered at temperature 850 $^{\circ}\text{C}$ for 1 hour under high purity argon gas atmosphere in a horizontal tube furnace. The diameter of sintered specimens was between 10- and 8.7-mm. The powder metallurgy production method flow chart is shown in Figure 3.

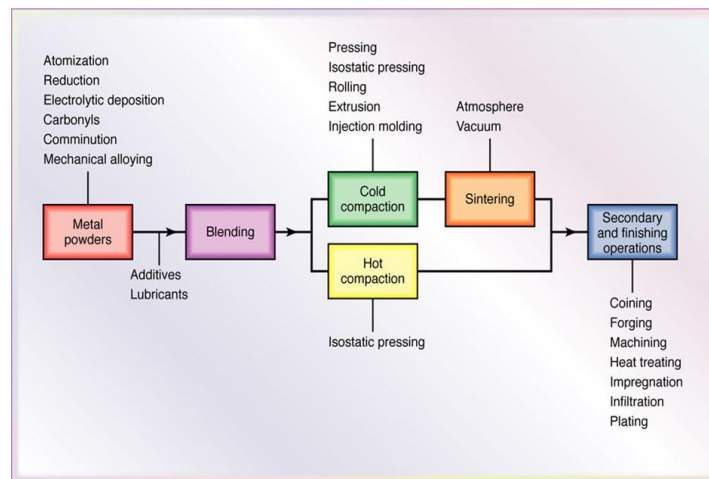


Figure 3. The powder metallurgy production method flow chart

Density and mass of sintered specimens were changed depending on the porosity level. Densities of the produced specimens were determined geometrically from the measured weight and dimensions with the aid of density measurement device. Microstructural characteristics of the sintered foams were examined in Light and Stereo Microscopes. Mechanical characterization of the samples was carried out by compression tests performed on a Instron compression testing machine. The stress strain obtained as a result of the compression test in the calculation of the mechanical properties of the samples obtained by the powder metallurgy method. Curves were used. In these curves, respectively, belong to each sample. Elasticity modular, yield strength values and deformation amounts were obtained. The said values were calculated from the data obtained from the device computer and the stress-strain curves. The sintering process diagram is shown in Figure 4.

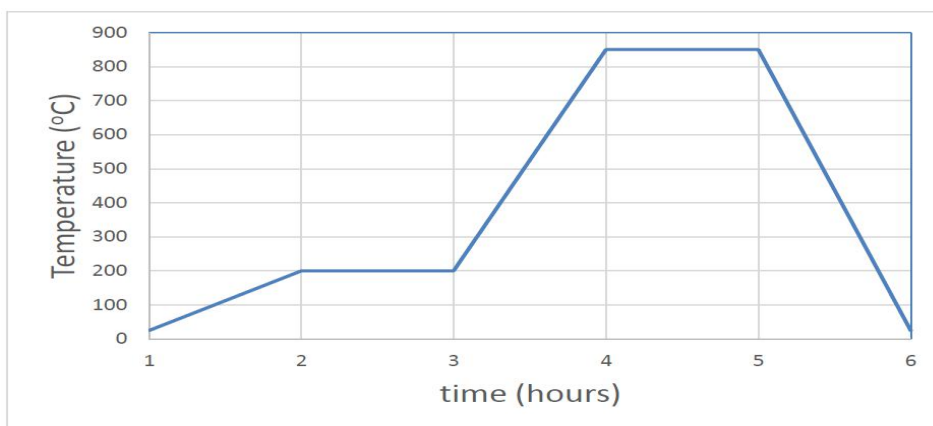


Figure 4. Sintering Temperature-Time

IV. RESULTS AND DISCUSSION

In this study, highly porous Ti6Al4V foams with porosity in the range of 20 – 80 %, were produced by powder metallurgy based on space holder technique. Figure 5 and 6 shows the photographs of the sintered Ti6Al4V foams.

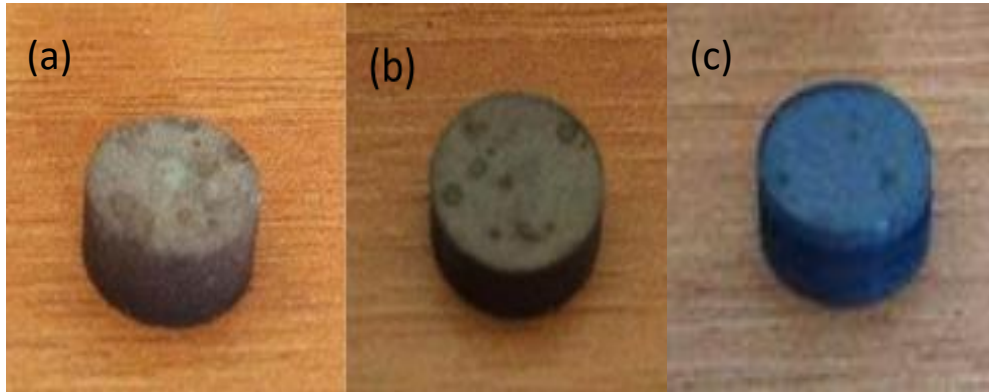


Figure 5. (a) 20%, (b)30% and (c)40% porous specimens

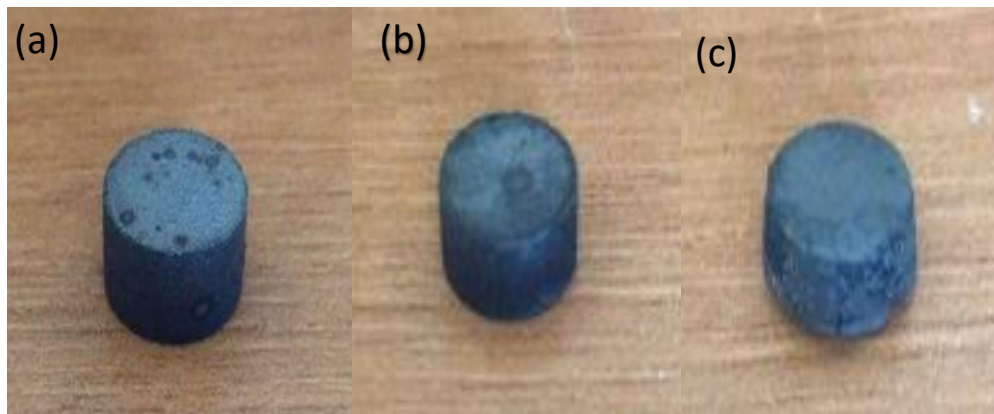


Figure 6. (a) 50%, (b) 70% and (c) 80% porous specimens

A) Results of Density and Porosity Determination

The properties of powders are given in the previous section and the average density values of samples containing different amount of PAN are listed in Table 2.

Table 2. Density of foam samples after sintering

Sample number	1	2	3	4	5	6
Porosity (%)	20	30	40	60	70	80
Diameter (mm)	10	10	10	9	8,8	8,7
Height (mm)	5,35	3,75	7,2	3,95	4,45	3,8
Soaked weight (g)	1,211	0,8	1,469	0,63	0,608	0,354
Suspended weight in	0,908	0,594	1,065	0,431	0,401	0,179

Density g/cm ³)	3,99	3,877	3,6	3,16	2,932	2,019
-----------------------------	------	-------	-----	------	-------	-------

Table 2 shows that the densities of the samples decrease with increasing porosity percent. And also it can be seen from the Table 2, the values of % porosity, diameter and height of the sintered specimens.

B) Results of Microscopic Examination

The microstructure examination of the foamy samples obtained by powder metallurgy method was carried out with an optical microscope. Metallographic images obtained at X500 magnifications it can be seen in Figure 7.

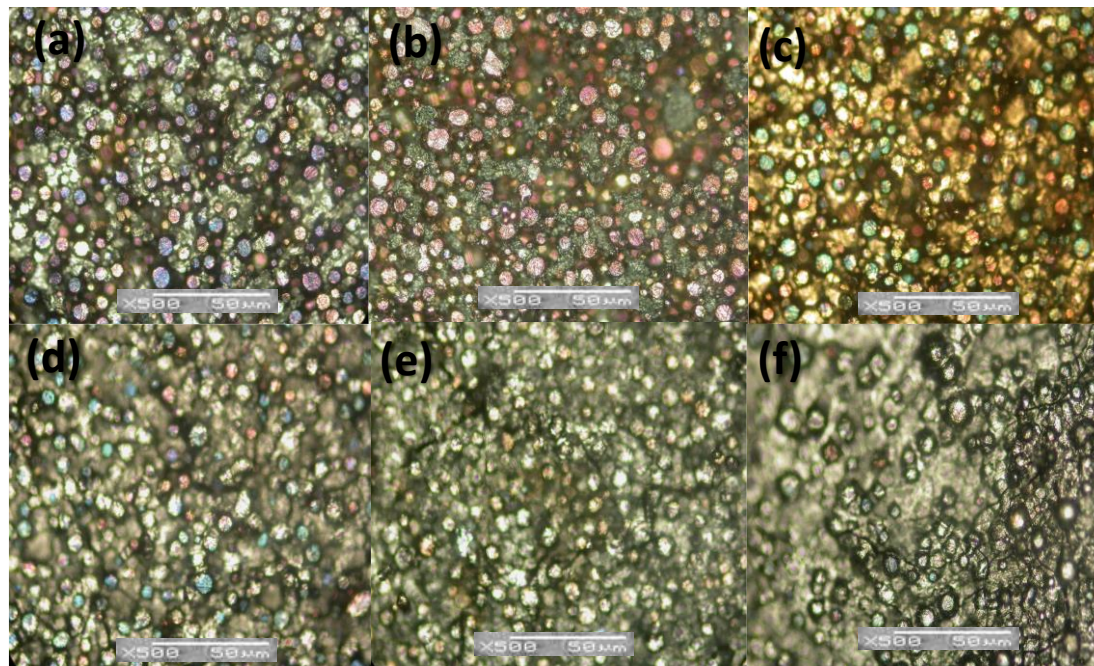


Figure 7. Ti6Al4V foam with (a) 20%, (b) 30%, (c)40%, (d) 60%, (e)70% and (f) 80% porosity (x500 Magnification)

C) Results of Compressive Testing

The data obtained from the tensile and mechanical tests (TSEN 138) performed according to the determined standards on the foamed samples obtained by the powder metallurgy method were given in Table 3.

Table 3. Elastic Modulus of specimens with different porosity percents

Sample Number	Porosity (%)	Load Failure (N)	Strain Failure (N)	Comprassion Max. (N)	Max Stress (MPa)	EModulus (MPa)
1	20	164,36	32,27	509,4	6,5	300
2	30	142,56	24,85	1168	14,8	348
3	40	285,97	22,81	935	11,9	496
4	60	1199,04	38,34	2190	36,0	554
5	70	977,93	36,83	1498	24,5	452
6	80	467,08	52,47	726	12,0	74

Compressive strength and elastic modulus results obtained as a result of tensile tests performed on foamed samples obtained by powder metallurgy method according to the determined standards. It can be seen in Figure 8 (a) and (b).

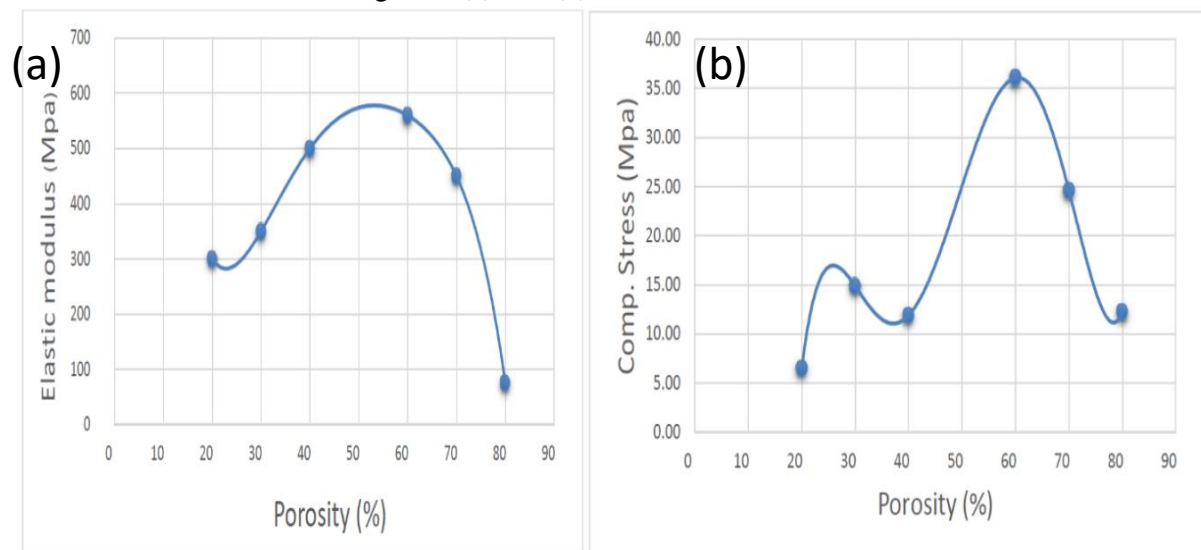


Figure 8. (a) E- Modulus with different porosity ratio and (b) Compression Stress with different porosity ratio

The findings of the compression test on the first three samples were unexpected since, in principle, the porosity ratio should increase as the modulus of elasticity decreases [18], but the first three samples demonstrate the opposite relationship. This inaccuracy is most likely the result of human error and is inconsistent with published study. Yet, the final three samples exhibit the behavior that would be predicted by a diminishing elastic modulus. As a result, the examples 4 and 5 were chosen as healthy specimens to comment on [19,20].

V. CONCLUSIONS

- ✓ There were some problems in this study. In the literature review performed again, the problems in the sample preparation phase in creating a porous structure were overcome [18].
- ✓ The differences in powder particle sizes contributed to obtaining the desired E-Module values. As a result, the elastic moduli of the 40%, 50% and 60% specimens decreased as expected as the porosity content increased.
- ✓ It can be said that the porous Ti6Al4V implant material can be made by employing powder metallurgy techniques and space holder technique to construct porous structure by using these results and the prior studies done on stress shielding problem as a reference.
- ✓ As the porosity increases, elastic moduli will be decreased and this will be closer to the bone's mechanical properties, this may eliminate some problems caused by stress shielding effect.
- ✓ In this work, healthy specimens that gives expected decrease in elastic moduli was in the range of 0,45-0,56 GPa and the known values of human bone tissue was in the range of 0,09 – 1,5 GPa. So, it can be concluded that making porous materials for implantation the stress shielding effect can be decreased or eliminated.
- ✓ In this way the negative effects of bone loosening, implant loosening, economical damage can be minimized for both the patient-user and producer of the implant.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Scientific Research Project Program of Marmara University (FEN-C-DRP- -110412-0098)

REFERENCES

- [1] A. Michael, F. Jones and R.H. David, "Engineering Materials 2" Oxford Pergamon Press. ISBN 0-08-032532-7. Pp.564.1992.
- [2] İ. Topcu and E. Karaman, "Çok Duvarlı Karbon Nanotüp Takviyeli Düzenli/ Düzensiz Şekilli Ti-6Al-4V Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c.7, s.3, ss.249-1260, 2019.
- [3] İ.Topcu and M Ceylan, "Wear behavior of irregular shape Ti6Al4V powder reinforced with carbon nanotubes", *Journal of Ceramic Processing Research*, vol.21, no.5, pp.539-546,2020.
- [4] M. R. Usal , M. Taşlıdere and M. F. Saraç, "Titanyum Karbür (TiC) Takviyeli Epoksi ile Güçlendirilmiş Hibrit Kompozitlerin Çarpma Davranışının Deneysel ve Sayısal İncelenmesi," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c.8, s.1, ss.18-32, 2020.
- [5] M. Niinomi and M. Nakai, "Titanium-Based Biomaterials for Preventing Stress Shielding between Implant Devices and Bone", *International Journal of Biomaterials*, vol. 2011, no.836587, 2011. doi. 10.1155/2011/836587
- [6] İ.Topcu, "Karbon Nanotüp Takviyeli Alüminyum Matriksli AlMg/KNT Kompozitlerinin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi", *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, sayı 4, no 1, 99-109.2018. <https://doi.org/10.28979/comufbed.359796>
- [7] İ.Mutlu, "Sinter-coating method for the production of TiN-coated titanium foam for biomedical implant applications", *Surface and Coating Technology*, vol.232, no.15, pp. 396-402, 2013. doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.05.041
- [8] İ.Topcu and M Ceylan, "Wear behavior of irregular shape Ti6Al4V powder reinforced with carbon nanotubes", *Journal of Ceramic Processing Research*, vol.21, no.5, pp.539-546,2020.
- [9] M. Ashby, A. Evans, N. Fleck, L. Gibson, J. Hutchinson and H. Wadley, "Metal Foams: A Design Guide", eBook ISBN: 9780080511467, *Elsevier Science*, Boston, MA, 2000.
- [10] K. S. Won, J. Hyun-Do, K. Min-Ho, K. Hyoun-Ee, K. Young-Hag and Y. Estrin, "Fabrication of porous titanium scaffold with controlled porous structure and net-shape using magnesium as spacer", *Materials Science and Engineering C*, vol. 33, n.5 pp. 2808–281,2013.
- [11] I. Topcu, "Determination of the mechanical properties of al/mwcnt composites obtained with the reinforcement of cu-coated multiwall carbon nanotubes (MWCNTs)", *Materiali in Tehnologije*, vol.54, n.5, pp.689-695,2020.
- [12] C. Oldani and A. Dominguez, "Titanium as a Biomaterial for Implants," ISSN. 978-953-307-990-5. pp.628, 2012. doi.10.5772/27413

- [13] İ. Topcu, B. N. Çetiner, A. N. Güllüoğlu and G. Özkan, "Investigation of Creep Behavior of CNT Reinforced Ti6Al4V Under Dynamic Loads", *J.Chem.Soc.Pak.*, vol.42, n.1, pp.70-80, 2020.
- [14] İ.Topcu, M Ceylan and E, B Yilmaz, "Experimental investigation on mechanical properties of Multi Wall Carbon Nanotubes (MWCNT) reinforced aluminium metal matrix composites", *Journal of Ceramic Processing Research*, vol.21,n.5, pp.596-601,2021.
- [15] M. Y. Zakaria, A.B. Sulong, M. I. Ramli and M. R. Raza, "Determination of Critical Powder Loading of Titanium-Hydroxyapatite with Powder Space Holder for Powder Injection Molding Feedstocks", *Journal of Mechanical Engineering*, vol. n.1, pp.11-21, 2017.
- [16] O. Bazaka, K. Bazaka, P. Kingshott, R. J. Crawford and E. P. Ivanova, "Metallic-implant biomaterials", *Materials-Science-and-Engineering-Reports.*, ch1, pp.98, 2015.
- [17] A. Mansourighasri, N. Muhamad and A. Sulong."Processing titanium foams using tapioca starch as a space holder" *Journal of Materials Processing Technology*, vol.212, n.1, pp.83-89,2012
- [18] İ.Topcu "Investigation of Wear Behavior of Particle Reinforced Al/B4C Composites under Different Sintering Conditions" *Journal of Technical Glasnic*, vol. 14, n.1, pp. 7-14,2020.
- [19] M. R. Usal, M. Taşlıdere and M. F. Saraç , "Titanyum Karbür (TiC) Takviyeli Epoksi ile Güçlendirilmiş Hibrit Kompozitlerin Çarpma Davranışının Deneysel ve Sayısal İncelenmesi," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c.8, s.1, ss.18-32, 2020. doi:10.29130/dubited.606515
- [20] İ.Topcu "Examination of wear properties of Al/B4C composites reinforced with irregularly shaped B4C" *Journal of Ceramic Processing Research* vol 22 no 3, pp. 276-282, 2021.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Derleme Makalesi

Geleceğin Alternatif Protein Kaynakları: Bitkiler

 Selen SEYHAN ^{a,*},  Emine NAKİLCİOĞLU ^b,  Semih ÖTLEŞ ^b

^a Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ege Üniversitesi, İzmir, TÜRKİYE

^b Gıda Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ege Üniversitesi, İzmir, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: selenseyhann@gmail.com

DOI: 10.29130/dubited.1215815

Öz

Proteinler, aminoasitler tarafından oluşturulan azot içerikli bir besin maddesidir. Vücudumuzda birçok fonksiyona hizmet eden proteinler, sağlıklı bir yaşam için gereklidir. Gün geçtikçe artan dünya nüfusu nedeniyle gıda endüstrisinde bitkisel protein kaynaklarına yönelim hız kazanmıştır. Tüketicilerin hayvansal proteinlere ulaşmasında, artan maliyetler ve sınırlı tedarikler nedenleriyle büyük sıkıntılar çıkabilmektedir. Ayrıca bilinçsiz hayvansal ürün tüketiminin birçok sağlık sorununa neden olduğu bilinmektedir. Çölyak hastalığı veya gluten duyarlılığı gibi sağlık sorunları, bireylerin sağlıklı beslenme yönündeki eğilimleri ve vegan, vejetaryen gibi beslenme tarzları ile bitkisel kaynaklar değer kazanmaktadır. Son zamanlarda bitkisel proteinler, insan beslenmesinde hayvansal kaynağın yanı sıra ürün formülasyonu için fonksiyonel bileşenlerin yerini alan ekonomik ve çok yönlü bir alternatif olarak daha fazla kullanılmaktadır. Bu derleme, bitkisel protein kaynaklarından yağlı tohumlar, tahıllar ve diğer bitkiler hakkında genel bir bilgi vererek bahsedilen bitkisel protein kaynakları ile ilgili gıda alanında yapılan çalışmalarını içermektedir.

Anahtar Kelimeler: Alternatif gıda, Bitkisel protein kaynakları, Gıda kullanımı, Protein, Zenginleştirme

Alternative Protein Sources of The Future: Plants

ABSTRACT

Proteins are nitrogen-containing nutrients formed by amino acids. Proteins, which serve many functions in our body, are essential for a healthy life. Due to the increasing world population day by day, the orientation towards vegetable protein sources in the food industry has been gained a momentum. Consumers' access to animal proteins can cause great difficulties due to increasing costs and limited supplies. It is also known that unconscious consumption of animal products causes many health problems. With health problems such as celiac disease or gluten sensitivity, individuals' tendencies towards healthy eating, and diets such as vegan and vegetarian, herbal resources gain value. Recently, vegetable proteins have been used more and more in human nutrition as an economical and versatile alternative to replace functional ingredients for product formulation as well as animal source. This review provides general information about plant protein sources such as oilseeds, grains and other plants, and includes studies in the field of food related to plant protein sources.

Keywords: Alternative food, Plant protein sources, Food use, Protein, Enrichment

I. GİRİŞ

Proteinler temel besin öğelerinden biri olmakla birlikte içeriğinde karbon, hidrojen, oksijen, kükürt, fosfor ve azot gibi elementleri içermektedir [1]. Aynı zamanda proteinler, 20 temel amino asidin belirli dizilişlerde birbirlerine kovalent bağlanmasıyla oluşan polipeptitlerdir [2]. Proteinlerin sahip olduğu amino asit dizilimleri birbirinden farklı ve kendilerine özgüdür [3]. Proteinlerin parçalanmasıyla çok sayıda ve çeşitte aminoasit ortaya çıkmaktadır. 8 adet esansiyel amino asit bulunmaktadır ve bunları vücut yeterli miktarda sentezleyemediği için dışardan alınması gerekmektedir [3],[4]. Sağlıklı bir diyet için yüksek yoğunluklu ve kaliteli protein alımı gerekmektedir. Diyetle uygulanacak öneriler bakımından protein kalitesi önem taşımaktadır [5],[6]. Sağlıklı beslenme düzeni için kalori alımının %30'u protein bileşenlerinin karışımını içermelidir [5]. Vücudun gıdadaki proteinleri maksimum etkinlikte kullanabilmesi için uygulanacak diyet; aminoasitleri uygun miktarda içermeli, sindirilebilirliği iyi olmalı, yeterli düzeyde enerji sağlamalı ve gereken vitamin ve mineralleri içermelidir [7]. Protein alımı hakkında, ideal vücut ağırlığının kilogramı başına günde 0.8 g /kg olacak şekilde ya da günde alınması gereken tek bir değer olarak 50 gram şeklinde 3 öneri bulunmaktadır [8],[9].

Günümüzde 1.3 milyar insan gıdaya ulaşmakta güçlük çekmektedir [10]. Dünya nüfusunun her geçen gün artması, açlık konusundaki zorlukların artacağını da göstermektedir [11]. Genellikle protein ihtiyacı et, süt ve balık gibi proteince zengin hayvansal kaynaklı gıdalardan sağlanmaktadır [12]. Fakat artan protein ve gıda talepleri doğrultusunda geleneksel hayvansal gıda ürünleri ve yöntemleri yerine alternatif ürünler ve yöntemler geliştirilmelidir [13]. Protein ihtiyacının hayvansal kaynaklardan sağlanması güçleşmektedir [14]. Gıda endüstrisinde son on yıla bakılırsa, geleneksel olarak hayvanlardan elde edilen proteinlerin yerine bitkisel kaynaklı, sağlıklı ve besleyici proteinler elde etmeye yönelik çalışmalar ön plana çıkmıştır [15]. Bitki bazlı proteinler, uzun bir ekim kullanımı (örneğin depolama) ve ekim geçmişi, daha düşük üretim maliyetleri ve kolay erişimleri nedenleriyle beslenme ihtiyaçları için umut verici gözükmektedir [16].

Tüketicilerin bitki bazlı ürünlere talebi gün geçtikçe artmaktadır [17]. Et (örneğin et analogları; kanola, soya fasulyesi, hindistan cevizi, ceviz, mantar), yumurta (maş fasulyesi protein izolatları), süt (soya sütü, badem sütü vs.) ve diğer hayvansal ürünler için bitki protein alternatifleri ile vücuda alınması gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [18]. Tüketicilerin, vegan ve vejetaryen beslenme şekline yönelmesi ile bitkisel kaynaklı proteinlerin önemi son yıllarda değer kazanmıştır [19]. Veganlık, 'tamamen veya kısmen hayvanlardan üretilen tüm ürünlerin diyet terimlerinden çıkarılması' olarak tanımlanmaktadır [20]. Vejetaryen kelimesi ise Latince "vegutes" kelimesinden türeyen, hayat dolu, sağlıklı, canlı anlamına gelmektedir. Vegandan farklı olarak isteğe bağlı yumurta, süt ve süt ürünlerinin tüketildiği beslenme biçimidir [19]-[21]. Ayrıca tüketiciler çölyak hastalığı (glutene duyarlılık) veya gluten hassasiyeti nedenleriyle de farklı bitkisel kaynaklara yönelim içerisindeyler [22].

Bitkisel gıdalar, insan tüketimi için diğer herhangi bir gıda kaynağından daha ucuz ve bol miktarda protein içeren kaynaklardır [9]. Genellikle protein ihtiyacı hayvansal proteinden karşılanırken son yıllarda obezitenin, hayvansal kaynaklı hastalıkların ve antibiyotik ile beslenmiş hayvanların artması nedeniyle bitkisel proteinlere olan ilgi artmaktadır [23]. Bu derleme, alternatif bitkisel protein kaynaklarından olan yağlı tohumlar, tahıllar ve diğer bitkiler hakkında genel bir bilgi vererek gıda alanında yapılan çalışmalarını kapsamaktadır.

II. BİTKİSEL PROTEİN KAYNAKLARI

A. YAĞLI TOHUMLAR

Yağlı tohumlar, değerli bitkisel protein kaynaklarından biridir. Global ölçekte protein ihtiyacının giderek artış göstermesi sonucu yağlı tohum üretimi de buna paralel olarak artış göstermiştir [24].

Ayrıca, daha sağlıklı bir yaşam anlayışı ile yağlı tohumlara olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır. Yağlı tohumların fizyokimyasal özellikleri genetiğine, işleme koşullarına ve büyüme ortamına bağlı olarak değişmektedir [25]. Dünyada yağ üretiminin yaklaşık %86'sı bitkisel kaynaklardan karşılanmaktadır. Bu bitkisel kaynakların başında soya tohumu, pamuk tohumu, keten tohumu, kolza tohumu, ayçiçeği, yerfıstığı, aspir, susam, haşhaş ve mısır gelmektedir [10].

A. 1. Keten Tohumu

Keten bitkisi, Geraniales takımı, Linaceae familyasının *Linum* cinsine ait olup bu cinsin 230 türü bulunmaktadır. *Linum usitatissimum* türünün ekonomik değeri diğer türlere oranla oldukça fazladır [26]. Tek yıllık bir bitki olan keten, 30-100 cm boylarında beyaz çiçekli, grimsi yeşil yapraklı bir bitkidir. Tohumları 4-6 mm uzunlukta, yumurta biçiminde yassı, kokusuz, yağlı ve lezzetlidir [27],[28]. Keten, düşük glisemik indeksli fonksiyonel bir besindir [29]. Potansiyel faydalar sağlayan keten bitkisi, proteinler, mineraller, fenolik bileşikler de dahil olmak üzere birçok biyoaktif bileşiği içermektedir [30].

Keten tohumu yüksek miktarda yağ içermesi ile bilinmektedir. Bu oran yaklaşık %40 (w/w) civarındadır. Yağ endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [30],[31]. Yem, boya, gıda, kumaş ve birçok sektörde avantajlarından dolayı keten tohumu tercih edilmektedir [30]. İçeriğinde, α -linolenik asit, palmitik asit, oleik asit ve linoleik asit baskın olarak bulunmaktadır. Çoklu doymamış yağ asitlerinin miktarı yapıda oldukça yüksektir [32]. Bu oranın %22.8 (w/w)'i α -linolenik aside aittir [33]. Keten tohumu, protein bakımından (%20-30 (w/w)) değerli bir kaynaktır [34]. Glutamik asit, metiyonin, arginin, sistein ve aspartik asit gibi amino asitleri zengin oranda içerirken lizin, treonin ve tirozin amino asitlerini düşük miktarda içerir [35]. Yüksek sistein ve metiyonin içeriği antioksidan kapasitesini artırır; böylece kanser riskini azaltmaya yardımcı olur [34]-[36]. Keten tohumu, özellikle magnezyum, kalsiyum ve fosfor mineralleri ile γ – tokoferol (E vitamini) bakımından zengin bir kaynaktır [34].

A. 2. Pamuk Tohumu

Pamuk bitkisi, Malvaceae familyasında yer almakta ve *Gossypium hirsutum* türü olarak bilinmektedir [37]. Pamuk tohumunun işlenmesi sırasında %5 (w/w)'i atık olarak değerlendirilmektedir. Pamuk tohumu küspesi, pamuk tohumunun yağ işleme işlemleri sırasında ortaya çıkan bir yan üründür. Oluşan atığın %50'si küspe, %22'si kabuk, %16'sı yağ ve %7'si linterdir [38]. Pamuk tohumunun besin bileşimini, tohum çeşidi ve özellikleri, işleme metotları, kabuk içeriği ve depolama süresi etkilemektedir [39]. Antioksidan ve antimikrobiyal etkileri bakımından pamuk tohumu ve atıkları incelendiğinde, sonuçlar tatmin edici düzeydedir. Bu doğrultuda, sağlık ve cilt bakımı endüstrilerinde antimikrobiyal ve antioksidan ajan olarak biyolojik özelliklerinden dolayı pamuk tohumu atıkları değerlendirilmelidir [40]. Pamuk tohumu, içeriğindeki potasyum ile koroner kalp hastalıklarını, yüksek tansiyonu ve kardiyovasküler hastalıkları önemli ölçüde azaltmaktadır [41].

Pamuk tohumunun yaklaşık olarak %20-28 (w/w)'lik kısmında yağ bulunmaktadır. Baskın olarak bulunan yağ asitleri linoleik asit, palmitik asit ve oleik asittir [42],[43]. Pamuk tohumu küspesi (45-50 gram pamuk tohumu küspesi/100 gram pamuk tohumu), pamuk tohumundan uygulanan yağ alma işlemi sonrasında kalan proteince zengin bir yan üründür [44]. Pamuk tohumu küspesi yaklaşık %35-40 (w/w) oranında protein içermektedir [45]. Yapıda bulunan baskın amino asitler ağırlıkça, arginin (yaklaşık %13) glutamik asit (yaklaşık %12) ve glutamindir (yaklaşık %10) [46]. İçeriğinde makro olarak bulunan mineraller ise potasyum, kalsiyum ve magnezyum şeklinde sıralanabilir [41].

A. 3. Kanola Tohumu (Kolza Tohumu)

Kanola (*Brassica napus* L.) bitkisi, tohumlarında ortalama %40 (w/w) oranında ham yağ içeren bir yağ bitkisidir [47]. Yüksek yağ oranı ile öne çıkan bitkisel bir kaynaktır ve yağ endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [48]. Dekara veriminin yüksek olması, sert iklimlere dayanıklılığı ve yüksek

yağ oranı nedeniyle endüstride yaygın olarak tercih edilmektedir [49]. Protein içeriğinin de yüksek olması sebebiyle yem ve gıda endüstrisinde ilgi görmektedir [50]. Düşük erusik asit (<%2 (w/w)) ve düşük glukosinolat (<30 µmol/g) içeren kolza bitkisinden elde edilen yağ, kanola yağı olarak adlandırılır [51].

Tohumlarda yaklaşık %37-41 (w/w) oranlarda yağ içeriği bulunmaktadır [52]. Kanola tohumu yüksek miktarlarda, palmitik asit, palmitoleik asit, oleik asit, linoleik asit, linolenik asit ve diğer doymamış yağ asitlerini içermektedir [53]. Kanola tohumu küspesi, nispeten dengeli amino asit bileşimine ve %38-48 (w/w) oranında protein içeriğine sahiptir [48]-[54]. Esansiyel aminoasitlerden olan lizin, izolösin, treonin, fenilalanin ve valin, esansiyel olmayan amino asitlerden tirozin, histidin, serin, glutamat ve sistein yüksek miktarlarda bulunmaktadır [54],[55]. Kanola baklagiller ve diğer tahıllara kıyasla daha yüksek miktarda azot, kükürt ve fosfor içeriğine sahiptir. Ayrıca magnezyum, kalsiyum ve sodyum bakımından da yeterli bir kaynaktır [53]. Kanola tohumu tokoferollerce zengin olup yüksek miktarda filokinon (K1 vitamini) da içermektedir [50].

A. 4. Chia Tohumu

Chia bitkisi (*Salvia hispanica* L.), Lamiaceae ailesine ait tek yıllık otsu bir bitkidir [56]. Uzunluğu 1 metreye ulaşabilmektedir. Tohum 1-2 mm büyüklüğündedir. Optimal büyüme şartları, ılık iklim, yüksek yağış ve 15-30 °C sıcaklıktır [57]. Chia tohumları bağırsakların düzgün çalışmasına destek olarak kan kolesterolünün ve glikoz seviyelerinin düşürülmesine yardımcı olmaktadır. Bu doğrultuda kardiyovasküler hastalık risklerini de azalttığı bildirilmiştir [58]. Chia tohumu yağ, protein, lif, mineral ve antioksidan kaynağı olarak tanımlanmaktadır ve düşük kalorili diyetlerin vazgeçilmez bir ögesidir [59].

Chia tohumu %30-35 (w/w) oranlarında yağ içeriğine sahiptir [58]. Chia tohumu yağı, α-linolenik asit (%19.5), α-linoleik asit (%5.2), oleik asit ve palmitik asit bakımından zengin bir kaynaktır [56]-[59]. Chia tohumu yüksek miktarda diyet lifi, fenolik bileşikler ve çoklu doymamış yağ asitlerini (PUFA) içermektedir [60]. İçeriğinde kafeik asit, kersetin, kemferol, glisin ve genisitin bulunduğu raporlanmıştır [56]. %21-37 (w/w) oranlarında protein içeriğine sahip olan chia tohumu, arginin, lösin, lizin, fenilalanin, valin ve triptofan bakımından zengindir. Esansiyel olmayan amino asitler bakımından ise başta glutamik asit ve aspartik asit olmak üzere serin, alanin, glisin ve prolin aminoasitlerini yüksek miktarda içermektedir [61]. Ek olarak A, E, C, tiamin, riboflavin ve nikotinik asit vitaminlerini ve magnezyum, fosfor, kalsiyum, potasyum ve sodyum minerallerini de yapısında bulundurmaktadır [56]-[62].

B. TAHILLAR

Tahıllar iyi bir besin kaynağı olup, cilt sağlığını iyileştirici ve sindirim sistemini düzenleyici önemli etkilere sahiptir. Günlük diyetle tüketilmesi gereken karbonhidrat, mineral, protein, diyet lifi ve vitamin ihtiyacının yaklaşık %70'ini giderebilmektedir. Gıda sektörüne fonksiyonel nitelikte yeni alternatifler kazandırılması amacıyla tahıllar, günümüzde yaygın olarak araştırılmaktadır [63].

B. 1. Yulaf

Yulaf (*Avena sativa* L.), Poaceae familyasında yer almaktadır. Son yıllarda fonksiyonel bir gıda olarak oldukça ilgi görmektedir [64]. Soğuk havaya toleransının düşük olması nedeniyle yulaf için kışlık hasat yapılmaktadır [65]. Protein ve diğer besin bileşenleri iklim, coğrafi koşullar ve işleme metotlarına bağlı olarak değişim gösterebilmektedir [66]. Yulaf, biyolojik olarak aktif madde ve besin kaynağı olarak kabul edilmektedir [67]. Çölyak hastalığı için iyi bir alternatif olan yulaf, tip-2 diyabetin, kanserin ve diğer kardiyovasküler hastalıkların risklerini azaltmaktadır [68]. Ek olarak, yulafın içeriğindeki β-glukanlar (%1.8-7.5 (w/w)) sayesinde serum kolesterolünü düşürme yeteneğine sahip olduğu raporlanmıştır [66].

Yaklaşık %10-12 (w/w) oranında protein içeren yulaf, lizin, fenilalanin, lösin ve arginin ile esansiyel amino asitler bakımından zengin bir kaynaktır [44]-[63]. Ayrıca aspartik asit, serin, treonin, glutamik

asit, glisin ve prolin gibi esansiyel olmayan aminoasitleri de yüksek miktarda içermektedir [69],[70]. Tahıl fenolik asitleri, hidroksisünamik asit ve hidroksibenzoik asit olarak ikiye ayrılmaktadır. Yulaftaki hidroksibenzoik asitler arasında protokateşik asit, şiringik asit, vanillik asit, p-hidroksibenzoik asit ve gallik asit yer almaktadır [71]. Hidroksisünamik asitler ise ferulik, p-kumarik, o-kumarik, kafeik ve sinapik asitlerdir. Yulaf, %5-7 (w/w) oranında yağ içeriğiyle tekli doymamış yağ asitlerini (%75-82) yüksek miktarda içermektedir [67]. Buğday ve mısır ile karşılaştırıldığında yulaf, sodyum, fosfor ve potasyum içeriği ile dikkat çekmektedir [72].

B. 2. Amaranth

Amaranth (*Amaranthus* spp.), kurak ve besince fakir topraklarda yetiştirilebilen ve değişen koşullara karşı toleransı yüksek bir bitkidir [73]. Amaranth tohumunun çapı yaklaşık 0.9-1.7 mm arasındadır [74]. Tohumun kabuğu pürüzsüz, ince ve krem-sarı arasında renk skalasına sahip olabilmektedir. Yapısındaki antioksidanlar sayesinde hiperkolestrolemi (kolesterol yüksekliği) ve arterioskleroz (damar sertliği) hastalıklarının risklerini azalttığı ve koroner kalp hastalıklarını önlemek için iyi bir seçenek olduğu raporlanmıştır [75],[76].

Amaranth taneleri öz ve kabuk kısımlarında E vitaminini ve yüksek antioksidan özelliğindeki polifenollerini içermektedir. Kafeik asit, hidroksibenzoik asit ve ferulik asit amaranthta yüksek miktarda bulunan fenolik bileşiklerdir [77]. Gluteni ve toksik etkiye neden olan prolaminini içermemesi ile çölyak diyeti için oldukça uygundur. Sindirilebilir kaliteli proteine sahip olan amaranth, yapısında %13-19 (w/w) oranında protein bulundurmaktadır [78]. Amaranth, esansiyel aminoasitlerden metiyonin, lizin, arginin, triptofan aminoasitlerini diğer tahıllardan daha yüksek miktarda içermektedir [79]. Amaranthın yağ asidi kompozisyonu ağırlıkça, %47 linoleik asit, %26 oleik asit ve %19 palmitik asitten meydana gelmektedir. Doymamış yağ asitlerini yüksek oranda (yaklaşık %75 (w/w)) bulundurmaktadır [77]. Farklı amaranth türlerinde kalsiyum ve magnezyum içeriği araştırıldığında sırasıyla 134-370 mg/100g ve 230-387mg/100g aralığında bulunmuştur. Ek olarak amaranth, potasyum, sodyum ve fosfor mineralleri açısından da zengindir [80].

B. 3. Karabuğday

Karabuğday (*Fagopyrum esculentum* Moench), kuzukulağıgiller (Polygonaceae) familyasından *Fagopyrum* cinsine ait tek yıllık bir bitki türüdür. Yetiştiriciliği, nemli ve serin yerlerde yapılmaktadır [81]. Çölyak hastaları ve yaygın olarak yapılan glutensiz diyet için oldukça önem arz etmektedir [63].

Karabuğday, beş flavonoidi yapısında barındırmaktadır. Bunlar, kemferol, kersetin, luteolin, rutin ve kersitrindir. İçerdiği flavonoidler sayesinde vücutta bağışıklık hücre fonksiyonlarını koruyucu bir etki ile virüslere karşı antiherpetik aktivite göstermektedir [82]. Ayrıca karabuğday ve karabuğday filizleri, anksiyete, nörodejeneratif bozukluklar ve cilt kanseri gibi çeşitli hastalıkların önlenmesine ve tedavisine yardımcı olmaktadır [83]. Karabuğdayın içeriğinde %18-24 (w/w) protein bulunmaktadır [84]. Lösin, lizin, fenilalanin ve valin içeriği ile dikkat çekmektedir [63]. Karabuğday, geleneksel buğday ile karşılaştırıldığında yaklaşık 4 kat daha fazla selenyum içerdiği raporlanmıştır. Ayrıca içeriğindeki niasin, pantotenik asit ve tokoferoller ile oldukça zengin bir kaynaktır [84].

C. DİĞER BİTKİLER

C. 1. Maş Fasulyesi

Maş fasulyesi (*Vigna radiata* Wilczek), genellikle yeşil veya sarı renkte olan besleyici değeri yüksek baklagillerdendir. Glutensiz olması nedeniyle maş fasulyesi, diyetlerde yaygın olarak tüketilmektedir [85]. Popülaritesini son yıllarda arttıran maş fasulyesi, diğer baklagillerde olduğu gibi kolesterol düşürücü, tümör oluşumunu engelleyici, iltihap kurutucu, idrar söktürücü ve toksik etkili maddeleri vücuttan temizleyici etkilere sahiptir [86]. Ayrıca içeriğindeki fenolik bileşikler (ferulik asit, sinapik asit, p-kumarik asit, kafeik asit, protokateşik asit, şiringik asit ve kateşin) ile Alzheimer hastalığına karşı nöroprotektif aktiviteye sahip olduğu raporlanmıştır [87].

Yüksek protein, mineral, diyet lifi ve fenolik bileşik içeriğiyle maş fasulyesi, fonksiyonel bir gıda olarak belirlenmiştir [85]. Yapılan çalışmalarda, maş fasulyesi %20-28 (w/w) oranındaki protein miktarı ile mercimek ve nohuttan daha yüksek protein içeriğine sahiptir [88]. Fenilalanin, lösin, lizin, valin, izolösin, histidin yüksek miktarlarda; triptofan, metionin ve sistein ise az miktarlarda maş fasulyesinin yapısında bulunmaktadır [89]. Minerallerden magnezyum, fosfor, kalsiyum, demir, çinko ve selenyum minerallerini ise makro düzeyde içermektedir [90]. Yapılan çalışmalarda çimlenmiş maş fasulyesinin mineral içeriğinin birçok bitki türüne göre daha fazla olduğu raporlanmıştır. Bu sayede fonksiyonel bir bileşen olarak kullanım potansiyeli artmaktadır [91]. Ek olarak niasin, pantotenik asit, folat, kolin, A vitamini ve K vitamini içeriğiyle dikkat çekmektedir [90].

C. 2. Soya Fasulyesi

Soya fasulyesi (*Glycine max* L.), baklagiller familyasından olup, yazlık ve tek yıllık olarak tarımı yapılan bir bitkidir. ‘Mucize bitki’ olarak bilinen soya, insan diyeti için önemli görülmektedir [92]. Yapılan araştırmalarda soya fasulyesinin antioksidan ve antikanser etkisinin, meme kanseri ve obezite riskini azaltmaya neden olduğu gözlemlenmiştir [93]. Tansiyonu ve kolesterolü düzenleyici aktivitesi de bulunmaktadır [92].

Soya fasulyesi yüksek miktarda protein (%40-50 (w/w)) içeriğine sahiptir [94]. Soya fasulyesi proteinleri, özellikle histidin, izolösin, lösin, fenilalanin, treonin ve triptofan gibi temel aminoasitlerin kaynağıdır [93]. Ayrıca yağ içeriğinin %18-24 (w/w) aralığında olması, yağ endüstrisinde kullanımının yaygınlaşmasını sağlamıştır. Palmitik asit, stearik asit, oleik asit ve linoleik asit bakımından soya fasulyesi, zengin bir kaynaktır [95]. Soya fasulyesi, yüksek miktarlarda içerdiği kalsiyum, demir, potasyum, magnezyum, çinko ve bakır mineralleri ile niasin, tiamin, kolin, C, B12, B6 ve K vitaminleri açısından ilgi görmektedir [92].

C. 3. Badem

Badem (*Prunus dulcis* Miller), gülgiller (Rosaceae) familyasının Prunoideae alt familyasından olan ve meyvesi yenebilen bir ağaç türüdür [96]. Badem unu gluten içermediğinden dolayı glutene duyarlı, alerjisi olan ve çölyak hastalığı olan bireyler için buğday unu yerine kullanılmaktadır [97]. Badem lipitleri %88-92 (w/w) oranlarında doymamış yağ asitlerini içerdiğinden kardiyovasküler hastalık riskini azaltmaktadır [98]. Badem, oleik asit (yağ asitlerinin yaklaşık %70’i) bakımından zengin bir kaynaktır. Badem, içerdiği yağ asitleri ve çözünebilir posadan dolayı kalp damar hastalıklarına, B grubu vitaminleri (tiamin, riboflavin, nikotinik asit ve piridoksin) bakımından zengin olduğu için anemiye, kalsiyumca zengin olduğu için kemik ve diş sağlığını iyileştirici etkiye ve potasyumu zengin, sodyumu düşük olması nedeni ile hipertansiyon üzerine koruyucu etkiye sahip bir fonksiyonel yağlı tohum olarak tanınmaktadır [99],[100].

Bademin besin değeri bileşimi incelendiğinde, %19-23 (w/w) oranlarında protein içerdiği bildirilmiştir [98]. Esansiyel amino asitlerce zengin olan badem, fenilalanin, izolösin, lösin, histidin ve treonin içermektedir [101]. Badem, genel olarak sağlıklı bir atıştırılabilirlik olarak kabul edilir. Diyet lifi, E vitamini, riboflavin ve temel mineraller (manganez, magnezyum, bakır, fosfor, kalsiyum ve potasyum) bakımından incelendiğinde diyetin sağlıklı bir parçasını oluşturmaktadır [99].

C. 4. Kinoa

Kinoa, (*Chenopodium quinoa* Willd.) kazayağıgiller (Chenopodiaceae) familyasına ait tek yıllık bitki olup, son yıllarda insan ve hayvan beslenmesindeki önemi gittikçe artmaktadır. Kinoa, kuraklık, don, tuzluluk gibi olaylara dayanıklılığı olan bir bitkidir [102]. Kan şekerini ve kolestrolü dengeleyerek insan sağlığına önemli katkılar sağlamaktadır [103]. Yapılan çalışmalarda kinoa ile beslenmenin sonucunda içerdiği aktif bileşenlerin bağırsak emiliminin arttığı raporlanmıştır [102]. Kinoa yaprakları, %7-14 (w/w) oranlarında lif içeriğine sahiptir. İspanağa yakın lif içeriğine sahip olması, genel besin değerine önemli bir katkı sağlamaktadır [104].

Kinoanın protein içeriği genel olarak %13.8-18 (w/w) aralığında olmakla beraber yetiştirilme koşullarına göre bu değerler farklılık göstermektedir [63]. Dengeli protein içeriği olan kinoa, esansiyel olan (izolösin, lösin, lizin, metionin, fenilalanin, treonin, triptofan ve valin) ve olmayan (alanin, arginin, aspartik asit, sistein, prolin ve glisin) amino asitler bakımından zengindir [105]. Ayrıca, polifenoller (vanilik asit, ferulik asit, kersetin ve kamferol), tokoferoller ve karotenoidler olmak üzere önemli biyoaktif bileşikleri içeriğinde bulundurmaktadır [106]. Ek olarak kinoanın bileşiminde yüksek miktarda bulunan mineraller ise bakır, magnezyum, potasyum ve fosfor olarak raporlanmıştır [104].

III. GIDALARDA BİTKİSEL KAYNAKLAR İLE PROTEİN İÇERİĞİNİ ARTTIRMAYA YÖNELİK YAPILAN ÇALIŞMALAR

Son yıllara kadar et ve süt ürünlerinin tüketimiyle protein alımı sağlanırken, şu an tüketicilerin bitki bazlı ürünleri kullanılmasına dair yoğun bir ilgi vardır. Ayrıca tüketicilerin sağlıklı beslenmeye olan ilgisi, küresel açlığın önlenmesi, temel beslenme talepleri, diyetle ilgili hastalıkları önleme isteği ve tüketici refahının iyileştirilmesi nedenleriyle araştırmacılar gıdaların potansiyel kullanımına odaklanmışlardır [107].

A. YAĞLI TOHUMLAR İLE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Nduko vd. [107] ananas reçelinin bileşimini güçlendirmek ve sağlık etkilerini arttırmak amacıyla chia tohumu ile zenginleştirilmiş ananas reçeli formüle etmişlerdir. Chia tohumu, reçele %6.5, %12.5, %25 ve %50 (w/w) oranlarında eklenmiş ve elde edilen numuneler analiz edilmiştir. Kontrol numunesinin protein miktarı %0.53 (w/w) olarak ölçülmüştür. Chia tohumu miktarı arttıkça protein miktarı artmıştır. En yüksek protein içeriğini %50 chia tohumu ile zenginleştirilen numunede, yaklaşık olarak %8.60 (w/w) olarak tespit edilmiştir. Bu numunenin lif içeriğinin ise kontrol numunesine göre 5 kat arttığı dikkat çekmiştir. Fakat %25 ve %50 (w/w) oranlarında chia tohumu ile zenginleştirilen reçellerin tüketicinin genel kabulünü olumsuz etkilediği sonucuna varılmıştır. %6.25 ve %12.5 (w/w) oranlarında chia tohumunun eklenmesi tüketici tarafından kabul edilebilir bir reçel eldesine imkân tanıdığı rapor edilmiştir.

Keten tohumu besin değeri ve sağlık etkileri ile değerli bir gıda ürünüdür. Bu amaç doğrultusunda Wirkijowska vd. [108] ekmek üretiminde keten tohumu ununun kullanım potansiyelini incelemişlerdir. Keten tohumu unu %5, %10 ve %15 (w/w) oranlarında ekmeğe ikame olarak eklenmiştir. En yüksek protein içeriği, %15 (w/w) keten tohumu unu ikameli ekmeklerde elde edilmiştir. Protein içeriği yaklaşık olarak 100 g ekmekte 11.06 g artış göstermiştir. %15 keten tohumu ilavesi, ekmek kırıntısının özgül hacmi ve gözenekliliği üzerinde olumsuz etkiye neden olmuştur. Yapılan fizikokimyasal, dokusal ve duyuşsal analizlerde en iyi sonucu %10 keten tohumu ikameli ekmek vermiştir.

Daha önce yapılan çalışmalarda pamuk tohumu küspesinin balık unu için iyi bir ikame olabileceği sonucuna varılmıştır. Gossipol, pamuk bitkisinin tohum, yaprak, dal ve köklerinde bulunan polifenolik bir pigment maddesidir. Yüksek gossipol içeriğinin, hayvanlarda toksisiteye neden olduğu ortaya konulmuştur. Pamuk tohumu küspesinin kullanımını iyileştirmek amacıyla serbest gossipolün azaltılması gerekmektedir. Zhang vd. [109] yavru kalkan balığında (*Scophthalmus maximus* L.) balık unu alternatifini olarak pamuk tohumu küspe konsantresinin potansiyelini incelemişlerdir. Alternatif protein kaynağı olarak pamuk tohumu küspesi (<400 mg/kg), %15, %25, %35 ve %45 (w/w) oranlarında balık unu yerine kullanılmıştır. Yapılan çalışmada, protein içeriği yaklaşık olarak %2 (w/w) oranında artmıştır. %45 pamuk tohumu küspesi kullanımı ile fenilalanin, lizin, ve arginin içerikleri %100 balık unu kullanılan kontrol örneğine göre daha yüksek değerler vermiştir. Protein sindirilebilirliği ise %4.53 (w/w) oranında artış göstermiştir. Sonuç olarak, pamuk tohumu küspesi su ürünlerinde potansiyel bir protein kaynağıdır. Kalkan balığının büyüme performansı, yem kullanımı ve

hematolojik tepkiler üzerinde olumsuz etkiler yaratmadan %35 oranında pamuk tohumu küspesinin kullanılabilceği sonucuna varılmıştır.

Lücke vd. [110] fermente kolza tohumu küspesi eklenmiş ekmek ile fermente kolza tohumu küspesi içeren kri-kırmızı biberli ekmek, fermente kolza tohumu küspesi içeren fesleğenli ekmek ve fermente kolza tohumu küspesi içeren barbunya fasulyeli ekmek üretmişlerdir. Kontrol için kolza tohumu içermeyen buđđay unu ile üretilen ekmek hazırlanmıştır. Fermente kolza küspesinin fermantasyonu *Rhizopus microsporus* ile gerçekleştirilmiştir. Acılık algısını azaltmak amacıyla ürünler sirke ve sitrik asit ile muamele edilmiştir. Kri-kırmızı biber, fesleğen ve barbunya fasulyesi içerikli ekmeklere yaklaşık olarak sırasıyla, %5, %4, %3.5 ve %5.3 (w/w) oranlarında kolza tohumu eklenmiştir. Sonuç olarak, protein içeriğinin tüm ürünlerde yaklaşık olarak %4-6 (w/w) oranlarında arttığı, fermente kolza tohumunun protein sindirilebilirliği bakımından olumlu etkisinin olduğu görülmektedir. Ayrıca yapılan duyuusal analizlerde acılık tadının tüketicici tarafından kabul aldığı şeklinde sonuçlanmıştır.

Manyok unu (Cassava unu) zellikle kükürt içeren amino asitler (metionin ve sistein) ve protein açısından düşük bir gıda ürünüdür. Otondi vd. [111] chia tohumu ile zenginleştirilerek manyok ununun besinsel ve fizikokimyasal özelliklerini iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Chia tohumları un haline getirilerek, %20, %40 ve %60 (w/w) oranlarında chia unu ve manyok unu kullanılarak un karışımları hazırlanmıştır. Manyok ununun 100 g'ında yaklaşık 2.39 g protein bulunmaktadır. Un karışımları sırasıyla %6.04, %8.93 ve %12.16 (w/w) protein ieremiştir. Duyusal analizler sonucunda %20 ve %40 oranlarında chia tohumu içeren un karışımlarının kabul edilebilir düzeyde olduğu saptanmıştır. Sonuç olarak, chia tohumlarının manyok ununun besin bileşimini geliştirdiği ve gıda formülasyonlarında kullanılabilceği ifade edilmiştir.

Zarycki vd. [112] makarnanın besinsel ve duyuusal değerini iyileştirmek amacıyla buđđay unu yerine keten tohumu unu kullanımını araştırmışlardır. %5, %9, %13, %17, %20 ve %23 (w/w) oranlarında keten tohumu unu eklenerek makarna üretilmiştir. Kontrol makarnası %13.37 (w/w) protein içeriğine sahipken diğer makarnalar için protein içeriği sırasıyla, %14.14, %14.93, %15.72, %16.51, %17.16 ve %18.06 (w/w) olarak bulunmuştur. Sonuçlar doğrultusunda protein değeri ve diğer besin bileşenleri bakımından en yüksek değeri %23 keten tohumu ile zenginleştirilen makarna vermiştir. Fakat %17'den daha fazla zenginleştirme oranına sahip ürünlerde doku parametreleri bakımından istenmeyen sonuçlar elde edilmiştir. Sonuç olarak keten tohumu unu ile zenginleştirilen makarna tüketiciler için daha sağlıklı bir seçenek olarak sunulabilir.

Tablo 1. Gıdalarda yağlı tohumları kullanarak yapılan diğer alışmalar

Kullanılan Hammadde	alışmanın Amacı	alışmanın Sonucu	Referans
Keten Tohumu	Piliç göğüs etin, keten tohumu ile zenginleştirilmesiyle besinsel ve fonksiyonel özellikleri incelenmiştir.	Keten tohumu ilavesi ile Na, K, Mg, K elementleri önemli ölçüde artış göstermiştir (p <0.05). Doymamış yağ asitleri bakımından zenginleştirilen piliç göğüs etinde yüksek protein içeriği gözlemlenmiştir.	[113]
	Atıştırmalık cipslere keten tohumu ilavesi (%10, %15 ve %20) ile omega-3 yağ asidi bakımından zenginleştirilerek dokusal ve bazı fizikokimyasal özellikler incelenmiştir.	Keten tohumu ilavesi atıştırmalık cipslerin protein içeriğini %4 oranında arttırmıştır. %20 keten tohumu ilavesi, en yüksek omega-3 yağ asidi içeriğini vermiş olup atıştırmalık cipslerin diyet lifi ve diğer doymamış yağ asitleri bakımından zenginleştirilmesini sağlamıştır.	[114]
Kanola Tohumu	Bisküvilerin kolza tohumu (%0, %20 ve %40) ile zenginleştirilerek antioksidan	Kontrol biskviye göre kanola tohumu oranı arttıka antioksidan aktivite 3 kat artış göstermiştir. Duyusal analizde ise	[115]

	aktivite ve duysal özelliklerin iyileştirilmesi amaçlanmıştır.	en iyi sonucu %20 oranında kanola tohumu içeren bisküvi vermiştir.	
Chia Tohumu	Chia tohumu (%1 ve %5) ile zenginleştirilen ekmeğin fizikokimyasal özellikleri incelenmiştir.	%5 oranında chia tohumu içeren ekmeğe göre %13 daha fazla protein içeriğine sahip olduğu belirtilmiştir. Tekstürel özellikler bakımından %5 oranında chia tohumu içeren ekmeğe kabul edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür.	[116]
	Elma suyunda ıslatılmış chia tohumları ile yoğurtların bazı biyoaktif bileşimler bakımından zenginleştirilmesi amaçlanmıştır.	Zenginleştirilen yoğurtta chia tohumuna özgü biyoaktif bileşimlere ek olarak elma suyundaki biyoaktif bileşimlerde bulunmuştur. Antioksidan aktivitesi ise kontrol yoğurda göre %19 kat yüksek bulunmuştur.	[117]

B. TAHILLAR İLE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Karabuğday ve ürünlerinin insan sağlığı açısından birçok yararı bulunmaktadır. Bu doğrultuda, Salejda vd. [118] yaptıkları çalışmada, biyoaktif bileşik kaynağı olan karabuğday kabuğu ile zenginleştirilmiş sosis üreterek, ürünün teknolojik ve duysal kalitesini nasıl etkileyeceğini değerlendirmişlerdir. Sosislerde karabuğday ile zenginleştirilme %1, %2 ve %3 (w/w) oranlarında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada sosis ürünlerinde bulunan aminoasitlerin miktarı da incelenmiştir. %2 ve %3 karabuğday içeren sosislerde aminoasitlerin anlamlı ölçüde yüksek miktarlarda bulunduğu belirlenmiştir. Kontrol numunesinde bulunmayan treonin, sistein, izolösin ve fenilalanin aminoasitleri, %2 oranında karabuğday içeren sosislerde saptanırken; %3 oranında karabuğday içeren sosislerde 2 kat daha fazla alanin ve tirozin tespit edilmiştir. Sosis ürününde karabuğday kullanımının, teknolojik kaliteden ödün vermeden sosislerin besin değerini arttırmak için iyi bir katkı maddesi olarak kullanılabilceği sonucuna varılmıştır.

Vázquez-Villegas vd. [119] buğday unu ile amarant unu kullanılarak hazırlanan tortilla ekmeğindeki kimyasal bileşimi ve dokusal özellikleri incelemişlerdir. %10, %15 ve %20 (w/w) amarant unu kullanılarak tortilla ekmeği hazırlanmıştır. Kontrol numunesi ise %100 buğday unu içermektedir. %10 amarant unu kullanılan tortilla ekmeğinde ham protein değeri %17 (w/w) artarak en yüksek değeri almıştır. Un ikamesi arttıkça protein değerinin artmaması, hamur formülasyonunda suda çözünmeyen protein artışı ile ilişkilendirilmiştir. %20 oranla zenginleştirilen ekmeğe ise yaklaşık %14 (w/w) artış görülmüştür. Diğer dokusal özellikler, duysal kabul ve sindirilebilirlik özellikleri dikkate alındığında ise en iyi sonucu %20 amarant unu ile zenginleştirilen tortilla ekmeği vermiştir.

Yulaf, kolesterolü ve kan şekeri seviyesini düzenleyen birçok bileşiği içeriğinde bulundurmaktadır. Bu doğrultuda de Oliveira Filho vd. [120] yaptıkları çalışmada, yulaf ile zenginleştirilmiş makarna üreterek, ürünün fizikokimyasal ve duysal profilini incelemeyi amaçlamışlardır. Yulaf un haline getirilerek makarnaya ikame edilmiştir. %1, %3, %5, %6 ve %10 (w/w) oranlarında yulaf unu kullanılmıştır. Kontrol formülasyonunda %17.85 (w/w) protein içeriği bulunurken %10 yulaf unu kullanılan makarna ürününde %32.63 protein içeriği tespit edilmiştir. Yulaf unu ile zenginleştirilmiş makarna numunelerinin duysal olarak kabul edilebilir düzeyde olduğu belirlenmiştir. Yulaf unu ile zenginleştirme işlemi, makarnanın potansiyel değerini arttırmıştır ve yulaf ununun gıda endüstrisinde kullanım alanlarına alternatif oluşturmuştur.

Amarant, bitkisel bir protein kaynağı olduğundan çölyak hastaları için iyi bir glutensiz seçenektir. Bu bağlamda Tamsen vd [121] kaplaması amarant unu ile ikame edilen kaplamalı kızarmış tavuğun (nugget) üretim olanağını araştırmışlardır. Bunun için kaplamada %50 ve %100 (w/w) oranlarında amarant unu kullanılmıştır. Amarant kullanımıyla, numunelerin protein konsantrasyonunun arttığı belirlenmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklıkta amarant proteinlerinin disülfid bağları yoluyla sert bir jel

oluşturduğu ve ürünü stabilize ettiği raporlanmıştır. Buğday ununa kıyasla amarant unu kullanımı protein içeriğinde %5 (w/w)'lik bir artışa neden olmuştur. Yapılan duyusal değerlendirmede, tüketiciler tarafından %50 amarant unu kullanımının kabul gördüğü sonucuna varılmıştır.

Ratnawati vd. [122] bisküvi üretiminde besin bileşimini arttırmak amacıyla soya fasulyesi unu kullanımını denemişlerdir. Buğday unu ile karşılaştırıldığında soya fasulyesi ile üretilen bisküvi de anlamlı ölçüde protein değeri (%40.94 (w/w)) yüksek çıkmıştır. Protein sindirilebilirliği ise 2 kat artmıştır. Dokusal analizler (şişme gücü, yapıştırma sıcaklığı, gerileme, viskozite vb.) iyi sonuçlar verirken, duyusal analizler de tüketiciler tarafından genel kabul almıştır.

Tablo 2. Gıdalarda tahıl kaynaklarını kullanarak yapılan diğer çalışmalar

Kullanılan Hammadde	Çalışmanın Amacı	Çalışmanın Sonucu	Referans
Yulaf	Kurabiyelerin fizikokimyasal ve duyusal özellikler bakımından iyileştirilmesi amacıyla yulaf (%5, %10, %15 ve %20) kullanılmıştır.	Yulaf ilavesi ile kurabiyelerin mineral içeriğini önemli ölçüde arttırmıştır (p<0.05). Ayrıca lif içeriği %61 oranında artış göstermiştir.	[123]
Amarant	Vegan diyetini desteklemek için amarant unu kullanarak makarna üretimi amaçlanmıştır.	Amarant unu ilavesi ile protein oranı minimum %12 artış göstermiştir. Arginin, alanin, glisin, lisin ve valin içerikleri önemli artış göstermiştir (p<0.05).	[124]
	Amarant unu ile zenginleştirilmiş ekmeklerin besinsel özellikleri değerlendirilmiştir.	Amarant unu ilavesi ekmeklerin diyet lif içeriğini ve kül içeriğini arttırmayı sağlamıştır. Ek olarak ekmeklerde protein içeriği %15 oranında artarak günlük protein alımını destekleyecek düzeydedir.	[125]
Karabuğday	Karabuğday unu (%0, %10, %20, %30 ve %40) ile zenginleştirilmiş bisküvi üretimi ile besinsel özelliklerin incelenmesi amaçlanmıştır.	Karabuğday unu oranı arttıkça bisküvilerin yağ, lif ve kül içeriğinde artış gözlemlenmiştir. Özellikle demir, potasyum ve çinko içerikleri önemli artış göstermiştir (p<0.05). Duyusal analiz bakımından %30'a kadar kabul edilebilir sonuçlar alınmıştır. Protein içeriği ise %28 artış göstermiştir.	[126]
	Fenolik bileşenler bakımından zenginleştirilmiş makarna için karabuğday unu kullanılmıştır.	Karabuğday unu oranı arttıkça pişme kalitesi ve karbonhidrat sindirilebilirliği artmıştır. Kontrol makarnaya göre fenolik bileşen içeriği ve antioksidan özelliği iyileştirilmiştir.	[127]

B. DİĞER BİTKİ KAYNAKLARI İLE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Yıldız [128] glutensiz bisküvi eldesinde badem unundan faydalanmıştır. Kontrol numunesi için buğday unu yerine pirinç unu kullanılmıştır. Diğer formülasyonlar için %10, %20 ve %30 (w/w) oranlarında badem unu kullanılmıştır. %100 pirinç unu kullanımı ile %4.47 (w/w) protein içeriği tespit edilirken; %10, %20 ve %30 badem ununun eklendiği formülasyonlarda sırasıyla protein değerleri %5.51, %6.36 ve %8.04 (w/w) olarak bulunmuştur. Badem unu katkısı ile bisküvilerde sertleşme özelliği artsa da duyusal analizlerde genel kabul edilebilirliği anlamlı ölçüde etkilememiştir. Sonuç olarak glutensiz bisküvi üretimi için badem unu kullanımı ürünlerin protein içeriği başta olmak üzere besinsel bileşimini arttırmıştır. Ayrıca dokusal özelliklerin ve duyusal analiz sonuçlarının kabul edilebilir düzeyde olduğu belirlenmiştir.

Kahve milyonlarca insan tarafından sıkça tüketilen içeceklerden biridir. Kafein, olumsuz etkileri ve tüketicilerin bu konudaki endişeleri sebebiyle araştırılma konusu olmaktadır. Maş fasulyesi besin değeri yüksek bir gıdadır. Aroma ve lezzet bakımından maş fasulyesi, kafeinsiz kahve üretimi için bir alternatif olarak görülmektedir. Bu doğrultuda, Alptekin ve Bölek [129] kafeinsiz kahve benzeri bir içecek üretimi için maş fasulyelerinin kullanımını araştırmışlardır. Kavurma işlemi için mikrodalga ve akışkan yatak kurutma yöntemleri karşılaştırılmıştır. Kavurma sıcaklığı, süresi ve gücü ile ilgili yapılan deneyde, en iyi sonucu mikrodalgada 130 °C /10 dakika ve 600 Watt koşulları altında yapılarak, protein değeri yaklaşık olarak % 21.78 olarak bulunmuştur. Duyusal analizde de en iyi sonucu mikrodalga kurutma yöntemi almış olup tüketicilerin kabulünü görmüştür. Şeker içermeyen Türk kahvesi ve filtre kahve örneklerine kıyasla anlamlı ölçüde yüksek protein değeri elde edilmiştir. Maş fasulyesi, kafeinsiz kahve alternatifi bakımından sağlıklı bir içecek olma potansiyeli taşımaktadır.

Demir ve Bilgiçli [130] glutensiz makarna üretimi amacıyla ham ve çimlendirilmiş kinoa ununun kullanımını araştırmışlardır. Ham ve çimlenmiş kinoa unları %10, %20 ve %30 (w/w) oranında makarna formülasyonunda kullanılmıştır. Kontrol makarnasının protein içeriği %8 civarında iken; %30 kinoa unu kullanımı ile makarnanın protein içeriği %26 (w/w)'ya çıkartılmıştır. Çimlendirme aşamasının protein içeriğine önemli katkıları olurken, protein sindirilebilirliğini de önemli ölçüde arttırdığı raporlanmıştır. %30 oranında ham veya çimlendirilmiş kinoa unu kullanımı, makarnada rahatsız edici bir koku oluşturması nedeniyle tüketiciler tarafından duyusal analizde daha düşük puanlanmıştır. Fakat bu düşüşler anlamlı ölçüde olmamıştır ($p < 0.05$). Tüketici beğenisi doğrultusunda %20 ve %30 kinoa unu kullanımı, glutensiz makarna üretimi için iyi bir alternatif olabilmektedir.

Hernández-Reyes vd. [131] mısır ekmeğini soya fasulyesi ile zenginleştirerek, elde ettikleri numunelerin kimyasal bileşimini ve duyusal analizlerini ortaya koymuşlardır. Bunun için soya fasulyesi küspesi %5 ve %10 (w/w) oranlarında mısır ekmeğine eklenmiştir. Kontrol numunesi için %100 mısır unu kullanılmıştır. Kontrol numunesi 100 g'ında 7 g protein içerirken; %10 soya fasulyesi ile zenginleştirilen mısır ekmeğinin yaklaşık %10 protein içeriği bulunmuştur. %10 soya fasulyesi ile zenginleştirilen mısır ekmeğinin lizin, fenilalanin, tirozin ve izolösin seviyesinde, kontrol numunesine kıyasla sırasıyla %26, %15, %13 ve %12 (w/w) artış gözlemlenmiştir. Protein sindirilebilirliğinde %18.5 (w/w) oranında arttığı tespit edilmiştir. Mısır ekmeğinde %10 soya fasulyesi kullanımı, duyusal açıdan kabul edilebilir, protein içeriği daha yüksek ve kontrole kıyasla dört kat daha fazla çözünür diyet lifi barından bir ürün elde edilmesini sağlamıştır.

Şensoy [132] yağı azaltılmış badem ile yeni bir tarhana çeşidi elde etmiştir. Gerçekleştirdiği çalışmada tarhananın besinsel bileşimini ve duyusal özelliklerini iyileştirmeyi amaçlamıştır. Yağı azaltılmış badem öğütülerek un haline getirilmiş olup %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 (w/w) oranlarında tarhana hamuruna eklenmiştir. Kontrol tarhanasının %12.1 (w/w), badem unu ile zenginleştirilen formülasyonların ise sırasıyla %13, %13.63, %14.58, %15.08, %15.62 ve %16.09 (w/w) protein içeriklerine sahip olduğu bulunmuştur. Tarhana üretimi için badem unu kullanımının, besinsel bileşimi ve antioksidan aktiviteyi önemli ölçüde artırdığı tespit edilmiştir. Duyusal özelliklerden tat ve görünüşü olumlu etkileyen badem unu ile ikame edilmiş tarhana numunelerinin, panelistler tarafından kabul edilebilir düzeyde oldukları değerlendirilmiştir.

Tablo 3. Gıdalarda diğer bitki kaynaklarını kullanarak yapılan diğer çalışmalar

Kullanılan Hammadde	Çalışmanın Amacı	Çalışmanın Sonucu	Referans
Maş Fasulyesi	Yoğurdun fizikokimyasal özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla maş fasulyesi ile zenginleştirilmiştir.	%10 oranında maş fasulyesi ilavesi duyusal kabul edilebilirlik göstermiştir. Elde edilen tekstürel ve mikrobiyal özellikler ile yoğurt standartlarına uygunluk göstermiştir.	[133]
	Maş fasulyesi unu (%0, %10 ve %20) ile zenginleştirilmiş	Maş fasulyesi unu ilavesi ile eriştenin pişme özellikleri iyileştirilmiştir. Ayrıca	[134]

	eriştenin besinsel ve kalite özellikleri incelenmiştir.	eriştede kül, antioksidan aktivite ve toplam fenolik madde miktarının artışı gözlemlenmiştir. Maş fasulyesi ilavesi eriştenin protein içeriğini minimum %24.5 oranında arttırmıştır.	
Soya Fasulyesi	Makarnaya değer katmak için soya fasulyesi unu ilave edilerek glutensiz makarna üretimi amaçlanmıştır.	Soya fasulyesi ilavesi ile makarnanın protein içeriği önemli oranda artış göstermiştir (p<0.05). Aminoasitler bakımından zenginleştirilen makarnalarda pişme kalitesinde de iyileştirmeler gözlemlenmiştir.	[135]
Badem	Glutensiz ürün olan keklerin çölyak hastaları için uygun olması amacıyla badem unu kullanımı incelenmiştir.	Badem unu ilavesi ile lif içeriği, yağ içeriği, kalsiyum, demir ve çinko içerikleri artış göstermiştir. Protein içeriği %11'den %14 oranına yükselmiştir. Duyusal ve tekstürel özellikler bakımından istenen özellikler gözlemlenmiştir.	[136]
	Atıştırmalık krakerlerin kimyasal, antioksidan ve duysal bakımdan iyileştirilmesi için badem unu kullanılmıştır.	Badem unu ilavesi ile krakerlerin antioksidan aktivitesi %16.1 oranında artış göstermiştir. Ayrıca badem unu kullanımı kül ve lif içeriğinde artış göstermiştir. Protein içeriği ise %12.4 oranında artmıştır.	[137]
Kinoa	Kinoa unu (%5, %10 ve %15) kurabiye formülasyonunda buğday ununa ikame edilerek fizikokimyasal özellikler incelenmiştir.	Zenginleştirilen kurabiyelerde kontrole göre lif içeriği, omega-3 yağ asidi içeriği, fenolik madde içeriği ve antioksidan kapasite bakımından artış göstermiştir. Protein içeriğini %13.9 oranında arttırarak bazı aminoasitler bakımından kurabiyeler zenginleştirilmiştir.	[138]
	Glutensiz bisküvi geliştirmek amacıyla besin değeri yüksek olan kinoa unu (%40, %50 ve %60) kullanılmıştır.	Kinoa unu miktarı arttıkça protein, lif içeriği artış göstermiş olup lizin ve metiyonin aminoasitleri önemli oranda artmıştır (p<0.05). Duyusal ve tekstürel özellikler bakımından %50 kinoa unu içeren bisküviler en iyi sonuçları vermiştir.	[139]

IV. SONUC

Dünyada proteince zengin hammaddelerin giderek yetersiz kalması ve maliyetlerinin artması gibi faktörler, tüketicileri ve araştırmacıları yeni kaynak arayışına yöneltmektedir. Proteinler zengin besin içeriği ile vücudun savunma mekanizmasında, kan basıncının düzenlenmesinde, sindirim hastalıklarının önlenmesinde ve kardiyovasküler hastalık risklerinin azaltılmasında rol oynayan önemli bir makro besindir. Günümüzde hayvansal olmayan protein kaynakları, beslenme eğilimlerinin değişmesi nedeniyle araştırma konusu haline gelmiştir. Gıda sektöründe, bitkisel proteinlerin ikame olarak kullanılması veya gıdaların bileşimini zenginleştirilmesi hakkında literatürde birçok araştırma mevcuttur. Gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda bitkisel protein kaynaklarının kullanımı sonucunda gıdaların protein, diyet lifi ve mineraller gibi besin içeriklerinin arttığı gözlemlenmiştir. Zengin besin içeriğine sahip bitkilerin saptanması, besin içeriklerinin ortaya konulması ve gıda alanındaki uygulamalarının ve kullanımlarının arttırılması oldukça önemlidir.

V. KAYNAKLAR

- [1] S. Ötleş, Ö. Özdeştan, E. Nakilcioğlu, C. Kartal, ve H. Özyurt, *Gıda Kimyası*, 3.baskı, İzmir, Türkiye: Ege Üniversitesi Basımevi, 2017, s: 23-50.
- [2] S. M. Krug, and M. Fromm, “Special issue on “The tight junction and its proteins: more than just a barrier”. *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 21, no. 13, pp. 4612, 2020
- [3] J. Perez-Castineira, “Chemistry and Biochemistry of Food” In *Chemistry and Biochemistry of Food*. De Gruyter, 2020, pp 28-86.
- [4] S. Pathania, C. Bhatia, and B. K. Tiwari, “Food Formulation and Product Development”. *Food Formulation: Novel Ingredients and Processing Techniques*, 2021, ch. 1-2, pp. 1-19.
- [5] R. R. Wolfe, J. I. Baum, C. Starck, and P. J. Moughan, “Factors contributing to the selection of dietary protein food sources”. *Clinical Nutrition*, vol. 37, no. 1, pp. 130-138, 2018.
- [6] G. Champeil-Potokar, L. Crossouard, N. Jérôme, C. Ouali, N. Darcel, O. Davidenko, ..., and I. Denis, “Diet protein content and individual phenotype affect food intake and protein appetite in rats”. *The Journal of Nutrition*, vol. 151, no. 5, pp. 1311-1319, 2021.
- [7] A. G. A. Sá, Y. M. F. Moreno, and B. A. M. Carciofi, “Plant proteins as high-quality nutritional source for human diet”. *Trends in Food Science & Technology*, vol. 97, pp. 170-184, 2020.
- [8] D. Haggmann, M. Siegrist, and C. Hartmann, “Meat avoidance: motives, alternative proteins and diet quality in a sample of Swiss consumers”. *Public health nutrition*, vol. 22, no. 13, pp. 2448-2459, 2019.
- [9] Z. Shan, C. D. Rehm, G. Rogers, M. Ruan, D. D. Wang, F. B. Hu, ..., and S. N. Bhupathiraju, “Trends in dietary carbohydrate, protein, and fat intake and diet quality among US adults, 1999-2016”. *Jama*, vol. 322, no. 12, pp. 1178-1187, 2019.
- [10] FAO, “Food and Agriculture Organization of the United Nations World Health Organization, Sustainable Healthy Diets Guiding Principles”. *Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome*, 2019. <http://www.fao.org/3/ca6640en/CA6640EN.pdf> / (Erişim: 13.06.2022).
- [11] FAO, “The Future of Food and Agriculture, Trends and Challenges”. *Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome*, 2017. <http://www.fao.org/3/a-i6583e.pdf> / (Erişim: 12.06.2022).
- [12] M. Zeece, “Introduction to the Chemistry of Food”, 1st ed., Academic Press, 2020, ch. 2, pp: 37-81.
- [13] A. Van Huis, and D. G. Oonincx, “The environmental sustainability of insects as food and feed”. *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 37, no. 5, pp. 1-14, 2017.
- [14] O. A. Ijabadeniyi, “Food Science and Technology: Trends and Future Prospects”. 1st ed., Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2020, pp. 127-153.
- [15] F. Wang, Y. Zhang, L. Xu, and H. Ma, “An efficient ultrasound-assisted extraction method of pea protein and its effect on protein functional properties and biological activities”. *Food Science and Technology*, vol. 127, no. 109348, pp. 1-8, 2020.

- [16] S. Y. J. Sim, A. Srv, J. H. Chiang, and C. J. Henry, "Plant proteins for future foods: A roadmap". *Foods*, vol. 10, no. 8, pp. 1-31, 2021.
- [17] T. Lafarga, S. Villaró, G. Bobo, and I. Aguiló-Aguayo, "Optimisation of the pH and boiling conditions needed to obtain improved foaming and emulsifying properties of chickpea aquafaba using a response surface methodology". *International Journal of Gastronomy and Food Science*, vol. 18, pp. 1-8, 2019.
- [18] F. U. Akharume, R. E. Aluko, and A. A. Adedeji, "Modification of plant proteins for improved functionality: A review". *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, vol. 20, no.1, pp. 198-224, 2021.
- [19] F. Boukid, and M. Gagaoua, "Vegan Egg: A Future-Proof Food Ingredient". *Foods*, vol. 11, no. 2, pp. 161, 2022.
- [20] M. Bulut, and G. Y. Tunçay, "The dimension of belief in veganism/vegetarianism". *Folklor/Edebiyat*, vol. 26, no. 104, pp. 839-858, 2020.
- [21] O. F. Kuz, (2018). "Aile hekimlerinin vejetaryen/vegan beslenme ile ilgili bilgi, tutum ve davranışları", Doktora tezi, T.C. Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2018.
- [22] G. Caio, U. Volta, A. Sapone, D. A. Leffler, R. De Giorgio, C. Catassi, and A. Fasano, "Celiac disease: a comprehensive current review". *BMC medicine*, vol. 17, no.1, pp. 1-20, 2019.
- [23] A. Manickavasagan, L. T. Lim, and A. Ali, *Plant Protein Foods*, 3rd ed., Springer Natures, 2022, ch. 6, pp. 171-196.
- [24] OECD-FAO, "Oilseeds and Oilseed Products, in OECD-FAO Agricultural Outlook 2016-2025", *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, OECD Publishing, Paris, 2016.
- [25] B. De Lamo, and M. Gómez, "Bread enrichment with oilseeds. A review". *Foods*, vol. 7, no. 11, pp. 191, 2018.
- [26] K. Waszkowiak, A. Siger, M. Rudzińska, and W. Bamber, "Effect of roasting on flaxseed oil quality and stability". *Journal of the American Oil Chemists' Society*, vol. 97, no. 6, pp. 637-649, 2020.
- [27] A. Öksüz, N. P. Bahadırılı, M. U. Yıldırım, ve E. O. Sarıhan, "Farklı keten tür ve çeşitlerinin besin bileşenleri, yağ asitleri ve mineral içeriklerinin karşılaştırılması". *Journal of Food and Health Science*, vol. 1, no. 3, pp. 124-134, 2015.
- [28] I. Dudarev, and V. Say, "Development of resource-saving technology of linseed harvesting". *Journal of Natural Fibers*, vol. 17, no. 9, pp. 1307-1316, 2020.
- [29] A. Santiago, D. Ryland, S. Cui, H. Blewett, and M. Aliani, "Effect of milled flaxseed and storage conditions on sensory properties and selected bioactive compounds in banana and cinnamon muffins used in a clinical trial". *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 99, no. 2, pp. 831-843, 2019.
- [30] Z. X. Tang, R. F. Ying, B. F. Lv, L. H. Yang, Z. Xu, L. Q. Yan, ..., and Y. S. Wei, "Flaxseed oil: extraction, health benefits and products". *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, vol. 13, no. 1, pp. 1-19, 2021.

- [31] A. Szydłowska-Czerniak, A. Tymczewska, M. Momot, and K. Włodarczyk, "Optimization of the microwave treatment of linseed for cold-pressing linseed oil-Changes in its chemical and sensory qualities". *LWT*, vol. 126, pp. 1-9, 2020.
- [32] E. Symoniuk, M. Wroniak, K. Napiórkowska, R. Brzezińska, and K. Ratusz, "Oxidative stability and antioxidant activity of selected cold-pressed oils and oils mixtures". *Foods*, vol. 11, no. 11, pp. 1-18, 2022.
- [33] Z. X. Tang, L. E. Shi, X. M. Wang, G. W. Dai, L. A. Cheng, Z. X. Wan, ..., and L. H. Huang, "Whole flaxseed-based products and their health benefits". *Food Science and Technology Research*, vol. 26, no.5, pp. 561-578, 2020.
- [34] B. Ebrahimi, Z. Nazmara, N. Hassanzadeh, A. Yarahmadi, N. Ghaffari, F. Hassani, ..., and G. Hassanzadeh, "Biomedical features of flaxseed against different pathologic situations: A narrative review". *Iranian Journal of Basic Medical Sciences*, vol. 24, no.5, pp. 551 2021.
- [35] Y. Lan, J. B. Ohm, B. Chen, and J. Rao, "Physicochemical properties and aroma profiles of flaxseed proteins extracted from whole flaxseed and flaxseed meal". *Food Hydrocolloids*, vol. 104, pp. 105731, 2020.
- [36] B. Safdar, Z. Pang, X. Liu, M. A. Jatoi, A. Mehmood, M. T. Rashid, ..., and M. Naveed, "Flaxseed gum: Extraction, bioactive composition, structural characterization, and its potential antioxidant activity". *Journal of food biochemistry*, vol. 43, no. 11, pp. 13014, 2019.
- [37] I. Afzal, M. Kamran, S. M. A. Basra, S. H. U. Khan, A. Mahmood, M. Farooq, and D. K. Tan, "Harvesting and post-harvest management approaches for preserving cottonseed quality". *Industrial Crops and Products*, vol. 155, pp. 112842, 2020.
- [38] M. Ma, Y. Ren, W. Xie, D. Zhou, S. Tang, M. Kuang, ..., and S. K. Du, "Physicochemical and functional properties of protein isolate obtained from cottonseed meal". *Food chemistry*, vol.240, pp. 856-862, 2018.
- [39] E. Rojo-Gutiérrez, J. J. Buenrostro-Figueroa, R. Natividad-Rangel, R. Romero-Romero, D. R., Sepulveda, and R. Baeza-Jimenez, "Effect of different extraction methods on cottonseed oil yield". *Revista Mexicana De Ingeniería Química*, vol. 19, no. 1, pp. 385-394, 2020.
- [40] W. Song, X. Kong, Y. Hua, X. Li, C. Zhang, and Y. Chen, "Antioxidant and antibacterial activity and in vitro digestion stability of cottonseed protein hydrolysates". *Food Science and Technology*, vol. 118, pp. 108724, 2020.
- [41] N. Bellaloui, S. Saha, J. L. Tonos, J. A. Scheffler, J. N. Jenkins, J. C. McCarty, and D. M. Stelly, "Effects of interspecific chromosome substitution in upland cotton on cottonseed macronutrients". *Plants*, vol. 10, no. 6, pp.1158, 2021.
- [42] M. Kaplan, M. S. Fidan, K. Kökten, and İ. Ülger, "Bazı pamuk çeşitlerinin (*Gossypium hirsutum* L.) çığıtlerinin kimyasal kompozisyonu in vitro gaz üretimi". *Erciyes Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, vol. 14, no. 2, pp. 93-99, 2017.
- [43] Z. He, D. Zhang, and O. M. Olanya, "Antioxidant activities of the water-soluble fractions of glandless and glanded cottonseed protein". *Food chemistry*, vol. 325, pp. 126907, 2020.
- [44] M. Kumar, M. Tomar, S. Punia, S. Grasso, F. Arrutia, J. Choudhary, ..., and R. Amarowicz, "Cottonseed: A sustainable contributor to global protein requirements". *Trends in Food Science & Technology*, vol. 111, pp. 100-113, 2021.

- [45] M. Kumar, M. Hasan, P. Choyal, M. Tomar, O. P. Gupta, M. Sasi, ..., and J. F. Kennedy, "Cottonseed feedstock as a source of plant-based protein and bioactive peptides: evidence based on biofunctionalities and industrial applications". *Food Hydrocolloids*, vol. 131, no. 107776, 2022.
- [46] H. N. Cheng, Z. He, C. Ford, W. Wyckoff, Q. Wu, "A review of cottonseed protein chemistry and non-food applications". *Sustainable Chemistry*, vol. 1, no. 3, pp. 256-274, 2020.
- [47] Y. Hao, Z. Wang, Y. Zou, R. He, X. Ju, and J. Yuan, "Effect of static-state fermentation on volatile composition in rapeseed meal". *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 100, no.5, pp. 2145-2152, 2020.
- [48] W. Jia, E. Rodriguez-Alonso, M. Bianeis, J. K. Keppler, and A. J. van der Goot, "Assessing functional properties of rapeseed protein concentrate versus isolate for food applications". *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, vol. 68, pp. 102636, 2021.
- [49] J. A. Kirkegaard, J. M. Lilley, P. M. Berry, and D. P. Rondanini, "Canola". In *Crop Physiology Case Histories for Major Crops*, pp. 518-549, 2021.
- [50] N. Raboanatahiry, H. Li, L. Yu, and M. Li, "Rapeseed (*Brassica napus*): processing, utilization, and genetic improvement". *Agronomy*, vol. 11, no. 9, pp. 1776, 2021.
- [51] S. C. Chew, "Cold-pressed rapeseed (*Brassica napus*) oil: Chemistry and functionality". *Food Research International*, vol. 131, pp. 108997, 2020.
- [52] Z. Xiao, Y. Pan, C. Wang, X. Li, Y., Lu, Z. Tian, ..., and H. Wang, "Multi-functional development and utilization of rapeseed: comprehensive analysis of the nutritional value of rapeseed sprouts". *Foods*, vol. 11, no.6, pp. 778, 2022.
- [53] E. Beyzi, A. Gunes, S. B. Beyzi, and Y. Konca, "Changes in fatty acid and mineral composition of rapeseed (*Brassica napus* ssp. *oleifera* L.) oil with seed sizes". *Industrial Crops and Products*, vol. 129, pp. 10-14, 2019.
- [54] H. Kalaydzhiev, P. Ivanova, M. Stoyanova, A. Pavlov, T. Rustad, C. L. Silva, and V. I. Chalova, "Valorization of rapeseed meal: influence of ethanol antinutrients removal on protein extractability, amino acid composition and fractional profile". *Waste and biomass valorization*, vol. 11, no. 6, pp. 2709-2719, 2020.
- [55] Y. Wang, J. Liu, F. Wei, X. Liu, C. Yi, and Y. Zhang, "Improvement of the nutritional value, sensory properties and bioavailability of rapeseed meal fermented with mixed microorganisms". *Food Science and Technology*, vol. 112, pp. 108238, 2019.
- [56] M. Knez Hrnčič, M. Ivanovski, D. Cör, and Ž. Knez, "Chia Seeds (*Salvia hispanica* L.): an overview—phytochemical profile, isolation methods, and application". *Molecules*, vol. 25, no. 1, pp. 11, 2019.
- [57] R. Bochicchio, T. D. Philips, S. Lovelli, R. Labella, F. Galgano, A. Di Marisco, ..., and M. Amato, "Innovative crop productions for healthy food: the case of chia (*Salvia hispanica* L.)". *The sustainability of agro-food and natural resource systems in the Mediterranean basin*, pp. 29-45, 2015.
- [58] H. T. Olaleye, T. O. Oresanya, B. Z. Bello, "Physicochemical, textural, rheological and sensory properties of chia seed-cashew nut spread". *Journal of Culinary Science & Technology*, pp. 1-11, 2021.
- [59] M. Grancieri, T. A. Verediano, C. T. SantAna, A. de Assis, R. L. Toledo, E. G. de Mejia, and H. S. D. Martino, "Digested protein from chia seed (*Salvia hispanica* L) prevents obesity and

associated inflammation of adipose tissue in mice fed a high-fat diet”. *Pharma Nutrition*, vol. 21, pp. 100298, 2022.

[60] H. C. Kwon, H. Bae, H. G. Seo, S. G. Han, “Chia seed extract enhances physiochemical and antioxidant properties of yogurt.” *Journal of dairy science*, vol. 102, no. 6, pp. 4870-4876, 2019.

[61] B. Kulczyński, J. Kobus-Cisowska, M. Taczanowski, D. Kmiecik, and A. Gramza-Michałowska, “The chemical composition and nutritional value of chia seeds—Current state of knowledge”. *Nutrients*, vol. 11, no. 6, pp. 1242, 2019.

[62] K. Ghafoor, F. Aljuhaimi, M. M. Özcan, N. Uslu, S. Hussain, E. E. Babiker, and G. Fadimu, “Effects of roasting on bioactive compounds, fatty acid, and mineral composition of chia seed and oil”. *Journal of Food Processing and Preservation*, vol. 42, no. 10, 2018.

[63] A. Culetu, I. E. Susman, D. E. Duta, and N. Belc, “Nutritional and functional properties of gluten-free flours”. *Applied Sciences*, vol. 11, no. 14, pp. 6283, 2021.

[64] J. V. de Oliveira Maximino, L. M. Barros, R. M. Pereira, I. I. de Santi, B. C. Aranha, C. Busanello, and C. Pegoraro, “Mineral and fatty acid content variation in white oat genotypes grown in Brazil”. *Biological Trace Element Research*, pp. 1-13, 2020.

[65] P. González-Barríos, M. Bhatta, M. Halley, P. Sandro, and L. Gutiérrez, “Speed breeding and early panicle harvest accelerates oat (*Avena sativa* L.) breeding cycles”. *Crop Science*, vol. 61, no. 1, pp. 320-330, 2021.

[66] R. Mel, and M. Malalgoda, “Oat protein as a novel protein ingredient: Structure, functionality, and factors impacting utilization”. *Cereal Chemistry*, vol. 99, no:1, pp. 21-36, 2022.

[67] K. Fernández-Acosta, I. Salmeron, D. Chavez-Flores, I. Perez-Reyes, V. Ramos, M. Ngadi, ..., and S. Perez-Vega, “Evaluation of different variables on the supercritical CO₂ extraction of oat (*Avena sativa* L.) oil; main fatty acids, polyphenols, and antioxidant content”. *Journal of cereal science*, vol. 88, pp. 118-124, 2019.

[68] D. Paudel, B. Dhungana, M. Caffè, and P. Krishnan, “A review of health-beneficial properties of oats. *Foods*, vol. 10, no.11, pp. 2591, 2021.

[69] J. Yue, Z. Gu, Z. Zhu, J. Yi, J. B. Ohm, B. Chen, J. Rao, “Impact of defatting treatment and oat varieties on structural, functional properties, and aromatic profile of oat protein”. *Food Hydrocolloids*, vol. 112, pp. 106368, 2021.

[70] L. Kumar, R. Sehrawat, and Y. Kong, “Oat proteins: A perspective on functional properties”. *Food Science and Technology*, vol. 152 pp. 112307, 2021.

[71] G. Soykan, M. Y. Schär, A. Kristek, J. Boberska, S. N. Alsharif, G. Corona, ..., and J. P. Spencer, “Composition and content of phenolic acids and avenanthramides in commercial oat products: are oats an important polyphenol source for consumers”. *Food chemistry*, vol. 3, pp. 100047, 2019.

[72] O. D. E. Kose, “Mineral content variation in oat genotypes grown in different environments”. *Comptes rendus de l'academie bulgare des sciences*, vol. 74(12): 1854-1861, 2021.

[73] E. Gutiérrez-Cortez, E. Hernandez-Becerra, S. M. Londoño-Restrepo, and M. E. Rodríguez-García, “Physicochemical characterization of Amaranth starch insulated by mechanical separations”. *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 177, pp. 430-436, 2021.

- [74] F. Zhu, "Structures, physicochemical properties, and applications of amaranth starch". *Critical reviews in food science and nutrition*, vol. 57, no.2, pp. 313-325, 2017.
- [75] T. H. Gamel, and J. P. Linssen, "Nutritional and medicinal aspects of amaranth". *Natural products*, pp. 347-361, 2007.
- [76] E. Yaver, ve N. Bilgiçli, "Tahıl benzeri ürünler: Bileşimi, beslenme-sağlık üzerine etkileri ve tahıl ürünlerinde kullanımı". *Food and Health*, vol. 6, no. 1, pp. 41-56, 2020.
- [77] O. Procopet, and M. Oroian, "Amaranth seed polyphenol, fatty acid and amino acid profile". *Applied Sciences*, vol. 12, no. 4, pp. 2181, 2022.
- [78] A. Ayala-Niño, E. Contreras-López, A. Castañeda-Ovando, J. A. Sánchez-Franco, and L. G. González-Olivares, "Amaranth proteins as a source of bioactive peptides: a review". *International Food Research Journal*, 27(1), 2020.
- [79] V. M. Caselato-Sousa, and J. Amaya-Farfán, "State of knowledge on amaranth grain: a comprehensive review". *Journal of Food Science*, vol. 77, no.4, pp. 94-104, 2012.
- [80] B. Skwaryło-Bednarz, P. M. Stępiak, A. Jamiołkowska, M. Kopacki, A. Krzepiłko, and H. Klikocka, "Amaranth seeds as a source of nutrients and bioactive substances in human diet". *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus*, vol. 19, no.6, pp. 153-164, 2020.
- [81] F. Zhu, "Buckwheat starch: Structures, properties, and applications". *Trends in Food Science & Technology*, vol. 49, pp. 121-135, 2016.
- [82] M. Kreft, "Buckwheat phenolic metabolites in health and disease". *Nutrition Research Reviews*, vol. 29, no.1, pp. 30-39, 2016.
- [83] A. Sturza, A. Păucean, M. S. Chiş, V. Mureşan, D. C. Vodnar, S. M. Man, ..., and S. Muste, "Influence of buckwheat and buckwheat sprouts flours on the nutritional and textural parameters of wheat buns". *Applied Sciences*, vol. 10, no. 22, pp. 7969, 2020.
- [84] S. Dhua, K. Kumar, Y. Kumar, L. Singh, and V. S. Sharanagat, "Composition, characteristics and health promising prospects of black wheat: a review". *Trends in Food Science & Technology*, vol. 112, pp. 780-794, 2021.
- [85] N. T. M. Huong, P. N. Hoa, and P. V. Hung, "Varying amylose contents affect the structural and physicochemical characteristics of starch in mung bean". *International Journal of Food Properties*, vol. 4, no.1, pp. 737-748, 2021.
- [86] D. Hou, L. Yousaf, Y. Xue, J. Hu, J. Wu, X. Hu, ..., and Q. Shen, "Mung bean (*Vigna radiata* L.): bioactive polyphenols, polysaccharides, peptides, and health benefits". *Nutrients*, vol. 11, no. 6, pp. 1238, 2019.
- [87] H. Xu, Q. Zhou, B. Liu, K. W. Cheng, F. Chen, and M. Wang, "Neuroprotective potential of mung bean (*Vigna radiata* L.) polyphenols in alzheimer's disease: a review". *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 69, no.39, pp. 11554-11571, 2021.
- [88] Y. Liu, M. Xu, H. Wu, L. Jing, B. Gong, M. Gou, ..., and W. Li, "The compositional, physicochemical and functional properties of germinated mung bean flour and its addition on quality of wheat flour noodle". *Journal of food science and technology*, vol. 55, no. 12, pp. 5142-5152, 2019.
- [89] Z. Yi-Shen, S. Shuai, and R. FitzGerald, "Mung bean proteins and peptides: nutritional, functional and bioactive properties". *Food & nutrition research*, vol. 62, pp. 1290, 2018.

- [90] K. Ganesan, and B. Xu, “A critical review on phytochemical profile and health promoting effects of mung bean (*Vigna radiata*)”. *Food Science and Human Wellness*, vol. 7, no. 1, pp. 11-33, 2018.
- [91] G. Kapravelou, R. Martínez, G. Perazzoli, C. Sánchez González, J. Llopis, S. Cantarero, ..., and J. M. Porres, “Germination improves the polyphenolic profile and functional value of mung bean (*Vigna radiata* L.)”. *Antioxidants*, vol. 9, no. 8, pp. 746, 2020.
- [92] M. S. Swallah, X. Yang, J. Li, J. K. Korese, S. Wang, H. Fan, ..., and Q. Huang, Q. “The pros and cons of soybean bioactive compounds: an overview”. *Food Reviews International*, pp. 1-28, 2022.
- [93] A. Khosravi, and S. H. Razavi, “Therapeutic effects of polyphenols in fermented soybean and black soybean products”. *Journal of Functional Foods*, vol. 81, pp. 104467, 2021.
- [94] Q. Qi, G. Zhang, W. Wang, F. A. Sadiq, Y. Zhang, X. Li, ..., and Y. Li, Y. “Preparation and antioxidant properties of germinated soybean protein hydrolysates”. *Frontiers in Nutrition*, vol. 9, pp. 866239, 2022.
- [95] J. Luo, Q. Xu, S. Lin, R. Luo, B. Yang, W. Wang, and Y. Wang, Y. “Physicochemical properties of soybean-based diacylglycerol before and after dry fractionation”. *International Food Research Journal*, vol. 27, no. 3, pp. 497-504, 2020.
- [96] J. N. Li, S. M. Henning, G. Thames, O. Bari, P. T. Tran, C. H. Tseng, ..., and Z. Li, “Almond consumption increased uvb resistance in healthy asian women”. *Journal of cosmetic dermatology*, vol. 20, no. 9, pp. 2975-2980, 2021.
- [97] E. Yildiz, and D. Gocmen, “Use of almond flour and stevia in rice-based gluten-free cookie production”. *Journal of food science and technology*, vol. 58, no. 3, pp. 940-951, 2021.
- [98] R. Massantini, and M. T. Frangipane, “Progress in almond quality and sensory assessment: an overview”. *Agriculture*, vol. 12, no. 5, pp. 710, 2022.
- [99] D. Barreca, S. M. Nabavi, A. Sureda, M. Rasekhian, R. Raciti, A. S. Silva, ..., and G. Mandalari, “Almonds (*Prunus dulcis* Mill. DA webb): a source of nutrients and health-promoting compounds”. *Nutrients*, vol. 12, no. 3, pp. 672, 2020.
- [100] M. Bezerra, M. Ribeiro, and G. Igrejas, “An Updated Overview of Almond Allergens”. *Nutrients*, vol. 13, no.8, pp. 2578, 2021.
- [101] J. D. House, K. Hill, J. Neufeld, A. Franczyk, and M. G. Nosworthy, “Determination of the protein quality of almonds (*Prunus dulcis* L.) as assessed by in vitro and in vivo methodologies”. *Food Science & Nutrition*, vol. 7, no. 9, pp. 2932-2938, 2019.
- [102] A. S. R. Ballegaard, J. M. Larsen, P. H. Rasmussen, E. Untersmayr, K. Pilegaard, and K. L. Bøgh, “Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) seeds increase intestinal protein uptake”. *Molecular Nutrition & Food Research*, vol. 65, no. 13, pp. 2100102, 2021.
- [103] M. I. Hussain, M. Farooq, Q. A. Syed, A. Ishaq, A. A. Al-Ghamdi, and A. A. “Hatamleh, Botany, nutritional value, phytochemical composition and biological activities of quinoa”. *Plants*, vol. 10, no. 11, pp. 2258, 2021.
- [104] S. Pathan, and R. A. Siddiqui, “Nutritional composition and bioactive components in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) greens: a review”. *Nutrients*, vol. 14, no. 3, pp. 558, 2022.

- [105] L. Li, G. Lietz, and C. J. Seal, “Phenolic, apparent antioxidant and nutritional composition of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) seeds”. *International Journal of Food Science & Technology*, vol. 56, no. 7, pp. 3245-3254, 2021.
- [106] M. N. Laus, M. P. Cataldi, C. Robbe, T. D'Ambrosio, M. L. Amodio, G. Colelli, ..., and D. Pastore, “Antioxidant capacity, phenolic and vitamin C contents of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) as affected by sprouting and storage conditions”. *Italian Journal of Agronomy*, vol. 12, no. 1, pp. 816, 2017.
- [107] J. M. Nduko, R. W. Maina, R. K. Muchina, and S. K. Kibitok, “Application of chia (*Salvia hispanica*) seeds as a functional component in the fortification of pineapple jam”. *Food Science & Nutrition*, vol. 6, no. 8, pp. 2344-2349, 2018.
- [108] A. Wirkijowska, P. Zarzycki, A. Sobota, A. Nawrocka, A. Blicharz-Kania, and D. Andrejko, “The possibility of using by-products from the flaxseed industry for functional bread production”. *Food Science and Technology*, vol. 118, pp. 108860, 2020.
- [109] X. Zhang, H. Zhou, C. Liu, K. Mai, G. He, and X. Wang, X. “Fishmeal substitution with low-gossypol cottonseed meal in the diet for juvenile turbot (*Scophthalmus maximus* L.): Effects on growth, nutrients utilization and haematological responses”. *Aquaculture Reports*, vol. 24, pp. 101149, 2022.
- [110] F. K. Lücke, K. Tannhäuser, A. Sharma, and V. Fritz, “Development of food products with addition of rapeseed presscake fermented by *Rhizopus*: Sensory properties and consumer acceptance”. *British Food Journal*, vol. 121, no. 10, pp. 2351-2364, 2019.
- [111] E. A. Otondi, J. M. Nduko, and M. Omwamba, “Physico-chemical properties of extruded cassava-chia seed instant flour”. *Journal of Agriculture and Food Research*, vol. 2, pp. 100058, 2020.
- [112] P. Zarzycki, E. Sykut-Domańska, A. Sobota, D. Teterycz, A. Krawęcka, A. Blicharz-Kania, ..., and B. Zdybel, “Flaxseed enriched pasta—chemical composition and cooking quality”. *Foods*, vol. 9, no. 4, pp. 404, 2020.
- [113] A. Albergamo, R. Vadalà, V. Nava, G. Bartolomeo, R. Rando, N. Colombo, ..., and N. Cicero, “Effect of dietary enrichment with flaxseed, vitamin e and selenium, and of market class on the broiler breast meat—Part 1: Nutritional and functional traits”. *Nutrients*, vol.14, no. 8, pp. 1666, 2022.
- [114] F. Yuksel, S. Karaman, and A. Kayacier, “Enrichment of wheat chips with omega-3 fatty acid by flaxseed addition: textural and some physicochemical properties”. *Food Chemistry*, vol. 145, pp. 910-917, 2014.
- [115] A. Szydłowska-Czerniak, S. Poliński, and M. Momot, “Optimization of ingredients for biscuits enriched with rapeseed press cake—Changes in their antioxidant and sensory properties”. *Applied Sciences*, vol. 11, no. 4, pp. 1558, 2021.
- [116] G. Adamczyk, E. Ivanišová, J. Kaszuba, I. Bobel, K. Khvostenko, M. Chmiel, and N. Falendysh, “Quality assessment of wheat bread incorporating chia seeds”. *Foods*, vol. 10, no. 10, pp. 2376, 2021.
- [117] B. Drużyńska, R. Wołosiak, M. Grzebalska, E. Majewska, M. Ciecierska, and E. Worobiej, “Comparison of the content of selected bioactive components and antiradical properties in yoghurts enriched with chia seeds (*Salvia hispanica* L.) and chia seeds soaked in apple juice”. *Antioxidants*, vol. 10, no. 12, pp. 1989, 2021.

- [118] A. M. Salejda, K. Olender, M. Zielińska-Dawidziak, M. Mazur, J. Szperlik, J. Miedzianka, ..., and A. Szmaja, "Frankfurter-type sausage enriched with buckwheat by-product as a source of bioactive compounds". *Foods*, vol. 11, no. 5, pp. 674, 2022.
- [119] P. Vázquez-Villegas, E. Perez-Carrillo, C. Picazo García, and M. Cruz Camacho, "Effect of wheat flour substitution and popped amaranth flour content on the rheological, physicochemical and textural properties of hot-press wheat-oat-quinoa-amaranth composite flour tortillas". *CyTA-Journal of Food*, vol. 19, no. 1, pp. 571-578, 2021.
- [120] J. G. de Oliveira Filho, D. C. dos Santos, M. S. Silva, T. do Prado Carvalho, A. C. Lemes, and M. B. Egea, "Physicochemical, technological, and sensory characteristics of fresh multigrain pasta: a multicomponent mixture experiments approach". *Journal of Food Processing and Preservation*, vol. 45, no. 5, pp. 15393, 2021.
- [121] M. Tamsen, H. Shekarchizadeh, and N. Soltanizadeh, "Evaluation of wheat flour substitution with amaranth flour on chicken nugget properties". *Food Science and Technology*, vol. 91, pp. 580-587, 2018.
- [122] L. Ratnawati, D. Desnilasari, D. N. Surahman, and R. Kumalasari, "Evaluation of physicochemical, functional and pasting properties of soybean, mung bean and red kidney bean flour as ingredient in biscuit". *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 25, no. 1, pp. 012026, 2019.
- [123] D. Dziki, K. Lisiecka, U. Gawlik-Dziki, R. Różyło, A. Krajewska, and G. Cacak-Pietrzak, "Shortbread cookies enriched with micronized oat husk: physicochemical and sensory properties". *Applied Sciences*, vol. 12, no.24, pp. 12512, 2022.
- [124] I. Beitane, and A. Marisheva, "The potential of amaranth as a basic raw material for the production of pasta for a vegan diet". *Applied Sciences*, vol. 13, no.6, pp. 3944, 2023.
- [125] K. C. Miranda-Ramos, N. Sanz-Ponce, and C. M. Haros, "Evaluation of technological and nutritional quality of bread enriched with amaranth flour". *Food Science and Technology*, vol. 114, pp. 108418, 2019.
- [126] T. Farzana, F. B. Hossain, M. J. Abedin, S. Afrin, and S. S. Rahman, "Nutritional and sensory attributes of biscuits enriched with buckwheat". *Journal of Agriculture and Food Research*, vol. 10, pp. 100394, 2022.
- [127] K. Biney, and T. Beta, "Phenolic profile and carbohydrate digestibility of durum spaghetti enriched with buckwheat flour and bran". *Food Science and Technology*, vol. 57, no.2, pp. 569-579, 2014.
- [128] E. Yıldız, "Glutensiz bisküvi üretiminde badem unu ve stevia kullanımı", Doktora tezi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye, 2019.
- [129] E. Alptekin, ve S. Bölek, "Kafeinsiz kahve benzeri içecek üretimi için maş fasulyesi (*Vigna radiata*) kullanımı". *GIDA/The Journal of FOOD*, vol. 45, no. 6, pp. 1227-1236, 2020.
- [130] B. Demir, and N. Bilgiçli, "Utilization of quinoa flour (*Chenopodium quinoa* Willd.) in gluten-free pasta formulation: Effects on nutritional and sensory properties". *Food Science and Technology International*, vol. 27, no. 3, pp. 242-250, 2021.
- [131] K. E. Hernández-Reyes, G. Montemayor-Mora, E. Pérez-Carrillo, J. De la Rosa-Millán, C. García-Villanueva, and S. O. Serna-Saldívar, "Effect of soybean bagasse addition on texture, sensory properties, and protein quality of maize tortillas". *Cereal Chemistry*, vol. 96, no.2, pp. 283-291, 2019.

- [132] E. Şensoy, “Farklı oranlarda kullanılan yağı azaltılmış badem posasının tarhananın fizikokimyasal ve reolojik özelliklerine etkisinin araştırılması”, Yüksek Lisans tezi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Ordu Üniversitesi, Ordu, Türkiye, 2019.
- [133] W. M. D. Priyadarshani, and M. A. M. R. Muthumuniarachchi, “Physico-chemical and sensory quality of mung bean (*Vigna radiata*) enriched stirred yoghurt”. *International Food Research Journal*, vol. 25, no. 5, pp. 2051-2055, 2018.
- [134] E. Yaver, and N. Bilgiçli, “Effect of transglutaminase on quality attributes of noodle enriched with germinated mung bean flour”. *Food*, vol. 45, no. 6, pp. 1097-1108, 2020.
- [135] M. Marengo, I. Amoah, A. Carpen, S. Benedetti, M. Zanoletti, S. Buratti, ..., and S. Iametti, “Enriching gluten-free rice pasta with soybean and sweet potato flours”. *Journal of food science and technology*, 55, 2641-2648, 2018.
- [136] S. Jabeen, A. U. Khan, W. Ahmad, M. U. D. Ahmed, M. A. Ali, S. Rashid, ..., and J. Sharifi-Rad, “Development of gluten-free cupcakes enriched with almond, flaxseed, and chickpea flours”. *Journal of Food Quality*, vol. 2022, 2022.
- [137] R. D. O. Ramos, P. B. Pertuzatti, I. M. Gomes, M. B. Santana Jr, R. D. M. Brito, M. Tussolini, ..., and L. Tussolini, “Chemical and antioxidant characterization, sensory and shelf-life analysis of cereal bars with almonds from pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.)”. *Food Science and Technology*, vol. 41, pp. 368-374, 2020.
- [138] J. Goyat, S. J. Passi, S. Suri, and H. Dutta, “Development of chia (*Salvia hispanica*, L.) and quinoa (*Chenopodium quinoa*, L.) seed flour substituted cookies-physicochemical, nutritional and storage studies”. *Current Research in Nutrition and Food Science Journal*, vol. 6, no. 3, pp. 757-769, 2018.
- [139] J. Jyoti, V. Sangwan, V. Rani, “Formulation, nutritional evaluation and storage stability of gluten free quinoa biscuits for celiac disease patients”. *Annals of Phytomedicine An International Journal*, vol. 11, no. 1, pp. 359-364, 2022.



Düzce University Journal of Science & Technology

Research Article

A New Hybrid Record for The Vascular Flora of Türkiye: *Fagus x taurica* Popl.

 Neval GÜNEŞ ÖZKAN ^{a,*},  Turgay BİRTÜRK ^a,  Necmi AKSOY ^a,  Ahmet AYTEĞİN ^a

^a Orman Mühendisliği Bölümü, Orman Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: nevalgunes@duzce.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1381503

ABSTRACT

The presence of *Fagus x taurica* Popl., a hybrid of two *Fagus* L. taxa known to be naturally distributed in Türkiye, has been detected in the natural deciduous-mixed forests of Bolu. Specimens were collected from Kökez Old Growth Fir Forest Nature Reserve Area, Bolu Kale Fındığı Nature Reserve Area, and Yedigöller National Park in Bolu province, northwest Türkiye. After the identification, specimens were compared with materials in the international herbaria. As a result of the examinations, the morphological features seen to be different from its parents are as follows: Young shoots are grayish-green in color, leaves have 7-13 pairs of lateral veins, are ovate or obovate, and their margins are dentate, and the cupula scales are subulate. It resembles *F. orientalis* Lipsky in terms of leaf characteristics and *F. sylvatica* L. in terms of cupula characteristics. In this article, a botanical description of the taxon, differences from the main species, distribution maps, and photos are given. *Fagus x taurica* is a new hybrid record for the vascular flora of Türkiye. With this new record, the number of *Fagus* sp. taxa in the flora of Türkiye has risen to 3.

Keywords: Crimean beech, Fagaceae, Forest biodiversity, New records, Northern Türkiye

Türkiye Vasküler Florası İçin Yeni Bir Hibrit Kayıt: *Fagus x taurica* Popl.

Öz

Türkiye'de doğal olarak yayılış gösterdiği bilinen iki *Fagus* L. türünün bir melezi olan *Fagus x taurica* Popl.'nin varlığı Bolu'nun doğal geniş yapraklı ormanlarında tespit edilmiştir. Örnekler Kuzeybatı Türkiye'nin Bolu ilindeki Kökez Çok Yaşlı Gökmar Ormanı Tabiatı Koruma Alanı, Bolu Kale Fındığı Tabiatı Koruma Alanı ve Yedigöller Milli Parkı'ndan toplandı. Tanımlamanın ardından örnekler uluslararası herbaryumdaki materyallerle karşılaştırıldı. İncelemeler sonucunda ebeveynlerinden farklı olarak görülen morfolojik özellikler şöyledir: Genç sürgünler grimsi-yeşil renkte, 7-13 çift yan damara sahip yapraklar yumurtamsı veya ters yumurtamsı şekilde ve kenarları dişli, kupula pulları biz şekindedir. Yaprak özellikleri bakımından *F. orientalis* Lipsky'e, kupula özellikleri bakımından ise *F. sylvatica* L.'ya benzemektedir. Bu makalede taksonun botanik tanımı, ana türlerden farklılıkları, yayılış haritaları ve fotoğrafları verilmektedir. *Fagus x taurica* Türkiye vasküler florası için yeni bir hibrit kayıttır. Bu yeni kayıtla birlikte *Fagus* cinsine ait Türkiye florasındaki takson sayısı 3'e yükselmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kırım kayını, Fagaceae, Orman biyoçeşitliliği, Yeni kayıt, Kuzey Türkiye

I. INTRODUCTION

The genus *Fagus* L. sp. is one of the 8 genera of the Fagaceae family and is represented by 13 taxa in the world [1, 2, 3]. It is known that two taxa of this genus, *Fagus orientalis* Lipsky and *Fagus sylvatica* L. are distributed in Türkiye [4, 5].

Fagus orientalis (Oriental beech) which naturally spreads in the east of the Balkan Peninsula (Bulgaria, Romania, Greece), Crimea, Caucasus, and Northern Iran, has a wider distribution in Türkiye [4, 6]. It establishes pure or mixed stands with coniferous and other deciduous species in Thrace, Istranca Mountains, Kaz Mountains, Uludağ, and Marmara Region along the Black Sea coast. It also moves to the south and mixes with plants of Mediterranean origin along with some Euro-Siberian origin plants like itself in the Amanos Mountains [7].

Fagus sylvatica (European beech), which naturally spreads in Western-Central Europe, the Balkans, the south of Russia, and the central part of Moldova, enters Türkiye from the Balkans and shows a limited distribution in the Thrace forests [8, 9, 10]. However, there are some local records from Ilgaz Mountains/Kastamonu [11] and Kavaklı Nature Reserve Area/Karabük [12]. A clear delimitation of the area in the Balkans is very difficult, as introgressive hybridization occurs between the Oriental beech and the European beech [6].

Although these two species are phylogenetically very close to each other, Poplawska, in her study on morphological variations of beeches growing in Crimea, proposed a new hybrid species, *Fagus x taurica* Popl., which has common features of *Fagus orientalis* and *Fagus sylvatica* [13]. This hybrid species is also included in the world Fagales checklist published in 1998 [8]. It was indicated that, in the central-east and east regions of the Rhodope Mountains in Bulgaria and Greece, extensive hybridization zones are observed between Oriental and European beeches [14, 15]. In addition, the results obtained in a study comparing the leaf morphologies of *Fagus orientalis* and *Fagus sylvatica* revealed that there was no significant morphological difference in terms of leaves [16].

The taxonomic position of the species resulting from this hybridization has long been controversial. While the Balkan beech (*Fagus moesiaca* (K.Malý) Czeczott) is considered by some scientists as a hybrid between *Fagus orientalis* and *Fagus sylvatica*, which is close to *Fagus sylvatica*; some consider it to be a transitional form in which one of the two species is dominant. While some consider it an ecotype, others consider it the same species as the Crimean beech (*Fagus x taurica*). Considered a subspecies of *Fagus sylvatica* in some articles, *Fagus moesiaca* now is a synonym of *Fagus x taurica* [1, 6, 14, 16, 17, 18, 19, 20].

In this study, we report the presence in Türkiye of *Fagus x taurica*, a hybrid species between *Fagus orientalis* and *Fagus sylvatica*, which is common in Europe and Crimea.

II. MATERIAL AND METHODS

Fagus x taurica samples were collected during the floristic investigations in Kökez Old Growth Fir Forest Nature Reserve Area, Bolu Kale Fındığı Nature Reserve Area, and Yedigöller National Park in Bolu province, in July–October 2020. The collected samples were dried in accordance with the herbarium rules and turned into herbarium samples.

Herbarium specimens of *F. orientalis*, *F. sylvatica*, and *F. x taurica* (listed in the examined specimens part) were used for comparative investigation. After identification by using literature about the taxon [6, 8, 13], specimens were compared with materials in the herbaria of B (Botanical Garden and Botanical Museum in Berlin), BR (Meise Botanic Garden Herbarium), DUOF (Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi Herbaryumu), E (Herbarium of Royal Botanic Garden of Edinburgh), L (Leiden Herbarium),

MW (Herbarium Universitatis Mosquensis), NEU (Susse Herbar, Universite De Neuchatel). After that specimens were deposited in the Herbarium of the Düzce University Forestry Faculty (DUOF).

The morphological features of the plant samples were examined and compared with each other. Leaf, fruit, and bark features were photographed. The morphological differences between the three taxa were defined by both measurements and literature and an identification key was created.

III. RESULTS AND DISCUSSION

A hybrid of *Fagus* sp. has been recorded for Türkiye. Therefore, it is necessary to present a new identification key for these 3 taxa that naturally spread in Türkiye.

Fagus x taurica Popl., Trudy Izuch. Zapov. Otdela Okhr. Prir. Glavnauki 2: 84 (1925) [19], (Fig. 1).

Hybrid Formula: *F. orientalis* x *F. sylvatica*

Lectotype: Described from the Crimean National Forest. Type in the Herbarium of the National Forest.

Synonyms: *Fagus sylvatica* f. *moesiaca* K.Malý in P.F.A.Ascherson & K.O.R.Graebner, Syn. Mitteleur. Fl. 4: 438 (1911), *Fagus sylvatica* f. *dawycki* Hesse, Mitt. Deutsch. Dendrol. Ges. 21: 366 (1912), *Fagus x moesiaca* (K.Malý) Czeczott, Ann. Soc. Dendrol. Pologne 5: 52 (1933), *Fagus sylvatica* subsp. *moesiaca* (K.Malý) Szafer, Polska Akad. Umiejtn. Rozpr., Wydz. Mat–Przyr., B, Nauki Biol. 71: 69 (1935), *Fagus x moesiaca* f. *leucodermis* Korac, Nau?ni Skup. Od. Prir.–Mat. Nauka 1(1), 33 (1974). *Fagus x moesiaca* var. *dawycki* (Hesse) P.D.Sell, Fl. Gr. Brit. Ireland 1: 685 (2018).



Figure 1. General appearance of *Fagus x taurica*: (a) habitus, (b) bark (c) young shoot,(d) leaf

Description: Bark smooth and darker grey from *F. orientalis*. Pseudo-terminal buds to 1.7–2.2 cm. Young shoots greyish–green, pubescent. Leaves broadly elliptic to obovate or ovate, acuminate, 8.1–11.7x4.2–7.3 cm, with (–7) 9–11 (–13) pairs of veins, cuneate or rounded at base, margin prominently dentate, glabrous on both surfaces except for midrib and primary veins of the lower surface, which are long silky–pilose; petiole pubescent, 0.3–1.1 cm, stipules 2.3– 3.5 mm, caducous. Involucral scales subulate; peduncles to 3.5 cm, pubescent. Nuts 1.2–2.2 cm (Morphological values were measured by the authors on herbarium samples DUOF 9546!, 9547!, 9548!, 9549! 9550!).

A deciduous, natural hybrid tree taxon between *F. orientalis* and *F. sylvatica*. The leaves are closer to the ancestor *F. orientalis*, but they are closer to the ancestor *F. sylvatica* in terms of fruit status. They lack the spatulate bracts on the lower part of the cupula, which are specific to *F. orientalis* [21]. The differences of this taxon from the main species are given in Table 1 and Figure 2.

Table 1. Morphological differences between *Fagus x taurica* and its parents.

Character / Trees	<i>Fagus orientalis</i>	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Fagus x taurica</i>
Young shoot	reddish–brown	reddish–brown	greyish–green
Leaves	obovate	ovate	has both ovate and obovate leaves
Lateral veins	8–13 pairs	5–8 pairs	(–7) 9–11 (–13) pairs
Leaf margin	entire or slightly undulate	undulate	dentate
Cupule scales	two kinds of cupule scales: upper ones subulate, lower spatulate bracts	scales of cupule uniform, subulate	scales of cupule uniform, subulate

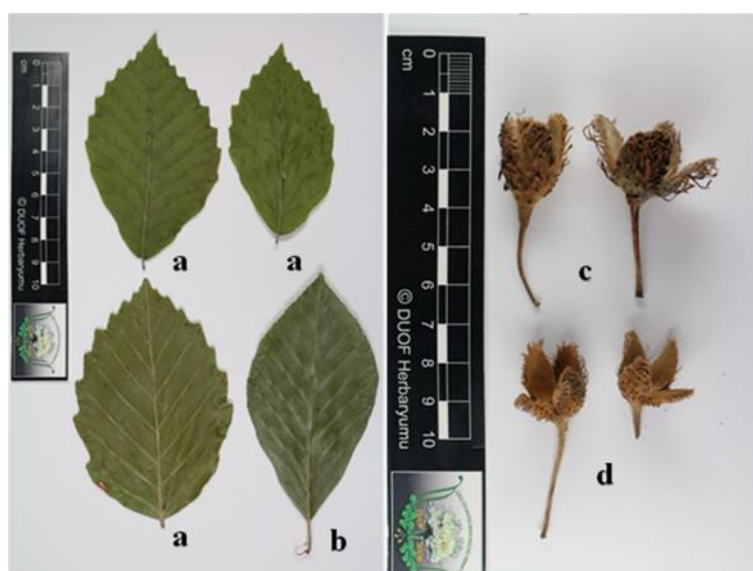


Figure 2. (a) *Fagus x taurica* leaves (b) *Fagus orientalis* leave, (c) *Fagus x taurica* cupule, (d) *Fagus orientalis* cupules

1. Leaves ovate, with 5–8 pairs of lateral veins, margin undulate; scales of cupule all alike, subulate.....*Fagus sylvatica*
1. Leaves ovate or obovate, with 8–13 pairs of lateral veins margin entire or dentate
2. Leaves obovate, margin entire or slightly undulate; scales of cupule two kinds, upper ones subulate, lower spatulate bracts.....*Fagus orientalis*
2. Leaves ovate or obovate, margin dentate; all scales of cupule subulate.....*Fagus x taurica*

Distribution: TÜRKİYE: A3–Bolu: Kökez Old Growth Fir Forest Nature Reserve Area, at elevation of 1400–1420 m, in the fir– beech forest, 10.07.2020, Leg.: N. Güneş Özkan (3610), T. Birtürk & A. Ayteğin (DUOF 9547), Det. N. Aksoy; A3–Bolu: Bolu Kale Fındığı Nature Reserve Area, at elevation of 1420 m, in the beech–fir and other deciduous-mixed forest, 16.07.2020, Leg.: N. Güneş Özkan (3863), T. Birtürk & A. Ayteğin (DUOF 9549), Det. N. Güneş Özkan; A3–Bolu: Yedigöller National Park, near Büyükgöl, at elevation of 790 m, in the fir–beech forest, 26.07.2020, Leg.: N. Güneş Özkan (4181), (DUOF 9550), Det. N. Güneş Özkan; A3–Bolu: Bolu Kale Fındığı Nature Reserve Area, at elevation of 1400 m, in the beech–fir forest, 16.07.2020, Leg.: N. Güneş Özkan (3730), T. Birtürk & A. Ayteğin (DUOF 9546), Det. N. Aksoy; A3–Bolu: Kökez Old Growth Fir Forest Nature Reserve Area,

at elevation of 1400 m, in the fir–beech forest, 12.11.2020, Leg.: N. Güneş Özkan (3782), N. Aksoy & A. Ayteğin (DUOF 9548), Det. N. Aksoy (Fig. 3 and 4).

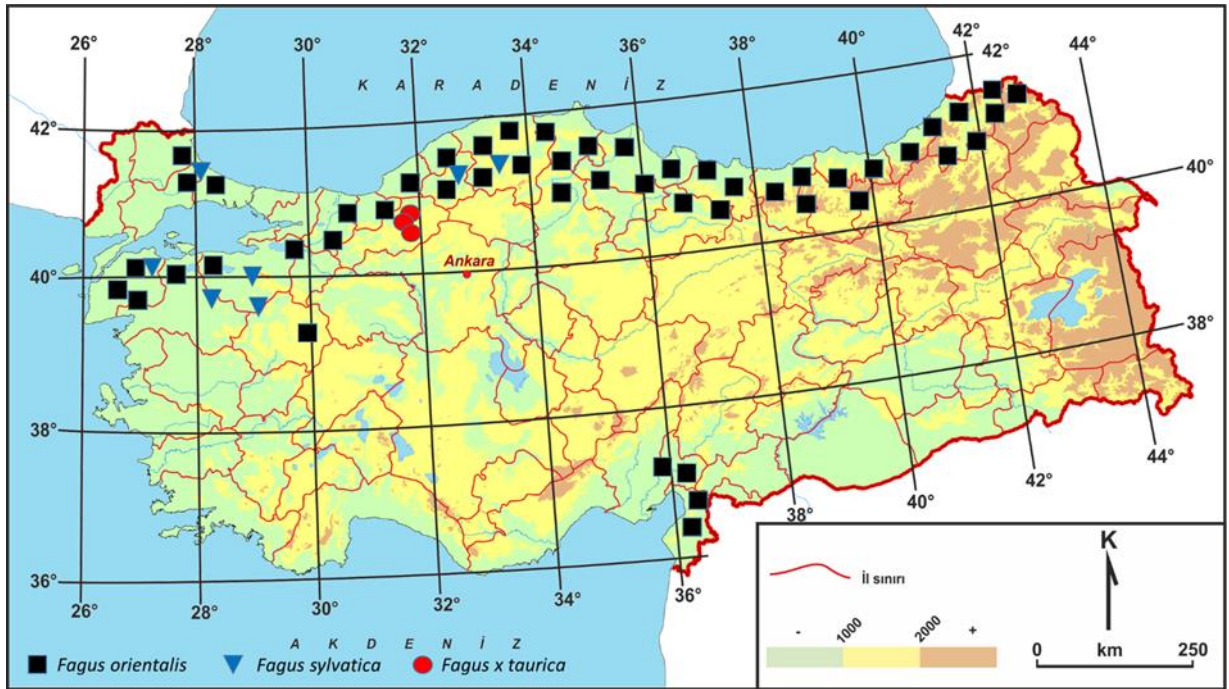


Figure 3. Distribution of *Fagus* sp. in Türkiye [22, 11, 12, 23, 24].

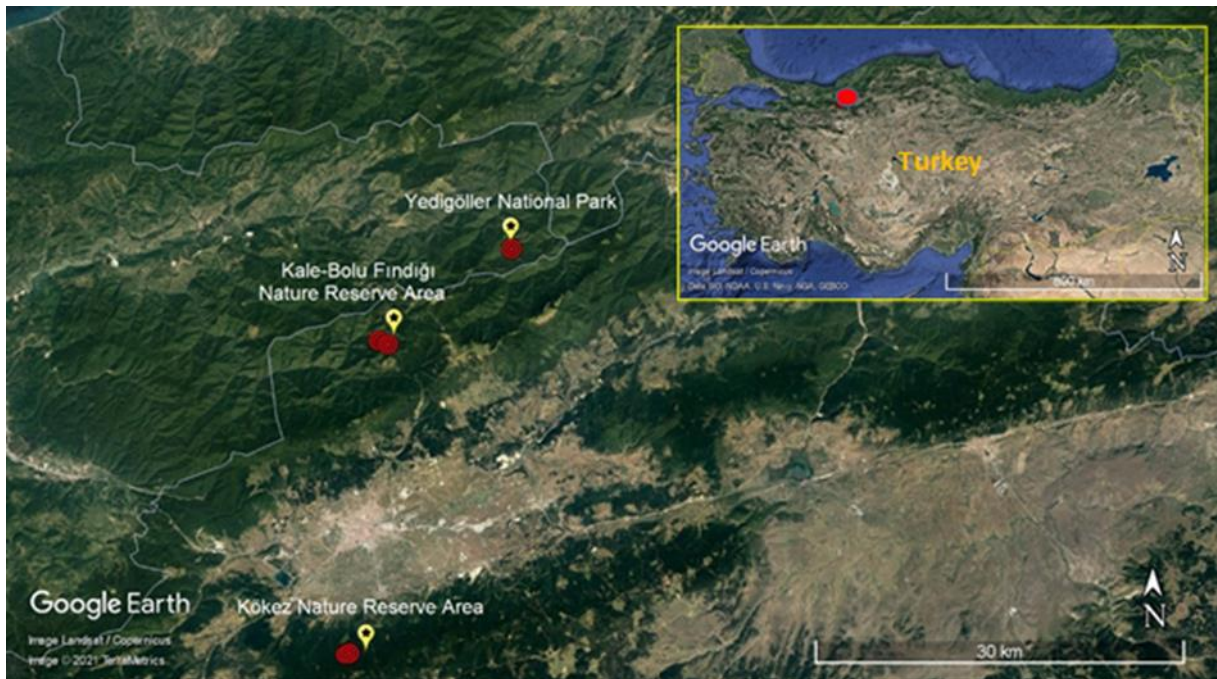


Figure 4. Distribution of *Fagus x taurica* in Bolu district.

Fagus x taurica which is the Euro–Siberian element, has been recorded in beech–fir mixed forest habitats. A large number of adult trees were found. At the same time, *F. orientalis* individuals in which hybridization is in the formation stage were also encountered.

In its habitat, this hybrid species is accompanied by species such as *Abies nordmanniana* (Steven) Spach subsp. *equi–trojani* (Asc. & Sint. ex Boiss.) Coode & Cullen, *Fagus orientalis*, *Rubus canescens* DC.

var. *canescens*, *Daphne pontica* L. subsp. *pontica*, *Ilex colchica* Pojark., *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn, *Cardamine impatiens* L. subsp. *impatiens*, *Helleborus orientalis* Lam., *Oxalis acetosella* L. in Kökez Old Growth Fir Forest Nature Reserve Area. *Carpinus betulus* L., *Corylus colurna* L., *Acer platanoides* L., *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. subsp. *iberica* (Steven ex M.Bieb.) Krassiln., *Rhododendron ponticum* L., *Lonicera caucasica* Pall., *Euonymus europeaus* L., *Euonymus latifolius* Mill. subsp. *cauconis* Coode & Cullen, *Sedum pallidum* M.Bieb., *Cephalanthera rubra* (L.) Rich., *Calystegia sylvatica* (Kit.) Griseb., *Trachystemon orientalis* (L.) G. Don, *Hypericum perforatum* L. are found together with this species in Bolu Kale Fındığı Nature Reserve Area.

It is normal to see *Fagus x taurica* in our country, which is a hybrid of two taxa naturally spread in Türkiye and is known to hybridize, and its existence is proven by this article.

IV. CONCLUSION

Fagus x taurica is a new hybrid record for the vascular flora of Türkiye. With this new record, the number of *Fagus* L. sp. taxa in the flora of Türkiye has risen to 3. *Fagus x taurica* is a rare species for Türkiye with this narrow distribution. The conservation status of this species should be listed as Critically Endangered (CR) according to the IUCN categories [25].

Because the distribution area of this hybrid tree, whose existence has just been discovered, has the status of a protected area where its use is regulated by the relevant legislation, only scientific and educational studies are allowed. However, the population, health, and reproductive status of the individuals of these hybrid trees in their distribution areas should be determined and monitored.

Some of the examined *F. sylvatica* herbarium specimens; reflect *F. sylvatica* in terms of leaf characteristics and *F. orientalis* in terms of the cupula, or it creates a question mark when there is no cupula in the sample. Because there is a very high variation in leaf characteristics between these two taxa, due to the cupula's lack of some herbarium specimens identified as *F. orientalis*, we believe that these specimens may be *F. x taurica*.

For this reason, herbarium records should be examined comprehensively and local flora studies should be carried out to determine certainly the distribution areas of *F. x taurica* in Türkiye. We think that the species is distributed in more areas than expected due to the high probability of hybridization, especially in areas where the distributions of the two main species overlap.

SPECIMENS EXAMINED

Fagus x taurica: CRIMEA: Republic of Crimea, Beech Forests between Alushta and Bukovel, Tauria, Leg: Poplawska (3385), fl. 07.05.1926, fr. 25.09.1926 (MW0606919!). South slopes of Crimea, Nikita Village, alt. 1000 m., forest, 19.07.1953, Leg. B.S. Govorulin (MW0606917!). Crimea, 15.08.1955, 800 m., Leg. Sergei Nikolaevich Tyuremnov (MW0606923!). Col. J' Ang., Crimea (URSS), Leg. Leon Delvosalle, July, 1978, 400 m., (BR0000024645485!). GREECE: N side of Mt. Chortiatis, above Ajos Ioannis (Greece, Makedonia, Nomos & Eparchia Thessalonikis), 40° 35' 45''N 23° 06' 40'' E, alt. 900–1000 m, mixed *Fagus Castanea* forest with clearings rich in *Pteridium aquilinum*, on calcareous rocks, July 23rd, 1994, Leg. Th –Taus, M. Palm & Ch. Schiers no 20980, Det. Th.Raus (BR0000027282816V!). ROMANIA: Comm. Racova: in silva Runc dicta. Alt. cca 400 m s.m.–10. VI. 1973. Leg. et. det. N. Barabaş & D. Mititelu. (L1553853!). TÜRKİYE: A3–Bolu: Kökez Old Growth Fir Forest Nature Reserve Area, at elevation of 1400–1420 m, in the fir– beech forest, 10.07.2020, Leg.: N. Güneş Özkan (3610), T. Birtürk & A. Ayteğın (DUOF 9547), Det. N. Aksoy. A3–Bolu: Bolu Kale Fındığı Nature Reserve Area, at elevation of 1420 m, in the beech–fir and other deciduous–mixed forest, 16.07.2020, Leg.: N. Güneş Özkan (3863), T. Birtürk & A. Ayteğın (DUOF 9549), Det. N. Güneş Özkan. A3–Bolu: Yedigöller National Park, near Büyükgöl, at elevation of 790 m, in the fir– beech forest, 26.07.2020, Leg.: N. Güneş Özkan (4181), (DUOF 9550), Det. N. Güneş Özkan. A3–Bolu: Bolu Kale Fındığı Nature Reserve Area, at elevation of 1400 m, in the beech–fir forest, 16.07.2020, Leg.: N.

Güneş Özkan (3730), T. Birtürk & A. AYTEĞİN (DUOF 9546), Det. N. Aksoy. A3–Bolu: Kökez Old Growth Fir Forest Nature Reserve Area, at elevation of 1400 m, in the fir–beech forest, 12.11.2020, Leg.: N. Güneş Özkan (3782), N. Aksoy & A. AYTEĞİN (DUOF 9548), Det. N. Aksoy. A2(A)–Bursa: Uludağ, 7.1944, Leg. S. Kuntay, Det. N. Aksoy (ISTF4548!). A1–Kırklareli: Demirköy, Yeniceköy, Velika Köprüsü, Quercus ormanı, 500 m., 8.7.1958, Leg. H. Demiriz, Det. N. Aksoy (ISTF17407!). A3–Bolu: Bolu Dağları, Seymenler, ormanaltı, 19.05.1962, Leg. B. Tutel, Det. N. Aksoy (ISTF18534!).

Fagus sylvatica: TÜRKİYE: A4–Karabük: Yenice Ormanları, Kavaklı Tabiatı Koruma Alanı, karışık yapraklı orman, 1070 m. 41° 10' 60''N 32° 24' 47'' E, Leg. A. AYTEĞİN 2592, Det. N. Aksoy (DUOF8349!). C6–Adana: Osmaniye, Gavur Dağı, *Abies cilicica* ile ve homojen bük, Exp. N., 1900 m., 7.1942, Leg. K. Mihçioğlu, Det. N. Aksoy (ISTF1985!). C6–Adana: Osmaniye, Gavur Dağı, *Abies cilicica* ile ve homojen bük, Exp. N., 1900 m., 7.1942, Leg. K. Mihçioğlu, Det. N. Aksoy (ISTF1985!). DEUTSCHLAND (DE), Niedersachsen, Bad Iburg, 52° 09' 34.20''N 8° 01' 19.42'' E, 2013–01–01, Leg. W. Bleeker WB–005, Det. W. Bleeker, (B 10 0553983!). SUISSE: Canton: Neuchâtel. District: Le Locle. Commune: Les Brenets. Localite: Forêt., 47° 04' 09,15 ''N 6° 42' 11.57'' E, 800 m, Forêt, W. McNeely & M. Hallal., (NEU000099977!).

Fagus orientalis: GEORGIA: Caucasus, Georgia, districtus Lagodekhi, in valle fluvii Lagodekhis–zkhali, alt. 1300 m. 19.06.1971, E. E. Gogina, (E00401536!). GREECE: Chalkidiki, NO Polygyros, 18.05.2019, Krautfluren in Eichenwald, 866 m, GK 17.05.77, 40° 24' 21''N 23° 29' 00'' E, Leg. E. & R. Willing, Det. E. Willing. (B 10 1086562!). IRAN: Mazanderan, Elburz Mts., Golban Forest Mixed deciduous forest of *Quercus*, *Fagus*, *Carpinus*, etc., 1200 m, Coll. David Walton, 31.08.1967, No. 242, (E00400275!). Caucasus magnus: Osetia Borealis, distr.bet", dictum 45 km ad australem et occidentem ab urbe ordzhonikidze, in meridie vici Karmadon. Alt. 2100 m.s.m. 31.07.1987, Det. J. Cuba, (E00401542!). TÜRKİYE: A4 Bartın: Ulus, Arıt yolu, Şahin Köyü üstü, 775 m., Leg. B. Tunçkol 4168, Det. B. Tunçkol, (DUOF7281!). A3 Düzce: Yığılca, Yığılca Bal Üretim Ormanı, 998 m, Leg. E.A. Yıldırım 1081, Det. E.A. Yıldırım, (DUOF9057!). A3 Düzce: Beçiyörükler, Düzce Üniversitesi Konuralp kampüsü, Orman Fakültesinin üst tarafı, 250 m., Leg. M. Bülbül 1172, Det. M. Bülbül, (DUOF5851!). A8 Artvin: Northeast Anatolia; above Murgul; above Damar. Ziyaretçi Dağ. 41° 14' 25.8''N 041° 35' 49.8'' E, 1491 m., Habitat: Degraded vegetation on steep mountain slopes above copper mine, with *Picea orientalis* and *Sorbus aucuparia* codominant species. 27. 09.2005., Leg. B. Güner, S. Knees, M. Gardner, P. Jones, D. Luscombe, S. Çelik, İ. Güner, G. Eksi, B. Kusoglu, (E00210447!). ENET Coll. No. 57, 25.09.2008, 40° 51' 59''N 40° 56' 34'' E, 1562 m, Kackar Mountains to ENET WP5 1 km north of Cat Village Margin of *Picea orientalis* woodland, (E00318857!). Kastamonu: Ilgaz Dag, 5000 ft., co–dom. With *Abies*, Davis 21724 A, 09.06.1954, Det. F. Yaltrık, 1964, (E00401501!). A6 Samsun: Borabay, 1000 m, Scrub, and pine. Bushy tree. 31.07.1967, Tobey 2292, 09.06.1954, (E00401543!). Adana distr., bahçe (Amanus), Dildil Dğ between Gökçayır & Atlık yayla, Ira with *Carpinus orientalis*, *Buxus sempervirens* & some *Abies cilicica*, Coll. P. H. Davis, 16443, 26.08.1949, Det. F. Yaltrık, 1964, (E00401552!). Türkiye, Eskişehir, Türkmenbaba dağ, Kalabak deresi, 12.06.1971, 1400–1600 m, Leg. T. Ekim 489, Det. T. Ekim, (E00401533!).

ACKNOWLEDGEMENTS:

Some of the findings in this study were obtained within the scope of the R&D projects supported by Doğa Koruma ve Milli Parklar Bolu Şube Müdürlüğü. We thank to Herbarium curator Prof. Dr. Osman EROL for his support in examining the specimens in the ISTF herbarium.

V. REFERENCES

[1] Plants of the World Online (POWO). (2024, January 10). [Online]. Available: <https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:30048723-2>

- [2] The International Plant Names Index (IPNI). (2021, September 09). [Online]. Available: <https://ipni.org/n/358603-1>
- [3] Catalogue of Life (COL). (2021, June 17). [Online]. Available: <https://www.catalogueoflife.org/?taxonKey=4J87>
- [4] F. Yaltırık, “Fagus L.”, in *Flora of Türkiye and the East Aegean Islands* (ed. PH Davis), Edinburgh University Press. Edinburgh, 1982, vol. 7, pp. 657–659.
- [5] A. Güner, S. Aslan, T. Ekim, M. Vural and M.T. Babaç (eds.), *Türkiye Bitkileri Listesi (Damarlı Bitkiler)*, 1st ed. İstanbul, Türkiye: Nezahat Gökyiğit Botanik Bahçesi ve Flora Araştırmaları Derneği Yayını, 2012.
- [6] K. Browicz and J. Zielinski, “Fagus orientalis” in *Chorology of Trees and Shrubs in South-West Asia and Adjacent Regions*, Institute of Dendrology, Warszawa-Poznan: Polish Academy of Sciences, Polish Scientific Publishers, 1982, vol. 8, pp. 32–33.
- [7] N. Aksoy, G.N. Tuğ and Ö. Eminağaoğlu, “Türkiye’nin vejetasyon yapısı”, *Türkiye’nin Doğal–Egzotik Ağaç ve Çalıları* (ed. by Ü Akkemik), Ankara, Türkiye: Orman Genel Müdürlüğü Yayınları, 2018. pp. 44–53.
- [8] R. Govaerts and D.G. Frodin, *World checklist and bibliography of Fagales*, 1st ed. Royal Botanic Gardens, Kew, 1998.
- [9] G. Postolache and D. Postolache, “Genetic resources of beech (*Fagus sylvatica*) in the Republic of Moldova”, *Revista Botanică*, vol. 3, no. 3, pp. 80–89, 2011.
- [10] H. Yılmaz, “Fagaceae”, *Türkiye’nin Bütün Ağaçları ve Çalıları* (ed. by Ü Akkemik), İstanbul, Türkiye: Türkiye İş Bankası Kültür Yayınları, 2020, ss. 627–659.
- [11] D. Aydınöz and F. İmat, “Türkiye’de Avrupa Kayını (*Fagus sylvatica*)’nın Yeni Bir Yayılış Alanı: Ilgaz Dağları”, *Coğrafya Dergisi*, c. 27, ss. 38–45, 2013.
- [12] A. Ayteğin, N. Aksoy, S. Aslan, N. Güneş Özkan and Y. Zorlu, “Kavaklı bölgesindeki (Yenice–Karabük) doğal yaşlı orman meşcerelerinin florası”, *OT Sistematik Botanik Dergisi*, c. 26, s. 1, ss. 123–172, 2019.
- [13] H. Poplawska, “Die Buche in der Krim und ihre Variabilität”, *Österreichische Botanische Zeitschrift*, vol. 77, no. 1, pp. 23–42, 1928.
- [14] C. Vettori, D. Pafetti, L. Paule and R. Giannini, “Identification of the *Fagus sylvatica* L. and *Fagus orientalis* L. species and intraspecific variability”, *Forest Genetics*, vol. 10, no. 3–4, pp. 223–230, 2004.
- [15] G. Kandemir and Z. Kaya, “Technical Guidelines for Genetic Conservation and Use for Oriental Beech (*Fagus orientalis*)”, *EUFORGEN Bioversity International*, Rome, Italy, pp. 1–6, 2009.
- [16] E. Ciocîrlan, “Comparative morphological analyses in marginal beech populations”, *Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering, Serie II*, vol. 7 (56), no. 1, pp. 7–12, 2014.
- [17] L. Paule, “Gene conservation in European beech (*Fagus sylvatica* L.)”, *Forest. Genetics*, vol. 2 no. 3, pp. 161–170, 1995.

- [18] D. G6m6ry, L. Paule, R. Brus, P. Zhelev, Z. Tomovic and J. Gracanŝ, “Genetic differentiation and phylogeny of beech on the Balkan peninsula”, *Journal of Evolutionary Biology*, vol. 12, no. 4, pp. 746–754, 1999.
- [19] G.E. Kandemir, Y. Tayanç, B. Çengel and E. Velioglu, “Türkiye’de yayılış gösteren kayın (Fagus) populasyonlarının molek6ler filogenisi”, *Ormancılık Araştırma Dergisi*, c. 1, s. 4A, ss. 69–79, 2016.
- [20] D. G6m6ry, L. Paule and V. Maçejovský, “Phylogeny of beech in western Eurasia as inferred by approximate Bayesian computation”, *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, vol. 87, no. 2, pp. 1-11, 2018.
- [21] T. Christian, (2021, June 17). *International Dendrology Society Trees and Shrubs Online*, [Online]. Available: <https://treesandshrubsonline.org/articles/fagus/fagus-x-aurica/>
- [22] D. Aydın6z6, “Avrupa Kayını (Fagus sylvatica)’nın Yıldız (Istranca) Dağlarındaki Yayılış Alanları”, *Coğrafya Dergisi*, c. 1, ss. 46–56, 2008.
- [23] Turkish Plants Data Service (TUBIVES). (2021, Eyl6l 03). [Çevrimiçi]. Erişim: http://194.27.225.161/yasin/tubives/index.php?sayfa=hizli_ara
- [24] European Forest Genetic Resources Programme (EUFORGEN). (2021, September 03). [Online]. Available: https://www.euforgen.org/fileadmin/templates/euforgen.org/upload/Documents/Maps/PDF/Fagus_orientalis.pdf
- [25] International Union for Conservation of Nature (IUCN). (2022, July). *Guidelines for using the IUCN Red List Categories and Criteria, Version 15.1. Prepared by the Standards and Petitions Subcommittee* [Online]. Available: <http://www.iucnredlist.org/documents/RedListGuidelines.pdf>



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Mantıksal Regresyon, Frekans Oranı ve ArcGIS Pro Suitability Model ile Yalova-Çınarcık Bölgesinin Heyelan Duyarlılık Analizi

Zeliha TAŞ^{a,*}, Özkan CORUK^b

^a Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, TÜRKİYE

^b Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: tasszeliha@gmail.com

DOI: 10.29130/dubited.1265598

Öz

Bu çalışmada Türkiye'nin batısında yer alan Yalova-Çınarcık bölgesinde, yaklaşık 11 km² olan inceleme alanında heyelan duyarlılık analizi yapılmıştır. Bölgede geniş yayımlı 20 heyelan bölgesi incelenmiştir. Mantıksal Regresyon, Frekans Oranı ve ArcGIS Pro Uygunluk Modeli ile heyelan duyarlılık analizi yapılmıştır. Verilerin %80'i analiz, %20'si test için kullanılmıştır. Analizin doğruluğunu test etmek için Alıcı İşletim Karakteristik (Receiver Operating Characteristic-ROC) eğrisi ve Eğrinin Altında Kalan Alan (Area Under the Curve-AUC) kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda Mantıksal Regresyon yöntemine göre inceleme alanının %5,41'i çok düşük, %10,32'si düşük, %31,22'si orta, %24,98'i yüksek ve %28,05'i çok yüksek heyelan duyarlılık sınıfındadır ve AUC sonucu ise %78,8'dir. Frekans Oranı için ise inceleme alanının %30,8'i çok düşük, %14,48'i düşük, %4,5'i orta, %24,02'si yüksek ve %26,2'si çok yüksek heyelan duyarlılık sınıfında olup AUC sonucu %64,4'tür. ArcGIS Pro Uygunluk Modeli için ise %4,42'si çok düşük, %20,57'si düşük, %27,9'u orta, %23,42'si yüksek ve %23,67'si çok yüksek ve AUC değeri %69,7'dir. Bu çalışmada elde edilen duyarlılık analizi verileri ile yüksek ve çok yüksek duyarlılık sınıfındaki bölgeler için gerekli önlemlerin ve bölgede yapılacak arazi planlaması için bu sonuçların dikkate alınması önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Heyelan Duyarlılık Haritası, Mantıksal Regresyon, Frekans Oranı, ArcGIS Pro Suitability Modeli, Yalova, Çınarcık

Landslide Susceptibility Analysis of Yalova-Çınarcık Region with Logistic Regression, Frequency Ratio, and ArcGIS Pro Suitability Model

ABSTRACT

In this study, landslide susceptibility analysis was carried out approximately 11 km² in Yalova-Çınarcık region, which is located in the west of Turkey. 20 landslide areas that are spread were examined. Landslide susceptibility analysis was performed with Logistic Regression, Frequency Ratio and ArcGIS Pro Suitability Model. 80% of the data was used for analysis and 20% for testing. The Receiver Operating Characteristic (ROC) curve and Area Under Curve (AUC) were used to test the accuracy of the analysis. As a result of the analysis, in the study area, according to the Logistic Regression method, 5,41% very low, 10,32% is low, 31,22% is medium, 24,98% is high and 28,05% is very high landslide susceptibility classes and AUC result is 78,8%. Frequency Ratio, 30,8% very low, 14,48% low, 4,5% medium, 24,02% high, and 26,2% very high landslide susceptibility classes and the AUC result was 64,4%. ArcGIS Pro Suitability Model, 4,42% very low, 20,57% low, 27,9% medium, 23,42% high, and 23,67% very high landslide susceptibility classes and AUC of 69,7%. According to the result of this landslide susceptibility analysis, it is recommended to take the necessary precautions for the regions that are in high and very high susceptibility classes and to consider these results for the land planning to be made in the region.

Keywords: Landslide Susceptibility Mapping, Logistic Regression, Frequency Ratio, ArcGIS Pro Suitability Model, Yalova, Çınarcık

I. GİRİŞ

İnsanlığın ilk zamanlarından beri, insan doğal afetlerle birlikte yaşamaktadır. Geçmişe göre teknolojinin ve analiz yöntemlerinin gelişmesiyle afet kaynaklı hayat kaybında bir azalma vardır. Ülkemizde doğal afetler hakkında ilk kez 4373 sayılı “Taşkın Sulara ve Su Baskınlarına Karşı Korunma Hakkında Kanun” ile 1944 yılında 4623 sayılı “Yer Sarsıntılarından Evvel ve Sonra Alınacak Tedbirler Hakkında Kanun” çıkarılmıştır. Dünyayı ve ülkemizi en fazla etkileyen doğal afetler sıralamasında ilk sırayı deprem alırken, onu heyelan takip etmektedir [1]. Heyelan ile ilgili yapılan çalışmaları incelediğinde en fazla çalışmanın heyelan duyarlılığı için yapıldığını ve ülkemizde bu alanda ilk kez 1996 yılında çalışma yapıldığını belirtmiştir [2]. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı’nın (AFAD) 2019 yılında yaptığı çalışmada ülkemizde 1950-2019 yılları arasında meydana gelen tüm kütle hareketlerinin haritası oluşturulmuştur. Bu haritaya göre Yalova ilinde 1950-2019 yılları arasında 107 adet heyelan meydana gelmiştir [3].

Heyelan, hiçbir taşıyıcı (rüzgâr, su, buzul) olmaksızın yeryüzünün yüzey veya yüzeye yakın bölümünün aşağıya (yer çekimi merkezine) doğru hareket etmesi, şekil ve yer değiştirmesi şeklinde tanımlanabilir. Heyelan yamaç yenilmesiyle meydana gelir. Bu nedenle heyelanı önlemek için yamaç duraylılığını sağlamak gerekmektedir. Bunun sağlanması için de duraylılığa olumsuz yönde etki eden parametrelerin doğru belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Parametrelerin belirlenmesi her inceleme alanında değişiklik göstermektedir. Literatürde 1996-2010 yılları arasında yapılan çalışmalar incelendiğinde yamaç eğimi, litoloji, bakı ve yükseklik en çok kullanılan parametreler olmuştur [4]. Heyelan duyarlılığının iyi bir şekilde değerlendirilmesi için, heyelanın nerede, nasıl oluşacağı ve hangi yenilmelerin meydana gelmesine neden olacağı sorularının sorulması gerektiği üzerinde durulmuştur [5]. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte Coğrafi Bilgi Sistemleri ile literatürdeki farklı istatistiksel analiz yöntemlerinin bir arada kullanılmasıyla heyelan çalışmalarında önemli bir ilerleme sağlanmıştır. Literatürde Yapay Sinir Ağları, Bulanık Mantık, Frekans Oranı, Karar Ağacı, Lojistik Regresyon ve Analitik Hiyerarşi Proses Yöntemi gibi yöntemler heyelan çalışmalarına katkı sağlamaktadır [6, 7, 8, 9, 10].

Bir bölgenin heyelana duyarlı olması doğal veya yapay etmenlerle yamaç dengesinin bozulmasıyla heyelan meydana gelme ihtimali olarak açıklanabilir. Bu çalışmada, heyelan duyarlılık haritasının oluşturulmasında, saha gözlemleri yapılmış, bölge hakkında önceki çalışmalar ve literatür incelemeleri sonucunda, jeoloji, yağış, eğim, arazi kullanımı, yükseklik, bakı, yola uzaklık ve faya yakınlık parametrelerinin kullanılmasına karar verilmiştir. Bu parametreler ile 7.1x7.1 piksel çözünürlüğüne sahip Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) verisi ile katman haritaları hazırlanmıştır. Bu katman haritalarını ve heyelan envanterini kullanarak Mantıksal Regresyon, Frekans Oranı ve ArcGIS Suitability Model ile heyelan duyarlılık analizi yapılmıştır.

II. LİTERATÜR İNCELEMESİ

Literatürde heyelan duyarlılığı ile ilgili yapılan çalışmalara bakıldığında son yıllarda istatistiksel analiz yöntemleri kullanılmıştır. Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de son 20 yılda bu alandaki çalışmaların sayısı oldukça fazladır.

Abay vd., (2019) Etiyopya’da 165 adet farklı tip ve büyüklükte heyelanlardan oluşan inceleme alanı için litoloji, faya yakınlık, arazi kullanımı, drenaja yakınlık, yamaç eğriselliği, bakı ve yükseklik parametreleri ile heyelan duyarlılık haritası hazırlanmıştır. Heyelanların oluşumunu etkileyen parametreler ise, litoloji (%37,2), faylara yakınlık (%24,5), drenaja yakınlık (%16,2); bunu bakı (%7,5), eğim (%7,4), arazi kullanımı (%7,2) izlemektedir. İnceleme alanı çok yüksek (%29), yüksek (%44), orta (%20) ve düşük (%7) olmak üzere dört duyarlılık bölgesi belirlemiştir [6].

Biçer ve Ercanoğlu (2020) Kahramanmaraş'ta yapılan çalışmada yamaç eğimi, litoloji, bakı, topografik yükseklik, drenaj özelliği, arazi kullanımı, eğrisellik, tektonik unsura uzaklık ve NDVI olmak üzere 9 parametre ve Lojistik Regresyon (LR), Frekans Oranı (FR) ve Analitik Hiyerarşi Proses (AHP) olmak üzere 3 farklı analiz yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen heyelan duyarlılık haritalarının performans değerlendirmesi için ROC yöntemi kullanılmıştır. AUC değerleri LR: 0.828, FR: 0.862 ve AHP: 0.793 olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda inceleme alanı için heyelan duyarlılık haritasının hazırlanmasında en uygun yöntemin FR olduğu belirtilmiştir [7].

Yıldız ve Çan (2021), Aydın-Germencik'te Frekans Oranı (FR) yöntemi kullanılarak bölgede toplam alanı 6.85 km² olan 59 heyelandan oluşan daha önce hazırlanmış olan heyelan envanter haritasını güncelleştirilmiştir. FR yöntemi ile hesaplanan parametreler için eğrinin altında kalan alan (AUC) yaklaşımıyla heyelan envanter haritası üretilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre inceleme alanının, %13,76'sı çok düşük, %27,34'ü düşük, %21,33'ü orta, %26,12'si yüksek ve %11,44'ü çok yüksek duyarlı bölgelerde yer almaktadır. Heyelanların %93,08'si yüksek ve çok yüksek duyarlı bölgelerde yer almaktadır [8].

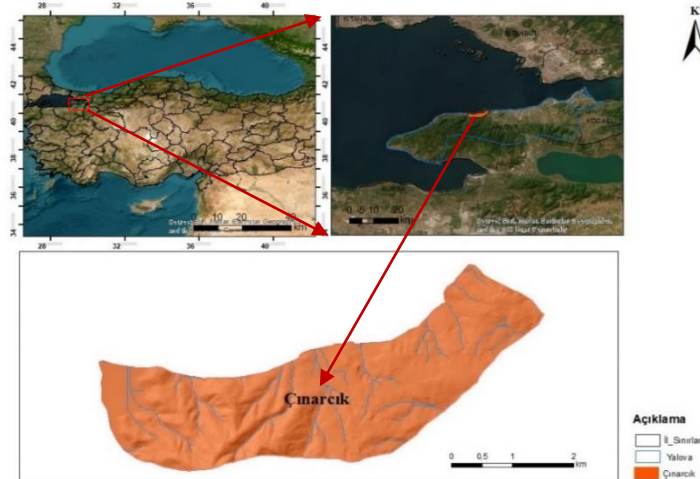
Yiğittepe vd. 2021 yılında Yenice-Karabük bölgesinde yaptıkları çalışmada Coğrafi Bilgi Sistemleri ortamında çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek olmak üzere beş sınıfa ayrılan heyelan duyarlılık haritası hazırlanmıştır. Heyelan duyarlılık haritası Frekans Oranı yöntemi ile jeoloji, eğim, bakı ve akarsulardan uzaklık parametreleri kullanılarak hazırlanmıştır. Analiz sonucunda inceleme alanı %9 çok düşük, %13 düşük, %17 orta, %38 yüksek ve %23 çok yüksek duyarlı bölgelerde yer almaktadır [9].

Zengince tarafından 2020'de yapılan çalışmada Kocaeli-Gölcük bölgesinin güney köylerini kapsayan 28,03 km² alan üzerinde 3 farklı senaryo ile heyelan duyarlılık analizi yapılmıştır. Jeoloji, eğim, bakı, yükseklik, arazi kullanımı, akarsuya uzaklık, yollara uzaklık, aktif faya uzaklık parametreleri ile Ağırlıklı Çakıştırma yöntemi ile Coğrafi Bilgi Sistemleri ortamında yapılan analizde senaryo 2 daha doğru sonuç vermiştir. İnceleme alanının %2,39'u çok yüksek, %6,88'i yüksek, %33,70'i orta, %2,97'si az, %0,044'ü ise duysarsız alanlardan oluşmaktadır [10].

III. İNCELEME ALANI

A. İNCELEME ALANININ TANITILMASI

İnceleme alanı Marmara Bölgesi'nde Yalova ili sınırları içindedir. G22D1 ve G22D2 paftaları içerisinde yer almaktadır. Yaklaşık olarak 11 km² alanı kaplamaktadır (Şekil 1). Arazide genel eğim yönü güneydoğuya doğru olup muhtelif yamaç eğimlerine sahiptir. Bölgedeki en önemli akarsular Armutlu Deresi ve Koca Deredir.



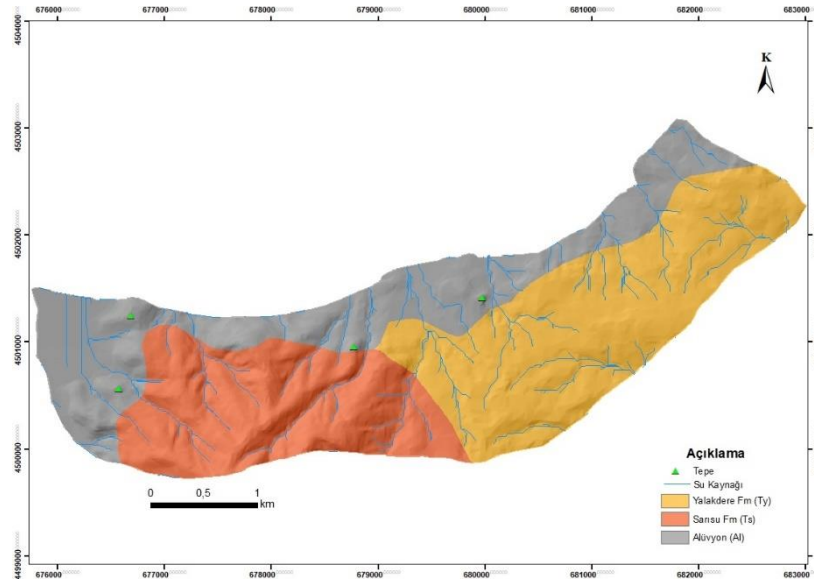
Şekil 1. İnceleme alanının yer bulduru haritası

A. 1. Bölgesel Jeoloji ve Jeomorfoloji

Yalova ili Marmara Bölgesi'nin güneydoğusunda yer almaktadır. Yalova'nın güneyinde ise ilin en yüksek kesimlerini oluşturan batıdan doğuya doğru İzmit-Sapanca arasında Kocaeli Sıradağları ile birleşen Samanlı Dağları ile çevrilidir. Bölgede Samanlı Dağları'nın en yüksek noktası olan Beşpınar Tepesi (926 m.) yer almaktadır.

İnceleme alanı ve yakın dolayında Kuvaterner çökelleri, Pliyosen yaşlı Yalakdere Formasyonu ve Eosen yaşlı Sarısu Volkanitleri yüzeylenmektedir. Bölgedeki en eski ve kapsamlı çalışma Akartuna, (1968) [11] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada en doğuda Gevye Boğazı, en batıda Armutlu Burnu'nu içeren Samanlı Dağları yükseliminin jeolojisi 1:100.000 ölçeğe haritalanmıştır.

Kuvaterner Çökeller inceleme alanında en geç birimdir ve kıyı şeridinde yüzeylenmektedir. Holosen yaşlı olan çökeller alüvyondan oluşmaktadır [12]. Yalakdere formasyonu Bargu ve Sakınc [13] tarafından adlandırılmıştır. Formasyon sarı, boz renkli, silt aralanmalarından, kıltaşı, ile kireçtaşı ve karbonatlı kumtaşından oluşmaktadır. Yalakdere Formasyonu, Mudanya formasyonun Yalova'daki karşılığıdır, yaşı Erken Pliyosen olarak belirlenmiştir [12]. Sarısu volkanitleri, Çınarcık'ın güneybatısında yüzeylenmektedir. Metamorfik kayalar üzerinde konglomera, çamurtaşı, kumtaşı ve kireçtaşından oluşan bir çökelleme düzeyi ile başlamaktadır. Volkanitlerdeki lav akıntısını bazalt ve bazaltik andezit türü kayalar oluşturmaktadır, birimin yaşı Eosen olarak belirlenmiştir [12]. İnceleme alanının jeoloji haritası Şekil 2'de verilmiştir. İnceleme alanında kıyı şerdi boyunca ve vadi tabanlarında alüvyon, batı kesimde Yalakdere formasyonu, doğu kesimde ise Sarısu formasyonu yüzeylenmektedir.



Şekil 2. İnceleme alanının jeoloji haritası

IV. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada heyelan duyarlılık haritalarının oluşturulmasında ArcGIS Pro 2022 yazılımı, uzaktan algılama ve hava fotoğrafları için PALSAR uydu görüntüleri, Google Earth görüntüleri ve 1:25 000 topografik haritaları kullanılmıştır. İnceleme alanında heyelan duyarlılık analizi yapmak için Mantıksal Regresyon, Frekans Oranı ve ArcGIS Pro Suitability Model yöntemlerinden yararlanılmıştır. Heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında aynı bölge için dahi farklı araştırmacılar ve farklı yöntemler kullanıldığında sonuçlarda değişim gözlemlenmektedir [14]. Bu nedenle birden fazla yöntem kullanılmış ve bu yöntemler için doğruluk analizi yapılmıştır. Yapılan doğruluk analizlerinde inceleme alanı için en doğru sonuç veren yöntemin Mantıksal Regresyon olduğu görülmüştür. Yapılan literatür taraması sonuçları ve arazi gözlemleri göz önünde bulundurulduğunda; inceleme alanı için yukarıda

belirtilen yöntemlerin kullanılmasına karar verilmiştir. Mantıksal Regresyon yöntemi için heyelanlı ve heyelansız alanlar için %80 analiz, %20 test olacak şekilde veri seti rasgele belirlenerek SPSS programı üzerinden elde edilen sonuçlara göre CBS ortamında analiz yapılmıştır. Frekans Oranı yöntemi için de aynı şekilde veri seti %80 analiz, %20 test verisi olacak şekilde rastgele ayrılmıştır, parametrelerin etki ağırlıklarına göre duyarlılık analizi yapılmıştır. ArcGIS Pro Suitability Modeli için de aynı adımlar izlenmiştir. Kullanılan tüm yöntemler için parametrelerin katman haritaları oluşturulmuş ve alt sınıflarının etki ağırlıkları belirlendikten sonra CBS ortamında analizler yapılmıştır (Şekil 4). Test verileri için kullanılan doğruluk analizi ise ROC analizi ile sağlanmıştır. Jeoloji, yağış, eğim, arazi kullanımı, yükseklik, bakı, yollardan uzaklık ve faydan uzaklık olmak üzere 8 farklı parametre kullanılarak heyelan duyarlılık haritaları oluşturulmuştur.

Çalışmanın ilk aşamasında 1:25 000 ölçekli topografik haritanın 10 metre aralıklı eş yükselti eğrileri sayısallaştırılarak elde edilen yüksek çözünürlüklü olması ve eğim, bakı haritalarının en doğru sonucu vermesi için piksel boyutu 7.1x7.1 m çözünürlüğe sahip sayısal yükseklik modeli haritası referans alınarak bakı ve eğim katman haritaları oluşturulmuştur. “MTA Yer Bilimleri Görüntüleyici” portalından alınan veriler Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamında sayısallaştırılarak inceleme alanının jeoloji haritası oluşturulmuştur. Meteoroloji Genel Müdürlüğü internet sitesinden alınan veriler ve istasyon bilgileri ile Kriging yöntemi ile inceleme alanının yağış yoğunluğu haritası oluşturulmuştur. Arazi kullanımı katman haritası için CORINE verileri kullanılmıştır. MTA Diri Fay Haritası ve OpenStreetMap verileri de sayısallaştırılarak Olası Kuvaterner fayından ve yollardan uzaklık katman haritaları oluşturulmuştur. Tüm katman haritaları ve heyelan duyarlılık haritaları WGS_1984_UTM_Zone_35N projeksiyon sistemine göre oluşturulmuştur.

Heyelan Envanteri

İnceleme alanı ve çevresinde yağış ve sıcaklık değişimleri gibi dönemsel değişimler diğer parametreler ile incelendiğinde bölgedeki heyelan türünün krip veya akma olduğu görülmektedir. Heyelan envanteri verileri duyarlılık analizlerin için baz alınan veridir. Heyelanın alansal olabilirliği ve dağılımını göstermektedir [15]. İnceleme alanında geniş yayılım gösteren 20 adet heyelan incelenmiştir. Heyelan duyarlılık haritaları arazi gözlemleri, “MTA Yer Bilimleri Görüntüleyici” portalından alınan heyelanlı bölge verileri ve AFAD Yalova Müdürlüğü tarafından belirlenen heyelan bölgeleri verileri kullanılarak hazırlanmıştır. İnceleme alanındaki duyarlılık analizi jeoloji, yağış, eğim, arazi kullanımı, yükseklik, bakı, yollardan uzaklık ve faydan uzaklık olmak üzere 8 farklı parametreden oluşan katman haritaları ve heyelan envanteri ile yapılmıştır. Bu katmanlar aşağıdaki bölümlerde açıklanmıştır.

Jeoloji

İnceleme alanındaki litoloji, jeolojik birimlerin mühendislik jeolojisi özellikleri ve litolojik özelliklere bağlı ayrışma yamaç duraysızlıkları açısından en çok kullanılan parametredir. Jeolojik istifteki birimlerin bu özellikleri ise her birimin kendi içinde yamaç duraysızlığına etki eden temel faktörlerdir. Yapılan saha gözlemleri sonucunda inceleme alanındaki yamaç duraysızlıkları sonucu meydana gelen heyelanların oluşmasında, en etkin parametrelerin litoloji-ayrışma ile Yalakdere ve Sarısu formasyonlarındaki heterojen jeolojik istif olduğu tespit edilmiştir. İnceleme alanı ve çevresinde meydana gelen yamaç duraysızlıkları bölgedeki litoloji üzerinde diğer parametrelerin katılımıyla meydana gelmektedir.

Yağış

Yamaç malzemesinin doygunluk derecesi duraylılığı doğrudan etkilemektedir. Duraysız bölgenin topuk kısmındaki su yoğunluğu nedeniyle doygunluk derecesi artmaktadır böylece stabilite bozulmaktadır. Suyun taneler arasına girmesiyle yamaç yükünde de bir artış olmaktadır. Böylece çok fazla su girişi yamacın yük dengesini değiştirerek ve duraylılığını bozarak heyelanın oluşumuna neden olmaktadır. İnceleme alanının aylık toplam yağış miktarı ortalaması (mm) özellikle aralık ve ocak aylarında oldukça fazladır. Yıllık ortalama yağışlı gün sayısı 124.2 iken aylık toplam yağış miktarı ortalama olarak 756.9 mm'dir.

Eğim

Yapılan birçok çalışmada eğim ile yamaç duraysızlığı arasında doğrudan bir ilişki olduğu savunulmuştur. Bazı araştırmacılar ise eğim derecesinin yüksek olmasının tek başına heyelana neden olacağı düşünülmektedir. Zemin ortamlarında heyelanın gerçekleşmesi için en az 1-2 metre kalınlığa ihtiyaç duyulduğunu fakat çok yüksek eğimli yerlerde erozyon ile bu kalınlığa her zaman ulaşamayacağı belirtilmiştir [14]. Litolojinin gevşek olması ve yamacın eğimli olması herhangi bir yük değişiminde heyelan oluşma sürecini hızlandırabilir. İnceleme alanına ait sayısal yükseklik modeline göre oluşturulan eğim haritası 0° - 10° , 10° - 20° , 20° - 30° , 30° - 40° ve $> 40^{\circ}$ şeklinde 5 alt parametreye ayrılmış ve hesaplanmıştır.

Arazi Kullanımı

İnceleme alanında arazi, yerleşim alanları, ormanlık alanlar, bitki örtüsü içeren alanlar, yollar vb. şekilde yamaç duraysızlığını neden olan etmenler şeklinde kullanılmıştır. Karakaş ve Coruk tarafından 2011 yılında yapılan çalışma gösteriyor ki Kocaeli'nin bazı bölgelerinde de heyelan nedeni ile yollarda çökme, istinat duvarlarının yıkılması gibi durumlar görülmüştür [16].

Daha önce belirtildiği gibi gevşek malzemeden oluşan yamaç üzerinde herhangi bir yük değişikliği yamacın stabilitesini bozarak heyelanın meydana gelmesine neden olmaktadır. Yerleşim alanları heyelan duyarlılığı olan yamaçların topuk kısmında bulunmaktadır. Topuk kısmındaki zemin malzemesinin tahliye edilerek yerine yapılar yapılması stabiliteye zarar vermektedir. İnceleme alanında daha önce meydana gelen heyelanlar nedeniyle bazı evlerde gözle görülen hasarlar meydana gelmiştir ve tahliye edilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. 2019 yılında meydana gelen heyelan nedeniyle yıkılan istinat duvarı [17].

İnceleme alanında yapılan yollarda zamanla yer yer çökme ve göçme meydana gelmiştir. Açılan yol yarmaları yamacın duraylılığını bozarak yük azalmasına, ardından yol yapım işlemi tamamlandıktan sonra ise trafik oluşmasıyla yük artışına neden olmaktadır. Bu yük dengesi değişiminin nasıl giderileceği doğru hesaplanmazsa daha büyük hasarlara ve kayıplara neden olabilir. İnceleme alanı ve çevresi için arazi kullanımı/örtüsü için CORINE verileri ile CBS ortamında sayısallaştırılmıştır. İnceleme alanı arazi kullanımı bakımından Kesikli Şehir Yapısı, Karışık Tarım Alanı, Karışık Orman, Geniş Yapraklı Orman, Doğal Bitki Örtüsü ve Bitki Değişim Alanları olmak üzere 6 sınıfa ayrılmıştır.

Sayısal Yükseklik Modeli

Yamaç duraysızlığı analizlerinde en çok kullanılan parametrelerden biri de yamacın deniz seviyesinden yüksekliğini ifade eden topografik yüksekliktir. Yüksekliğin heyelanın meydana gelmesinde doğrudan bir etkisinin olup olmadığı birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. İnceleme alanındaki yükseklik 2,6 ile 371,28 metre arasında değişiklik göstermektedir ve CBS ortamında 0-50 m, 50-100 m, 100-150 m, 150-200 m, 200-371,28 metre olacak şekilde 5 sınıfa ayrılmıştır.

Bakı

Bakı, yamaçların yönü hakkında bilgi verir ve inceleme alanı için önemli olan parametredir. Bakı yamacın yönüne göre günlemeye maruz kalma, yağış ve rüzgâr gibi litolojiyi zayıflatır ve ayrışmaya neden olur. Bu etmenler ile zayıflayan ve ayrışan litoloji ise yamacın duraylılığının kaybetmesi ile heyelana neden olur. Bakı düz (-1), kuzey (0-22,5°), kuzeydoğu (22,5°-67,5°), doğu (67,5°-112,5°), güneydoğu (112,5°-157,5°), güney (157,5°-202,5°), güneybatı (202,5°-247,5°), batı (247,5°-292,5°), kuzeybatı (292,5°-337,5°) ve (337,5°-360°) şeklinde sınıflandırılmıştır. İnceleme alanındaki jeolojik birimler bakı yönüne göre günlenmeye maruz kalmıştır.

Yollara Uzaklık

Yamaç duraylılığının bozulup heyelanın meydana gelmesindeki en önemli etkenlerden biri yamaç üzerindeki doğal yük dengesinin bozulmasıdır. Yol yapım sürecinde ve daha sonra araçların sürekli yamaç dengesi üzerinde değişikliğe neden olması heyelan oluşumunu tetikleyebilir. Ayrıca inceleme alanı yağış alan bölgelerdendir. Özellikle yağışın yoğun olduğu zamanlarda gevşek malzeme ve yüksek eğimle birlikte yollarda çökme gibi istenmeyen durumlar geçmişte meydana gelmiştir. İnceleme alanı için yollara olan mesafenin de heyelan oluşumu üzerinde etkisi olduğu düşünülerek analize dahil edilmiştir. İnceleme alanı “Öklid Uzaklığı” ile yolların yakınlık mesafesine göre 0-50 m, 50-100 m, 100-400 m, 400-1082,2 metre olmak üzere 4 sınıfa ayrılmıştır.

Faya Uzaklık

MTA Yer Bilimleri Görüntüleyici portalında bu hattın devamı olan Olası Kuvaterner Fayı'na olan uzaklık değerlendirilmiştir. Aktif olan bu fay 18 Eylül 1963 yılında meydana gelen 6.4 büyüklüğünde deprem üretmiş Çıncarcık havzasının kuzeydoğusunda kırığa neden olmuştur. Örgülü 2011, bu olayı havzanın çek-ayır modeline uygun olduğunu vurgulamıştır [18]. İnceleme alanındaki litoloji gevşek malzemeden oluştuğu için deprem dalgalarından daha çok etkilenecek ve daha çok zarar görecektir. Aktif tektonizmaya sahip olan bölgelerdeki malzemeler tektonizma nedeniyle zarar gördüğü için duraysızlık bakımından yüksek riskli bölgeler olmaktadır. İnceleme alanı ve çevresinin bu faylara uzaklığı ~170 m ile ~ 3 km arasında değişiklik göstermektedir. CBS ortamında “Öklid Uzaklığı” yaklaşımıyla faya uzaklık katman haritası oluşturulmuştur ve yakınlık mesafesine göre 0-200 m, 200-300 m, 300-800 m, 800-3000 m, 3000-4387,1 metre olmak üzere 5 sınıfa ayrılmıştır.

V. BULGULAR

İnceleme alanında geniş yayılım gösteren 20 heyelanın jeoloji, yağış, eğim, arazi kullanımı, sayısal yükseklik modeli, bakı, yollara uzaklık ve faya uzaklık olmak üzere oluşturulan katman haritaları ile CBS ortamında duyarlılık analizi yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan heyelan envanter haritasında farklı tipte heyelanların olduğu görülmektedir. Abay vd. (2019) yapılan çalışmada da olduğu gibi farklı çeşit olan ve geniş yayılım gösteren 20 heyelan aynı haritada üzerinde gösterilmiştir [6]. İnceleme alanında da akma, krip ve kayma türü hareketler birbirini tetikleyen veya birbiri ardına gelişen heyelanlar olarak izlenmektedir. İnceleme alanı için duyarlılık haritasında bu karmaşık hareket türü değerlendirilmiştir.

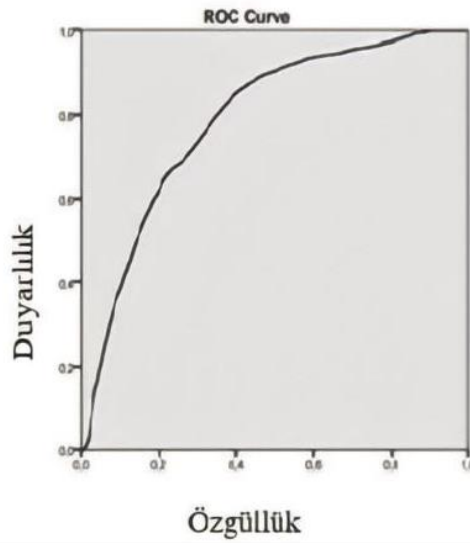
İnceleme alanı heyelan duyarlılık analizi için CBS ortamında 7.1x7.1 metre çözünürlüğe sahip Sayısal Yükseklik Modeli verisi kullanılarak inceleme alanına ait eğim, jeoloji, yağış, yükseklik, arazi kullanımı/örtüsü, bakı, yollara uzaklık ve faya uzaklık parametrelerine ait katman haritaları hazırlanarak elde edilen tüm veriler sonucunda Mantıksal Regresyon, Frekans Oranı ve ArcGIS Pro Suitability Model ile heyelan duyarlılık haritaları oluşturulmuştur. Verilerin tahmin edilebilirliğini test etmek amacıyla Alıcı işletim karakteristiği (ROC) eğrisi kullanılmıştır. Şekil 10'da kullanılan yöntemlerin analiz değerleri gösterilmiştir. ROC eğrisi oluşturulduktan sonra eğrinin altında kalan alanın (AUC) değerine göre yapılan analizin doğruluğu belirlenmektedir. Yapılan analizin kabul edilebilir olması için eğrinin altında kalan alanın en az %60 olması gerekmektedir. Bu

çalışmada yapılan analizlerde eğrinin altında kalan alan Mantıksal Regresyon yöntemi için %78,8, Frekans Oranı için %64,7 ve ArcGIS Pro Suitability Model için %69,4 olarak hesaplanmıştır.

Mantıksal Regresyon ile Heyelan Duyarlılık Haritası

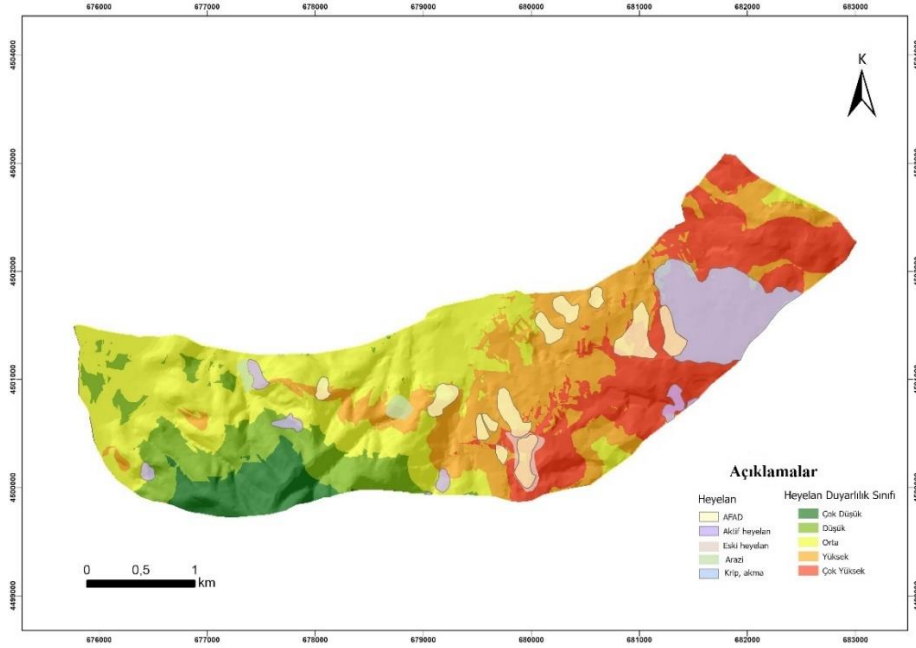
İnceleme alanı heyelan duyarlılık analizi için CBS ortamında 7.1x7.1 metre çözünürlüğe sahip SYM verisi kullanılarak inceleme alanına ait eğim, jeoloji, yağış, yükseklik, arazi kullanımı/örtüsü, bakı, yollara uzaklık ve faya uzaklık parametrelerine ait katman haritalar hazırlanarak elde edilen tüm verilerin %80'i, analiz, %20'si ise elde edilen duyarlılık değerlerini test etmek amacıyla kullanılmıştır. Verilerin tahmin edilebilirliğini test etmek amacıyla ROC eğrisi kullanılmıştır. Mantıksal Regresyon analizi için doğruluğu 1 değerine yaklaştıkça artarken 0.5 değerinin altında kalması başarılı olmadığı anlamına gelir.

Analiz için elde edilen verilerin %80'i analiz, %20'si ise test amacıyla kullanılmıştır. SPSS üzerinde test için ROC eğrisi ve AUC kullanılmıştır ve ROC eğrisi analizi ile eğrinin altında kalan alan (AUC) %78,8 olarak bulunmuştur. Şekil 4'de doğruluk analizi sonucu gösterilmiştir.



Şekil 4. Mantıksal Regresyon ROC Analizi

Mantıksal Regresyon yöntemine göre inceleme alanının %5,41'i düşük, %10,32'si düşük, %31,22'si orta, %24,98'i yüksek ve %28,05'i çok yüksek riskli heyelan duyarlılık sınıfında yer almaktadır (Şekil 5).

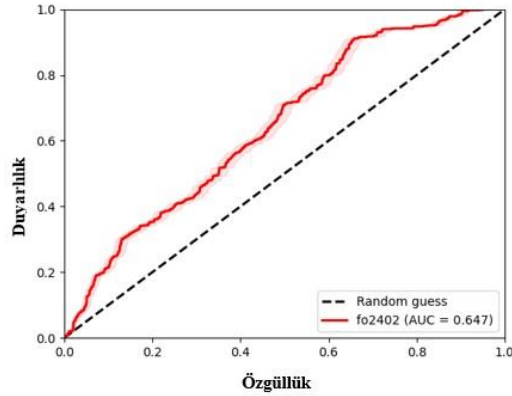


Şekil 5. Mantıksal Regresyon Yöntemi ile hazırlanan Heyelan Duyarlılık Haritası

Frekans Oranı ile Heyelan Duyarlılık Haritası

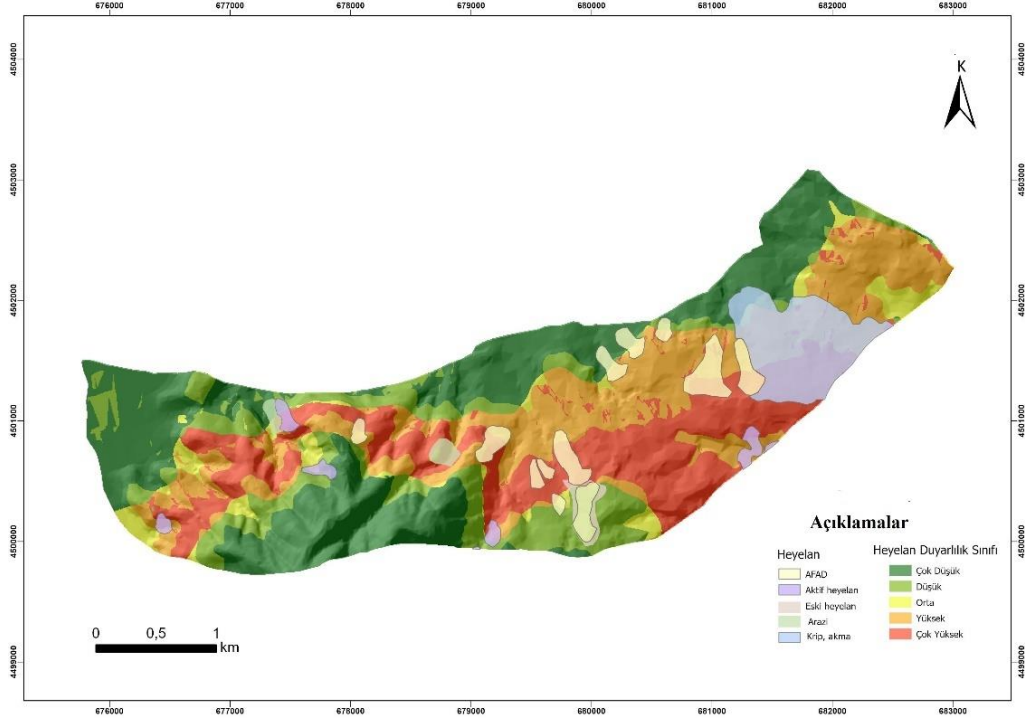
Belirlenen parametrelerin katman haritaları hazırlandıktan CBS ortamında ArcToolBox menüsünden “Spatial Analyst Tools”- “Zonal”- “Tabulate Area” komutu ile her parametrenin piksel değerlerinin heyelanlı alandaki piksel değerinin oranları hesaplanarak frekans oranları bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar CBS ortamında parametre değerlerine tekrar sınıflandırma yapılarak atanmıştır ve son olarak öngörülen oran (PR) değerlerin toplanmasıyla heyelan duyarlılık haritası oluşturulmuştur. Bu çalışma için Heyelan Duyarlılık İndeksi (Landslide Susceptibility Index-LSI) 5,40 olarak bulunmuştur. Analiz sonucunda heyelan duyarlılık sınıfları çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek olarak beş sınıfa ayrılmıştır.

Yapılan analizin doğruluğunu test etmek için ROC eğrisi CBS ortamında oluşturulmuştur ve sonucu %64,7 olarak hesaplanmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. Frekans Oranı ROC Eğrisi Analizi

Frekans Oranı için ise inceleme alanının %30,8'i çok düşük, %14,48'i düşük, %4,5'i orta, %24,02'si yüksek ve %26,2'si çok yüksek heyelan duyarlılık sınıfında yer almaktadır (Şekil 7).

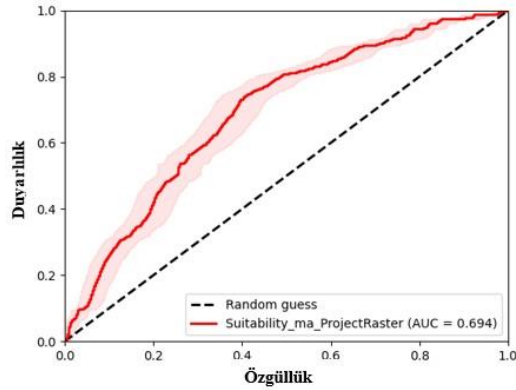


Şekil 7. Frekans Oranı Yöntemi ile hazırlanan Heyelan Duyarlılık Haritası

ArcGIS Pro Uygunluk Modeli ile Heyelan Duyarlılık Haritası

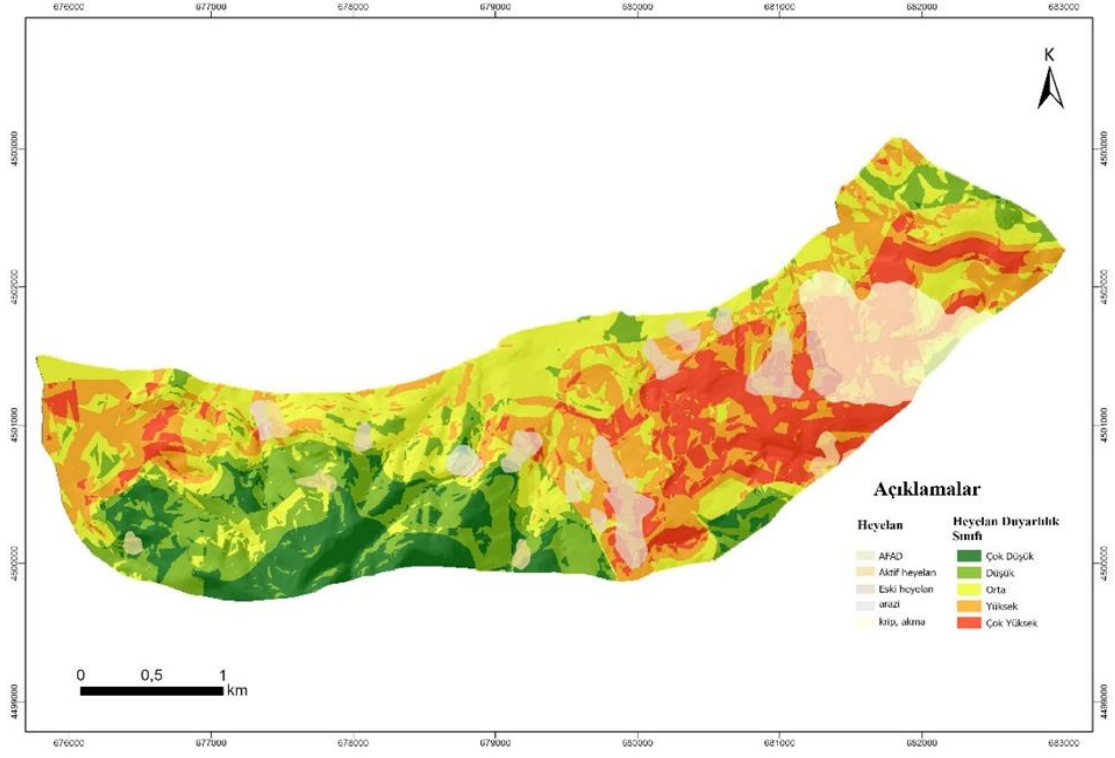
Analiz için belirlenen eğim, yağış, jeoloji, yükseklik, arazi kullanımı, bakı, yollardan uzaklık ve faydan uzaklık parametrelerinin katman haritaları ile heyelan envanteri karşılaştırılmıştır. Daha sonra her parametre ve alt sınıfları için 1 ile 10 arasında; 1 en az, 10 en çok etkili olacak şekilde atama yapılarak yeniden sınıflandırılmıştır ve her parametre için ağırlık yüzdesi tanımlanmıştır.

Yapılan analizin doğruluğunu test etmek için ROC eğrisi CBS ortamında oluşturulmuştur ve sonucu %69,4 olarak hesaplanmıştır (Şekil 8).



Şekil 8. ArcGIS Pro Suitability Model ROC Eğrisi

ArcGIS Pro Suitability Model için ise % 4,42'si çok düşük, %20,57'si düşük, %27,9'u orta, %23,42'si yüksek ve %23,67'si çok yüksek ve AUC değeri %69,7'dir (Şekil 9).



Şekil 9. ArcGIS Pro Suitability Model ile hazırlanan Heyelan Duyarlılık Haritası

Parametre	Alt Sınıf	Mantıksal Regresyon	Frekans Oranı	ArcGIS Pro Suitability Model
Eğim	≤10°	-0,001	0,185	3
	10°-20°		0,114	4
	20°-30°		0,059	5
	30°-40°		0,094	6
	>40°		0,197	8
Jeoloji	Yalakdere	.000	0,378	8
	Alüvyon		0,06	7
	Sarısu		0,033	3
Bakı	Düz	.001	0,117	1
	Kuzey		0,163	10
	Kuzeydoğu		0,153	9
	Doğu		0,116	8
	Güneydoğu		0,049	7
	Güney		0,091	5
	Güneybatı		0,031	4
	Batı		0,16	3
Arazi Kullanımı	Karışık Tarım Alanı	.0.069	0,204	10
	Karışık Orman		0,046	8
	Doğal Bitki Örtüsü		0,206	9
	Kesikli Şehir Yapısı		0,107	7
	Bitki Değişim Alanla		0,045	6
	Geniş Yapraklı Orman		0,021	2
Faydan Uzaklık (m)	0-200	.001	0,032	10
	200-300		0,001	9
	300-800		0,056	8
	800-3000		1,871	5
	3000-4387,10		0,516	4
Yoldan Uzaklık (m)	0-50	-0,009	0,184	10
	50-100		0,191	9
	100-400		0,071	7
	400-1.082,19		0,003	4
Yağış	734,33-756,39	.021	0,052	1
	756,39-779,82		0,215	5
	779,82-808,07		0,214	8
	808,07-846,67		0,091	9
	846,67-910,07		0,002	10
Sayısal Yükseklik Modeli (m)	2,7-50	.000	0,054	3
	50-100		0,185	5
	100-150		0,244	6
	150-200		0,132	7
	200-370,85		0,005	9

Şekil 10. Frekans Oranı, Mantıksal Regresyon ve ArcGIS Pro Suitability Model analizleri için Kullanılan tüm parametreler ve etki ağırlıkları

VI. SONUC

Bu çalışma kapsamında geniş yayılım gösteren 20 heyelan incelenmiştir. Heyelan duyarlılık haritasının hazırlanması için Mantıksal Regresyon, Frekans Oranı ve ArcGIS Pro Suitability Model olmak üzere üç farklı yöntemle analiz yapılmıştır. Mantıksal Regresyon yöntemine göre inceleme alanının %5,41'i düşük, %10.32'si düşük, %31,22'si orta, %24,98'i yüksek ve %28.05'i çok yüksek riskli heyelan duyarlılık sınıfında yer almaktadır. Yapılan analizin doğruluğunu test etmek için ROC eğrisi ve AUC kullanılmıştır. AUC %78,8 olarak bulunmuştur. Frekans Oranı yöntemine göre ise inceleme alanının %30,8'i çok düşük, %14.48'i düşük, %4,5'i orta, %24.02'si yüksek ve %26,2'si çok yüksek heyelan duyarlılık sınıfında olup AUC sonucu %64,4'tür. ArcGIS Pro Suitability Model için ise %4.42'si çok düşük, %20.57'si düşük, %27,9'u orta, %23.42'si yüksek ve %23,67'si çok yüksek ve AUC değeri %69,7'dir. Mantıksal Regresyon yöntemine göre inceleme alanının %53,03'ü yüksek ve çok yüksek duyarlılık, Frekans Oranı yöntemine göre %50,22'si yüksek ve çok yüksek duyarlılık, ArcGIS Pro Suitability Model için 51,32'si yüksek ve çok yüksek duyarlılık sınıfında yer almaktadır. Analizler sonucunda inceleme alanı için en uygun heyelan duyarlılık analizinin Mantıksal Regresyon yöntemi analizi olduğu söylenebilir.

İnceleme alanının kuzeyinde bulunan heyelanlar, heyelan envanterine göre eski heyelan olarak sınıflandırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda ise bu alanın yüksek veya çok yüksek riskli heyelan duyarlılık sınıfında yer aldığı gözlemlenmiştir. Bu çalışma sonucunda oluşturulan heyelan duyarlılık haritası ile bölgenin heyelan bakımından duyarlılık düzeyi saptanmıştır. Elde edilen duyarlılık analizi verileri ile yüksek ve çok yüksek duyarlılık sınıfındaki bölgeler için gerekli önlemlerin mutlaka alınması gerekmektedir. Heyelan modelleri dikkate alınarak bölgede yapılacak arazi planlaması için bu çalışmada elde edilen sonuçların dikkate alınması önerilir.

VII. KAYNAKLAR

[1] B. Ildır, "Distribution of landslides in Turkey and applications regarding the natural disaster Regulation," *In Proceedings of 2nd National Landslide Symposium Sapanca, Türkiye, 1995*, pp. 1-9.

[2] L. D. Cengiz, "Farklı analitik hiyerarşi süreci yöntemlerinin heyelan duyarlılığı haritalamalarındaki etkinliğinin araştırılması," Yüksek Lisans Tezi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2021.

[3] Afet İstatistikleri 2020, AFAD.

[4] Ç. Tetik Biçer, "Heyelan risk haritalaması üzerine yarı sayısal bir değerlendirme," Doktora Tezi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2017.

[5] P. Aleotti, & R. Chowdhury, "Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives". *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 58, no. 1, pp. 21-44, 1999.

[6] A. Abay, G. Barbieri, & K. Woldearegay, "Gis-based landslide susceptibility evaluation using analytical hierarchy process (AHP) approach: the case of tarmaber district, ethiopia". *Momona Ethiopian Journal of Science*, vol. 11, no.1, pp. 14-36, 2019.

[7] Ç. T. Biçer, & M. Ercanoglu, "A semi-quantitative landslide risk assessment of central karamanmaraş city in the eastern mediterranean region of turkey," *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 13, pp. 1-26, 2020.

[8] A. Yıldız, & T. Çan, "Germencik-İncirliova (Aydın) bölgesinin heyelan duyarlılık değerlendirilmesi," Yüksek Lisans Tezi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Çukurova Üniversitesi, Adana,

Türkiye, 2021.

[9] A. G. Yiğittepe, H. K. Çıtıroğlu, A. Karakaş, C. Mekik, “Investigation of slope movements and landslide susceptibility analysis of karabük-yenice area in nw of turkey,” *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 14, no. 12, pp. 1144, 2021.

[10] M. Zengince, A. Karakaş, “Kocaeli gölcük’te oluşan heyelanların nedenleri, etkileri ve alınan önlemler,” *Uygulamalı Yerbilimleri Dergisi*, c. 17, s. 1, ss. 39-54, 2018.

[11] M. Akartuna, “Armutlu yarımadasının jeolojisi,” *İstanbul Üniversitesi. Fen Fakültesi Monografileri (Tabii İlimler Kısmı)*, c. 20, 1968.

[12] Ö. Emre, T. Erkal, A. Tchepalyga, N. Kazancı, M. Keçer, & E. Ünay, “Doğu marmara bölgesinin neojen-kuvaternerdeki evrimi,” *MTA dergisi*, c. 120, ss. 289-314, 1998.

[13] S. Bargu, & M. Sakıncı, “İzmit körfezi ile iznik gölü arasında kalan bölgenin jeolojisi ve yapısal özellikleri,” *İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi*, c. 6, s. 1-2, ss. 47-76, 1989.

[14] C. Gökçeoğlu, & M. Ercanoğlu, “Heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında kullanılan parametrelere ilişkin belirsizlikler”, *Yerbilimleri*, c. 23, ss. 189–206, 2001.

[15] A. Yalçın, S. Reis, A. C. Aydınoglu, & T. Yomralıoğlu, “A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in trabzon, ne turkey,” *Catena*, vol. 85, no. 3, pp. 274-287, 2007.

[16] A. Karakaş, & Ö. Coruk, “Impact of mass movements in the kocaeli province, turkey,” *Geology Today*, vol. 27, no. 2, pp. 70-73, 2011.

[17] S. Gözdereliler, (2019, 4 Mart). *Yalova'da heyelan riski tedirgin ediyor* [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.cnnturk.com/yerel-haberler/yalova/cinarcik/yalovada-heyelan-riski-tedirgin-ediyor-950382>

[18] G. Örgülü, “Seismicity and source parameters for small-scale earthquakes along the splays of the north anatolian fault (naf) in the marmara sea,” *Geophysical Journal International*, vol. 184, no. 1, pp. 385-404, 2011.

Bu çalışmada ArcGIS Pro 2022 sürümü kullanılarak 0722639_LearnArcGIS kullanıcı adı ile 21 günlük deneme sürümü lisansı ile duyarlılık haritaları oluşturulmuştur.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Mantıksal Regresyon, Frekans Oranı ve ArcGIS Pro Suitability Model ile Yalova-Çınarcık Bölgesinin Heyelan Duyarlılık Analizi

 Zeliha TAŞ^{a,*},  Özkan CORUK^b

^a Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, TÜRKİYE

^b Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: tasszeliha@gmail.com

DOI: 10.29130/dubited.1265598

Öz

Bu çalışmada Türkiye'nin batısında yer alan Yalova-Çınarcık bölgesinde, yaklaşık 11 km² olan inceleme alanında heyelan duyarlılık analizi yapılmıştır. Bölgede geniş yayımlı 20 heyelan bölgesi incelenmiştir. Mantıksal Regresyon, Frekans Oranı ve ArcGIS Pro Uygunluk Modeli ile heyelan duyarlılık analizi yapılmıştır. Verilerin %80'i analiz, %20'si test için kullanılmıştır. Analizin doğruluğunu test etmek için Alıcı İşletim Karakteristik (Receiver Operating Characteristic-ROC) eğrisi ve Eğrinin Altında Kalan Alan (Area Under the Curve-AUC) kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda Mantıksal Regresyon yöntemine göre inceleme alanının %5,41'i çok düşük, %10,32'si düşük, %31,22'si orta, %24,98'i yüksek ve %28,05'i çok yüksek heyelan duyarlılık sınıfındadır ve AUC sonucu ise %78,8'dir. Frekans Oranı için ise inceleme alanının %30,8'i çok düşük, %14,48'i düşük, %4,5'i orta, %24,02'si yüksek ve %26,2'si çok yüksek heyelan duyarlılık sınıfında olup AUC sonucu %64,4'tür. ArcGIS Pro Uygunluk Modeli için ise %4,42'si çok düşük, %20,57'si düşük, %27,9'u orta, %23,42'si yüksek ve %23,67'si çok yüksek ve AUC değeri %69,7'dir. Bu çalışmada elde edilen duyarlılık analizi verileri ile yüksek ve çok yüksek duyarlılık sınıfındaki bölgeler için gerekli önlemlerin ve bölgede yapılacak arazi planlaması için bu sonuçların dikkate alınması önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Heyelan Duyarlılık Haritası, Mantıksal Regresyon, Frekans Oranı, ArcGIS Pro Suitability Modeli, Yalova, Çınarcık

Landslide Susceptibility Analysis of Yalova-Çınarcık Region with Logistic Regression, Frequency Ratio, and ArcGIS Pro Suitability Model

ABSTRACT

In this study, landslide susceptibility analysis was carried out approximately 11 km² in Yalova-Çınarcık region, which is located in the west of Turkey. 20 landslide areas that are spread were examined. Landslide susceptibility analysis was performed with Logistic Regression, Frequency Ratio and ArcGIS Pro Suitability Model. 80% of the data was used for analysis and 20% for testing. The Receiver Operating Characteristic (ROC) curve and Area Under Curve (AUC) were used to test the accuracy of the analysis. As a result of the analysis, in the study area, according to the Logistic Regression method, 5,41% very low, 10,32% is low, 31,22% is medium, 24,98% is high and 28,05% is very high landslide susceptibility classes and AUC result is 78,8%. Frequency Ratio, 30,8% very low, 14,48% low, 4,5% medium, 24,02% high, and 26,2% very high landslide susceptibility classes and the AUC result was 64,4%. ArcGIS Pro Suitability Model, 4,42% very low, 20,57% low, 27,9% medium, 23,42% high, and 23,67% very high landslide susceptibility classes and AUC of 69,7%. According to the result of this landslide susceptibility analysis, it is recommended to take the necessary precautions for the regions that are in high and very high susceptibility classes and to consider these results for the land planning to be made in the region.

Keywords: Landslide Susceptibility Mapping, Logistic Regression, Frequency Ratio, ArcGIS Pro Suitability Model, Yalova, Çınarcık

I. GİRİŞ

İnsanlığın ilk zamanlarından beri, insan doğal afetlerle birlikte yaşamaktadır. Geçmişe göre teknolojinin ve analiz yöntemlerinin gelişmesiyle afet kaynaklı hayat kaybında bir azalma vardır. Ülkemizde doğal afetler hakkında ilk kez 4373 sayılı “Taşkın Sulara ve Su Baskınlarına Karşı Korunma Hakkında Kanun” ile 1944 yılında 4623 sayılı “Yer Sarsıntılarından Evvel ve Sonra Alınacak Tedbirler Hakkında Kanun” çıkarılmıştır. Dünyayı ve ülkemizi en fazla etkileyen doğal afetler sıralamasında ilk sırayı deprem alırken, onu heyelan takip etmektedir [1]. Heyelan ile ilgili yapılan çalışmaları incelediğinde en fazla çalışmanın heyelan duyarlılığı için yapıldığını ve ülkemizde bu alanda ilk kez 1996 yılında çalışma yapıldığını belirtmiştir [2]. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı’nın (AFAD) 2019 yılında yaptığı çalışmada ülkemizde 1950-2019 yılları arasında meydana gelen tüm kütle hareketlerinin haritası oluşturulmuştur. Bu haritaya göre Yalova ilinde 1950-2019 yılları arasında 107 adet heyelan meydana gelmiştir [3].

Heyelan, hiçbir taşıyıcı (rüzgâr, su, buzul) olmaksızın yeryüzünün yüzey veya yüzeye yakın bölümünün aşağıya (yer çekimi merkezine) doğru hareket etmesi, şekil ve yer değiştirmesi şeklinde tanımlanabilir. Heyelan yamaç yenilmesiyle meydana gelir. Bu nedenle heyelanı önlemek için yamaç duraylılığını sağlamak gerekmektedir. Bunun sağlanması için de duraylılığa olumsuz yönde etki eden parametrelerin doğru belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Parametrelerin belirlenmesi her inceleme alanında değişiklik göstermektedir. Literatürde 1996-2010 yılları arasında yapılan çalışmalar incelendiğinde yamaç eğimi, litoloji, bakı ve yükseklik en çok kullanılan parametreler olmuştur [4]. Heyelan duyarlılığının iyi bir şekilde değerlendirilmesi için, heyelanın nerede, nasıl oluşacağı ve hangi yenilmelerin meydana gelmesine neden olacağı sorularının sorulması gerektiği üzerinde durulmuştur [5]. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte Coğrafi Bilgi Sistemleri ile literatürdeki farklı istatistiksel analiz yöntemlerinin bir arada kullanılmasıyla heyelan çalışmalarında önemli bir ilerleme sağlanmıştır. Literatürde Yapay Sinir Ağları, Bulanık Mantık, Frekans Oranı, Karar Ağacı, Lojistik Regresyon ve Analitik Hiyerarşi Proses Yöntemi gibi yöntemler heyelan çalışmalarına katkı sağlamaktadır [6, 7, 8, 9, 10].

Bir bölgenin heyelana duyarlı olması doğal veya yapay etmenlerle yamaç dengesinin bozulmasıyla heyelan meydana gelme ihtimali olarak açıklanabilir. Bu çalışmada, heyelan duyarlılık haritasının oluşturulmasında, saha gözlemleri yapılmış, bölge hakkında önceki çalışmalar ve literatür incelemeleri sonucunda, jeoloji, yağış, eğim, arazi kullanımı, yükseklik, bakı, yola uzaklık ve faya yakınlık parametrelerinin kullanılmasına karar verilmiştir. Bu parametreler ile 7.1x7.1 piksel çözünürlüğüne sahip Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) verisi ile katman haritaları hazırlanmıştır. Bu katman haritalarını ve heyelan envanterini kullanarak Mantıksal Regresyon, Frekans Oranı ve ArcGIS Suitability Model ile heyelan duyarlılık analizi yapılmıştır.

II. LİTERATÜR İNCELEMESİ

Literatürde heyelan duyarlılığı ile ilgili yapılan çalışmalara bakıldığında son yıllarda istatistiksel analiz yöntemleri kullanılmıştır. Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de son 20 yılda bu alandaki çalışmaların sayısı oldukça fazladır.

Abay vd., (2019) Etiyopya’da 165 adet farklı tip ve büyüklükte heyelanlardan oluşan inceleme alanı için litoloji, faya yakınlık, arazi kullanımı, drenaja yakınlık, yamaç eğriselliği, bakı ve yükseklik parametreleri ile heyelan duyarlılık haritası hazırlanmıştır. Heyelanların oluşumunu etkileyen parametreler ise, litoloji (%37,2), faylara yakınlık (%24,5), drenaja yakınlık (%16,2); bunu bakı (%7,5), eğim (%7,4), arazi kullanımı (%7,2) izlemektedir. İnceleme alanı çok yüksek (%29), yüksek (%44), orta (%20) ve düşük (%7) olmak üzere dört duyarlılık bölgesi belirlemiştir [6].

Biçer ve Ercanoğlu (2020) Kahramanmaraş'ta yapılan çalışmada yamaç eğimi, litoloji, bakı, topografik yükseklik, drenaj özelliği, arazi kullanımı, eğrisellik, tektonik unsura uzaklık ve NDVI olmak üzere 9 parametre ve Lojistik Regresyon (LR), Frekans Oranı (FR) ve Analitik Hiyerarşi Proses (AHP) olmak üzere 3 farklı analiz yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen heyelan duyarlılık haritalarının performans değerlendirmesi için ROC yöntemi kullanılmıştır. AUC değerleri LR: 0.828, FR: 0.862 ve AHP: 0.793 olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda inceleme alanı için heyelan duyarlılık haritasının hazırlanmasında en uygun yöntemin FR olduğu belirtilmiştir [7].

Yıldız ve Çan (2021), Aydın-Germencik'te Frekans Oranı (FR) yöntemi kullanılarak bölgede toplam alanı 6.85 km² olan 59 heyelandan oluşan daha önce hazırlanmış olan heyelan envanter haritasını güncelleştirilmiştir. FR yöntemi ile hesaplanan parametreler için eğrinin altında kalan alan (AUC) yaklaşımıyla heyelan envanter haritası üretilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre inceleme alanının, %13,76'sı çok düşük, %27,34'ü düşük, %21,33'ü orta, %26,12'si yüksek ve %11,44'ü çok yüksek duyarlı bölgelerde yer almaktadır. Heyelanların %93,08'si yüksek ve çok yüksek duyarlı bölgelerde yer almaktadır [8].

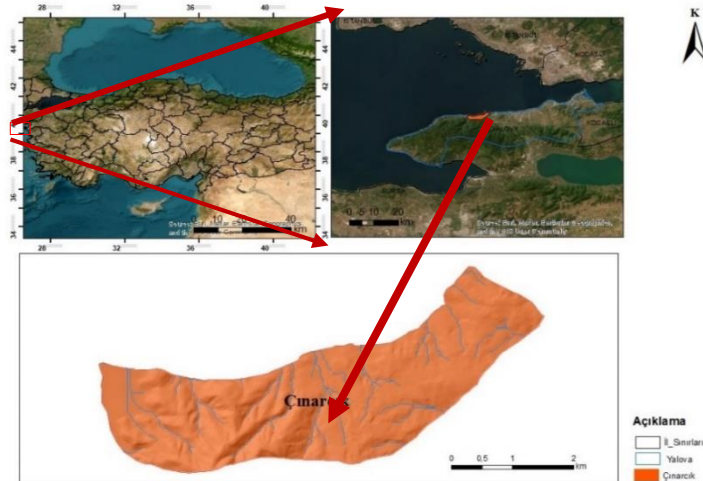
Yiğittepe vd. 2021 yılında Yenice-Karabük bölgesinde yaptıkları çalışmada Coğrafi Bilgi Sistemleri ortamında çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek olmak üzere beş sınıfa ayrılan heyelan duyarlılık haritası hazırlanmıştır. Heyelan duyarlılık haritası Frekans Oranı yöntemi ile jeoloji, eğim, bakı ve akarsulardan uzaklık parametreleri kullanılarak hazırlanmıştır. Analiz sonucunda inceleme alanı %9 çok düşük, %13 düşük, %17 orta, %38 yüksek ve %23 çok yüksek duyarlı bölgelerde yer almaktadır [9].

Zengince tarafından 2020'de yapılan çalışmada Kocaeli-Gölcük bölgesinin güney köylerini kapsayan 28,03 km² alan üzerinde 3 farklı senaryo ile heyelan duyarlılık analizi yapılmıştır. Jeoloji, eğim, bakı, yükseklik, arazi kullanımı, akarsuya uzaklık, yollara uzaklık, aktif faya uzaklık parametreleri ile Ağırlıklı Çakıştırma yöntemi ile Coğrafi Bilgi Sistemleri ortamında yapılan analizde senaryo 2 daha doğru sonuç vermiştir. İnceleme alanının %2,39'u çok yüksek, %6,88'i yüksek, %33,70'i orta, %2,97'si az, %0,044'ü ise duysarsız alanlardan oluşmaktadır [10].

III. İNCELEME ALANI

A. İNCELEME ALANININ TANITILMASI

İnceleme alanı Marmara Bölgesi'nde Yalova ili sınırları içindedir. G22D1 ve G22D2 paftaları içerisinde yer almaktadır. Yaklaşık olarak 11 km² alanı kaplamaktadır (Şekil 1). Arazide genel eğim yönü güneydoğuya doğru olup muhtelif yamaç eğimlerine sahiptir. Bölgedeki en önemli akarsular Armutlu Deresi ve Koca Deredir.



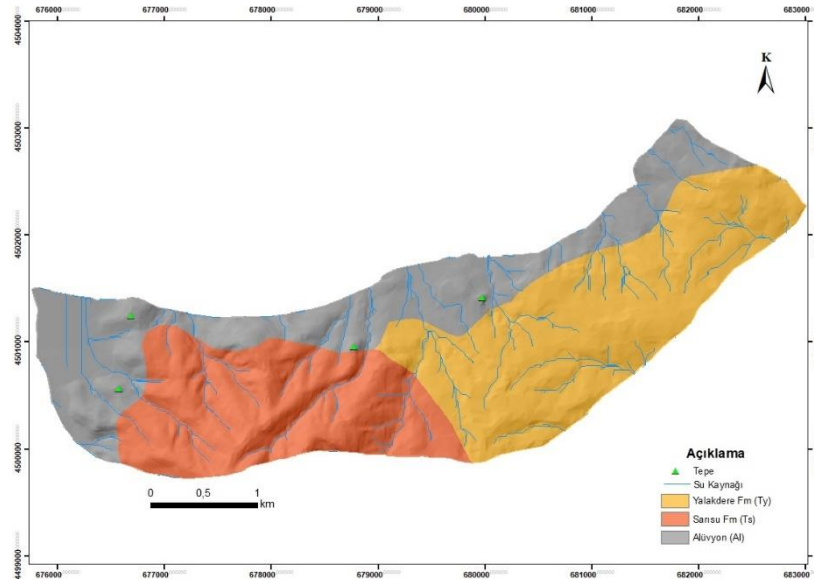
Şekil 1. İnceleme alanının yer bulduru haritası

A. 1. Bölgesel Jeoloji ve Jeomorfoloji

Yalova ili Marmara Bölgesi'nin güneydoğusunda yer almaktadır. Yalova'nın güneyinde ise ilin en yüksek kesimlerini oluşturan batıdan doğuya doğru İzmit-Sapanca arasında Kocaeli Sıradağları ile birleşen Samanlı Dağları ile çevrilidir. Bölgede Samanlı Dağları'nın en yüksek noktası olan Beşpınar Tepesi (926 m.) yer almaktadır.

İnceleme alanı ve yakın dolayında Kuvaterner çökelleri, Pliyosen yaşlı Yalakdere Formasyonu ve Eosen yaşlı Sarısu Volkanitleri yüzeylenmektedir. Bölgedeki en eski ve kapsamlı çalışma Akartuna, (1968) [11] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada en doğuda Gevye Boğazı, en batıda Armutlu Burnu'nu içeren Samanlı Dağları yükseliminin jeolojisi 1:100.000 ölçekte haritalanmıştır.

Kuvaterner Çökeller inceleme alanında en geç birimdir ve kıyı şeridinde yüzeylenmektedir. Holosen yaşlı olan çökeller alüvyondan oluşmaktadır [12]. Yalakdere formasyonu Bargu ve Sakınc [13] tarafından adlandırılmıştır. Formasyon sarı, boz renkli, silt aralanmalarından, kilaşı, ile kireçtaşı ve karbonatlı kumtaşından oluşmaktadır. Yalakdere Formasyonu, Mudanya formasyonun Yalova'daki karşılığıdır, yaşı Erken Pliyosen olarak belirlenmiştir [12]. Sarısu volkanitleri, Çınarcık'ın güneybatısında yüzeylenmektedir. Metamorfik kayalar üzerinde konglomera, çamurtaşı, kumtaşı ve kireçtaşından oluşan bir çökelleme düzeyi ile başlamaktadır. Volkanitlerdeki lav akıntısını bazalt ve bazaltik andezit türü kayalar oluşturmaktadır, birimin yaşı Eosen olarak belirlenmiştir [12]. İnceleme alanının jeoloji haritası Şekil 2'de verilmiştir. İnceleme alanında kıyı şerdi boyunca ve vadi tabanlarında alüvyon, batı kesimde Yalakdere formasyonu, doğu kesimde ise Sarısu formasyonu yüzeylenmektedir.



Şekil 2. İnceleme alanının jeoloji haritası

IV. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada heyelan duyarlılık haritalarının oluşturulmasında ArcGIS Pro 2022 yazılımı, uzaktan algılama ve hava fotoğrafları için PALSAR uydu görüntüleri, Google Earth görüntüleri ve 1:25 000 topografik haritaları kullanılmıştır. İnceleme alanında heyelan duyarlılık analizi yapmak için Mantıksal Regresyon, Frekans Oranı ve ArcGIS Pro Suitability Model yöntemlerinden yararlanılmıştır. Heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında aynı bölge için dahi farklı araştırmacılar ve farklı yöntemler kullanıldığında sonuçlarda değişim gözlemlenmektedir [14]. Bu nedenle birden fazla yöntem kullanılmış ve bu yöntemler için doğruluk analizi yapılmıştır. Yapılan doğruluk analizlerinde inceleme alanı için en doğru sonuç veren yöntemin Mantıksal Regresyon olduğu görülmüştür. Yapılan literatür taraması sonuçları ve arazi gözlemleri göz önünde bulundurulduğunda; inceleme alanı için yukarıda

belirtilen yöntemlerin kullanılmasına karar verilmiştir. Mantıksal Regresyon yöntemi için heyelanlı ve heyelansız alanlar için %80 analiz, %20 test olacak şekilde veri seti rasgele belirlenerek SPSS programı üzerinden elde edilen sonuçlara göre CBS ortamında analiz yapılmıştır. Frekans Oranı yöntemi için de aynı şekilde veri seti %80 analiz, %20 test verisi olacak şekilde rastgele ayrılmıştır, parametrelerin etki ağırlıklarına göre duyarlılık analizi yapılmıştır. ArcGIS Pro Suitability Modeli için de aynı adımlar izlenmiştir. Kullanılan tüm yöntemler için parametrelerin katman haritaları oluşturulmuş ve alt sınıflarının etki ağırlıkları belirlendikten sonra CBS ortamında analizler yapılmıştır (Şekil 4). Test verileri için kullanılan doğruluk analizi ise ROC analizi ile sağlanmıştır. Jeoloji, yağış, eğim, arazi kullanımı, yükseklik, bakı, yollardan uzaklık ve faydan uzaklık olmak üzere 8 farklı parametre kullanılarak heyelan duyarlılık haritaları oluşturulmuştur.

Çalışmanın ilk aşamasında 1:25 000 ölçekli topografik haritanın 10 metre aralıklı eş yükselti eğrileri sayısallaştırılarak elde edilen yüksek çözünürlüklü olması ve eğim, bakı haritalarının en doğru sonucu vermesi için piksel boyutu 7.1x7.1 m çözünürlüğe sahip sayısal yükseklik modeli haritası referans alınarak bakı ve eğim katman haritaları oluşturulmuştur. “MTA Yer Bilimleri Görüntüleyici” portalından alınan veriler Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamında sayısallaştırılarak inceleme alanının jeoloji haritası oluşturulmuştur. Meteoroloji Genel Müdürlüğü internet sitesinden alınan veriler ve istasyon bilgileri ile Kriging yöntemi ile inceleme alanının yağış yoğunluğu haritası oluşturulmuştur. Arazi kullanımı katman haritası için CORINE verileri kullanılmıştır. MTA Diri Fay Haritası ve OpenStreetMap verileri de sayısallaştırılarak Olası Kuvaterner fayından ve yollardan uzaklık katman haritaları oluşturulmuştur. Tüm katman haritaları ve heyelan duyarlılık haritaları WGS_1984_UTM_Zone_35N projeksiyon sistemine göre oluşturulmuştur.

Heyelan Envanteri

İnceleme alanı ve çevresinde yağış ve sıcaklık değişimleri gibi dönemsel değişimler diğer parametreler ile incelendiğinde bölgedeki heyelan türünün krip veya akma olduğu görülmektedir. Heyelan envanteri verileri duyarlılık analizlerin için baz alınan veridir. Heyelanın alansal olabilirliği ve dağılımını göstermektedir [15]. İnceleme alanında geniş yayılım gösteren 20 adet heyelan incelenmiştir. Heyelan duyarlılık haritaları arazi gözlemleri, “MTA Yer Bilimleri Görüntüleyici” portalından alınan heyelanlı bölge verileri ve AFAD Yalova Müdürlüğü tarafından belirlenen heyelan bölgeleri verileri kullanılarak hazırlanmıştır. İnceleme alanındaki duyarlılık analizi jeoloji, yağış, eğim, arazi kullanımı, yükseklik, bakı, yollardan uzaklık ve faydan uzaklık olmak üzere 8 farklı parametreden oluşan katman haritaları ve heyelan envanteri ile yapılmıştır. Bu katmanlar aşağıdaki bölümlerde açıklanmıştır.

Jeoloji

İnceleme alanındaki litoloji, jeolojik birimlerin mühendislik jeolojisi özellikleri ve litolojik özelliklere bağlı ayrışma yamaç duraysızlıkları açısından en çok kullanılan parametredir. Jeolojik istifteki birimlerin bu özellikleri ise her birimin kendi içinde yamaç duraysızlığına etki eden temel faktörlerdir. Yapılan saha gözlemleri sonucunda inceleme alanındaki yamaç duraysızlıkları sonucu meydana gelen heyelanların oluşmasında, en etkin parametrelerin litoloji-ayrışma ile Yalakdere ve Sarısu formasyonlarındaki heterojen jeolojik istif olduğu tespit edilmiştir. İnceleme alanı ve çevresinde meydana gelen yamaç duraysızlıkları bölgedeki litoloji üzerinde diğer parametrelerin katılımıyla meydana gelmektedir.

Yağış

Yamaç malzemesinin doygunluk derecesi duraylılığı doğrudan etkilemektedir. Duraysız bölgenin topuk kısmındaki su yoğunluğu nedeniyle doygunluk derecesi artmaktadır böylece stabilite bozulmaktadır. Suyun taneler arasına girmesiyle yamaç yükünde de bir artış olmaktadır. Böylece çok fazla su girişi yamacın yük dengesini değiştirerek ve duraylılığını bozarak heyelanın oluşumuna neden olmaktadır. İnceleme alanının aylık toplam yağış miktarı ortalaması (mm) özellikle aralık ve ocak aylarında oldukça fazladır. Yıllık ortalama yağışlı gün sayısı 124.2 iken aylık toplam yağış miktarı ortalama olarak 756.9 mm'dir.

Eğim

Yapılan birçok çalışmada eğim ile yamaç duraysızlığı arasında doğrudan bir ilişki olduğu savunulmuştur. Bazı araştırmacılar ise eğim derecesinin yüksek olmasının tek başına heyelana neden olacağı düşünülmemektedir. Zemin ortamlarında heyelanın gerçekleşmesi için en az 1-2 metre kalınlığa ihtiyaç duyulduğunu fakat çok yüksek eğimli yerlerde erozyon ile bu kalınlığa her zaman ulaşamayacağı belirtilmiştir [14]. Litolojinin gevşek olması ve yamacın eğimli olması herhangi bir yük değişiminde heyelan oluşma sürecini hızlandırabilir. İnceleme alanına ait sayısal yükseklik modeline göre oluşturulan eğim haritası 0° - 10° , 10° - 20° , 20° - 30° , 30° - 40° ve $> 40^{\circ}$ şeklinde 5 alt parametreye ayrılmış ve hesaplanmıştır.

Arazi Kullanımı

İnceleme alanında arazi, yerleşim alanları, ormanlık alanlar, bitki örtüsü içeren alanlar, yollar vb. şekilde yamaç duraysızlığını neden olan etmenler şeklinde kullanılmıştır. Karakaş ve Coruk tarafından 2011 yılında yapılan çalışma gösteriyor ki Kocaeli'nin bazı bölgelerinde de heyelan nedeni ile yollarda çökme, istinat duvarlarının yıkılması gibi durumlar görülmüştür [16].

Daha önce belirtildiği gibi gevşek malzemeden oluşan yamaç üzerinde herhangi bir yük değişikliği yamacın stabilitesini bozarak heyelanın meydana gelmesine neden olmaktadır. Yerleşim alanları heyelan duyarlılığı olan yamaçların topuk kısmında bulunmaktadır. Topuk kısmındaki zemin malzemesinin tahliye edilerek yerine yapılar yapılması stabiliteye zarar vermektedir. İnceleme alanında daha önce meydana gelen heyelanlar nedeniyle bazı evlerde gözle görülen hasarlar meydana gelmiştir ve tahliye edilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. 2019 yılında meydana gelen heyelan nedeniyle yıkılan istinat duvarı [17].

İnceleme alanında yapılan yollarda zamanla yer yer çökme ve göçme meydana gelmiştir. Açılan yol yarmaları yamacın duraylılığını bozarak yük azalmasına, ardından yol yapım işlemi tamamlandıktan sonra ise trafik oluşmasıyla yük artışına neden olmaktadır. Bu yük dengesi değişiminin nasıl giderileceği doğru hesaplanmazsa daha büyük hasarlara ve kayıplara neden olabilir. İnceleme alanı ve çevresi için arazi kullanımı/örtüsü için CORINE verileri ile CBS ortamında sayısallaştırılmıştır. İnceleme alanı arazi kullanımı bakımından Kesikli Şehir Yapısı, Karışık Tarım Alanı, Karışık Orman, Geniş Yapraklı Orman, Doğal Bitki Örtüsü ve Bitki Değişim Alanları olmak üzere 6 sınıfa ayrılmıştır.

Sayısal Yükseklik Modeli

Yamaç duraysızlığı analizlerinde en çok kullanılan parametrelerden biri de yamacın deniz seviyesinden yüksekliğini ifade eden topografik yüksekliktir. Yüksekliğin heyelanın meydana gelmesinde doğrudan bir etkisinin olup olmadığı birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. İnceleme alanındaki yükseklik 2,6 ile 371,28 metre arasında değişiklik göstermektedir ve CBS ortamında 0-50 m, 50-100 m, 100-150 m, 150-200 m, 200-371,28 metre olacak şekilde 5 sınıfa ayrılmıştır.

Bakı

Bakı, yamaçların yönü hakkında bilgi verir ve inceleme alanı için önemli olan parametredir. Bakı yamacın yönüne göre günlemeye maruz kalma, yağış ve rüzgâr gibi litolojiyi zayıflatır ve ayrışmaya neden olur. Bu etmenler ile zayıflayan ve ayrışan litoloji ise yamacın duraylılığının kaybetmesi ile heyelana neden olur. Bakı düz (-1), kuzey (0-22,5°), kuzeydoğu (22,5°-67,5°), doğu (67,5°-112,5°), güneydoğu (112,5°-157,5°), güney (157,5°-202,5°), güneybatı (202,5°-247,5°), batı (247,5°-292,5°), kuzeybatı (292,5°-337,5°) ve (337,5°-360°) şeklinde sınıflandırılmıştır. İnceleme alanındaki jeolojik birimler bakı yönüne göre günlenmeye maruz kalmıştır.

Yollara Uzaklık

Yamaç duraylılığının bozulup heyelanın meydana gelmesindeki en önemli etkenlerden biri yamaç üzerindeki doğal yük dengesinin bozulmasıdır. Yol yapım sürecinde ve daha sonra araçların sürekli yamaç dengesi üzerinde değişikliğe neden olması heyelan oluşumunu tetikleyebilir. Ayrıca inceleme alanı yağış alan bölgelerdendir. Özellikle yağışın yoğun olduğu zamanlarda gevşek malzeme ve yüksek eğimle birlikte yollarda çökme gibi istenmeyen durumlar geçmişte meydana gelmiştir. İnceleme alanı için yollara olan mesafenin de heyelan oluşumu üzerinde etkisi olduğu düşünülerek analize dahil edilmiştir. İnceleme alanı “Öklid Uzaklığı” ile yolların yakınlık mesafesine göre 0-50 m, 50-100 m, 100-400 m, 400-1082,2 metre olmak üzere 4 sınıfa ayrılmıştır.

Faya Uzaklık

MTA Yer Bilimleri Görüntüleyici portalında bu hattın devamı olan Olası Kuvaterner Fayı’na ulan uzaklık değerlendirilmiştir. Aktif olan bu fay 18 Eylül 1963 yılında meydana gelen 6.4 büyüklüğünde deprem üretmiş Çınarcık havzasının kuzeydoğusunda kırığa neden olmuştur. Örgülü 2011, bu olayı havzanın çek-ayır modeline uygun olduğunu vurgulamıştır [18]. İnceleme alanındaki litoloji gevşek malzemeden oluştuğu için deprem dalgalarından daha çok etkilenecek ve daha çok zarar görecektir. Aktif tektonizmaya sahip olan bölgelerdeki malzemeler tektonizma nedeniyle zarar gördüğü için duraysızlık bakımından yüksek riskli bölgeler olmaktadır. İnceleme alanı ve çevresinin bu faylara uzaklığı ~170 m ile ~ 3 km arasında değişiklik göstermektedir. CBS ortamında “Öklid Uzaklığı” yaklaşımıyla faya uzaklık katman haritası oluşturulmuştur ve yakınlık mesafesine göre 0-200 m, 200-300 m, 300-800 m, 800-3000 m, 3000-4387,1 metre olmak üzere 5 sınıfa ayrılmıştır.

V. BULGULAR

İnceleme alanında geniş yayılım gösteren 20 heyelanın jeoloji, yağış, eğim, arazi kullanımı, sayısal yükseklik modeli, bakı, yollara uzaklık ve faya uzaklık olmak üzere oluşturulan katman haritaları ile CBS ortamında duyarlılık analizi yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan heyelan envanter haritasında farklı tipte heyelanların olduğu görülmektedir. Abay vd. (2019) yapılan çalışmada da olduğu gibi farklı çeşit olan ve geniş yayılım gösteren 20 heyelan aynı haritada üzerinde gösterilmiştir [6]. İnceleme alanında da akma, krip ve kayma türü hareketler birbirini tetikleyen veya birbiri ardına gelişen heyelanlar olarak izlenmektedir. İnceleme alanı için duyarlılık haritasında bu karmaşık hareket türü değerlendirilmiştir.

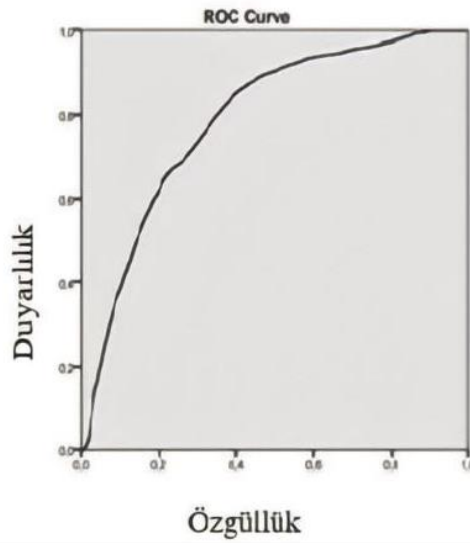
İnceleme alanı heyelan duyarlılık analizi için CBS ortamında 7.1x7.1 metre çözünürlüğe sahip Sayısal Yükseklik Modeli verisi kullanılarak inceleme alanına ait eğim, jeoloji, yağış, yükseklik, arazi kullanımı/örtüsü, bakı, yollara uzaklık ve faya uzaklık parametrelerine ait katman haritaları hazırlanarak elde edilen tüm veriler sonucunda Mantıksal Regresyon, Frekans Oranı ve ArcGIS Pro Suitability Model ile heyelan duyarlılık haritaları oluşturulmuştur. Verilerin tahmin edilebilirliğini test etmek amacıyla Alıcı işletim karakteristiği (ROC) eğrisi kullanılmıştır. Şekil 9’da kullanılan yöntemlerin analiz değerleri gösterilmiştir. ROC eğrisi oluşturulduktan sonra eğrinin altında kalan alanın (AUC) değerine göre yapılan analizin doğruluğu belirlenmektedir. Yapılan analizin kabul edilebilir olması için eğrinin altında kalan alanın en az %60 olması gerekmektedir. Bu

çalışmada yapılan analizlerde eğrinin altında kalan alan Mantıksal Regresyon yöntemi için %78,8, Frekans Oranı için %64,7 ve ArcGIS Pro Suitability Model için %69,4 olarak hesaplanmıştır.

Mantıksal Regresyon ile Heyelan Duyarlılık Haritası

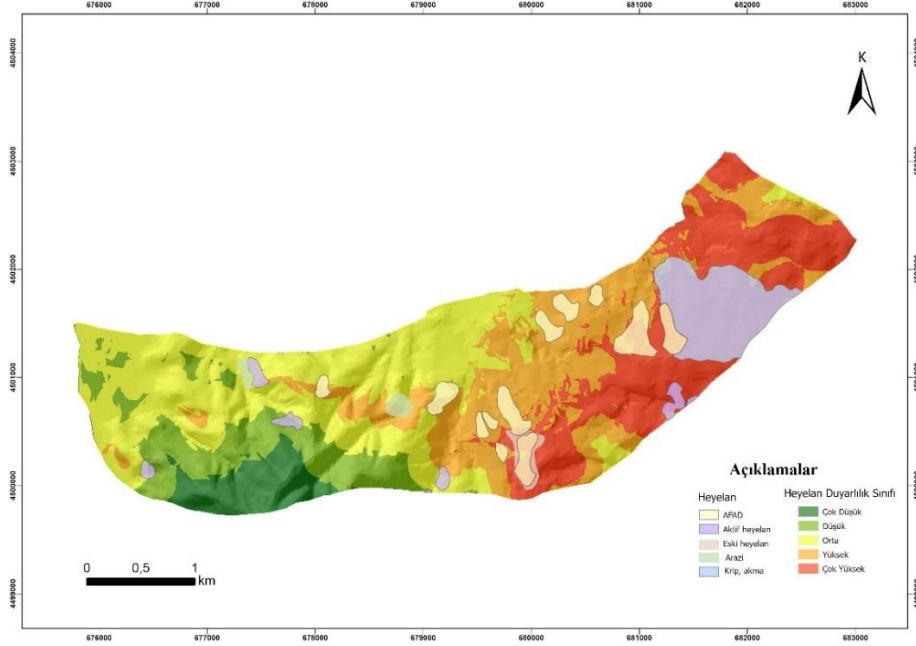
İnceleme alanı heyelan duyarlılık analizi için CBS ortamında 7.1x7.1 metre çözünürlüğe sahip dem verisi kullanılarak inceleme alanına ait eğim, jeoloji, yağış, yükseklik, arazi kullanımı/örtüsü, bakı, yollara uzaklık ve faya uzaklık parametrelerine ait katman haritalar hazırlanarak elde edilen tüm verilerin %80'i, analiz, %20'si ise elde edilen duyarlılık değerlerini test etmek amacıyla kullanılmıştır. Verilerin tahmin edilebilirliğini test etmek amacıyla ROC eğrisi kullanılmıştır. Mantıksal Regresyon analizi için doğruluğu 1 değerine yaklaştıkça artarken 0.5 değerinin altında kalması başarılı olmadığı anlamına gelir.

Analiz için elde edilen verilerin %80'i analiz, %20'si ise test amacıyla kullanılmıştır. SPSS üzerinde test için ROC eğrisi ve AUC kullanılmıştır ve ROC eğrisi analizi ile eğrinin altında kalan alan (AUC) %78,8 olarak bulunmuştur. Şekil 3'de doğruluk analizi sonucu gösterilmiştir.



Şekil 4. Mantıksal Regresyon ROC Analizi

Mantıksal Regresyon yöntemine göre inceleme alanının %5,41'i düşük, %10,32'si düşük, %31,22'si orta, %24,98'i yüksek ve %28,05'i çok yüksek riskli heyelan duyarlılık sınıfında yer almaktadır (Şekil 4).

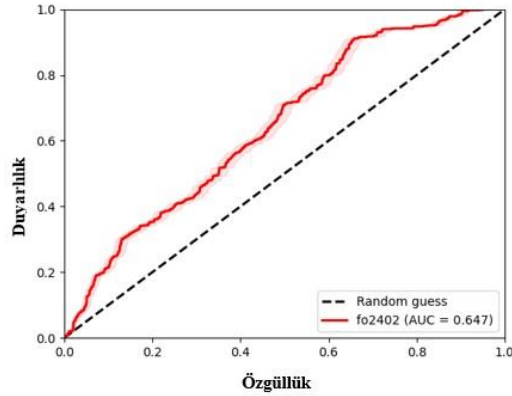


Şekil 5. Mantıksal Regresyon Yöntemi ile hazırlanan Heyelan Duyarlılık Haritası

Frekans Oranı ile Heyelan Duyarlılık Haritası

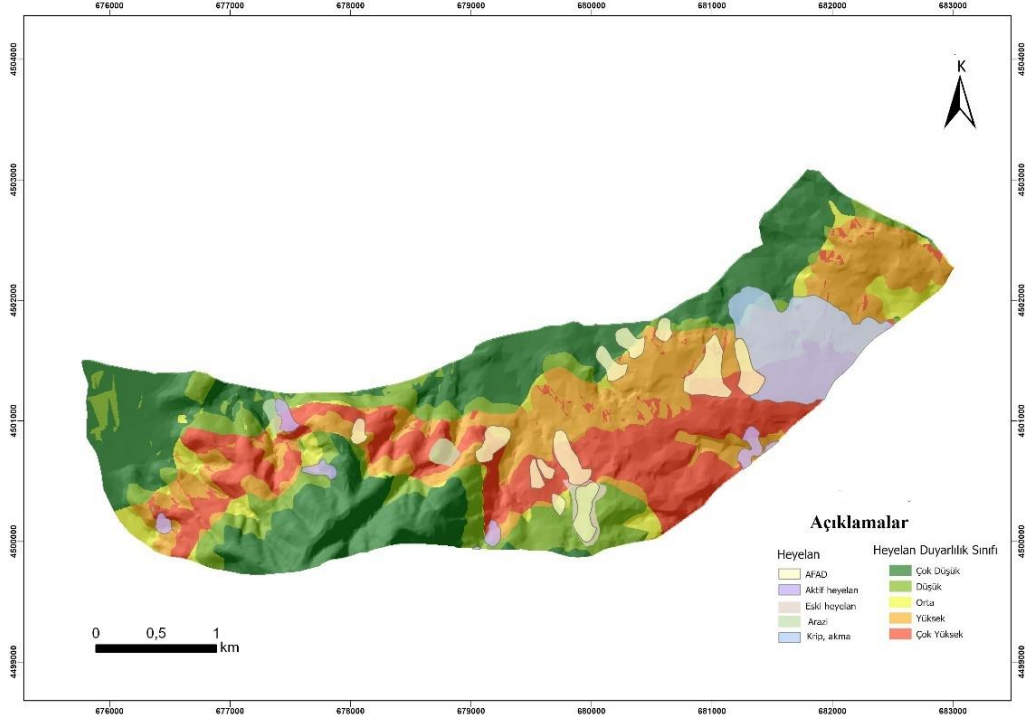
Belirlenen parametrelerin katman haritaları hazırlandıktan CBS ortamında ArcToolBox menüsünden “Spatial Analyst Tools”- “Zonal”- “Tabulate Area” komutu ile her parametrenin piksel değerlerinin heyelanlı alandaki piksel değerinin oranları hesaplanarak frekans oranları bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar CBS ortamında parametre değerlerine tekrar sınıflandırma yapılarak atanmıştır ve son olarak öngörülen oran (PR) değerlerin toplanmasıyla heyelan duyarlılık haritası oluşturulmuştur. Bu çalışma için Heyelan Duyarlılık İndeksi (Landslide Susceptibility Index-LSI) 5,40 olarak bulunmuştur. Analiz sonucunda heyelan duyarlılık sınıfları çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek olarak beş sınıfa ayrılmıştır.

Yapılan analizin doğruluğunu test etmek için ROC eğrisi CBS ortamında oluşturulmuştur ve sonucu %64,7 olarak hesaplanmıştır (Şekil 5).



Şekil 6. Frekans Oranı ROC Eğrisi Analizi

Frekans Oranı için ise inceleme alanının %30,8'i çok düşük, %14,48'i düşük, %4,5'i orta, %24,02'si yüksek ve %26,2'si çok yüksek heyelan duyarlılık sınıfında yer almaktadır (Şekil 6).

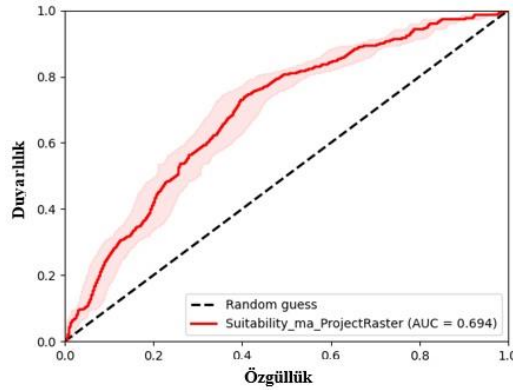


Şekil 7. Frekans Oranı Yöntemi ile hazırlanan Heyelan Duyarlılık Haritası

ArcGIS Pro Uygunluk Modeli ile Heyelan Duyarlılık Haritası

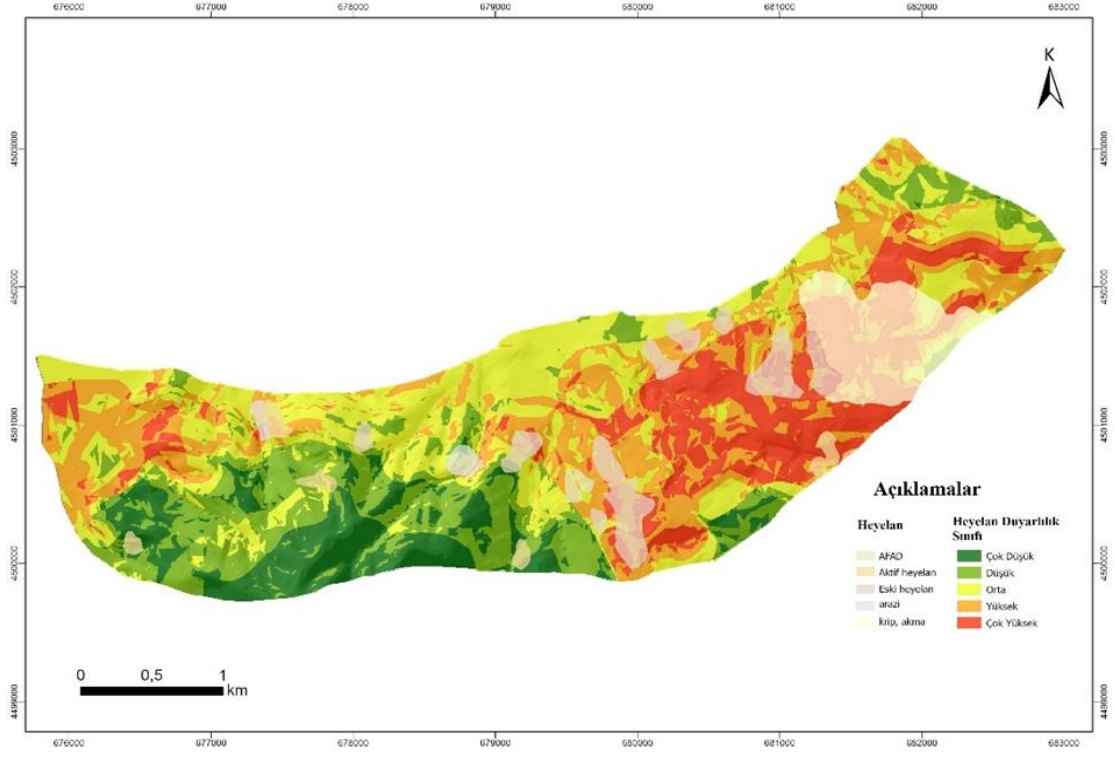
Analiz için belirlenen eğim, yağış, jeoloji, yükseklik, arazi kullanımı, bakı, yollardan uzaklık ve faydan uzaklık parametrelerinin katman haritaları ile heyelan envanteri karşılaştırılmıştır. Daha sonra her parametre ve alt sınıfları için 1 ile 10 arasında; 1 en az, 10 en çok etkili olacak şekilde atama yapılarak yeniden sınıflandırılmıştır ve her parametre için ağırlık yüzdesi tanımlanmıştır.

Yapılan analizin doğruluğunu test etmek için ROC eğrisi CBS ortamında oluşturulmuştur ve sonucu %69,4 olarak hesaplanmıştır (Şekil 7).



Şekil 8. ArcGIS Pro Suitability Model ROC Eğrisi

ArcGIS Pro Suitability Model için ise % 4,42'si çok düşük, %20,57'si düşük, %27,9'u orta, %23,42'si yüksek ve %23,67'si çok yüksek ve AUC değeri %69,7'dir (Şekil 8).



Şekil 9. ArcGIS Pro Suitability Model ile hazırlanan Heyelan Duyarlılık Haritası

Parametre	Alt Sınıf	Mantıksal Regresyon	Frekans Oranı	ArcGIS Pro Suitability Model
Eğim	≤10°	-0,001	0,185	3
	10°-20°		0,114	4
	20°-30°		0,059	5
	30°-40°		0,094	6
	>40°		0,197	8
Jeoloji	Yalakdere	.000	0,378	8
	Alüvyon		0,06	7
	Sarısu		0,033	3
Bakı	Düz	.001	0,117	1
	Kuzey		0,163	10
	Kuzeydoğu		0,153	9
	Doğu		0,116	8
	Güneydoğu		0,049	7
	Güney		0,091	5
	Güneybatı		0,031	4
	Batı		0,16	3
Arazi Kullanımı	Karışık Tarım Alanı	.0.069	0,204	10
	Karışık Orman		0,046	8
	Doğal Bitki Örtüsü		0,206	9
	Kesikli Şehir Yapısı		0,107	7
	Bitki Değişim Alanla		0,045	6
	Geniş Yapraklı Orman		0,021	2
Faydan Uzaklık (m)	0-200	.001	0,032	10
	200-300		0,001	9
	300-800		0,056	8
	800-3000		1,871	5
	3000-4387,10		0,516	4
Yoldan Uzaklık (m)	0-50	-0,009	0,184	10
	50-100		0,191	9
	100-400		0,071	7
	400-1.082,19		0,003	4
Yağış	734,33-756,39	.021	0,052	1
	756,39-779,82		0,215	5
	779,82-808,07		0,214	8
	808,07-846,67		0,091	9
	846,67-910,07		0,002	10
Sayısal Yükseklik Modeli (m)	2,7-50	.000	0,054	3
	50-100		0,185	5
	100-150		0,244	6
	150-200		0,132	7
	200-370,85		0,005	9

Şekil 10. Frekans Oranı, Mantıksal Regresyon ve ArcGIS Pro Suitability Model analizleri için Kullanılan tüm parametreler ve etki ağırlıkları

VI. SONUC

Bu çalışma kapsamında geniş yayılım gösteren 20 heyelan incelenmiştir. Heyelan duyarlılık haritasının hazırlanması için Mantıksal Regresyon, Frekans Oranı ve ArcGIS Pro Suitability Model olmak üzere üç farklı yöntemle analiz yapılmıştır. Mantıksal Regresyon yöntemine göre inceleme alanının %5,41'i düşük, %10.32'si düşük, %31,22'si orta, %24,98'i yüksek ve %28.05'i çok yüksek riskli heyelan duyarlılık sınıfında yer almaktadır. Yapılan analizin doğruluğunu test etmek için ROC eğrisi ve AUC kullanılmıştır. AUC %78,8 olarak bulunmuştur. Frekans Oranı yöntemine göre ise inceleme alanının %30,8'i çok düşük, %14.48'i düşük, %4,5'i orta, %24.02'si yüksek ve %26,2'si çok yüksek heyelan duyarlılık sınıfında olup AUC sonucu %64,4'tür. ArcGIS Pro Suitability Model için ise %4.42'si çok düşük, %20.57'si düşük, %27,9'u orta, %23.42'si yüksek ve %23,67'si çok yüksek ve AUC değeri %69,7'dir. Mantıksal Regresyon yöntemine göre inceleme alanının %53,03'ü yüksek ve çok yüksek duyarlılık, Frekans Oranı yöntemine göre %50,22'si yüksek ve çok yüksek duyarlılık, ArcGIS Pro Suitability Model için 51,32'si yüksek ve çok yüksek duyarlılık sınıfında yer almaktadır. Analizler sonucunda inceleme alanı için en uygun heyelan duyarlılık analizinin Mantıksal Regresyon yöntemi analizi olduğu söylenebilir.

İnceleme alanının kuzeyinde bulunan heyelanlar, heyelan envanterine göre eski heyelan olarak sınıflandırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda ise bu alanın yüksek veya çok yüksek riskli heyelan duyarlılık sınıfında yer aldığı gözlemlenmiştir. Bu çalışma sonucunda oluşturulan heyelan duyarlılık haritası ile bölgenin heyelan bakımından duyarlılık düzeyi saptanmıştır. Elde edilen duyarlılık analizi verileri ile yüksek ve çok yüksek duyarlılık sınıfındaki bölgeler için gerekli önlemlerin mutlaka alınması gerekmektedir. Heyelan modelleri dikkate alınarak bölgede yapılacak arazi planlaması için bu çalışmada elde edilen sonuçların dikkate alınması önerilir.

VII. KAYNAKLAR

[1] B. Ildır, "Distribution of landslides in Turkey and applications regarding the natural disaster Regulation," *In Proceedings of 2nd National Landslide Symposium Sapanca, Türkiye, 1995*, pp. 1-9.

[2] L. D. Cengiz, "Farklı analitik hiyerarşi süreci yöntemlerinin heyelan duyarlılığı haritalamalarındaki etkinliğinin araştırılması," Yüksek Lisans Tezi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2021.

[3] Afet İstatistikleri 2020, AFAD.

[4] Ç. Tetik Biçer, "Heyelan risk haritalaması üzerine yarı sayısal bir değerlendirme," Doktora Tezi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2017.

[5] P. Aleotti, & R. Chowdhury, "Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives". *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 58, no. 1, pp. 21-44, 1999.

[6] A. Abay, G. Barbieri, & K. Woldearegay, "Gis-based landslide susceptibility evaluation using analytical hierarchy process (AHP) approach: the case of tarmaber district, ethiopia". *Momona Ethiopian Journal of Science*, vol. 11, no.1, pp. 14-36, 2019.

[7] Ç. T. Biçer, & M. Ercanoglu, "A semi-quantitative landslide risk assessment of central karamanmaraş city in the eastern mediterranean region of turkey," *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 13, pp. 1-26, 2020.

[8] A. Yıldız, & T. Çan, "Germencik-İncirliova (Aydın) bölgesinin heyelan duyarlılık değerlendirilmesi," Yüksek Lisans Tezi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Çukurova Üniversitesi, Adana,

Türkiye, 2021.

[9] A. G. Yiğittepe, H. K. Çıtıroğlu, A. Karakaş, C. Mekik, “Investigation of slope movements and landslide susceptibility analysis of karabük-yenice area in nw of turkey,” *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 14, no. 12, pp. 1144, 2021.

[10] M. Zengince, A. Karakaş, “Kocaeli gölcük’te oluşan heyelanların nedenleri, etkileri ve alınan önlemler,” *Uygulamalı Yerbilimleri Dergisi*, c. 17, s. 1, ss. 39-54, 2018.

[11] M. Akartuna, “Armutlu yarımadasının jeolojisi,” *İstanbul Üniversitesi. Fen Fakültesi Monografileri (Tabii İlimler Kısmı)*, c. 20, 1968.

[12] Ö. Emre, T. Erkal, A. Tchepalyga, N. Kazancı, M. Keçer, & E. Ünay, “Doğu marmara bölgesinin neojen-kuvaternerdeki evrimi,” *MTA dergisi*, c. 120, ss. 289-314, 1998.

[13] S. Bargu, & M. Sakıncı, “İzmit körfezi ile iznik gölü arasında kalan bölgenin jeolojisi ve yapısal özellikleri,” *İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi*, c. 6, s. 1-2, ss. 47-76, 1989.

[14] C. Gökçeoğlu, & M. Ercanoğlu, “Heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında kullanılan parametrelere ilişkin belirsizlikler”, *Yerbilimleri*, c. 23, ss. 189–206, 2001.

[15] A. Yalçın, S. Reis, A. C. Aydınoglu, & T. Yomralıoğlu, “A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in trabzon, ne turkey,” *Catena*, vol. 85, no. 3, pp. 274-287, 2007.

[16] A. Karakaş, & Ö. Coruk, “Impact of mass movements in the kocaeli province, turkey,” *Geology Today*, vol. 27, no. 2, pp. 70-73, 2011.

[17] S. Gözdereliler, (2019, 4 Mart). *Yalova'da heyelan riski tedirgin ediyor* [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.cnnturk.com/yerel-haberler/yalova/cinarcik/yalovada-heyelan-riski-tedirgin-ediyor-950382>

[18] G. Örgülü, “Seismicity and source parameters for small-scale earthquakes along the splays of the north anatolian fault (naf) in the marmara sea,” *Geophysical Journal International*, vol. 184, no. 1, pp. 385-404, 2011.

Bu çalışmada ArcGIS Pro 2022 sürümü kullanılarak 0722639_LearnArcGIS kullanıcı adı ile 21 günlük deneme sürümü lisansı ile duyarlılık haritaları oluşturulmuştur.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Bakır Oksit-Su ve Elmas-Su Nanoakışkanlı Birleşik Jet Akışlı Kanallarda Isı Transferi ve Akış Yapılarının Değerlendirilmesi

 Koray KARABULUT^{a,*}

^a *Elektrik ve Enerji Bölümü, Sivas Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, TÜRKİYE*

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: kkarabulut@cumhuriyet.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1183108

ÖZ

Bu çalışmada, sabit 1000 W/m^2 ısı akısına sahip dairesel oyuklu ve yamuk modellenmiş bakır plakalı yüzeylerden olan ısı transferi ve birleşik jet akışlı kanallardaki akış yapıları su, %2 hacimsel konsantrasyonlu CuO-Su (Bakır oksit)-Su ve Elmas-Su nanoakışkanları kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal çalışma, sürekli ve üç boyutlu olarak $k-\epsilon$ türbülans modeli Ansys-Fluent programının kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Kanallara ayrıca jet girişinden itibaren D jet giriş çapı ölçüsündeki sabit bir uzaklıkta (N) 45° ve 90° açılı kanatçıklar eklenmiştir. Kanal yüksekliği 3D iken; akışkanların Re sayısı aralığı 5000-15000'dir. Çalışmadan elde edilen sonuçların doğruluğu ve kabul edilebilirliği deneysel araştırmalar sonucu elde edilen eşitlik kullanılarak kanıtlanmıştır. Çalışmanın sonuçları, kanallardaki her bir model için ortalama Nu sayısının değişimleri olarak su ve nanoakışkanlar için kanatçiksiz ve kanatçıklı durumlarda karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, CuO-Su nanoakışkanı için birleşik jet akışın hız ve sıcaklık konturu dağılımları farklı kanatçık açıları için sunulmuştur. Bununla birlikte, kanallardaki her üç desenli yüzeyin tümü için farklı Reynolds sayılarında performans değerlendirme sayıları (PEC) ve ortalama Nu sayısı (Nu_m) ve yüzey sıcaklık değerleri (T_m) Re=5000 ve 15000 için analiz edilmiştir. Re=15000 için 90° kanatçıklı kanalda yamuk modellenmiş yüzeyde sırasıyla Elmas-Su ve Bakır oksit-Su nanoakışkanları kullanılması durumları için kanatçiksiz ve su akışkanı kullanılan kanallara göre Nu_m sayısında %27,57 ve %26,11'lik artışlar elde edilmiştir. Bunun yanı sıra, Re=15000 değerinde 90° açılı kanatçıklı kanallarda su akışkanı için PEC sayısı değerlerinin sırasıyla dairesel oyuklu ve yamuk modellenmiş yüzeylerde Elmas-Su ve CuO-Su nanoakışkanlarına göre %1,1-%1,31 ve %0,82-%0,63 daha fazla oldukları tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çapraz akış-çarpın jet birleşik jet akış, Nanoakışkan, Sayısal ısı transferi, Kanatçık

Evaluation of Heat Transfer and Flow Structures in Combined Jet Flow Channels with Copper Oxide-Water and Diamond-Water

ABSTRACT

In this study, heat transfer from circular hollow and trapezoidal model copper plate surfaces with a constant heat flux of 1000 W/m^2 and flow structures in combined jet flow channels were numerically investigated using water, 2% volumetric concentration CuO-Water (Copper oxide)-Water and Diamond-Water nanofluids. The numerical study was carried out steady and in three dimensions by using the Ansys-Fluent program with the $k-\epsilon$ turbulence model. In addition, 45° and 90° angled fins have been added to the channels at a fixed distance (N) in the size of the D jet inlet diameter from the jet inlet. While the channel height is 3D, the Re number range of the fluids is 5000-15000. The accuracy and acceptability of the results obtained from the study were proven by using the equation obtained as a result of experimental research. The results of the study were evaluated comparatively in

the finless and finned conditions for water and nanofluids as variations in the average Nu number for each model in the channels. Also, the velocity and temperature contour distributions of the combined jet flow for the CuO-Water nanofluid were presented for different fin angles. However, performance evaluation numbers (PEC) at different Reynolds numbers and mean Nu number (Nu_m) and surface temperature values (T_m) were analyzed for $Re=5000$ and 15000 for all three model surfaces in the channels. For $Re=15000$, 27.57% and 26.11% increases in the Nu_m number were obtained compared to the channels without fin and water-fluid for the use of Diamond-Water and Copper oxide-Water nanofluids, respectively, on the trapezoidal model surface in the 90° finned channel. In addition, the PEC number values for water fluid in channels with 90° angled fins at $Re=15000$ value were found to be 1.1%-1.31% and 0.82%-0.63 higher compared to Diamond-Water and CuO-Water nanofluids on the circular hollow and trapezoidal model surfaces, respectively.

Keywords: Combined jet flow with cross flow-impinging jet, Nanofluid, Numerical heat transfer, Fin

I. GİRİŞ

Elektronik elemanlardan olan ısı transferini artırmada kullanılan çapraz akış ile soğutma yöntemi, en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntem, soğuk akışkanın bir fanla tüm bileşenler üzerine gönderilmesi ve bu sayede elektronik bileşenlerin bütününe soğutulması esasına dayanmaktadır. Ancak, bu metod bütün devre elemanlarının soğutulması esasında olduğundan çok yüksek sıcaklıklardaki bileşenlerden olan ısı transferinde başarısız olabilir [1]. Bir diğer ısı transferi yöntemi de çarpan jetle soğutmadır. Bu yöntemde, soğuk akışkan lüleyle sıcaklığı yüksek bir elemana yersel şekilde püskürtülür. Çarpan jet ile sıcaklığı yüksek bir devre bileşeninin soğutulması sağlanabilirken, devrenin bütününe soğutulmasında yetersiz kalabilmektedir. Bir elektronik devrede sıcaklıkları birbirlerinden oldukça farklı birden çok eleman bulunmaktadır. Bu sebeple, tek çeşit soğutma yöntemi ile bütün devreyi güvenli şekilde tutabilecek şartlara erişilmekte sıkıntı yaşanmaktadır. Bu nedenle; çarpan jet ve çapraz akış soğutma yönteminin bir arada işleme alınarak birleşik jet akışı şeklinde uygulanması soğutma kapasitesi yüksek faydalı bir durum oluşturabilir. Çapraz akışla devre elemanları bir bütün olarak belirli bir aşamaya kadar soğutulabilirken, devrede sadece çok yüksek sıcaklıktaki elemanlar ise çarpan jet akışıyla noktasal olarak soğutulabilmektedir [2], [3]

Kilic ve ark., [4] bir tarafı açık ve üç tarafı kapalı kenarlardan oluşan dikdörtgen bir kanaldaki sabit ısı akılı ve bakır plakalı elektronik bileşenlerin tek bir hava jeti ile soğutulmaları üzerinde vorteks üreticinin etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Türbülanslı akış için kullandıkları Re sayısı 8000 iken; elemanlara uygulanan sabit ısı akısı değeri 1000 W/m^2 dir. Isı transferinin girdap üreticinin yerleşimine, uzunluğuna ve açısal konumuna duyarlı olduğunu gözlemlemişlerdir. Kılıç ve Ullah [5] farklı Re sayılarında ($Re=6000-12000$) Realizable $k-\epsilon$ türbülans modelini kullanarak sayısal olarak farklı akışkanların ($\text{Cu-H}_2\text{O}$, $\text{CuO-H}_2\text{O}$, $\text{TiO}_2\text{-H}_2\text{O}$, H_2O) çapraz akışlı ısı değiştiricilerinde soğutma performanslarını araştırmışlardır. Suyu göre en iyi performans gösteren akışkan olan $\text{Cu-H}_2\text{O}$ nanoakışkanının ortalama Nu sayısını %6,63 artırdığını belirlemişlerdir. Bir diğer çalışmada; Kılıç ve Abdulvahitoğlu [6] bir araç radyatöründe nanoakışkanlar ve dönen jetler ile sayısal olarak ısı transferini çalışmışlardır. Çalışmada, baz soğutucu olarak tüm parametreler için $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ nanoakışkanı seçilmiştir. Re sayısının 12000' den 21000' e artışı ile ortalama Nusselt sayısında (Nu) %51,3' lük bir artış elde edilmiştir. Dal ve ark., [7] hidrostatik yataklarda nanoparçacık ilaveli yağlayıcı akışkan kullanımının yük taşıma kapasitesine etkisi teorik olarak araştırılmışlardır. Yapılan çalışma ile nanoparçacık takviyeli yağlayıcı kullanımının hidrostatik yatakların yük taşıma kapasitesini arttırdığını ve yüksek hacimsel oranlar için nanoparçacık boyutunun performansa etkisinin daha baskın olduğunu belirlemişlerdir. Sabit ısı akılı bir elemandan çapraz akış-çarpan hava jetli akış ile olan ısı transferi Öztürk ve Demircan [8] tarafından sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada farklı jet giriş hızı/kanal giriş hızı oranları (0, 1, 2 ve 3) ve 0° , $22,5^\circ$, 45° , $67,5^\circ$ ve 90° olmak üzere kanala yerleştirilen kanatçıkların farklı açıları için kanaldaki tek bir elemandan olan ısı transferi incelenmiştir. En yüksek ısı transferinin, jet giriş hızı/kanal giriş hızı oranının 3 ve 90° kanatçık açısında olduğu belirlenmiştir.

Nanoakışkanların kullanıldığı jet çarpmalı çalışmalar incelendiğinde; Chang ve Yang [9] $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Su}$ nanoakışkanını kullanarak jet çarpmalı akış kaynamasının ısı transfer performansını incelemişlerdir.

Al_2O_3 -Su nanoakışkanının jet çarpma akışının ısı transferi performansının, çalışma sıvısı olarak kullanılan sudan daha kötü olduğu bulunmuştur. Isı transfer performansındaki azalmanın ısıl direncin artmasıyla sonuçlanan ısıtılmış yüzey üzerindeki bir nano-soğurma tabakasının oluşmasından kaynaklandığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, ısıtılan yüzeye akustik titreşim uygulanarak nano-soğurma tabakasının oluşumu önlenirken, bu durumda Al_2O_3 -Su nanoakışkanı kullanılarak elde edilen ısı transfer performansı su kullanılarak elde edilenden daha iyi olmaktadır. Datta ve ark., [10] dış bükey bir yüzey üzerine sınırlı bir yarıktan jet çarpmasında Al_2O_3 -Su nanoakışkanı kullanarak ısı transfer performansının araştırılması için sayısal simülasyon gerçekleştirmişlerdir. Sistemin akış davranışını ve taşınım ısı transfer performansını araştırmak için çeşitli Reynolds sayıları, jet-plaka arasındaki mesafe gibi farklı parametreler göz önünde bulundurulmuştur. Ortalama Nusselt sayısı ve ısı transfer katsayısının jet giriş Reynolds sayısındaki artışla önemli ölçüde arttığını belirlemişlerdir. Kumar ve ark., [11] ısı transfer oranını artırmak için jet çarpmalı durumda kanat profili sütunlarıyla birleştirilmiş bir ısı emici kullanmışlardır. Bunu gerçekleştirirken araştırmalarında su ve %1 konsantrasyonlu CuO-Su nanoakışkanından yararlanmışlardır. Sonuçlarında, ısı emici sıcaklığında jet akışkanı olarak su akışkanı kullandıklarında %10' luk bir azalma elde ederlerken, nanoakışkan kullandıklarında ise sıcaklık düşüşünün %14' ü bulduğunu saptamışlardır. Mikrokanalın üst duvarında tırtıklı enjeksiyon jeti bulunan ve 0-40 Hartman yoğunluğunda manyetik alan kullanan bir mikrokanal içindeki %0-6 Al_2O_3 -Su nanoakışkanın akışı Jalali ve ark., [12] tarafından incelenmiştir. Jet çarpma bölmeli alt mikro kanal duvarı sabit bir sıcaklığa sahipken üst mikro kanal duvarı çarpan jetler arasında yalıtılmıştır. Isı transferini artırmak amacıyla çarpan jetler için girintili mod uygulanmıştır. Sonuçlar, tırtık çentik yüksekliğinin fazla olmasının ısı transferini o ölçüde artırdığını göstermiştir. Selimefendigil ve Chamka [13] CuO-Su nano jeti kullanılarak oyuk benzeri bir kısmı olan izotermal bir yüzeyin soğutulmasında taşınım ısı transfer özelliklerini sayısal olarak analiz etmeyi amaçlamışlardır. Çalışmalarını, Reynolds sayısının farklı değerlerinde (100-400), farklı oyuk uzunlukları (5w-40w) ve yüksekliklerinde (w-5w) nanoparçacığın hacimsel konsantrasyonunu (%0-4) değiştirerek gerçekleştirmişlerdir. Oyuk uzunluğu düşük olduğunda, oyuk eğimli duvarının ortalama Nusselt sayısına katkısının önemli olduğunu ve en yüksek hacimsel konsantrasyonda su yerine nanoakışkan kullanıldığında ortalama ısı transferinin %35-46 oranında arttığını belirlemişlerdir. Abdullah ve ark., [14] çalışmalarında alüminyum bir plaka yüzeyine çift jet çarpmasının ısı transferi üzerinde TiO_2 nano çözeltisi konsantrasyonunun etkisini deneysel analiz yoluyla incelemişlerdir. Bunun haricinde değişkenler olarak çift jetin lüle mesafesini ve lüle-plaka mesafesini göz önüne almışlardır. Bu verilere bağlı olarak çift jetin akış yapısının ısı transferi artışını etkileyen önemli bir durum olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca, mesafelerin ve akış yapısını etkileyen nanoparçacık konsantrasyonunun da Re sayısı ile birlikte Nu sayısını etkilediğini belirlemişlerdir. Shi ve ark., [15] nano-alüminyum katkı maddelerinin yuvarlak su jetlerinin kararsızlığı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. İki şeffaf lülenin içinde ve çıkışının yakınında akış görselleştirmesi, yüksek hızlı gölge görüntüleme tekniği ile elde edilmiş ve nanoparçacık katkı maddelerinin jet kararsızlığı üzerindeki etkilerine esas olarak, viskozite artışı ve kavitasyon teşvikinin neden olduğu belirlenmiştir.

Ulaşılan literatür incelemelerinden de görüldüğü gibi çarpan jetlerin olduğu bir çok çalışma mevcuttur. Ancak, nanoakışkanların kullanılarak çapraz akış-çarpan jet akışın birlikte uygulandığı birleşik jet akışlı çalışma sayısı oldukça az olmakla birlikte; bu çalışmada kullanılan CuO-Su ve Elmas-Su nanoakışkanların kullanılarak ısı transferi performanslarının kıyaslandığı bir çalışmaya literatürde rastlanamamıştır. Bununla birlikte, literatürde ulaşılan çalışmalarla kıyaslandığında kanalda daha düşük basınç düşüşüne karşı; daha yüksek ısı transferi oranlarına ulaşılabilmektedir. Ayrıca, bu çalışmada da kullanılan karbon kökenli nanoakışkanlardan olan Elmas-Su nanoakışkanı gibi metal ve metal oksit nanoakışkanlarına göre düşük nanoparçacık konsantrasyonları ile yüksek ısı transferi sağlayabilen karbon kökenli nanoakışkanlar son yıllarda araştırmacıların dikkatini çekmekte olup; özellikle çeşitli ısı değiştiricileri uygulamalarında kullanıldığı çalışmalar literatürde bulunmaktadır [16 -19].

Bu çalışmada, H=3D yükseklikli birleşik jet akışlı kanallardaki dairesel oyuklu ve yamuk desenli yüzeylerden olan ısı transferi ve akış yapıları su, %2 CuO-Su ve %2 Elmas-Su nanoakışkanları kullanılarak kanatçıksız, 45° ve 90° açılı kanatçıklı kanal durumları için sayısal olarak incelenmiştir. Kanal içerisinde bulunan elemanların farklı model yüzeyleri olarak seçilmesinin nedeni, birleşik jet akışın soğutulacak desenli yüzeyler üzerindeki temasının artırılmasını sağlamanın yanında; jet akışın bir

desenli model yüzeyine çarptıktan sonra tekrar kanal içerisindeki diğer modele doğru yönlendirmesini sağlayarak ısı transferi etkisini artırmaktır. Kanatçık, literatürde bulunan Öztürk ve Demircan [8] tarafından yapılan çalışma da göz önünde bulundurularak; kanaldan gelen çapraz akışın ilk sırada bulunan modeller üzerine daha iyi yönlendirilebilmesi ve modeller arası boşlukta bulunan akışkanın hızının artırılabilmesi etkileri dikkate alınarak; akışı engellemeyecek şekilde konumlandırılmıştır. Sayısal araştırma, sürekli ve üç boyutlu enerji ve Navier-Stokes denklemlerinin k-ε türbülans modeli Ansys-Fluent programı kullanılarak çözümlenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Kanatçık ve kanalın alt ve üst yüzeyleri adyabatik iken; desenli yüzeyler 1000 W/m²' lik sabit ısı akısına sahiptir. ([5], [20-22]). Bilindiği gibi aşırı ısınma elektronik elemanların yoğun çalışma yükü altında oluşmaktadır. Bu ısı yükü ile birlikte, elemanların sıcaklıkları 308 ila 353 K arasında değişen sıcaklıklara kadar ulaşabilmektedir. Bu çalışmada da sırasıyla dairesel oyuklu ve yamuk modeller için elde edilen yüzey sıcaklıkları 304-307 K aralığındadır. Bu nedenle, yüzeylere uygulanan sabit ısı akısı yaklaşımının doğru olduğu görülmektedir. Akışkanlar için çalışılan Reynolds sayısı aralığı 5000-15000' dir. Seçilen bu Re sayısı değerleri literatürde yapılan çalışmalar temel alınarak seçilmiş olup; hem jet Re sayısını (Re_j) hem de kanal Re sayısını (Re_k) temsil etmektedir. Buna bağlı olarak, örnek verecek olursak; çalışmada H=3D kanal yüksekliğinde; jet ve kanalda Elmas-Su nanoakışkan akışı için Reynolds sayısının 5000 olduğu değerlerde akış hızları sırasıyla V_j=0,335 m/s ve V_k=0,098 m/s olmaktadır. Re=15000 için ise bu değerler sırasıyla V_j=1,004 m/s ve V_k=0,293 m/s' dir. Dolayısıyla, literatürde ulaşılan çalışmalar da göz önüne alındığında hem jet hem de kanal akışı için çalışılan Re sayısı aralığı (Re=5000-15000) türbülanslı olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, bu çalışmada akış çapraz ve jet akış olmak üzere birleşik şekilde uygulanarak kanaldaki akışın yüzeyler üzerindeki etkisinin kontrol edilmesiyle ısı transferi artırılırken; akış kontrolünün aerodinamik açıdan da öneminin vurgulandığı literatürde farklı uygulamalar mevcuttur [23-28]. Çalışmada kullanılan nanoakışkanların termofiziksel özellikleri literatürde bulunan çalışmadaki eşitlikler ve nanoparçacık özellikleri kullanılarak bulunmuştur. Çalışmanın sonuçları, literatürdeki deneysel çalışma sonuçlarıyla kıyaslanmış ve uyumlu oldukları saptanmıştır. Sonuçlar, her bir dairesel oyuk ve yamuk model yüzeyi için ortalama Nu sayısının değişimleri olarak incelenmiştir. Bununla birlikte, birleşik jet akışlı kanallar için kanatçiksiz ve farklı kanatçık açılı kanallarda CuO-Su nanoakışkanının hız ve sıcaklık konturu dağılımları Re=13000 için sunulmuştur. Ayrıca, Re sayısının 5000 ve 15000 değerlerinde kanallarda bulunan tüm desenler için kanatçiksiz ve kanatçıklı durumlarda ortalama Nu sayısı (Nu_m) ve yüzey sıcaklık (T_m) değerleri değerlendirilmiştir. Ayrıca, kanatçıkların ve nanoakışkanın birleşik jet akışlı kanallarda kanatçiksiz ve su kullanılan durumlara göre Nu sayısı artışına karşı basınç düşüşleri, performans değerlendirme sayısı (PEC) göz önüne alınarak yorumlanmıştır.

II. BAKIR OKSİT-SU VE ELMAS-SU NANOAKIŞKANLARININ TERMOFİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

Bu çalışmada kullanılan çalışma akışkanlarından olan %2 hacimsel konsantrasyonlu Bakır oksit-Su ve Elmas-Su nanoakışkanlarının termofiziksel özellikleri literatürde bulunan ve yaygın olarak kullanılan eşitlikler [29] yardımıyla elde edilmiş ve Su akışkanı ile Tablo 1' de gösterilmiştir. Çalışmada, akışkanların tez fazlı akışkan oldukları varsayımı ile modellemeler yapılmıştır. Bu yaklaşımdaki temel düşünce, nanoakışkanlardaki Bakır oksit ve Elmas nanoparçacıklarının düşük konsantrasyonları nedeniyle akışkanlarda çökelme ve topaklaşma sorunu yaşanmadan homojen bir şekilde dağılımları üzerinedir. Ayrıca, katı haldeki Bakır oksit ve Elmas nanoparçacıklarının termofiziksel özellikleri de literatürdeki ilgili çalışmadan alınmıştır [30].

Nanoakışkanın yoğunluğu

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{nf} + \phi\rho_p \quad (1)$$

Bu eşitlikte, ρ akışkanın yoğunluğunu (kg/m³), φ nanoparçacık konsantrasyonu ifade ederken, p, nf ve bf ise sırasıyla nanoparçacık, nanoakışkan ve su akışkanını belirtmektedir.

Nanoakışkanın özgül ısısı

$$c_{pnf} = (1 - \varphi)c_{pbf} + \varphi c_{pp} \quad (2)$$

Nanoakışkanın ısı iletkenliği

$$k_{nf} = \frac{k_p + 2k_{bf} + 2(k_p - k_{bf})\varphi}{k_p + 2k_{bf} - 2(k_p - k_{bf})\varphi} k_{bf} \quad (3)$$

Nanoakışkanın viskozitesi

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} (1 + 2,5\varphi) \quad (4)$$

Tablo 1. Termofiziksel özellikler (30°C)

Özellikler	Su	Bakır oksit	Elmas	Bakır oksit-Su nanoakışkanı	Elmas-Su nanoakışkanı
k (W/mK)	0,6172	20	1000	0,6639	0,6685
ρ (kg/m ³)	995,8	6500	3510	1105,884	1046,08
c_p (J/kgK)	4178,4	535,6	497,26	4105,54	4104,77
μ (Ns/m ²)	803,4x10 ⁻⁶	-	-	843,57x10 ⁻⁶	843,57x10 ⁻⁶

III. SAYISAL METOT

Model yüzeylerindeki çapraz akış-çarpan jet akışının zorlanmış taşınım ısı transferinin çözümünde Ansys-Fluent programı kullanılmıştır.

Akış ve ısı transferi, aşağıdaki gibi gövde kuvvetinin bulunmadığı sürekli, kanaldaki çapraz akış-çarpan jet akış nedeniyle gerçekleşen türbülanslı akış için kütle, momentum ve enerjinin korunumu denklemlerinden zaman ortalamalı olarak türetilen diferansiyel denklemlerin çözümleriyle yapılmıştır ([31-32]).

Isı transferi süreçlerinde türbülansın doğru modellenmesi esastır. Bununla birlikte, türbülanslı akışkanların doğrudan sayısal simülasyonları çok zor olup aynı zamanda zaman alıcı bir süreçtir. Sayısal modellemelerde kullanılan çeşitli türbülans modelleri (k- ω , k-k_L- ω , k- ω SST) ([33-41]) bulunmakla birlikte, bu modeller arasında ekonomikliği ve pek çok akış olayında kabul edilebilir doğrulukla sonuç vermesi bakımından yarı ampirik bir model olan k- ϵ türbülans modeli yaygın olarak kullanılmaktadır ([31]). Bu nedenle, literatürdeki çalışmalardan elde edilen sonuçlar da göz önünde bulundurularak bu çalışmadaki sayısal hesaplamalarda standart k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır.

Süreklilik denklemi

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = 0 \quad (5)$$

Momentum denklemi

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u_i' u_j'} \right] \quad (6)$$

Enerji denklemi

$$\rho c_p \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{u}_i \bar{T}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} - \rho c_p \overline{T' u_i'} \right] \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (8)$$

Türbülans kinetik enerji denklemi

Türbülans kinetik enerji yutulma terimi

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (9)$$

Bu denklemlerde, k türbülanslı akış kinetik enerjisini, u_i x, y ve z yönlerindeki hız bileşenlerini, μ akışkanın viskozitesini, σ_k ($\sigma_k=1$) türbülanslı kinetik enerji Pr sayısını belirtmektedir. Türbülanslı kinetik enerji üretimi (G_k) ve türbülanslı akışın viskozitesini (μ_t) gösteren eşitlikler aşağıdaki gibidir ([31], [35]).

$$G_k = -\overline{\rho u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (10)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (11)$$

Türbülans yutulma Pr sayısı σ_ε ile belirtilirken, $C_{1\varepsilon}=1.44$, $C_{2\varepsilon}=1.92$, $C_\mu=0.09$ ve $\sigma_\varepsilon=1.3$ değerlerine sahip olan eşitliklerdeki katsayılarıdır ([8], [30]).

Isı taşınım katsayısı h, Eş. 12 ve Nusselt sayısı (Nu) ise Eş. 13 ile hesaplanmaktadır ([8], [21]).

$$h = \frac{q''}{T_y - T_a} \quad (12)$$

$$-k_a \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_y = h (T_a - T_y) \text{ ve } Nu = \frac{h(3m)}{k_a} \quad (13)$$

Bu eşitliklerde, T_a ve T_y sırasıyla akışkanının ve elemanın ortalama olarak yüzey sıcaklıklarını (K), k_a akışkanın ısı iletim katsayısını (W/m.K), 3m akışkanın temas ettiği elemanın toplam yüzey uzunluğunu (m), h ve h_m ise sırasıyla model yüzeyi boyunca noktasal ve ortalama ısı taşınım katsayısını (W/m².K), n ise yüzeye dik yön olup; model yüzeyi için ortalama Nu sayısı (Nu_m) aşağıda belirtilen eşitliklerden bulunmaktadır.

Desenli yüzey ortalama ısı taşınım katsayısı

$$h_m = \frac{1}{3m} \int_0^{3m} h dx \quad (14)$$

Desenli yüzey ortalama Nu sayısı

$$Nu_m = \frac{h_m(3m)}{k_a} \quad (15)$$

Kanalın hidrolik çapı

$$D_{kh} = \frac{4A_k}{P_k} = \frac{4(H.W)}{2(H+W)} \quad (16)$$

Bu eşitlikte, A_k ve P_k sırasıyla kanalın kesit alanı ve ıslak çevresini gösterirken, kanalın yükseklik ve genişliği ise H ve W ile temsil edilmektedir. Jet giriş çapı D , dairesel girişli jet hidrolik çapına (D_{hjet}) eşittir.

Kanalın ve jetin Re sayıları ise sırasıyla Eş. 17 ve 18 kullanılarak belirlenmektedir [8].

$$Re_k = \frac{\rho_a V_k D_{hk}}{\mu_a} \quad (17)$$

$$Re_j = \frac{\rho_a V_j D}{\mu_a} \quad (18)$$

Bu eşitliklerde, akışkanın kanal ve jet akış hızları sırasıyla V_k ve V_j (m/s) ile gösterilmektedir.

Kanal boyunca basınç düşüşü (ΔP) aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$\Delta P = \frac{f \rho L}{2D_{kh}} V_k^2 \quad (19)$$

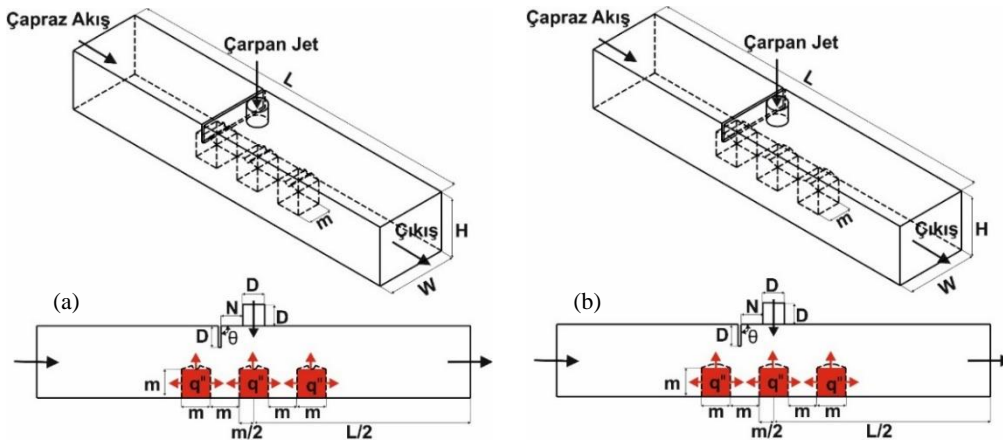
Bu eşitlikte, ΔP kanatçiksız ve kanatçıklı kanalların giriş ve çıkışları arasındaki basınç düşüşünü (Pa), f sürtünme faktörünü ve L kanalın uzunluğunu (m) temsil etmektedir.

Performans değerlendirme sayısı (PEC) ise aşağıda belirtilen Eş. 20 ile bulunmaktadır ([42]).

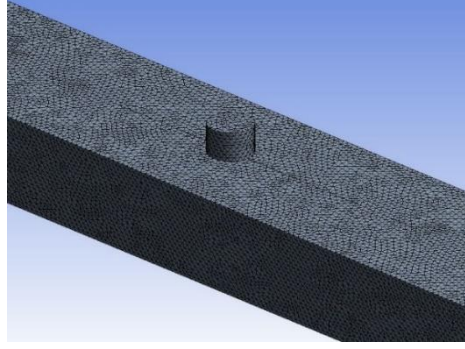
$$PEC = \frac{(Nu_{m-kanatçıklı} / Nu_{m-kanatçiksız})}{(\Delta P_{kanatçıklı} / \Delta P_{kanatçiksız})} \quad (20)$$

IV. MODEL GEOMETRİLERİ

Çalışmadaki çapraz akış-çarpan jet birleşik jet akışlı kanatçıklı kanallar ve kanallardaki dairesel oyuklu ve yamuk model yüzeylerine sahip elemanların ölçüleri Şekil 1 (a) ve (b)' de verilirken; kanalların boyutsal ölçüleri ise Tablo 2 (Öztürk ve Demircan [8])' de verilmiştir. Bunun yanı sıra, bu çalışmada yapılan kabuller ve sınır şartları Tablo 3' de sunulmaktadır. Ayrıca, birleşik jet akışlı kanalların sayısal hesaplamalarında kullanılan düzgün dörtyüzlü ağ yapısı Şekil 2' de gösterilmektedir.



Şekil 1. (a) dairesel oyuklu (b) yamuk modelli kanalların görünüşleri



Şekil 2. Kanalda kullanılan düzgün dört yüzüzlü ağ yapısının gösterimi

Tablo 2. Kanalların boyutsal ölçüleri (Öztürk ve Demircan [8])

Değişken	Ölçü
D	15 (mm)
L	66D
W	4D
H	3D
M	20 (mm)
θ	45° ve 90°
N	D

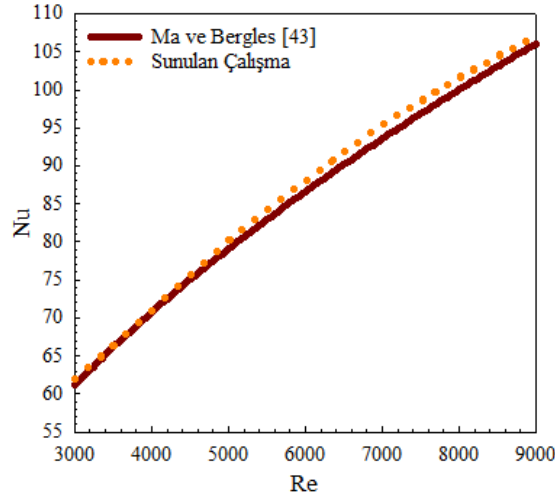
Tablo 3. Çalışmada uygulanan sınır şartları

a) Akış hacmi, sürekli, üç boyutlu ve türbülanslıdır
b) Sıkıştırılamaz akışkan olarak su, %2 CuO-Su ve Elmas-Su nanoakışkanları, hem jet hem de çapraz akış akışkanı olarak kullanılmışlardır
c) Akışkanların ısı özellikleri sabit olup, sıcaklıktan bağımsızdır
d) Kanalın ve kanatçığın yüzeyleri adyabatiktir
e) Akışkan olarak kullanılan su, nanoakışkan ve desenli model yüzeylerinde ısı kaynağı bulunmamaktadır
f) Kanalın çıkış basıncı, atmosfer basıncına eşit olarak alınmıştır ($P_{ç}=P_{atm}$)
g) Kanalın çıkışındaki sıcaklık farkının ihmal edilebilecek kadar az miktarda olduğu kabul edilerek $\partial T/\partial x=0$ olarak belirlenmiştir
h) Kanal, kanatçık ve model yüzeylerinde kaymazlık sınır şartı olduğu ve bu nedenle bahsedilen yüzeylerde tüm hız bileşeni değerlerinin sıfır olduğu kabul edilmiştir.

V. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmada, Şekil 3' de gösterildiği gibi sadece jet akışın olduğu durumda farklı Reynolds sayılarında incelemelerde bulunularak ulaşılan sonuçlar ile Ma ve Bergles [43]' in deneysel incelemeleri sonucunda ulaştıkları Eş. 21 kullanılarak ulaşılan sonuçlar karşılaştırılmış ve Ma ve Bergles [43]' in deneysel sonuçları ile sunulan çalışmanın sayısal sonuçlarının uyumlu ve tutarlı oldukları bulunmuştur.

$$\overline{Nu} = 1,29 Re^{0.5} Pr^{0.4} \quad (21)$$



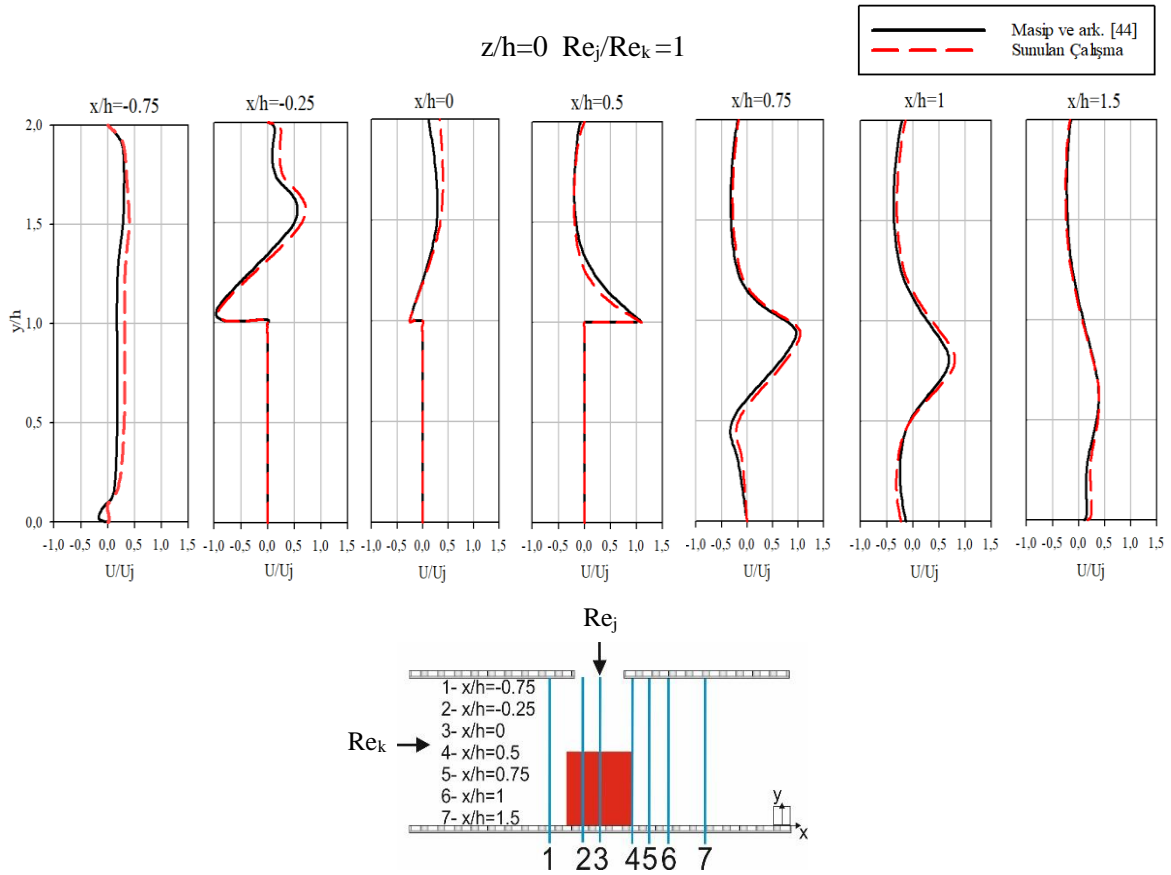
Şekil 3. Sunulan çalışma ve Ma ve Bergles [43]'in sonuçlarının karşılaştırılması

Ayrıca, literatürde Masip ve ark., [44]' nın çarpaz akış ve çarpan jet kombine akışına maruz kalan bir küp etrafındaki türbülanslı akışın deneysel olarak incelendiği çalışma ile bu çalışmanın sayısal sonuçları karşılaştırılmış ve Şekil 4' de gösterilmiştir. Masip ve ark., [44] çalışmalarında 2000x300x30mm boyutlarında bir kanal içerisine küp şeklinde bir eleman yerleştirmişlerdir. Kanalin bütün yüzeylerinin adyabatik olarak alındığı varsayılarak; jet Re sayısının (Re_j), kanal Re sayısına (Re_k) oranı eşit alınarak ($Re_j/Re_k=1$) elektronik elemanın etrafındaki akış yapıları farklı konumlarda (x/h) incelenmiştir. Şekil 4' den de görülebildiği gibi sunulan çalışma ile Masip ve ark., [44]' nın yapmış olduğu deneysel çalışma sonucu ulaşılan hız profillerinin birbirleri ile oldukça uyumlu oldukları saptanmıştır.

Ağ sayısı bağımsızlığını test ederek en uygun sayıda ağ sayısını saptamak için kanatçiksız birleşik jet akışlı kanaldaki ağ sayısının, ortalama Nu sayısı (Nu_m) üzerindeki etkisi farklı Reynolds sayılarında Tablo 4' de verilmiştir. Buna göre kanatçiksız kanal için 2022840 adet ağ elemanının güvenilir ve doğru sonucu vereceği belirlenmiştir.

Tablo 4. Ağ elemanı sayısına bağlı olarak Nu_m ' nin Reynolds sayısıyla değişimi

Ağ elemanı sayısı	Re=5000 Nu_m	Re=7000 Nu_m	Re=9000 Nu_m
1758412	86,48	108,84	127,40
2022840	86,52	108,88	127,43
2245786	86,52	108,87	127,42

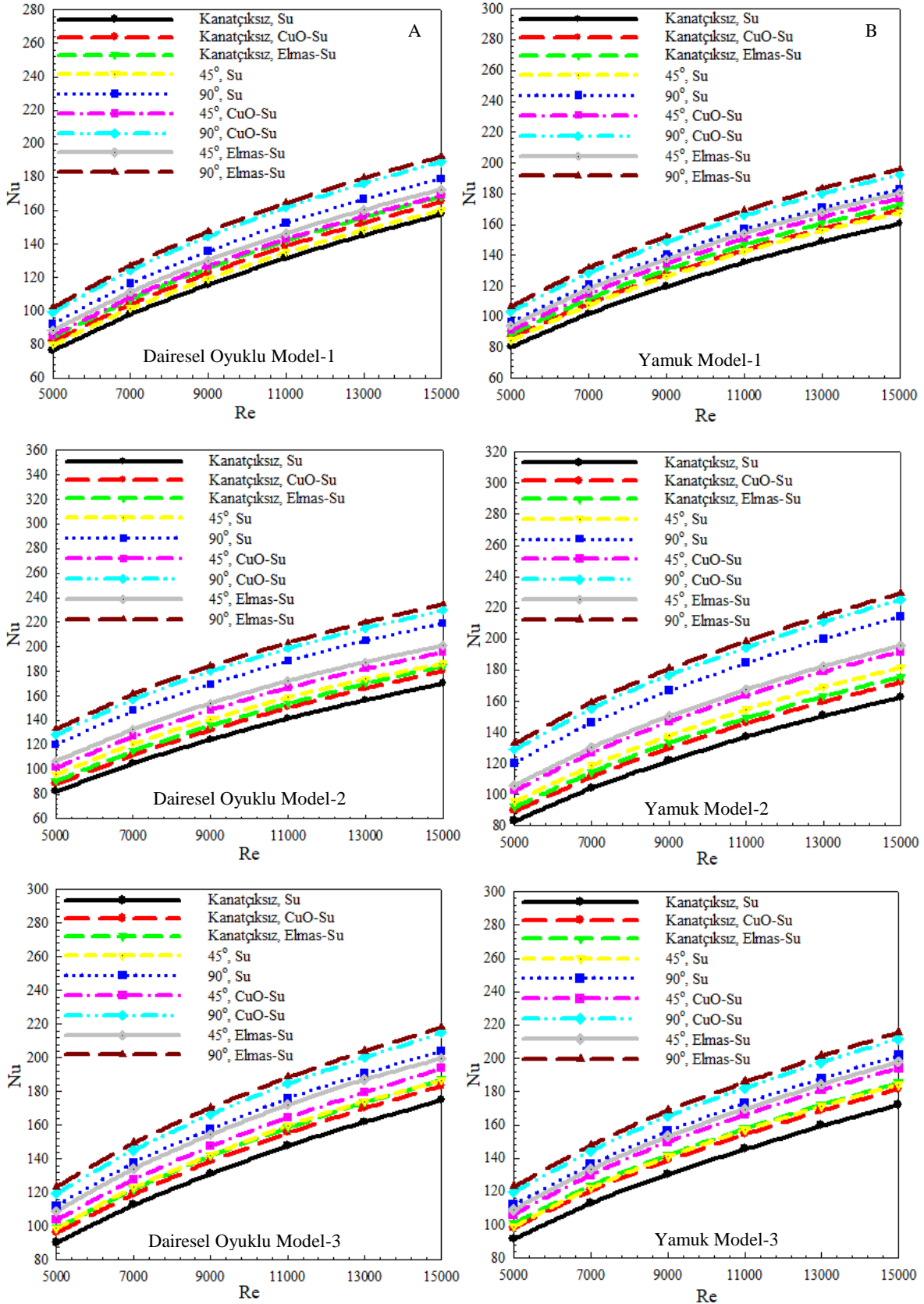


Şekil 4. Sunulan çalışma ve Masip ve ark., ([44])'nin sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 5. A ve B' de sırasıyla dairesel oyuklu ve yamuk modellenli bakır plakalı yüzeylere sahip, kanatçiksız, 45° ve 90° açılı kanatçıklı çapraz akış-çarpan jet birleşik jet akışlı kanallarda çapraz akışın olduğu kanal girişinden başlamak üzere model sıralarına göre ortalama Nu sayısının değişimleri Re sayısına bağlı olarak su, CuO-Su (Bakır oksit-Su) ve Elmas-Su nanoakışkanları için gösterilmektedir. Her iki modeli, çapraz akış-çarpan jet akışlı kanal için de en düşük Nu sayısı değerlerine kanatçiksız ve su akışkanı için ulaşılrken; kanallara kanatçık eklenmesiyle akışkanın desenli model yüzeyleri üzerine daha iyi yönlendirilmesiyle Nu sayısı değerleri artmaktadır. Çapraz akışın etkisi altında bulunan kanal girişine göre birinci sıradaki Model 1 yüzeyleri incelendiğinde kanatçık ve açı değişimleriyle birlikte akışkanın türüne karşı olan duyarlılıkları da Şekil 5. A ve B (a)' dan gözlemlenebilmektedir. $Re=9000$ değerinde 45° kanatçık açılı kanalda CuO-Su nanoakışkanı kullanılması durumunda, kanatçiksız ve su akışkanı olan birleşik jet akışlı kanala göre ortalama Nu sayısı artışları sırasıyla dairesel oyuklu ve yamuk modellenli yüzeyler için %9,75 ve %12,33 olmaktadır. Ayrıca, yamuk modellenli yüzeyler etrafında akışkanın daha iyi temasta bulunarak ısı transferi artışı dolayısıyla soğutma performansı etkisinin daha iyi olduğu söylenebilmektedir. Kanallar içerisinde ikinci sırada bulunan ortadaki Model 2 analiz edildiğinde; hem kanatçiksız hem de kanatçıklı kanallarda Model 1' e göre yüzeylerin sahip olduğu ortalama Nu sayısı değerlerinin arttığı görülmektedir. Bu duruma, Model 2' nin çapraz akışa ek olarak doğrudan çarpan jet akışı etkisi altında bulunması neden olmaktadır. Çarpan jet akışı sonucu ısı transferinin gerçekleştiği ısı sınır tabaka kalınlığı azalarak, ısı transferinin artması sağlanmaktadır. Ayrıca, kanal girişinden gelen çapraz akış da çarpan jet akışı kitlesel olarak desenli model yüzeyleri üzerinden sürükleyerek; yerini daha soğuk olan kanal girişindeki akışkanın almasını sağlayıp ısı transferini artırıcı etki yapmaktadır. Bununla birlikte, $Re=13000$ için 90° kanatçık açılı birleşik jet akışlı kanallarda 45° açılı olanlara göre sırasıyla Elmas-Su ve Bakır oksit-Su nanoakışkanları kullanılması durumları için Model 2' de Model 1' e göre yamuk model yüzeyi için Nu sayılarının %8,7 ve %8,63 daha fazla oldukları bulunmuştur. Görüldüğü gibi kanatçık açısının 90°'ye çıkarılması hem çapraz akışın geçtiği kesit alanını daraltarak Model 2 üzerinde jet akış etkisi oluşmasını sağlarken; hem de Model 1 ve Model 2 arasında bulunan

yeniden dolaşım halindeki akışkanın hareketlenmesini sağlayarak Model 2 yüzeylerinden olan ısı transferini artırmaktadır. Kanalin sonunda bulunan Model 3' de ise kanatçiksız birleşik jet akışlı kanallarda, Model 1 ve 2' den gelen çapraz akış-çarpan jet akışı doğrudan Model 3 üzerine doğru hareket ettiğinden her üç akışkan için de (su, CuO-Su, Elmas-Su) Model 1 ve 2' ye göre Nu sayısı değerleri artarken; kanatçıklı kanallarda yüksek Re sayılarında akışkanın kanatçıklı yüzeyler üzerine ve modeller arasına yönlendirilmesiyle kanal sonunda bulunan ve birleşik jet akış etkisinin azaldığı Model 3' de Model 2' ye göre Nu sayılarında bir miktar azalma saptanmaktadır. $Re=15000$ ' de Model 3 için Model 2' ye göre 90° açılı kanatçıklı durumda sırasıyla dairesel oyuklu ve yamuk model yüzeylerinde Elmas-Su nanoakışkanı için %7,62 ve % 8,11' lik azalışlar görülmektedir.

Tablo 5' de Reynolds sayısının 5000 ve 15000 değerleri için çapraz akış-çarpan jet birleşik jet akışlı kanallarda bulunan her üç desenli dairesel oyuklu ve yamuk modellenli yüzeyler için kanatçiksız, 45° ve 90° açılı kanatçıklı durumlarda su, CuO-Su ve Elmas-Su nanoakışkanları kullanılarak elde edilen ortalama Nusselt sayısı (Nu_m) ve ortalama model yüzey sıcaklık (T_m) değerlerinin değişimleri sunulmaktadır. Her iki model yüzeyi ve her üç akışkan tipi için de kanatçiksız durumlarda Nu_m değerleri en düşük değerlerde iken; kanalın üst yüzeyine eklenen kanatçık sayesinde birleşik jet akışkanının model yüzeyleri üzerine yönlendirilmesiyle Nu_m değerleri artarken; T_m değerleri azalış göstermektedir. Özellikle nanoakışkanların (CuO-Su ve Elmas-Su) kullanılması durumlarında, akışkana eklenen nanoparçacıkların ısı transfer yüzey alanını artırması ve akışkan içerisinde türbülans oluşturucu etkisiyle hız sınır tabakasının model yüzeyleri üzerinde daha basık ve kanal merkezinde daha düz olması sağlanarak; model yüzeyleri üzerinde ısı sınır tabakasını inceltmesiyle ısı transferini artırıcı etki sağlayarak yüzeylerin soğuma performansını iyileştirmektedir ki bu durum Şekil 7' deki hız konturu dağılımlarında model yüzeyleri üzerindeki akışkanın hız artışlarından ve sıcaklık değişimlerinden anlaşılabilir. Bu nedenle, CuO-Su ve Elmas-Su nanoakışkanlarında Su akışkanına göre daha yüksek Nu_m ve daha düşük T_m değerleri elde edilmektedir. $Re=15000$ için 90° kanatçıklı kanalda Yamuk modellenli yüzeyde sırasıyla Elmas-Su ve Bakır oksit-Su nanoakışkanları kullanılması durumları için kanatçiksız ve su akışkanı kullanılan kanallara göre Nu_m sayısında %27,57 ve %26,11' lik artışlar olmaktadır. Aynı şartlarda, dairesel oyuklu desenli model yüzeyinde Nu_m değerinin artış oranları Elmas-Su ve Bakır oksit-Su nanoakışkanları için %28,48 ve %27,2' dir. Bununla birlikte, birleşik jet akışın yüzeyler üzerindeki temasının ve etrafındaki akışkan hareketinin daha iyi olduğu yamuk model için Nu_m değerleri; dairesel oyuklu model yüzeyleri için daha fazladır ve buna bağlı olarak artan ısı transferi nedeniyle T_m değerleri dairesel oyuklu modelden daha düşüktür.

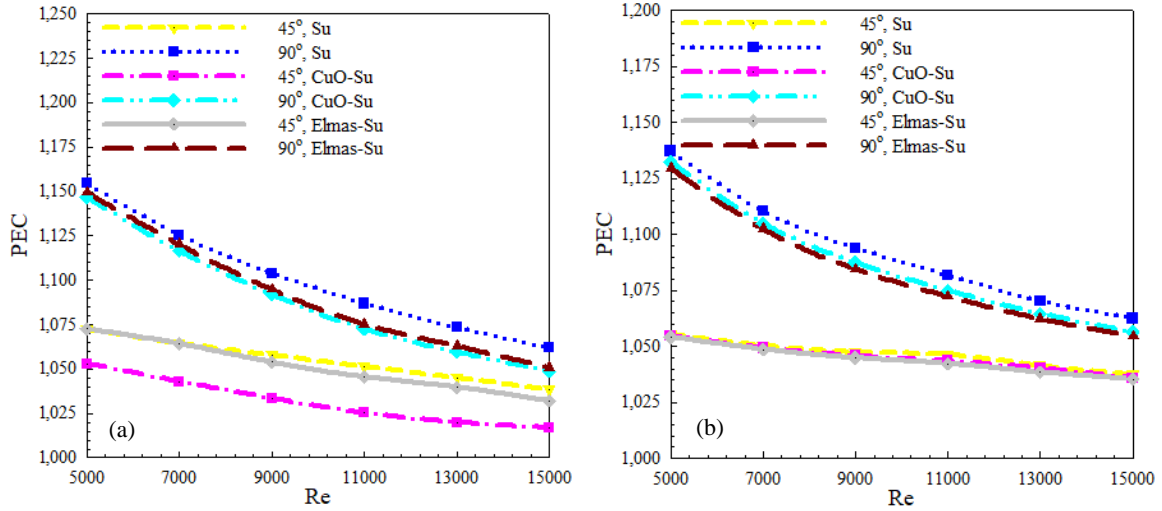


Şekil 5. Birleşik jet akışlı kanallarda bulunan A-Dairesel oyuklu B-Yamuk model yüzeyleri için kanal içerisindeki model diziliş sırasına göre ortalama Nu sayılarının Re sayısına göre değişimleri

Tablo 5. Birleşik jet akışlı kanallarda her üç dairesel oyuklu ve yamuk model yüzeyi için Nu_m ve T_m değerlerinin farklı akışkan tipleri ve Re sayılarında analizi

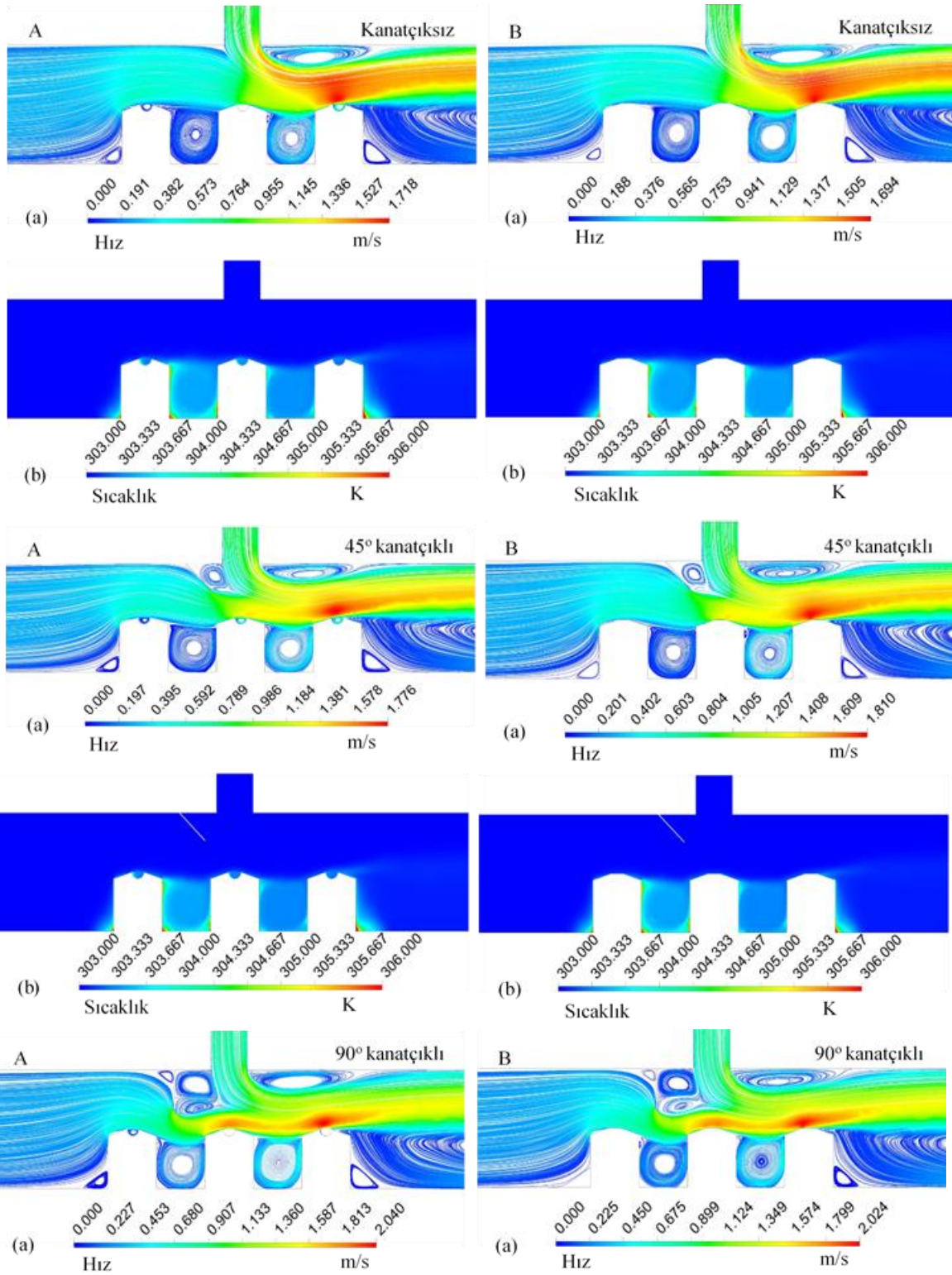
			Re=5000		Re=15000	
			Dairesel oyuklu model	Yamuk model	Dairesel oyuklu model	Yamuk model
Kanatçksız	Su	Nu_m	82,872	84,891	164,992	167,493
Kanatçksız	CuO-Su	Nu_m	88,789	91,298	174,464	176,311
Kanatçksız	Elmas-Su	Nu_m	91,504	94,042	177,944	179,885
45° Kanatçık	Su	Nu_m	91,580	93,125	176,901	177,797
90° Kanatçık	Su	Nu_m	108,303	109,681	199,663	200,829
45° Kanatçık	CuO-Su	Nu_m	96,955	100,083	186,239	187,703
90° Kanatçık	CuO-Su	Nu_m	115,829	117,461	209,873	211,231
45° Kanatçık	Elmas-Su	Nu_m	101,441	103,094	190,154	191,391
90° Kanatçık	Elmas-Su	Nu_m	119,493	120,823	211,993	213,685
Kanatçksız	Su	T_m (K)	306,768	306,653	304,223	304,209
Kanatçksız	CuO-Su	T_m (K)	306,393	306,193	304,086	304,045
Kanatçksız	Elmas-Su	T_m (K)	306,256	306,061	304,043	304,003
45° Kanatçık	Su	T_m (K)	306,494	306,338	304,138	304,112
90° Kanatçık	Su	T_m (K)	305,613	305,501	303,85	303,819
45° Kanatçık	CuO-Su	T_m (K)	306,045	305,915	303,973	303,961
90° Kanatçık	CuO-Su	T_m (K)	305,265	305,176	303,716	303,707
45° Kanatçık	Elmas-Su	T_m (K)	305,935	305,792	303,945	303,921
90° Kanatçık	Elmas-Su	T_m (K)	305,181	305,082	303,703	303,678

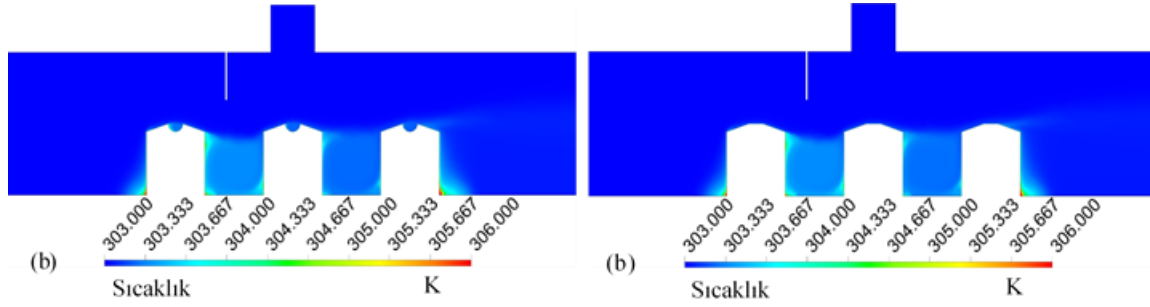
Şekil 6. (a) ve (b)' de $H=3D$ yükseklikli birleşik jet akışlı kanallardaki sırasıyla dairesel oyuklu ve yamuk model yüzeylerine ait performans değerlendirme sayısının (PEC) Re sayısı değişimleri, su akışkanı, CuO-Su ve Elmas-Su nanoakışkanları için farklı kanatçık açılarında (45° ve 90°) gösterilmektedir. PEC sayısı, birleşik jet akışlı kanallarda kanatçık kullanılması durumunda kanatçksız duruma göre ortalama Nu sayısı artışının basınç düşüşü artışına karşı olan performansını sergilemektedir. Bu nedenle, PEC sayısı fazla olan kanal ve akış şartlarının daha yüksek performanslı olduğu söylenebilir. Şekil 6' da her iki kanal için de en yüksek PEC değerine 90° kanatçık açılı kanalda su akışkanı için ulaşıldığı görülmektedir. Bununla birlikte, nanoakışkan için sudan daha fazla Nu sayısı değerleri elde edilirken; suya göre nanoakışkanın viskozitesinin daha yüksek olması sebebiyle sürtünme faktörü ve dolayısıyla kanaldaki basınç düşüşü daha fazla olduğundan PEC sayıları sudan daha düşüktür. $Re=15000$ değerinde 90° açılı kanatçıklı kanallarda su akışkanı için PEC sayısı değerlerinin sırasıyla dairesel oyuklu ve yamuk modellenli yüzeylerde Elmas-Su ve CuO-Su nanoakışkanlarına göre %1,1-1,31 ve %0,82-%0,63 daha fazla oldukları tespit edilmiştir. Ayrıca, yamuk model için PEC sayısı değerlerinin dairesel oyuklu modelden daha fazla oldukları grafiklerden görülebilmektedir. Bu durum, yamuk modellenli yüzeylerin dairesel oyuklu modellere göre kanal içerisinde Nu sayısı artışına karşın; daha düşük basınç düşüşüne sebep olduklarını belirtmektedir.



Şekil 6. (a) Dairesel oyuklu (b) yamuk model yüzeyleri için PEC sayısının Re sayısı ile değişiminin incelenmesi

Şekil 7. A ve B' de kanatçıksız, 45° ve 90° kanatçıklı birleşik jet akışlı kanallarda sırasıyla dairesel oyuklu ve yamuk model yüzeylerine ait (a) hız ve (b) sıcaklık konturu dağılımları CuO-Su nanoakışkanı için $Re=13000$ değerinde verilmektedir. Kanatçıksız durumda kanal girişindeki soldan birinci model olan Model 1, daha çok çapraz akışın etkisi altında olup; her iki model yüzeyi için de bu modeller etrafındaki hız değerleri düşüktür. Kanallarda ortadaki model olan Model 2 ise çapraz akışa ek olarak doğrudan çarpan jet akışın da etkisi altındadır. Bu nedenle bu model etrafındaki hız değerleri hız konturu dağılımlarından da görülebildiği gibi (Şekil 7. A, B (a) ve (b)) Model 1' e göre daha fazladır. Kanalın sonunda bulunan Model 3 etrafında akışkan hareketine bakıldığında kanatçıksız durumda kanal girişinden gelen çapraz akışın çarpan jete kanal sonuna doğru sürüklenmesiyle hız değerlerinin fazla olduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak, özellikle Model 2 ve 3 için Model 1' e göre model yüzey ve akışkan sıcaklık değerlerinin daha düşük oldukları sıcaklık konturlarından saptanabilmektedir. Kanallara 45° açılı kanatçık eklendiğinde; akışkanın geçiş kesit alanı daraltıldığından her iki şekilli yüzey için Model 1 üzerinde akışkan hızlanma sağlanırken; Model 2 ve 3 üzerinde çarpan jete ilave olarak jet akış etkisi sağlanarak akışkan hızı artmaktadır. Böylece, model yüzeylerinden olan ısı transferi artarak soğuma iyileştirilmektedir. Bununla birlikte, kanatçıksız kanala göre çapraz akış; kanatçıklı model yüzeyleri (Model 1 ve 2) üzerine yönlendirilebildiğinden kanal sonundaki Model 3 üzerindeki akışkan hızı azalmaktadır. Kanatçık açısı 90°' ye çıkarıldığında ise akışkan, hem modeller üzerine hem de modeller arasına daha iyi temas edebildiğinden; hem modeller arası yeniden dolaşım bölgeleri hareketlendirilebilmekte hem de model yüzeyleri üzerinde jet akış etkisi artırılarak model yüzeylerinin soğuması iyileştirilmektedir. Bu nedenle, 90° kanatçık açılı durumda; hem kanatçıksız hem de 45° açılı durumdakine göre modeller arasında ve model yüzeyleri etrafında akışkan sıcaklıklarının daha düşük değerlere ulaştığı görülebilmektedir. Ayrıca, özellikle yamuk model için modeller etrafındaki sıcak akışkan bölgelerinin daha az düzeyde oldukları sıcaklık konturu dağılımlarından söylenebilir.





Şekil 7. A-Dairesel oyuklu ve B-Yamuk model için birleşik jet akışlı kanallarda kanatçiksız, 45° ve 90° kanatçık açılı durumlarda CuO-Su nanoakışkanı ve $Re=13000$ için (a) hız ve (b) sıcaklık konturu dağılımları

VI. GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, dairesel oyuklu ve yamuk modellenmiş bakır plakalı yüzeylerden olan ısı transferi ve kanallardaki akış yapısı çapraz akış-çarpan jetten oluşan birleşik jet akışlı kanallarda kanatçiksız, 45° ve 90° açılı kanatçık eklenmesi durumları için Su, %2 hacimsel konsantrasyonlu CuO-Su (Bakır oksit-Su) ve Elmas-Su nanoakışkanları için sayısal olarak araştırılmıştır.

Bu çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda verildiği şekilde özetlenebilir:

- Kanal girişine göre birinci sıradaki Model 1 için $Re=9000$ değerinde 45° kanatçık açılı kanalda CuO-Su nanoakışkanı kullanılması durumunda, kanatçiksız ve su akışkanı olan birleşik jet akışlı kanala göre ortalama Nu sayısı artışları sırasıyla dairesel oyuklu ve yamuk modellenmiş yüzeyler için %9,75 ve %12,33 olmaktadır.
- Model 2 analiz edildiğinde; hem kanatçiksız hem de kanatçıklı kanallarda Model 1'e göre yüzeylerin sahip olduğu ortalama Nu sayısı değerlerinin arttığı görülmektedir.
- $Re=13000$ için 90° kanatçık açılı birleşik jet akışlı kanallarda 45° açılı olanlara göre sırasıyla Elmas-Su ve Bakır oksit-Su nanoakışkanları kullanılması durumları için Model 2'de Model 1'e göre yamuk model yüzeyi için Nu sayılarının %8,7 ve %8,63 daha fazla oldukları bulunmuştur.
- Model 3 için ise kanatçiksız birleşik jet akışlı kanallarda, her üç akışkan için de (Su, CuO-Su, Elmas-Su) Model 1 ve 2'ye göre Nu sayısı değerleri artarken; kanatçıklı kanallarda yüksek Re sayılarında Model 3'de Model 2'ye göre Nu sayılarında bir miktar azalma saptanmaktadır.
- $Re=15000$ 'de Model 3 için Model 2'ye göre 90° açılı kanatçıklı durumda sırasıyla dairesel oyuklu ve yamuk model yüzeylerinde Elmas-Su nanoakışkanı için %7,62 ve %8,11'lik azalışlar görülmektedir.
- Kanallardaki her üç model yüzeyi birlikte incelendiğinde; her iki model yüzeyi ve her üç akışkan tipi için de kanatçiksız durumlarda Nu_m değerleri en düşük değerlerde iken; kanala kanatçık eklenmesiyle Nu_m değerleri artarken; T_m değerleri azalış göstermektedir.
- Özellikle nanoakışkanların (CuO-Su ve Elmas-Su) kullanılması durumlarında, yüzeylerin soğuma performansları iyileşmektedir. Bu nedenle, CuO-Su ve Elmas-Su nanoakışkanlarında Su akışkanına göre daha yüksek Nu_m ve daha düşük T_m değerleri elde edilmektedir.
- $Re=15000$ için 90° kanatçıklı kanalda yamuk modellenmiş yüzeyde sırasıyla Elmas-Su ve Bakır oksit-Su nanoakışkanları kullanılması durumları için kanatçiksız ve Su akışkanı kullanılan kanallara göre Nu_m sayısında %27,57 ve %26,11'lik artışlar olmaktadır. Aynı şartlarda, dairesel oyuklu model yüzeyinde Nu_m değerinin artış oranları Elmas-Su ve Bakır oksit-Su nanoakışkanları için %28,48 ve %27,2'dir.
- Bununla birlikte, birleşik jet akışın yüzeyler üzerindeki temasının ve etrafındaki akışkan hareketinin daha iyi olduğu yamuk model için Nu_m değerleri; dairesel oyuklu model yüzeyleri için daha fazladır ve buna bağlı olarak artan ısı transferi nedeniyle T_m değerleri dairesel oyuklu modelden daha düşüktür.
- $Re=15000$ değerinde 90° açılı kanatçıklı kanallarda su akışkanı için PEC sayısı değerlerinin sırasıyla dairesel oyuklu ve yamuk modellenmiş yüzeylerde Elmas-Su ve CuO-Su nanoakışkanlarına göre %1,1-1,31 ve %0,82-0,63 daha fazla oldukları tespit edilmiştir. Ayrıca, yamuk model için PEC sayısı değerleri; dairesel oyuklu modelden daha fazladır.

- Hız ve sıcaklık konturu dağılımlarına bakıldığında; kanatçık açısı 90° ye çıkarıldığında model yüzeylerinin soğuması iyileştirilmekte ve böylece 90° kanatçık açılı durumda; hem kanatçıksız hem de 45° açılı durumdakine göre modeller arasında ve model yüzeyleri etrafında akışkan sıcaklıklarının daha düşük değerlere ulaştığı görülebilmektedir.

TEŞEKKÜR: Bu çalışma Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi tarafından desteklenmiştir (Proje no: TEKNO-2021-031).

VII. KAYNAKLAR

- [1] K. Naga Ramesh, T. Karthikeya Sharma, G. Amba Prasad Rao, "Latest advancements in heat transfer enhancement in the micro-channel heat sinks: a review," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 28, pp. 3135-3165, 2021.
- [2] M. Kılıç, "Elektronik sistemlerin soğutulmasında nanoakışkanlar ve çarpan jetlerin müşterek etkisinin incelenmesi," *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 18, s. 33 (3), ss. 121-132, 2018.
- [3] M. A. Teamah, M. M. Dawood, A. Shehata, "Numerical and experimental investigation of flow structure and behavior of nanofluids flow impingement on horizontal flat plate," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 74, pp. 235-246, 2015.
- [4] M. Kılıç, A. Ullah, "Numerical investigation of effect of different parameter on heat transfer for a crossflow heat exchanger by using nanofluids," *Journal of Thermal Engineering*, vol. 7, no. 14, pp. 1980-1989, 2021.
- [5] M. Kilic, T. Calisir, S. Baskaya, "Experimental and numerical investigation of vortex promoter effects on heat transfer from heated electronic components in a rectangular channel with an impinging jet," *Heat Transfer Research*, vol. 48, no. 5, pp. 435-463, 2017.
- [6] M. Kılıç, A. Abdulvahitoglu, "Numerical investigation of heat transfer at a rectangular channel with combined effect of nanofluids and swirling jets in a vehicle radiator," *Thermal Science*, vol. 23, no. 6A, pp. 3627-3637, 2019.
- [7] A. Dal, M. Kılıç, A. Ö. Akyüz, A. D. Tuncer, A. Gungor, "Effects of lubricant fluid with nanoparticle additive on the load capacity of a hydrostatic journal bearing," *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, vol. 7, no. 2, pp. 753-762, 2020.
- [8] S. M. Öztürk, T. Demircan, "Numerical analysis of the effects of fin angle on flow and heat transfer characteristics for cooling an electronic component with impinging jet and cross-flow combination," *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 37, no. 1, pp. 57-74, 2022.
- [9] T. B. Chang, Y. K. Yang, "Heat transfer performance of jet impingement flow boiling using Al₂O₃-water nanofluid," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 28, no. 4, pp. 1559-1566, 2014.
- [10] A. Datta, A. Jaiswal, P. Halder, "Heat transfer analysis of slot jet impingement using nano fluid on convex surface," *IOP Conference Series-Materials Science and Engineering*, vol. 402, no. 012098, 2018.
- [11] D. Kumar, M. Zunaid, S. Gautam, "Heat sink analysis in jet impingement with air foil pillars and nanoparticles," *Materials Today: Proceedings*, vol. 46, no. 20, pp. 10752-10756, 2021.

- [12] E. Jalali, S. M. Sajadi, F. Ghaemi, D. Baleanu, "Numerical analysis of the effect of hot dent infusion jet on the fluid flow and heat transfer rate through the microchannel in the presence of external magnetic field," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 147, pp. 8397-8409, 2022.
- [13] F. Selimefendigil, A. J. Chamkha, "Cooling of an isothermal surface having a cavity component by using CuO-water nano-jet," *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, vol. 30, no. 4, pp. 2169-2191, 2020.
- [14] M. F. Abdullah, R. Zulkifli, Z. Harun, S. Abdullah, W. A. Wan Ghopa, A. S. Najm, N. H. Sulaiman, "Impact of the TiO₂ nanosolution concentration on heat transfer enhancement of the twin impingement jet of a heated aluminum plate," *Micromachines*, vol. 10, no. 176, 2019.
- [15] W. Shi, F. Li, Q. Lin, G. Fang, "Experimental study on instability of round nanofluid jets at low velocity," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 120, no. 110253, 2021.
- [16] F. Kılınç, E. Buyruk, K. Karabulut, "Experimental investigation of cooling performance with graphene based nano-fluids in a vehicle radiator", *Heat and Mass Transfer*, vol. 56, pp. 521-530, 2020.
- [17] K. Karabulut, E. Buyruk, F. Kılınç, "Experimental and numerical investigation of convection heat transfer in a circular copper tube using graphene oxide nanofluid", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 42, no. 230, 2020.
- [18] K. Karabulut, E. Buyruk, F. Kılınç, "Grafen oksit nanoparçacıkları içeren nanoakışkanın taşınım ısı transferi ve basınç düşüşü artışı üzerindeki etkisinin düz bir boruda deneysel olarak araştırılması", *Mühendis ve Makina*, vol. 59, no. 690, pp. 45-67, 2018.
- [19] F. Kılınç, E. Buyruk, K. Karabulut, "Grafen tabanlı nanoakışkanların araç radyatörü soğutma performansı üzerindeki etkisinin deneysel analizi", *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 9, no. 2, pp. 1046-1056, 2019.
- [20] M. Kilic, T. Calisir, S. Baskaya, "Experimental and numerical study of heat transfer from a heated fat plate in a rectangular channel with an impinging air jet," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 39, no. 1, pp. 329-344, 2016.
- [21] K. Karabulut, "Heat transfer improvement study of electronic component surfaces using air jet impingement," *Journal of Computational Electronics*, vol. 18, pp. 1259-1271, 2019.
- [22] D. E. Alnak, F. Koca, Y. A. Alnak, "Numerical investigation of heat transfer from heated surfaces of different shapes," *Journal of Engineering Thermophysics*, vol. 30, pp. 494-507, 2021.
- [23] K. Koca, M. S. Genç, E. Bayır, F. K. Soğuksu, "Experimental study of the wind turbine airfoil with the local flexibility at different locations for more energy output", *Energy*, vol. 239, no. Part A, pp. 121887, 2022.
- [24] K. Koca, M. S. Genç, R. Özkan, "Mapping of laminar separation bubble and bubble-induced vibrations over a turbine blade at low Reynolds numbers", *Ocean Engineering*, vol. 239, pp. 109867, 2021.
- [25] K. Koca, M. S. Genç, S. Ertürk, "Impact of local flexible membrane on power efficiency stability at wind turbine blade", *Renewable Energy*, vol. 197, pp. 1163-1173, 2022.
- [26] K. Koca, M. S. Genç, H. H. Açıkkel, M. Çağdaş, T. M. Bodur, "Identification of flow phenomena over NACA 4412 wind turbine airfoil at low Reynolds numbers and role of laminar separation bubble on flow evolution", *Energy*, vol. 144, pp. 750-764, 2018.

- [27] K. Koca, M. S. Genç, H. H. Açık, “Experimental investigation on effect of partial flexibility at low aspect ratio airfoil - Part II: Installation both on suction and pressure surface”, *EPJ Web of Conferences- Experimental Fluid Mechanics*, vol. 269, no. 01028, 2022.
- [28] K. Koca, M. S. Genç, D. Veerasamy, M. Özden, “Experimental flow control investigation over suction surface of turbine blade with local surface passive oscillation”, *Ocean Engineering*, vol. 266, no. Part 4-113024, 2022.
- [29] J. C. Maxwell, Preliminary on the Measurement of Quantities, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, England: Oxford University Press, 1873, pp. 6-10.
- [30] H. A. Mohammed, P. Gunnasegaran, N. H. Shuaib, “The impact of various nanofluid types on triangular microchannels heat sink cooling performance,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, no. 3, pp. 767-773, 2011.
- [31] S. J. Wang, A. S. Mujumdar, “A comparative study of five low Reynolds number k- ϵ models for impingement heat transfer”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 25, pp. 31-44, 2005.
- [32] K. Karabulut, D. E. Alnak, “Investigation of graphene oxide-distilled water nanofluids with consideration of heat transfer and flow structure for backward-facing step flow,” *Journal of Engineering Thermophysics*, vol. 30, no. 2, pp. 300-316, 2021.
- [33] M.S. Genc, U. Kaynak, G. D. Lock, “Flow over an aerofoil without and with a leading-edge slat at a transitional Reynolds number,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G: Journal of Aerospace Engineering*, vol. 223, pp. 217-231, 2009.
- [34] M. S. Genç, “Numerical simulation of flow over a thin aerofoil at a high Reynolds number using a transition model,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 24, pp. 2155-2164, 2010.
- [35] M. S. Genç, Ü. Kaynak, H. Yapıcı, “Performance of transition model for predicting low Re aerofoil flows without/with single and simultaneous blowing and suction,” *European Journal of Mechanics B/Fluids*, vol. 30, pp. 218-235, 2011.
- [36] M. S. Genc, Ü. Kaynak, “Control of laminar separation bubble over a NACA2415 aerofoil at low Re transitional flow using blowing/suction”, *International Conference on Aerospace Sciences and Aviation Technology, ASAT-13-AE-11, Cairo, Egypt, 2009.*
- [37] M. S. Genc, G. Lock, U. Kaynak, “An experimental and computational study of low Re number transitional flows over an aerofoil with leading edge slat”, *The 26th Congress of ICAS and 8th AIAA ATIO, AIAA-8877, Anchorage, Alaska, 2008.*
- [38] İ. Karasu, M. Özden, M. S. Genç, “Performance assessment of transition models for three-dimensional flow over NACA4412 wings at low Reynolds numbers”, *Journal of Fluids Engineering* vol. 140, no. 12, pp. 121102, 2018.
- [39] M. S. Genç, G. Ozisik, N. Kahraman, “Investigation of aerodynamics performance of NACA 00-12 aerofoil with plain”, *Journal of Thermal Science and Technology*, vol. 28, no. 1, pp. 1-8, 2008.
- [40] M. S. Genç, K. Koca, H. H. Açık, “Investigation of pre-stall flow control on wind turbine blade airfoil using roughness element”, *Energy*, vol. 176, pp. 320-334, 2019.
- [41] İ. Karasu, H. H. Açık, K. Koca, M. S. Genç, “Effects of thickness and camber ratio on flow characteristics over airfoils”, *Journal of Thermal Engineering*, vol. 6, no. 3, pp. 242-252, 2020.

- [42] D. E. Alnak, "Thermohydraulic performance study of different square baffle angles in cross-corrugated channel," *Journal of Energy Storage*, vol. 28, no. 101295, 2020.
- [43] C. F. Ma, A. E. Bergles, "Boiling jet impingement cooling of simulated microelectronic chips," *Heat Transfer in Electronic Equipment HTD*, vol. 28, pp. 5-12, 1983.
- [44] Y. Masip, A. Rivas, G. S. Larraona, R. Anton, J. C. Ramos, B. Moshfegh, "Experimental study of the turbulent flow around a single wall-mounted cube exposed to a cross-flow and an impinging jet," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 38, pp. 50-71, 2012.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Bakır Oksit-Su ve Elmas-Su Nanoakışkanlı Birleşik Jet Akışlı Kanallarda Isı Transferi ve Akış Yapılarının Değerlendirilmesi

 Koray KARABULUT^{a,*}

^a *Elektrik ve Enerji Bölümü, Sivas Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, TÜRKİYE*

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: kkarabulut@cumhuriyet.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1183108

Öz

Bu çalışmada, sabit 1000 W/m^2 ısı akısına sahip dairesel oyuklu ve yamuk modellenmiş bakır plakalı yüzeylerden olan ısı transferi ve birleşik jet akışlı kanallardaki akış yapıları su, %2 hacimsel konsantrasyonlu CuO-Su (Bakır oksit)-Su ve Elmas-Su nanoakışkanları kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal çalışma, sürekli ve üç boyutlu olarak $k-\epsilon$ türbülans modeli Ansys-Fluent programının kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Kanallara ayrıca jet girişinden itibaren D jet giriş çapı ölçüsündeki sabit bir uzaklıkta (N) 45° ve 90° açılı kanatçıklar eklenmiştir. Kanal yüksekliği 3D iken; akışkanların Re sayısı aralığı 5000-15000' dir. Çalışmadan elde edilen sonuçların doğruluğu ve kabul edilebilirliği deneysel araştırmalar sonucu elde edilen eşitlik kullanılarak kanıtlanmıştır. Çalışmanın sonuçları, kanallardaki her bir model için ortalama Nu sayısının değişimleri olarak su ve nanoakışkanlar için kanatçiksiz ve kanatçıklı durumlarda karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, CuO-Su nanoakışkanı için birleşik jet akışın hız ve sıcaklık konturu dağılımları farklı kanatçık açıları için sunulmuştur. Bununla birlikte, kanallardaki her üç desenli yüzeyin tümü için farklı Reynolds sayılarında performans değerlendirme sayıları (PEC) ve ortalama Nu sayısı (Nu_m) ve yüzey sıcaklık değerleri (T_m) Re=5000 ve 15000 için analiz edilmiştir. Re=15000 için 90° kanatçıklı kanalda yamuk modellenmiş yüzeyde sırasıyla Elmas-Su ve Bakır oksit-Su nanoakışkanları kullanılması durumları için kanatçiksiz ve su akışkanı kullanılan kanallara göre Nu_m sayısında %27,57 ve %26,11' lik artışlar elde edilmiştir. Bunun yanı sıra, Re=15000 değerinde 90° açılı kanatçıklı kanallarda su akışkanı için PEC sayısı değerlerinin sırasıyla dairesel oyuklu ve yamuk modellenmiş yüzeylerde Elmas-Su ve CuO-Su nanoakışkanlarına göre %1,1-%1,31 ve %0,82-%0,63 daha fazla oldukları tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çapraz akış-çarpan jet birleşik jet akış, Nanoakışkan, Sayısal ısı transferi, Kanatçık

Evaluation of Heat Transfer and Flow Structures in Combined Jet Flow Channels with Copper Oxide-Water and Diamond-Water

ABSTRACT

In this study, heat transfer from circular hollow and trapezoidal model copper plate surfaces with a constant heat flux of 1000 W/m^2 and flow structures in combined jet flow channels were numerically investigated using water, 2% volumetric concentration CuO-Water (Copper oxide)-Water and Diamond-Water nanofluids. The numerical study was carried out steady and in three dimensions by using the Ansys-Fluent program with the $k-\epsilon$ turbulence model. In addition, 45° and 90° angled fins have been added to the channels at a fixed distance (N) in the size of the D jet inlet diameter from the jet inlet. While the channel height is 3D, the Re number range of the fluids is 5000-15000. The accuracy and acceptability of the results obtained from the study were proven by using the equation obtained as a result of experimental research. The results of the study were evaluated comparatively in

the finless and finned conditions for water and nanofluids as variations in the average Nu number for each model in the channels. Also, the velocity and temperature contour distributions of the combined jet flow for the CuO-Water nanofluid were presented for different fin angles. However, performance evaluation numbers (PEC) at different Reynolds numbers and mean Nu number (Nu_m) and surface temperature values (T_m) were analyzed for $Re=5000$ and 15000 for all three model surfaces in the channels. For $Re=15000$, 27.57% and 26.11% increases in the Nu_m number were obtained compared to the channels without fin and water-fluid for the use of Diamond-Water and Copper oxide-Water nanofluids, respectively, on the trapezoidal model surface in the 90° finned channel. In addition, the PEC number values for water fluid in channels with 90° angled fins at $Re=15000$ value were found to be 1.1%-1.31% and 0.82%-0.63 higher compared to Diamond-Water and CuO-Water nanofluids on the circular hollow and trapezoidal model surfaces, respectively.

Keywords: Combined jet flow with cross flow-impinging jet, Nanofluid, Numerical heat transfer, Fin

I. GİRİŞ

Elektronik elemanlardan olan ısı transferini artırmada kullanılan çapraz akış ile soğutma yöntemi, en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntem, soğuk akışkanın bir fanla tüm bileşenler üzerine gönderilmesi ve bu sayede elektronik bileşenlerin bütününe soğutulması esasına dayanmaktadır. Ancak, bu metod bütün devre elemanlarının soğutulması esasında olduğundan çok yüksek sıcaklıklardaki bileşenlerden olan ısı transferinde başarısız olabilir [1]. Bir diğer ısı transferi yöntemi de çarpan jetle soğutmadır. Bu yöntemde, soğuk akışkan lüleyle sıcaklığı yüksek bir elemana yersel şekilde püskürtülür. Çarpan jet ile sıcaklığı yüksek bir devre bileşeninin soğutulması sağlanabilirken, devrenin bütününe soğutulmasında yetersiz kalabilmektedir. Bir elektronik devrede sıcaklıkları birbirlerinden oldukça farklı birden çok eleman bulunmaktadır. Bu sebeple, tek çeşit soğutma yöntemi ile bütün devreyi güvenli şekilde tutabilecek şartlara erişilmekte sıkıntı yaşanmaktadır. Bu nedenle; çarpan jet ve çapraz akış soğutma yönteminin bir arada işleme alınarak birleşik jet akışı şeklinde uygulanması soğutma kapasitesi yüksek faydalı bir durum oluşturabilir. Çapraz akışla devre elemanları bir bütün olarak belirli bir aşamaya kadar soğutulabilirken, devrede sadece çok yüksek sıcaklıktaki elemanlar ise çarpan jet akışıyla noktasal olarak soğutulabilmektedir [2], [3]

Kilic ve ark., [4] bir tarafı açık ve üç tarafı kapalı kenarlardan oluşan dikdörtgen bir kanaldaki sabit ısı akılı ve bakır plakalı elektronik bileşenlerin tek bir hava jeti ile soğutulmaları üzerinde vorteks üreticinin etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Türbülanslı akış için kullandıkları Re sayısı 8000 iken; elemanlara uygulanan sabit ısı akısı değeri 1000 W/m^2 dir. Isı transferinin girdap üreticinin yerleşimine, uzunluğuna ve açısal konumuna duyarlı olduğunu gözlemlemişlerdir. Kılıç ve Ullah [5] farklı Re sayılarında ($Re=6000-12000$) Realizable $k-\epsilon$ türbülans modelini kullanarak sayısal olarak farklı akışkanların ($\text{Cu-H}_2\text{O}$, $\text{CuO-H}_2\text{O}$, $\text{TiO}_2\text{-H}_2\text{O}$, H_2O) çapraz akışlı ısı değiştiricilerinde soğutma performanslarını araştırmışlardır. Suya göre en iyi performans gösteren akışkan olan $\text{Cu-H}_2\text{O}$ nanoakışkanının ortalama Nu sayısını %6,63 artırdığını belirlemişlerdir. Bir diğer çalışmada; Kılıç ve Abdulvahitoğlu [6] bir araç radyatöründe nanoakışkanlar ve dönen jetler ile sayısal olarak ısı transferini çalışmışlardır. Çalışmada, baz soğutucu olarak tüm parametreler için $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ nanoakışkanı seçilmiştir. Re sayısının 12000' den 21000' e artışı ile ortalama Nusselt sayısında (Nu) %51,3' lük bir artış elde edilmiştir. Dal ve ark., [7] hidrostatik yataklarda nanoparçacık ilaveli yağlayıcı akışkan kullanımının yük taşıma kapasitesine etkisi teorik olarak araştırılmışlardır. Yapılan çalışma ile nanoparçacık takviyeli yağlayıcı kullanımının hidrostatik yatakların yük taşıma kapasitesini arttırdığını ve yüksek hacimsel oranlar için nanoparçacık boyutunun performansa etkisinin daha baskın olduğunu belirlemişlerdir. Sabit ısı akılı bir elemandan çapraz akış-çarpan hava jetli akış ile olan ısı transferi Öztürk ve Demircan [8] tarafından sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada farklı jet giriş hızı/kanal giriş hızı oranları (0, 1, 2 ve 3) ve 0° , $22,5^\circ$, 45° , $67,5^\circ$ ve 90° olmak üzere kanala yerleştirilen kanatçıkların farklı açıları için kanaldaki tek bir elemandan olan ısı transferi incelenmiştir. En yüksek ısı transferinin, jet giriş hızı/kanal giriş hızı oranının 3 ve 90° kanatçık açısında olduğu belirlenmiştir.

Nanoakışkanların kullanıldığı jet çarpmalı çalışmalar incelendiğinde; Chang ve Yang [9] $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Su}$ nanoakışkanını kullanarak jet çarpmalı akış kaynamasının ısı transfer performansını incelemişlerdir.

Al_2O_3 -Su nanoakışkanının jet çarpma akışının ısı transferi performansının, çalışma sıvısı olarak kullanılan sudan daha kötü olduğu bulunmuştur. Isı transfer performansındaki azalmanın ısıl direncin artmasıyla sonuçlanan ısıtılmış yüzey üzerindeki bir nano-soğurma tabakasının oluşmasından kaynaklandığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, ısıtılan yüzeye akustik titreşim uygulanarak nano-soğurma tabakasının oluşumu önlenirken, bu durumda Al_2O_3 -Su nanoakışkanı kullanılarak elde edilen ısı transfer performansı su kullanılarak elde edilenden daha iyi olmaktadır. Datta ve ark., [10] dış bükey bir yüzey üzerine sınırlı bir yarıktan jet çarpmasında Al_2O_3 -Su nanoakışkanı kullanarak ısı transfer performansının araştırılması için sayısal simülasyon gerçekleştirmişlerdir. Sistemin akış davranışını ve taşınım ısı transfer performansını araştırmak için çeşitli Reynolds sayıları, jet-plaka arasındaki mesafe gibi farklı parametreler göz önünde bulundurulmuştur. Ortalama Nusselt sayısı ve ısı transfer katsayısının jet giriş Reynolds sayısındaki artışla önemli ölçüde arttığını belirlemişlerdir. Kumar ve ark., [11] ısı transfer oranını artırmak için jet çarpmalı durumda kanat profili sütunlarıyla birleştirilmiş bir ısı emici kullanmışlardır. Bunu gerçekleştirirken araştırmalarında su ve %1 konsantrasyonlu CuO-Su nanoakışkanından yararlanmışlardır. Sonuçlarında, ısı emici sıcaklığında jet akışkanı olarak su akışkanı kullandıklarında %10' luk bir azalma elde ederlerken, nanoakışkan kullandıklarında ise sıcaklık düşüşünün %14' ü bulduğunu saptamışlardır. Mikrokanalın üst duvarında tırtıklı enjeksiyon jeti bulunan ve 0-40 Hartman yoğunluğunda manyetik alan kullanan bir mikrokanal içindeki %0-6 Al_2O_3 -Su nanoakışkanın akışı Jalali ve ark., [12] tarafından incelenmiştir. Jet çarpma bölmeli alt mikro kanal duvarı sabit bir sıcaklığa sahipken üst mikro kanal duvarı çarpan jetler arasında yalıtılmıştır. Isı transferini artırmak amacıyla çarpan jetler için girintili mod uygulanmıştır. Sonuçlar, tırtık çentik yüksekliğinin fazla olmasının ısı transferini o ölçüde artırdığını göstermiştir. Selimefendigil ve Chamka [13] CuO-Su nano jeti kullanılarak oyuk benzeri bir kısmı olan izotermal bir yüzeyin soğutulmasında taşınım ısı transfer özelliklerini sayısal olarak analiz etmeyi amaçlamışlardır. Çalışmalarını, Reynolds sayısının farklı değerlerinde (100-400), farklı oyuk uzunlukları (5w-40w) ve yüksekliklerinde (w-5w) nanoparçacığın hacimsel konsantrasyonunu (%0-4) değiştirerek gerçekleştirmişlerdir. Oyuk uzunluğu düşük olduğunda, oyuk eğimli duvarının ortalama Nusselt sayısına katkısının önemli olduğunu ve en yüksek hacimsel konsantrasyonda su yerine nanoakışkan kullanıldığında ortalama ısı transferinin %35-46 oranında arttığını belirlemişlerdir. Abdullah ve ark., [14] çalışmalarında alüminyum bir plaka yüzeyine çift jet çarpmasının ısı transferi üzerinde TiO_2 nano çözeltisi konsantrasyonunun etkisini deneysel analiz yoluyla incelemişlerdir. Bunun haricinde değişkenler olarak çift jetin lüle mesafesini ve lüle-plaka mesafesini göz önüne almışlardır. Bu verilere bağlı olarak çift jetin akış yapısının ısı transferi artışını etkileyen önemli bir durum olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca, mesafelerin ve akış yapısını etkileyen nanoparçacık konsantrasyonunun da Re sayısı ile birlikte Nu sayısını etkilediğini belirlemişlerdir. Shi ve ark., [15] nano-alüminyum katkı maddelerinin yuvarlak su jetlerinin kararsızlığı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. İki şeffaf lülenin içinde ve çıkışının yakınında akış görselleştirmesi, yüksek hızlı gölge görüntüleme tekniği ile elde edilmiş ve nanoparçacık katkı maddelerinin jet kararsızlığı üzerindeki etkilerine esas olarak, viskozite artışı ve kaviteasyon teşvikinin neden olduğu belirlenmiştir.

Ulaşılan literatür incelemelerinden de görüldüğü gibi çarpan jetlerin olduğu bir çok çalışma mevcuttur. Ancak, nanoakışkanların kullanılarak çapraz akış-çarpan jet akışın birlikte uygulandığı birleşik jet akışlı çalışma sayısı oldukça az olmakla birlikte; bu çalışmada kullanılan CuO-Su ve Elmas-Su nanoakışkanların kullanılarak ısı transferi performanslarının kıyaslandığı bir çalışmaya literatürde rastlanamamıştır. Bununla birlikte, literatürde ulaşılan çalışmalarla kıyaslandığında kanalda daha düşük basınç düşüşüne karşı; daha yüksek ısı transferi oranlarına ulaşılabilmektedir. Ayrıca, bu çalışmada da kullanılan karbon kökenli nanoakışkanlardan olan Elmas-Su nanoakışkanı gibi metal ve metal oksit nanoakışkanlarına göre düşük nanoparçacık konsantrasyonları ile yüksek ısı transferi sağlayabilen karbon kökenli nanoakışkanlar son yıllarda araştırmacıların dikkatini çekmekte olup; özellikle çeşitli ısı değiştiricileri uygulamalarında kullanıldığı çalışmalar literatürde bulunmaktadır [16 -19].

Bu çalışmada, H=3D yükseklikli birleşik jet akışlı kanallardaki dairesel oyuklu ve yamuk desenli yüzeylerden olan ısı transferi ve akış yapıları su, %2 CuO-Su ve %2 Elmas-Su nanoakışkanları kullanılarak kanatçıksız, 45° ve 90° açılı kanatçıklı kanal durumları için sayısal olarak incelenmiştir. Kanal içerisinde bulunan elemanların farklı model yüzeyleri olarak seçilmesinin nedeni, birleşik jet akışın soğutulacak desenli yüzeyler üzerindeki temasının artırılmasını sağlamanın yanında; jet akışın bir

desenli model yüzeyine çarptıktan sonra tekrar kanal içerisindeki diğer modele doğru yönlendirmesini sağlayarak ısı transferi etkisini artırmaktır. Kanatçık, literatürde bulunan Öztürk ve Demircan [8] tarafından yapılan çalışma da göz önünde bulundurularak; kanaldan gelen çapraz akışın ilk sırada bulunan modeller üzerine daha iyi yönlendirilebilmesi ve modeller arası boşlukta bulunan akışkanın hızının artırılabilmesi etkileri dikkate alınarak; akışı engellemeyecek şekilde konumlandırılmıştır. Sayısal araştırma, sürekli ve üç boyutlu enerji ve Navier-Stokes denklemlerinin k-ε türbülans modeli Ansys-Fluent programı kullanılarak çözümlenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Kanatçık ve kanalın alt ve üst yüzeyleri adyabatik iken; desenli yüzeyler 1000 W/m²’ lik sabit ısı akısına sahiptir. ([5], [20-22]). Bilindiği gibi aşırı ısınma elektronik elemanların yoğun çalışma yükü altında oluşmaktadır. Bu ısı yükü ile birlikte, elemanların sıcaklıkları 308 ila 353 K arasında değişen sıcaklıklara kadar ulaşabilmektedir. Bu çalışmada da sırasıyla dairesel oyuklu ve yamuk modeller için elde edilen yüzey sıcaklıkları 304-307 K aralığındadır. Bu nedenle, yüzeylere uygulanan sabit ısı akısı yaklaşımının doğru olduğu görülmektedir. Akışkanlar için çalışılan Reynolds sayısı aralığı 5000-15000’ dir. Seçilen bu Re sayısı değerleri literatürde yapılan çalışmalar temel alınarak seçilmiş olup; hem jet Re sayısını (Re_j) hem de kanal Re sayısını (Re_k) temsil etmektedir. Buna bağlı olarak, örnek verecek olursak; çalışmada H=3D kanal yüksekliğinde; jet ve kanalda Elmas-Su nanoakışkan akışı için Reynolds sayısının 5000 olduğu değerlerde akış hızları sırasıyla V_j=0,335 m/s ve V_k=0,098 m/s olmaktadır. Re=15000 için ise bu değerler sırasıyla V_j=1,004 m/s ve V_k=0,293 m/s’ dir. Dolayısıyla, literatürde ulaşılan çalışmalar da göz önüne alındığında hem jet hem de kanal akışı için çalışılan Re sayısı aralığı (Re=5000-15000) türbülanslı olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, bu çalışmada akış çapraz ve jet akış olmak üzere birleşik şekilde uygulanarak kanaldaki akışın yüzeyler üzerindeki etkisinin kontrol edilmesiyle ısı transferi artırılırken; akış kontrolünün aerodinamik açıdan da öneminin vurgulandığı literatürde farklı uygulamalar mevcuttur [23-28]. Çalışmada kullanılan nanoakışkanların termofiziksel özellikleri literatürde bulunan çalışmadaki eşitlikler ve nanoparçacık özellikleri kullanılarak bulunmuştur. Çalışmanın sonuçları, literatürdeki deneysel çalışma sonuçlarıyla kıyaslanmış ve uyumlu oldukları saptanmıştır. Sonuçlar, her bir dairesel oyuk ve yamuk model yüzeyi için ortalama Nu sayısının değişimleri olarak incelenmiştir. Bununla birlikte, birleşik jet akışlı kanallar için kanatçıksız ve farklı kanatçık açılı kanallarda CuO-Su nanoakışkanının hız ve sıcaklık konturu dağılımları Re=13000 için sunulmuştur. Ayrıca, Re sayısının 5000 ve 15000 değerlerinde kanallarda bulunan tüm desenler için kanatçıksız ve kanatçıklı durumlarda ortalama Nu sayısı (Nu_m) ve yüzey sıcaklık (T_m) değerleri değerlendirilmiştir. Ayrıca, kanatçıkların ve nanoakışkanın birleşik jet akışlı kanallarda kanatçıksız ve su kullanılan durumlara göre Nu sayısı artışına karşı basınç düşüşleri, performans değerlendirme sayısı (PEC) göz önüne alınarak yorumlanmıştır.

II. BAKIR OKSİT-SU VE ELMAS-SU NANOAKIŞKANLARININ TERMOFİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

Bu çalışmada kullanılan çalışma akışkanlarından olan %2 hacimsel konsantrasyonlu Bakır oksit-Su ve Elmas-Su nanoakışkanlarının termofiziksel özellikleri literatürde bulunan ve yaygın olarak kullanılan eşitlikler [29] yardımıyla elde edilmiş ve Su akışkanı ile Tablo 1’ de gösterilmiştir. Çalışmada, akışkanların tez fazlı akışkan oldukları varsayımı ile modellemeler yapılmıştır. Bu yaklaşımdaki temel düşünce, nanoakışkanlardaki Bakır oksit ve Elmas nanoparçacıklarının düşük konsantrasyonları nedeniyle akışkanlarda çökelme ve topaklaşma sorunu yaşanmadan homojen bir şekilde dağılımları üzerinedir. Ayrıca, katı haldeki Bakır oksit ve Elmas nanoparçacıklarının termofiziksel özellikleri de literatürdeki ilgili çalışmadan alınmıştır [30].

Nanoakışkanın yoğunluğu

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{nf} + \phi\rho_p \quad (1)$$

Bu eşitlikte, ρ akışkanın yoğunluğunu (kg/m³), φ nanoparçacık konsantrasyonu ifade ederken, p, nf ve bf ise sırasıyla nanoparçacık, nanoakışkan ve su akışkanını belirtmektedir.

Nanoakışkanın özgül ısısı

$$c_{pnf} = (1 - \varphi)c_{pbf} + \varphi c_{pp} \quad (2)$$

Nanoakışkanın ısı iletkenliği

$$k_{nf} = \frac{k_p + 2k_{bf} + 2(k_p - k_{bf})\varphi}{k_p + 2k_{bf} - 2(k_p - k_{bf})\varphi} k_{bf} \quad (3)$$

Nanoakışkanın viskozitesi

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} (1 + 2,5\varphi) \quad (4)$$

Tablo 1. Termofiziksel özellikler (30°C)

Özellikler	Su	Bakır oksit	Elmas	Bakır oksit-Su nanoakışkanı	Elmas-Su nanoakışkanı
k (W/mK)	0,6172	20	1000	0,6639	0,6685
ρ (kg/m ³)	995,8	6500	3510	1105,884	1046,08
c_p (J/kgK)	4178,4	535,6	497,26	4105,54	4104,77
μ (Ns/m ²)	803,4x10 ⁻⁶	-	-	843,57x10 ⁻⁶	843,57x10 ⁻⁶

III. SAYISAL METOT

Model yüzeylerindeki çapraz akış-çarpan jet akışının zorlanmış taşınım ısı transferinin çözümünde Ansys-Fluent programı kullanılmıştır.

Akış ve ısı transferi, aşağıdaki gibi gövde kuvvetinin bulunmadığı sürekli, kanaldaki çapraz akış-çarpan jet akış nedeniyle gerçekleşen türbülanslı akış için kütle, momentum ve enerjinin korunumu denklemlerinden zaman ortalamalı olarak türetilen diferansiyel denklemlerin çözümleriyle yapılmıştır ([31-32]).

Isı transferi süreçlerinde türbülansın doğru modellenmesi esastır. Bununla birlikte, türbülanslı akışkanların doğrudan sayısal simülasyonları çok zor olup aynı zamanda zaman alıcı bir süreçtir. Sayısal modellemelerde kullanılan çeşitli türbülans modelleri (k- ω , k-k_L- ω , k- ω SST) ([33-41]) bulunmakla birlikte, bu modeller arasında ekonomikliği ve pek çok akış olayında kabul edilebilir doğrulukla sonuç vermesi bakımından yarı ampirik bir model olan k- ϵ türbülans modeli yaygın olarak kullanılmaktadır ([31]). Bu nedenle, literatürdeki çalışmalardan elde edilen sonuçlar da göz önünde bulundurularak bu çalışmadaki sayısal hesaplamalarda standart k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır.

Süreklilik denklemi

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = 0 \quad (5)$$

Momentum denklemi

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u_i' u_j'} \right] \quad (6)$$

Enerji denklemi

$$\rho c_p \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{u}_i \bar{T}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} - \rho c_p \overline{T' u_i'} \right] \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (8)$$

Türbülans kinetik enerji denklemi

Türbülans kinetik enerji yutulma terimi

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (9)$$

Bu denklemlerde, k türbülanslı akış kinetik enerjisini, u_i x, y ve z yönlerindeki hız bileşenlerini, μ akışkanın viskozitesini, σ_k ($\sigma_k=1$) türbülanslı kinetik enerji Pr sayısını belirtmektedir. Türbülanslı kinetik enerji üretimi (G_k) ve türbülanslı akışın viskozitesini (μ_t) gösteren eşitlikler aşağıdaki gibidir ([31], [35]).

$$G_k = -\overline{\rho u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (10)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (11)$$

Türbülans yutulma Pr sayısı σ_ε ile belirtilirken, $C_{1\varepsilon}=1.44$, $C_{2\varepsilon}=1.92$, $C_\mu=0.09$ ve $\sigma_\varepsilon=1.3$ değerlerine sahip olan eşitliklerdeki katsayılarıdır ([8], [30]).

Isı taşınım katsayısı h, Eş. 12 ve Nusselt sayısı (Nu) ise Eş. 13 ile hesaplanmaktadır ([8], [21]).

$$h = \frac{q''}{T_y - T_a} \quad (12)$$

$$-k_a \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_y = h (T_a - T_y) \text{ ve } Nu = \frac{h(3m)}{k_a} \quad (13)$$

Bu eşitliklerde, T_a ve T_y sırasıyla akışkanının ve elemanın ortalama olarak yüzey sıcaklıklarını (K), k_a akışkanın ısı iletim katsayısını (W/m.K), 3m akışkanın temas ettiği elemanın toplam yüzey uzunluğunu (m), h ve h_m ise sırasıyla model yüzeyi boyunca noktasal ve ortalama ısı taşınım katsayısını (W/m².K), n ise yüzeye dik yön olup; model yüzeyi için ortalama Nu sayısı (Nu_m) aşağıda belirtilen eşitliklerden bulunmaktadır.

Desenli yüzey ortalama ısı taşınım katsayısı

$$h_m = \frac{1}{3m} \int_0^{3m} h dx \quad (14)$$

Desenli yüzey ortalama Nu sayısı

$$Nu_m = \frac{h_m(3m)}{k_a} \quad (15)$$

Kanalın hidrolik çapı

$$D_{kh} = \frac{4A_k}{P_k} = \frac{4(H.W)}{2(H+W)} \quad (16)$$

Bu eşitlikte, A_k ve P_k sırasıyla kanalın kesit alanı ve ıslak çevresini gösterirken, kanalın yükseklik ve genişliği ise H ve W ile temsil edilmektedir. Jet giriş çapı D , dairesel girişli jet hidrolik çapına (D_{hjet}) eşittir.

Kanalın ve jetin Re sayıları ise sırasıyla Eş. 17 ve 18 kullanılarak belirlenmektedir [8].

$$Re_k = \frac{\rho_a V_k D_{hk}}{\mu_a} \quad (17)$$

$$Re_j = \frac{\rho_a V_j D}{\mu_a} \quad (18)$$

Bu eşitliklerde, akışkanın kanal ve jet akış hızları sırasıyla V_k ve V_j (m/s) ile gösterilmektedir.

Kanal boyunca basınç düşüşü (ΔP) aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$\Delta P = \frac{f \rho L}{2D_{kh}} V_k^2 \quad (19)$$

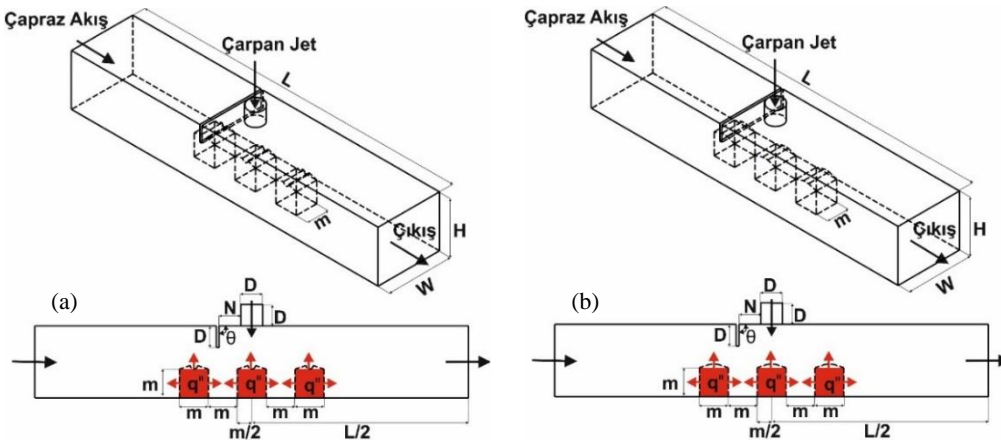
Bu eşitlikte, ΔP kanatçiksız ve kanatçıklı kanalların giriş ve çıkışları arasındaki basınç düşüşünü (Pa), f sürtünme faktörünü ve L kanalın uzunluğunu (m) temsil etmektedir.

Performans değerlendirme sayısı (PEC) ise aşağıda belirtilen Eş. 20 ile bulunmaktadır ([42]).

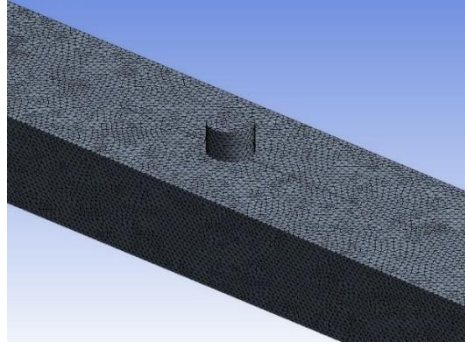
$$PEC = \frac{(Nu_{m-kanatçıklı} / Nu_{m-kanatçiksız})}{(\Delta P_{kanatçıklı} / \Delta P_{kanatçiksız})} \quad (20)$$

IV. MODEL GEOMETRİLERİ

Çalışmadaki çapraz akış-çarpan jet birleşik jet akışlı kanatçıklı kanallar ve kanallardaki dairesel oyuklu ve yamuk model yüzeylerine sahip elemanların ölçüleri Şekil 1 (a) ve (b)' de verilirken; kanalların boyutsal ölçüleri ise Tablo 2 (Öztürk ve Demircan [8])' de verilmiştir. Bunun yanı sıra, bu çalışmada yapılan kabuller ve sınır şartları Tablo 3' de sunulmaktadır. Ayrıca, birleşik jet akışlı kanalların sayısal hesaplamalarında kullanılan düzgün dörtyüzlü ağ yapısı Şekil 2' de gösterilmektedir.



Şekil 1. (a) dairesel oyuklu (b) yamuk modelli kanalların görünüşleri



Şekil 2. Kanalda kullanılan düzgün dört yüzüzlü ağ yapısının gösterimi

Tablo 2. Kanalların boyutsal ölçüleri (Öztürk ve Demircan [8])

Değişken	Ölçü
D	15 (mm)
L	66D
W	4D
H	3D
M	20 (mm)
θ	45° ve 90°
N	D

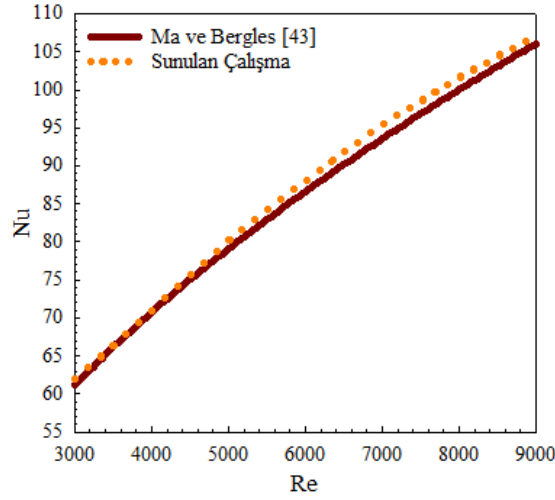
Tablo 3. Çalışmada uygulanan sınır şartları

a) Akış hacmi, sürekli, üç boyutlu ve türbülanslıdır
b) Sıkıştırılamaz akışkan olarak su, %2 CuO-Su ve Elmas-Su nanoakışkanları, hem jet hem de çapraz akış akışkanı olarak kullanılmışlardır
c) Akışkanların ısı özellikleri sabit olup, sıcaklıktan bağımsızdır
d) Kanalın ve kanatçığın yüzeyleri adyabatiktir
e) Akışkan olarak kullanılan su, nanoakışkan ve desenli model yüzeylerinde ısı kaynağı bulunmamaktadır
f) Kanalın çıkış basıncı, atmosfer basıncına eşit olarak alınmıştır ($P_{ç}=P_{atm}$)
g) Kanalın çıkışındaki sıcaklık farkının ihmal edilebilecek kadar az miktarda olduğu kabul edilerek $\partial T/\partial x=0$ olarak belirlenmiştir
h) Kanal, kanatçık ve model yüzeylerinde kaymazlık sınır şartı olduğu ve bu nedenle bahsedilen yüzeylerde tüm hız bileşeni değerlerinin sıfır olduğu kabul edilmiştir.

V. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmada, Şekil 3' de gösterildiği gibi sadece jet akışın olduğu durumda farklı Reynolds sayılarında incelemelerde bulunularak ulaşılan sonuçlar ile Ma ve Bergles [43]' in deneysel incelemeleri sonucunda ulaştıkları Eş. 21 kullanılarak ulaşılan sonuçlar karşılaştırılmış ve Ma ve Bergles [43]' in deneysel sonuçları ile sunulan çalışmanın sayısal sonuçlarının uyumlu ve tutarlı oldukları bulunmuştur.

$$\overline{Nu} = 1,29 Re^{0.5} Pr^{0.4} \quad (21)$$



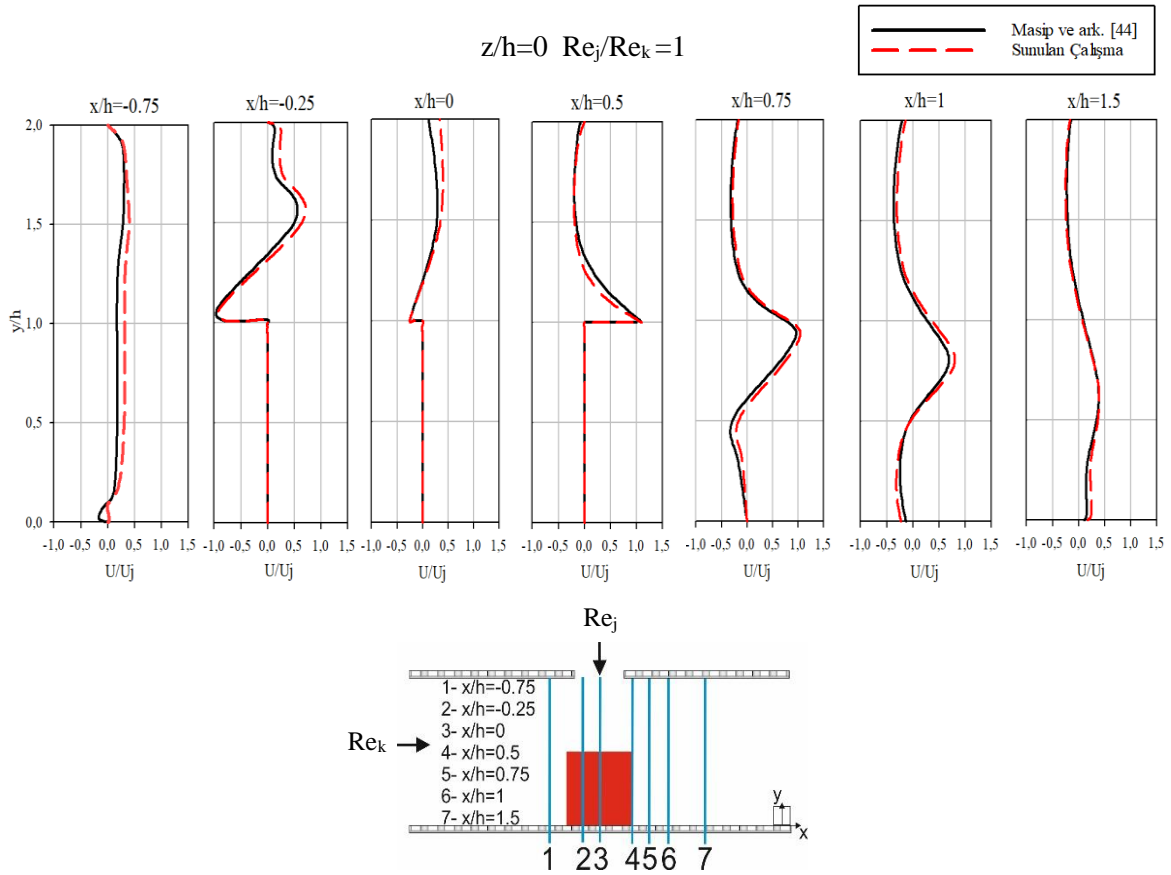
Şekil 3. Sunulan çalışma ve Ma ve Bergles [43]'in sonuçlarının karşılaştırılması

Ayrıca, literatürde Masip ve ark., [44]' nın çarpaz akış ve çarpan jet kombine akışına maruz kalan bir küp etrafındaki türbülanslı akışın deneysel olarak incelendiği çalışma ile bu çalışmanın sayısal sonuçları karşılaştırılmış ve Şekil 4' de gösterilmiştir. Masip ve ark., [44] çalışmalarında 2000x300x30mm boyutlarında bir kanal içerisine küp şeklinde bir eleman yerleştirmişlerdir. Kanalin bütün yüzeylerinin adyabatik olarak alındığı varsayılarak; jet Re sayısının (Re_j), kanal Re sayısına (Re_k) oranı eşit alınarak ($Re_j/Re_k=1$) elektronik elemanın etrafındaki akış yapıları farklı konumlarda (x/h) incelenmiştir. Şekil 4' den de görülebildiği gibi sunulan çalışma ile Masip ve ark., [44]' nın yapmış olduğu deneysel çalışma sonucu ulaşılan hız profillerinin birbirleri ile oldukça uyumlu oldukları saptanmıştır.

Ağ sayısı bağımsızlığını test ederek en uygun sayıda ağ sayısını saptamak için kanatçiksız birleşik jet akışlı kanaldaki ağ sayısının, ortalama Nu sayısı (Nu_m) üzerindeki etkisi farklı Reynolds sayılarında Tablo 4' de verilmiştir. Buna göre kanatçiksız kanal için 2022840 adet ağ elemanının güvenilir ve doğru sonucu vereceği belirlenmiştir.

Tablo 4. Ağ elemanı sayısına bağlı olarak Nu_m ' nin Reynolds sayısı ile değişimi

Ağ elemanı sayısı	Re=5000 Nu_m	Re=7000 Nu_m	Re=9000 Nu_m
1758412	86,48	108,84	127,40
2022840	86,52	108,88	127,43
2245786	86,52	108,87	127,42

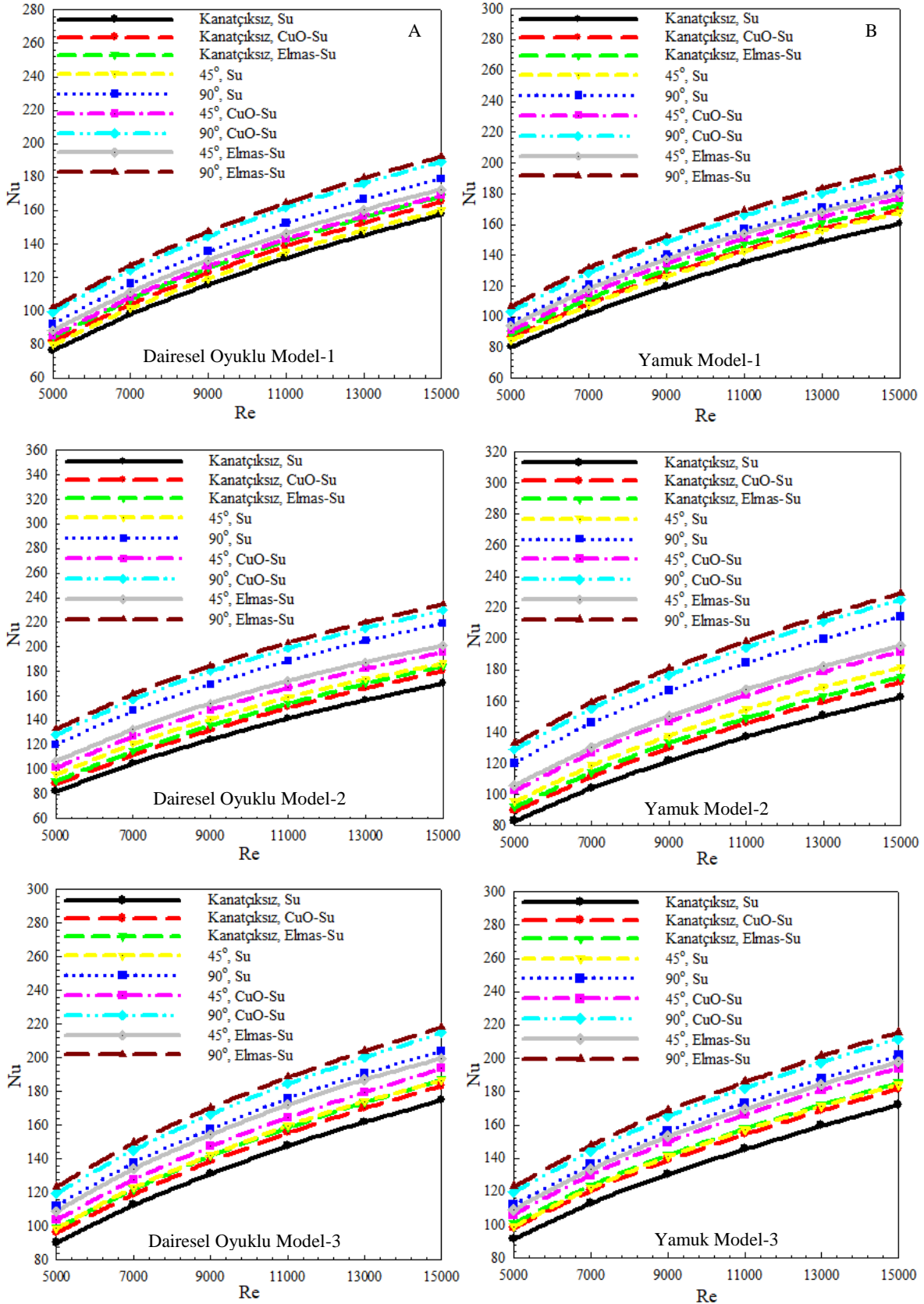


Şekil 4. Sunulan çalışma ve Masip ve ark., ([44])'nin sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 5. A ve B' de sırasıyla dairesel oyuklu ve yamuk modellenli bakır plakalı yüzeylere sahip, kanatçiksız, 45° ve 90° açılı kanatçıklı çapraz akış-çarpan jet birleşik jet akışlı kanallarda çapraz akışın olduğu kanal girişinden başlamak üzere model sıralarına göre ortalama Nu sayısının değişimleri Re sayısına bağlı olarak su, CuO-Su (Bakır oksit-Su) ve Elmas-Su nanoakışkanları için gösterilmektedir. Her iki modeli, çapraz akış-çarpan jet akışlı kanal için de en düşük Nu sayısı değerlerine kanatçiksız ve su akışkanı için ulaşılrken; kanallara kanatçık eklenmesiyle akışkanın desenli model yüzeyleri üzerine daha iyi yönlendirilmesiyle Nu sayısı değerleri artmaktadır. Çapraz akışın etkisi altında bulunan kanal girişine göre birinci sıradaki Model 1 yüzeyleri incelendiğinde kanatçık ve açı değişimleriyle birlikte akışkanın türüne karşı olan duyarlılıkları da Şekil 5. A ve B (a)' dan gözlemlenebilmektedir. $Re=9000$ değerinde 45° kanatçık açılı kanalda CuO-Su nanoakışkanı kullanılması durumunda, kanatçiksız ve su akışkanı olan birleşik jet akışlı kanala göre ortalama Nu sayısı artışları sırasıyla dairesel oyuklu ve yamuk modellenli yüzeyler için %9,75 ve %12,33 olmaktadır. Ayrıca, yamuk modellenli yüzeyler etrafında akışkanın daha iyi temasta bulunarak ısı transferi artışı dolayısıyla soğutma performansı etkisinin daha iyi olduğu söylenebilmektedir. Kanallar içerisinde ikinci sırada bulunan ortadaki Model 2 analiz edildiğinde; hem kanatçiksız hem de kanatçıklı kanallarda Model 1' e göre yüzeylerin sahip olduğu ortalama Nu sayısı değerlerinin arttığı görülmektedir. Bu duruma, Model 2' nin çapraz akışa ek olarak doğrudan çarpan jet akışı etkisi altında bulunması neden olmaktadır. Çarpan jet akışı sonucu ısı transferinin gerçekleştiği ısı sınır tabaka kalınlığı azalarak, ısı transferinin artması sağlanmaktadır. Ayrıca, kanal girişinden gelen çapraz akış da çarpan jet akışı kitlesel olarak desenli model yüzeyleri üzerinden sürükleyerek; yerini daha soğuk olan kanal girişindeki akışkanın almasını sağlayıp ısı transferini artırıcı etki yapmaktadır. Bununla birlikte, $Re=13000$ için 90° kanatçık açılı birleşik jet akışlı kanallarda 45° açılı olanlara göre sırasıyla Elmas-Su ve Bakır oksit-Su nanoakışkanları kullanılması durumları için Model 2' de Model 1' e göre yamuk model yüzeyi için Nu sayılarının %8,7 ve %8,63 daha fazla oldukları bulunmuştur. Görüldüğü gibi kanatçık açısının 90°'ye çıkarılması hem çapraz akışın geçtiği kesit alanını daraltarak Model 2 üzerinde jet akış etkisi oluşmasını sağlarken; hem de Model 1 ve Model 2 arasında bulunan

yeniden dolaşım halindeki akışkanın hareketlenmesini sağlayarak Model 2 yüzeylerinden olan ısı transferini artırmaktadır. Kanalin sonunda bulunan Model 3' de ise kanatçiksız birleşik jet akışlı kanallarda, Model 1 ve 2' den gelen çapraz akış-çarpan jet akışı doğrudan Model 3 üzerine doğru hareket ettiğinden her üç akışkan için de (su, CuO-Su, Elmas-Su) Model 1 ve 2' ye göre Nu sayısı değerleri artarken; kanatçıklı kanallarda yüksek Re sayılarında akışkanın kanatçıklı yüzeyler üzerine ve modeller arasına yönlendirilmesiyle kanal sonunda bulunan ve birleşik jet akış etkisinin azaldığı Model 3' de Model 2' ye göre Nu sayılarında bir miktar azalma saptanmaktadır. $Re=15000$ ' de Model 3 için Model 2' ye göre 90° açılı kanatçıklı durumda sırasıyla dairesel oyuklu ve yamuk model yüzeylerinde Elmas-Su nanoakışkanı için %7,62 ve % 8,11' lik azalışlar görülmektedir.

Tablo 5' de Reynolds sayısının 5000 ve 15000 değerleri için çapraz akış-çarpan jet birleşik jet akışlı kanallarda bulunan her üç desenli dairesel oyuklu ve yamuk modellenli yüzeyler için kanatçiksız, 45° ve 90° açılı kanatçıklı durumlarda su, CuO-Su ve Elmas-Su nanoakışkanları kullanılarak elde edilen ortalama Nusselt sayısı (Nu_m) ve ortalama model yüzey sıcaklık (T_m) değerlerinin değişimleri sunulmaktadır. Her iki model yüzeyi ve her üç akışkan tipi için de kanatçiksız durumlarda Nu_m değerleri en düşük değerlerde iken; kanalın üst yüzeyine eklenen kanatçık sayesinde birleşik jet akışkanının model yüzeyleri üzerine yönlendirilmesiyle Nu_m değerleri artarken; T_m değerleri azalış göstermektedir. Özellikle nanoakışkanların (CuO-Su ve Elmas-Su) kullanılması durumlarında, akışkana eklenen nanoparçacıkların ısı transfer yüzey alanını artırması ve akışkan içerisinde türbülans oluşturucu etkisiyle hız sınır tabakasının model yüzeyleri üzerinde daha basık ve kanal merkezinde daha düz olması sağlanarak; model yüzeyleri üzerinde ısı sınır tabakasını inceltmesiyle ısı transferini artırıcı etki sağlayarak yüzeylerin soğuma performansını iyileştirmektedir ki bu durum Şekil 7' deki hız konturu dağılımlarında model yüzeyleri üzerindeki akışkanın hız artışlarından ve sıcaklık değişimlerinden anlaşılabilir. Bu nedenle, CuO-Su ve Elmas-Su nanoakışkanlarında Su akışkanına göre daha yüksek Nu_m ve daha düşük T_m değerleri elde edilmektedir. $Re=15000$ için 90° kanatçıklı kanalda Yamuk modellenli yüzeyde sırasıyla Elmas-Su ve Bakır oksit-Su nanoakışkanları kullanılması durumları için kanatçiksız ve su akışkanı kullanılan kanallara göre Nu_m sayısında %27,57 ve %26,11' lik artışlar olmaktadır. Aynı şartlarda, dairesel oyuklu desenli model yüzeyinde Nu_m değerinin artış oranları Elmas-Su ve Bakır oksit-Su nanoakışkanları için %28,48 ve %27,2' dir. Bununla birlikte, birleşik jet akışın yüzeyler üzerindeki temasının ve etrafındaki akışkan hareketinin daha iyi olduğu yamuk model için Nu_m değerleri; dairesel oyuklu model yüzeyleri için daha fazladır ve buna bağlı olarak artan ısı transferi nedeniyle T_m değerleri dairesel oyuklu modelden daha düşüktür.

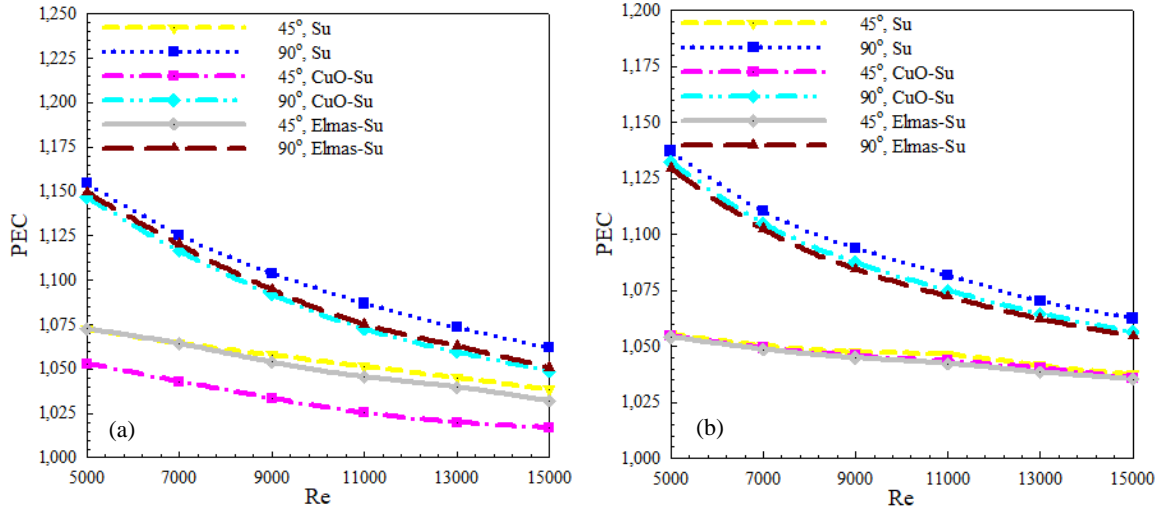


Şekil 5. Birleşik jet akışlı kanallarda bulunan A-Dairesel oyuklu B-Yamuk model yüzeyleri için kanal içerisindeki model diziliş sırasına göre ortalama Nu sayılarının Re sayısına göre değişimleri

Tablo 5. Birleşik jet akışlı kanallarda her üç dairesel oyuklu ve yamuk model yüzeyi için Nu_m ve T_m değerlerinin farklı akışkan tipleri ve Re sayılarında analizi

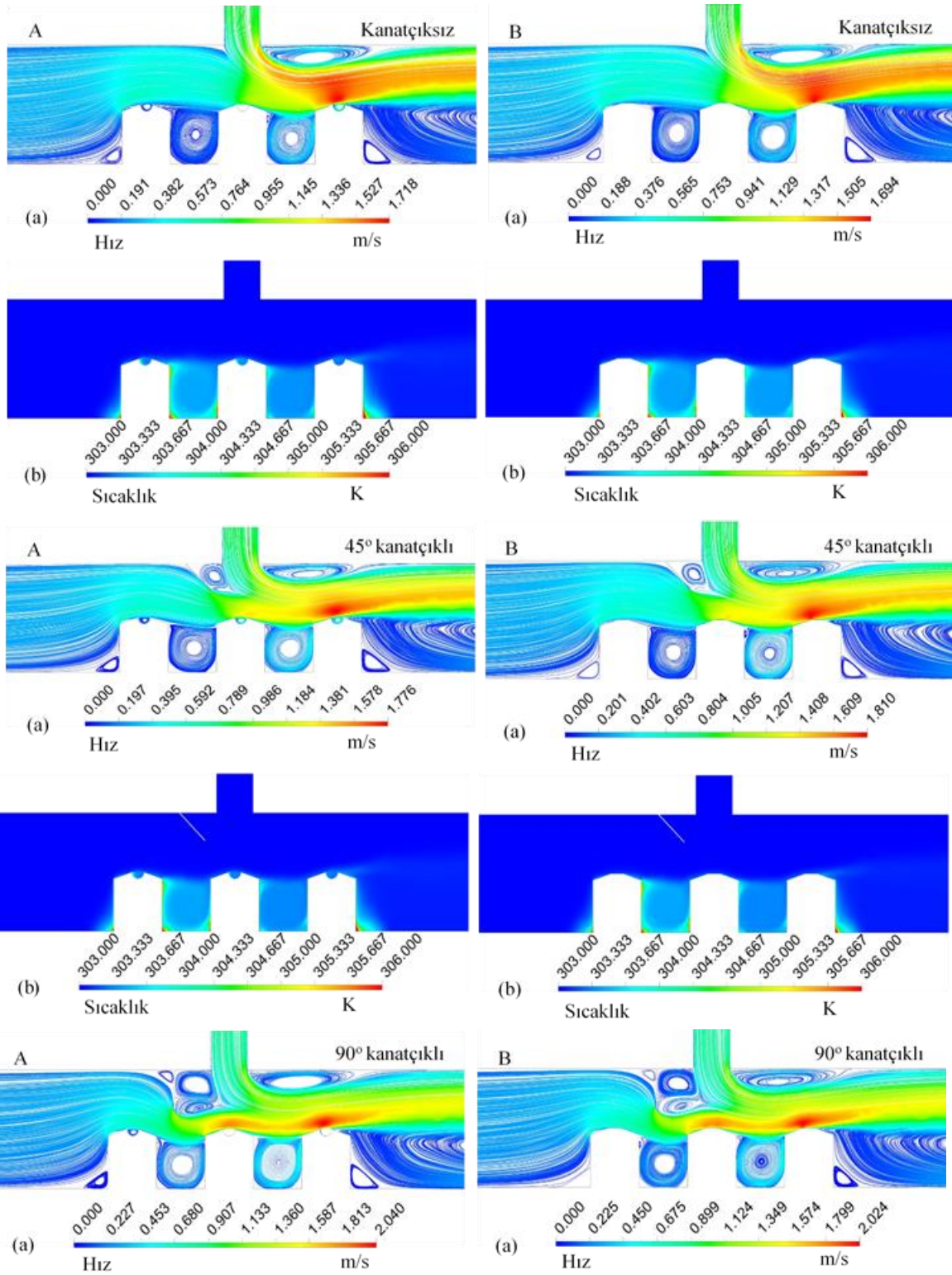
			Re=5000		Re=15000	
			Dairesel oyuklu model	Yamuk model	Dairesel oyuklu model	Yamuk model
Kanatçksız	Su	Nu_m	82,872	84,891	164,992	167,493
Kanatçksız	CuO-Su	Nu_m	88,789	91,298	174,464	176,311
Kanatçksız	Elmas-Su	Nu_m	91,504	94,042	177,944	179,885
45° Kanatçık	Su	Nu_m	91,580	93,125	176,901	177,797
90° Kanatçık	Su	Nu_m	108,303	109,681	199,663	200,829
45° Kanatçık	CuO-Su	Nu_m	96,955	100,083	186,239	187,703
90° Kanatçık	CuO-Su	Nu_m	115,829	117,461	209,873	211,231
45° Kanatçık	Elmas-Su	Nu_m	101,441	103,094	190,154	191,391
90° Kanatçık	Elmas-Su	Nu_m	119,493	120,823	211,993	213,685
Kanatçksız	Su	T_m (K)	306,768	306,653	304,223	304,209
Kanatçksız	CuO-Su	T_m (K)	306,393	306,193	304,086	304,045
Kanatçksız	Elmas-Su	T_m (K)	306,256	306,061	304,043	304,003
45° Kanatçık	Su	T_m (K)	306,494	306,338	304,138	304,112
90° Kanatçık	Su	T_m (K)	305,613	305,501	303,85	303,819
45° Kanatçık	CuO-Su	T_m (K)	306,045	305,915	303,973	303,961
90° Kanatçık	CuO-Su	T_m (K)	305,265	305,176	303,716	303,707
45° Kanatçık	Elmas-Su	T_m (K)	305,935	305,792	303,945	303,921
90° Kanatçık	Elmas-Su	T_m (K)	305,181	305,082	303,703	303,678

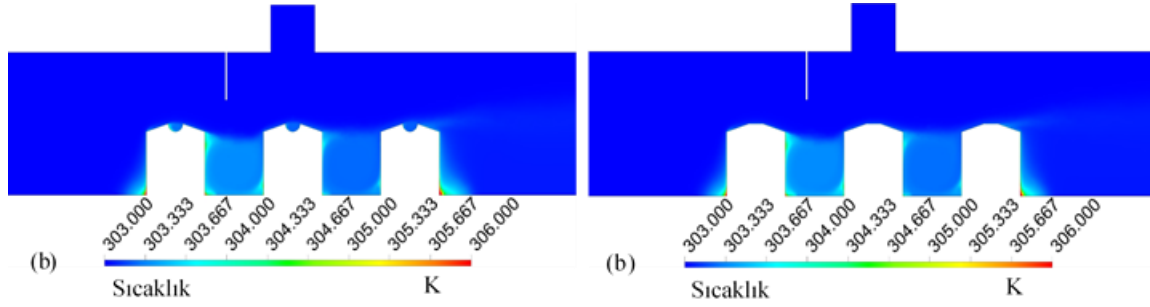
Şekil 6. (a) ve (b)' de $H=3D$ yükseklikli birleşik jet akışlı kanallardaki sırasıyla dairesel oyuklu ve yamuk model yüzeylerine ait performans değerlendirme sayısının (PEC) Re sayısı değişimleri, su akışkanı, CuO-Su ve Elmas-Su nanoakışkanları için farklı kanatçık açılarında (45° ve 90°) gösterilmektedir. PEC sayısı, birleşik jet akışlı kanallarda kanatçık kullanılması durumunda kanatçksız duruma göre ortalama Nu sayısı artışının basınç düşüşü artışına karşı olan performansını sergilemektedir. Bu nedenle, PEC sayısı fazla olan kanal ve akış şartlarının daha yüksek performanslı olduğu söylenebilir. Şekil 6' da her iki kanal için de en yüksek PEC değerine 90° kanatçık açılı kanalda su akışkanı için ulaşıldığı görülmektedir. Bununla birlikte, nanoakışkan için sudan daha fazla Nu sayısı değerleri elde edilirken; suya göre nanoakışkanın viskozitesinin daha yüksek olması sebebiyle sürtünme faktörü ve dolayısıyla kanaldaki basınç düşüşü daha fazla olduğundan PEC sayıları sudan daha düşüktür. $Re=15000$ değerinde 90° açılı kanatçıklı kanallarda su akışkanı için PEC sayısı değerlerinin sırasıyla dairesel oyuklu ve yamuk modellenli yüzeylerde Elmas-Su ve CuO-Su nanoakışkanlarına göre %1,1-1,31 ve %0,82-%0,63 daha fazla oldukları tespit edilmiştir. Ayrıca, yamuk model için PEC sayısı değerlerinin dairesel oyuklu modelden daha fazla oldukları grafiklerden görülebilmektedir. Bu durum, yamuk modellenli yüzeylerin dairesel oyuklu modellere göre kanal içerisinde Nu sayısı artışına karşın; daha düşük basınç düşüşüne sebep olduklarını belirtmektedir.



Şekil 6. (a) Dairesel oyuklu (b) yamuk model yüzeyleri için PEC sayısının Re sayısı ile değişiminin incelenmesi

Şekil 7. A ve B' de kanatçıksız, 45° ve 90° kanatçıklı birleşik jet akışlı kanallarda sırasıyla dairesel oyuklu ve yamuk model yüzeylerine ait (a) hız ve (b) sıcaklık konturu dağılımları CuO-Su nanoakışkanı için $Re=13000$ değerinde verilmektedir. Kanatçıksız durumda kanal girişindeki soldan birinci model olan Model 1, daha çok çapraz akışın etkisi altında olup; her iki model yüzeyi için de bu modeller etrafındaki hız değerleri düşüktür. Kanallarda ortadaki model olan Model 2 ise çapraz akışa ek olarak doğrudan çarpan jet akışın da etkisi altındadır. Bu nedenle bu model etrafındaki hız değerleri hız konturu dağılımlarından da görülebildiği gibi (Şekil 7. A, B (a) ve (b)) Model 1' e göre daha fazladır. Kanalın sonunda bulunan Model 3 etrafında akışkan hareketine bakıldığında kanatçıksız durumda kanal girişinden gelen çapraz akışın çarpan jeti kanal sonuna doğru sürüklemesiyle hız değerlerinin fazla olduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak, özellikle Model 2 ve 3 için Model 1' e göre model yüzey ve akışkan sıcaklık değerlerinin daha düşük oldukları sıcaklık konturlarından saptanabilmektedir. Kanallara 45° açılı kanatçık eklendiğinde; akışkanın geçiş kesit alanı daraltıldığından her iki şekilli yüzey için Model 1 üzerinde akışkan hızlanma sağlanırken; Model 2 ve 3 üzerinde çarpan jete ilave olarak jet akış etkisi sağlanarak akışkan hızı artmaktadır. Böylece, model yüzeylerinden olan ısı transferi artarak soğuma iyileştirilmektedir. Bununla birlikte, kanatçıksız kanala göre çapraz akış; kanatçıklı model yüzeyleri (Model 1 ve 2) üzerine yönlendirilebildiğinden kanal sonundaki Model 3 üzerindeki akışkan hızı azalmaktadır. Kanatçık açısı 90°' ye çıkarıldığında ise akışkan, hem modeller üzerine hem de modeller arasına daha iyi temas edebildiğinden; hem modeller arası yeniden dolaşım bölgeleri hareketlendirilebilmekte hem de model yüzeyleri üzerinde jet akış etkisi artırılarak model yüzeylerinin soğuması iyileştirilmektedir. Bu nedenle, 90° kanatçık açılı durumda; hem kanatçıksız hem de 45° açılı durumdakine göre modeller arasında ve model yüzeyleri etrafında akışkan sıcaklıklarının daha düşük değerlere ulaştığı görülebilmektedir. Ayrıca, özellikle yamuk model için modeller etrafındaki sıcak akışkan bölgelerinin daha az düzeyde oldukları sıcaklık konturu dağılımlarından söylenebilir.





Şekil 7. A-Dairesel oyuklu ve B-Yamuk model için birleşik jet akışlı kanallarda kanatçiksız, 45° ve 90° kanatçık açılı durumlarda CuO-Su nanoakışkanı ve $Re=13000$ için (a) hız ve (b) sıcaklık konturu dağılımları

VI. GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, dairesel oyuklu ve yamuk modellenmiş bakır plakalı yüzeylerden olan ısı transferi ve kanallardaki akış yapısı çapraz akış-çarpan jetten oluşan birleşik jet akışlı kanallarda kanatçiksız, 45° ve 90° açılı kanatçık eklenmesi durumları için Su, %2 hacimsel konsantrasyonlu CuO-Su (Bakır oksit-Su) ve Elmas-Su nanoakışkanları için sayısal olarak araştırılmıştır.

Bu çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda verildiği şekilde özetlenebilir:

- Kanal girişine göre birinci sıradaki Model 1 için $Re=9000$ değerinde 45° kanatçık açılı kanalda CuO-Su nanoakışkanı kullanılması durumunda, kanatçiksız ve su akışkanı olan birleşik jet akışlı kanala göre ortalama Nu sayısı artışları sırasıyla dairesel oyuklu ve yamuk modellenmiş yüzeyler için %9,75 ve %12,33 olmaktadır.
- Model 2 analiz edildiğinde; hem kanatçiksız hem de kanatçıklı kanallarda Model 1'e göre yüzeylerin sahip olduğu ortalama Nu sayısı değerlerinin arttığı görülmektedir.
- $Re=13000$ için 90° kanatçık açılı birleşik jet akışlı kanallarda 45° açılı olanlara göre sırasıyla Elmas-Su ve Bakır oksit-Su nanoakışkanları kullanılması durumları için Model 2' de Model 1'e göre yamuk model yüzeyi için Nu sayılarının %8,7 ve %8,63 daha fazla oldukları bulunmuştur.
- Model 3 için ise kanatçiksız birleşik jet akışlı kanallarda, her üç akışkan için de (Su, CuO-Su, Elmas-Su) Model 1 ve 2' ye göre Nu sayısı değerleri artarken; kanatçıklı kanallarda yüksek Re sayılarında Model 3' de Model 2' ye göre Nu sayılarında bir miktar azalma saptanmaktadır.
- $Re=15000$ ' de Model 3 için Model 2' ye göre 90° açılı kanatçıklı durumda sırasıyla dairesel oyuklu ve yamuk model yüzeylerinde Elmas-Su nanoakışkanı için %7,62 ve % 8,11' lik azalışlar görülmektedir.
- Kanallardaki her üç model yüzeyi birlikte incelendiğinde; her iki model yüzeyi ve her üç akışkan tipi için de kanatçiksız durumlarda Nu_m değerleri en düşük değerlerde iken; kanala kanatçık eklenmesiyle Nu_m değerleri artarken; T_m değerleri azalış göstermektedir.
- Özellikle nanoakışkanların (CuO-Su ve Elmas-Su) kullanılması durumlarında, yüzeylerin soğuma performansları iyileşmektedir. Bu nedenle, CuO-Su ve Elmas-Su nanoakışkanlarında Su akışkanına göre daha yüksek Nu_m ve daha düşük T_m değerleri elde edilmektedir.
- $Re=15000$ için 90° kanatçıklı kanalda yamuk modellenmiş yüzeyde sırasıyla Elmas-Su ve Bakır oksit-Su nanoakışkanları kullanılması durumları için kanatçiksız ve Su akışkanı kullanılan kanallara göre Nu_m sayısında %27,57 ve %26,11' lik artışlar olmaktadır. Aynı şartlarda, dairesel oyuklu model yüzeyinde Nu_m değerinin artış oranları Elmas-Su ve Bakır oksit-Su nanoakışkanları için %28,48 ve %27,2' dir.
- Bununla birlikte, birleşik jet akışın yüzeyler üzerindeki temasının ve etrafındaki akışkan hareketinin daha iyi olduğu yamuk model için Nu_m değerleri; dairesel oyuklu model yüzeyleri için daha fazladır ve buna bağlı olarak artan ısı transferi nedeniyle T_m değerleri dairesel oyuklu modelden daha düşüktür.
- $Re=15000$ değerinde 90° açılı kanatçıklı kanallarda su akışkanı için PEC sayısı değerlerinin sırasıyla dairesel oyuklu ve yamuk modellenmiş yüzeylerde Elmas-Su ve CuO-Su nanoakışkanlarına göre %1,1- %1,31 ve %0,82- %0,63 daha fazla oldukları tespit edilmiştir. Ayrıca, yamuk model için PEC sayısı değerleri; dairesel oyuklu modelden daha fazladır.

- Hız ve sıcaklık konturu dağılımlarına bakıldığında; kanatçık açısı 90° ye çıkarıldığında model yüzeylerinin soğuması iyileştirilmekte ve böylece 90° kanatçık açılı durumda; hem kanatçıksız hem de 45° açılı durumdakine göre modeller arasında ve model yüzeyleri etrafında akışkan sıcaklıklarının daha düşük değerlere ulaştığı görülebilmektedir.

TEŞEKKÜR: Bu çalışma Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi tarafından desteklenmiştir (Proje no: TEKNO-2021-031).

VII. KAYNAKLAR

- [1] K. Naga Ramesh, T. Karthikeya Sharma, G. Amba Prasad Rao, "Latest advancements in heat transfer enhancement in the micro-channel heat sinks: a review," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 28, pp. 3135-3165, 2021.
- [2] M. Kılıç, "Elektronik sistemlerin soğutulmasında nanoakışkanlar ve çarpan jetlerin müşterek etkisinin incelenmesi," *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 18, s. 33 (3), ss. 121-132, 2018.
- [3] M. A. Teamah, M. M. Dawood, A. Shehata, "Numerical and experimental investigation of flow structure and behavior of nanofluids flow impingement on horizontal flat plate," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 74, pp. 235-246, 2015.
- [4] M. Kılıç, A. Ullah, "Numerical investigation of effect of different parameter on heat transfer for a crossflow heat exchanger by using nanofluids," *Journal of Thermal Engineering*, vol. 7, no. 14, pp. 1980-1989, 2021.
- [5] M. Kilic, T. Calisir, S. Baskaya, "Experimental and numerical investigation of vortex promoter effects on heat transfer from heated electronic components in a rectangular channel with an impinging jet," *Heat Transfer Research*, vol. 48, no. 5, pp. 435-463, 2017.
- [6] M. Kılıç, A. Abdulvahitoglu, "Numerical investigation of heat transfer at a rectangular channel with combined effect of nanofluids and swirling jets in a vehicle radiator," *Thermal Science*, vol. 23, no. 6A, pp. 3627-3637, 2019.
- [7] A. Dal, M. Kılıç, A. Ö. Akyüz, A. D. Tuncer, A. Gungor, "Effects of lubricant fluid with nanoparticle additive on the load capacity of a hydrostatic journal bearing," *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, vol. 7, no. 2, pp. 753-762, 2020.
- [8] S. M. Öztürk, T. Demircan, "Numerical analysis of the effects of fin angle on flow and heat transfer characteristics for cooling an electronic component with impinging jet and cross-flow combination," *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 37, no. 1, pp. 57-74, 2022.
- [9] T. B. Chang, Y. K. Yang, "Heat transfer performance of jet impingement flow boiling using Al₂O₃-water nanofluid," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 28, no. 4, pp. 1559-1566, 2014.
- [10] A. Datta, A. Jaiswal, P. Halder, "Heat transfer analysis of slot jet impingement using nano fluid on convex surface," *IOP Conference Series-Materials Science and Engineering*, vol. 402, no. 012098, 2018.
- [11] D. Kumar, M. Zunaid, S. Gautam, "Heat sink analysis in jet impingement with air foil pillars and nanoparticles," *Materials Today: Proceedings*, vol. 46, no. 20, pp. 10752-10756, 2021.

- [12] E. Jalali, S. M. Sajadi, F. Ghaemi, D. Baleanu, "Numerical analysis of the effect of hot dent infusion jet on the fluid flow and heat transfer rate through the microchannel in the presence of external magnetic field," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 147, pp. 8397-8409, 2022.
- [13] F. Selimefendigil, A. J. Chamkha, "Cooling of an isothermal surface having a cavity component by using CuO-water nano-jet," *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, vol. 30, no. 4, pp. 2169-2191, 2020.
- [14] M. F. Abdullah, R. Zulkifli, Z. Harun, S. Abdullah, W. A. Wan Ghopa, A. S. Najm, N. H. Sulaiman, "Impact of the TiO₂ nanosolution concentration on heat transfer enhancement of the twin impingement jet of a heated aluminum plate," *Micromachines*, vol. 10, no. 176, 2019.
- [15] W. Shi, F. Li, Q. Lin, G. Fang, "Experimental study on instability of round nanofluid jets at low velocity," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 120, no. 110253, 2021.
- [16] F. Kılınç, E. Buyruk, K. Karabulut, "Experimental investigation of cooling performance with graphene based nano-fluids in a vehicle radiator", *Heat and Mass Transfer*, vol. 56, pp. 521-530, 2020.
- [17] K. Karabulut, E. Buyruk, F. Kılınç, "Experimental and numerical investigation of convection heat transfer in a circular copper tube using graphene oxide nanofluid", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 42, no. 230, 2020.
- [18] K. Karabulut, E. Buyruk, F. Kılınç, "Grafen oksit nanoparçacıkları içeren nanoakışkanın taşınım ısı transferi ve basınç düşüşü artışı üzerindeki etkisinin düz bir boruda deneysel olarak araştırılması", *Mühendis ve Makina*, vol. 59, no. 690, pp. 45-67, 2018.
- [19] F. Kılınç, E. Buyruk, K. Karabulut, "Grafen tabanlı nanoakışkanların araç radyatörü soğutma performansı üzerindeki etkisinin deneysel analizi", *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 9, no. 2, pp. 1046-1056, 2019.
- [20] M. Kilic, T. Calisir, S. Baskaya, "Experimental and numerical study of heat transfer from a heated fat plate in a rectangular channel with an impinging air jet," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 39, no. 1, pp. 329-344, 2016.
- [21] K. Karabulut, "Heat transfer improvement study of electronic component surfaces using air jet impingement," *Journal of Computational Electronics*, vol. 18, pp. 1259-1271, 2019.
- [22] D. E. Alnak, F. Koca, Y. A. Alnak, "Numerical investigation of heat transfer from heated surfaces of different shapes," *Journal of Engineering Thermophysics*, vol. 30, pp. 494-507, 2021.
- [23] K. Koca, M. S. Genç, E. Bayır, F. K. Soğuksu, "Experimental study of the wind turbine airfoil with the local flexibility at different locations for more energy output", *Energy*, vol. 239, no. Part A, pp. 121887, 2022.
- [24] K. Koca, M. S. Genç, R. Özkan, "Mapping of laminar separation bubble and bubble-induced vibrations over a turbine blade at low Reynolds numbers", *Ocean Engineering*, vol. 239, pp. 109867, 2021.
- [25] K. Koca, M. S. Genç, S. Ertürk, "Impact of local flexible membrane on power efficiency stability at wind turbine blade", *Renewable Energy*, vol. 197, pp. 1163-1173, 2022.
- [26] K. Koca, M. S. Genç, H. H. Açıkkel, M. Çağdaş, T. M. Bodur, "Identification of flow phenomena over NACA 4412 wind turbine airfoil at low Reynolds numbers and role of laminar separation bubble on flow evolution", *Energy*, vol. 144, pp. 750-764, 2018.

- [27] K. Koca, M. S. Genç, H. H. Açık, “Experimental investigation on effect of partial flexibility at low aspect ratio airfoil - Part II: Installation both on suction and pressure surface”, *EPJ Web of Conferences- Experimental Fluid Mechanics*, vol. 269, no. 01028, 2022.
- [28] K. Koca, M. S. Genç, D. Veerasamy, M. Özden, “Experimental flow control investigation over suction surface of turbine blade with local surface passive oscillation”, *Ocean Engineering*, vol. 266, no. Part 4-113024, 2022.
- [29] J. C. Maxwell, Preliminary on the Measurement of Quantities, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, England: Oxford University Press, 1873, pp. 6-10.
- [30] H. A. Mohammed, P. Gunnasegaran, N. H. Shuaib, “The impact of various nanofluid types on triangular microchannels heat sink cooling performance,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, no. 3, pp. 767-773, 2011.
- [31] S. J. Wang, A. S. Mujumdar, “A comparative study of five low Reynolds number k- ϵ models for impingement heat transfer”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 25, pp. 31-44, 2005.
- [32] K. Karabulut, D. E. Alnak, “Investigation of graphene oxide-distilled water nanofluids with consideration of heat transfer and flow structure for backward-facing step flow,” *Journal of Engineering Thermophysics*, vol. 30, no. 2, pp. 300-316, 2021.
- [33] M.S. Genc, U. Kaynak, G. D. Lock, “Flow over an aerofoil without and with a leading-edge slat at a transitional Reynolds number,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G: Journal of Aerospace Engineering*, vol. 223, pp. 217-231, 2009.
- [34] M. S. Genç, “Numerical simulation of flow over a thin aerofoil at a high Reynolds number using a transition model,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 24, pp. 2155-2164, 2010.
- [35] M. S. Genç, Ü. Kaynak, H. Yapıcı, “Performance of transition model for predicting low Re aerofoil flows without/with single and simultaneous blowing and suction,” *European Journal of Mechanics B/Fluids*, vol. 30, pp. 218-235, 2011.
- [36] M. S. Genc, Ü. Kaynak, “Control of laminar separation bubble over a NACA2415 aerofoil at low Re transitional flow using blowing/suction”, *International Conference on Aerospace Sciences and Aviation Technology, ASAT-13-AE-11, Cairo, Egypt, 2009.*
- [37] M. S. Genc, G. Lock, U. Kaynak, “An experimental and computational study of low Re number transitional flows over an aerofoil with leading edge slat”, *The 26th Congress of ICAS and 8th AIAA ATIO, AIAA-8877, Anchorage, Alaska, 2008.*
- [38] İ. Karasu, M. Özden, M. S. Genç, “Performance assessment of transition models for three-dimensional flow over NACA4412 wings at low Reynolds numbers”, *Journal of Fluids Engineering* vol. 140, no. 12, pp. 121102, 2018.
- [39] M. S. Genç, G. Ozisik, N. Kahraman, “Investigation of aerodynamics performance of NACA 00-12 aerofoil with plain”, *Journal of Thermal Science and Technology*, vol. 28, no. 1, pp. 1-8, 2008.
- [40] M. S. Genç, K. Koca, H. H. Açık, “Investigation of pre-stall flow control on wind turbine blade airfoil using roughness element”, *Energy*, vol. 176, pp. 320-334, 2019.
- [41] İ. Karasu, H. H. Açık, K. Koca, M. S. Genç, “Effects of thickness and camber ratio on flow characteristics over airfoils”, *Journal of Thermal Engineering*, vol. 6, no. 3, pp. 242-252, 2020.

- [42] D. E. Alnak, "Thermohydraulic performance study of different square baffle angles in cross-corrugated channel," *Journal of Energy Storage*, vol. 28, no. 101295, 2020.
- [43] C. F. Ma, A. E. Bergles, "Boiling jet impingement cooling of simulated microelectronic chips," *Heat Transfer in Electronic Equipment HTD*, vol. 28, pp. 5-12, 1983.
- [44] Y. Masip, A. Rivas, G. S. Larraona, R. Anton, J. C. Ramos, B. Moshfegh, "Experimental study of the turbulent flow around a single wall-mounted cube exposed to a cross-flow and an impinging jet," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 38, pp. 50-71, 2012.



Düzce University Journal of Science & Technology

Research Article

Deep Learning Based Traffic Sign Recognition Using YOLO Algorithm

 Gökalp ÇINARER^{a,*}

^a Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Bozok University, Yozgat, TÜRKİYE

*Corresponding author's e-mail address: gokalp.cinarer@bozok.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1214901

ABSTRACT

Traffic sign detection has attracted a lot of attention in recent years among object recognition applications. Accurate and fast detection of traffic signs will also eliminate an important technical problem in autonomous vehicles. With the developing artificial intelligency technology, deep learning applications can distinguish objects with high perception and accurate detection. New applications are being tested in this area for the detection of traffic signs using artificial intelligence technology. In this context, this article has an important place in correctly detecting traffic signs with deep learning algorithms. In this study, three model of (You Only Look Once) YOLOv5, an up-to-date algorithm for detecting traffic signs, were used. A system that uses deep learning models to detect traffic signs is proposed. In the proposed study, real-time plate detection was also performed. When the precision, recall and mAP50 values of the models were compared, the highest results were obtained as 99.3, 95% and 98.1%, respectively. Experimental results have supported that YOLOv5 architectures are an accurate method for object detection with both image and video. It has been seen that YOLOv5 algorithms are quite successful in detecting traffic signs and average precession.

Keywords: Deep learning, traffic sign recognition, Yolo, Artificial intelligence

Yolo Algoritması Kullanarak Derin Öğrenme Tabanlı Trafik İşareti Tanıma

ÖZ

Trafik işaretleri tespiti nesne tanıma uygulamaları arasında son yıllarda oldukça fazla ilgi görmektedir. Trafik işaretlerinin doğru ve hızlı şekilde algılanması otonom araçlarda önemli bir teknik sorunu da ortadan kaldıracaktır. Gelişen yapay zeka teknolojiyle beraber derin öğrenme uygulamaları yüksek algılama ve doğru tespitle objeleri ayırt edebilmektedir. Yapay zeka teknolojisi kullanarak trafik levhalarının tespiti için bu alanda yeni uygulamalar test edilmektedir. Bu kapsamda bu makale trafik işaretlerini derin öğrenme algoritmalarıyla doğru tespit etmek için önemli bir yere sahiptir. Bu çalışmada trafik işaretlerinin tespiti için güncel bir algoritma olan YOLOv5'in en yeni üç modeli kullanılmıştır. Derin öğrenme algoritmalarını temel alan bir trafik işaret algılama ve tanıma sistemi önerilmiştir. Önerilen çalışmada aynı zamanda gerçek zamanlı levha tespiti de gerçekleştirilmiştir. Modellerin precision, recall ve mAP50 değerleri karşılaştırıldığında en yüksek sonuçlar sırasıyla %99.3, %95 ve %98.1 olarak elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar YOLOv5 mimarilerinin hem görüntü hem de video ile nesne tespiti için doğru bir yöntem olduğunu desteklemektedir. YOLOv5 algoritmalarının trafik işaretlerini ve ortalama hassasiyeti (mAP) algılamada oldukça başarılı olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Derin öğrenme, Trafik işareti tanıma, Yolo, Yapay zeka

INTRODUCTION

Recently, the increasing use of artificial intelligence has included intelligent systems in many aspects of our lives. Service robots, smart homes and autonomous vehicles are autonomous systems that are increasing in number every day. The increase in the number of unmanned vehicles that recognize traffic signs and autonomous vehicles that follow lanes in recent years can be shown as the best example of this. In addition, the determination of traffic signs has an important place in the decision-making process of the vehicle[1]. For this reason, it is a very important problem for vehicles to detect traffic signs correctly and to enable vehicles to activate automatic software systems accordingly.

In the report given by the International Association for Safe Road Travel, while 1.1 million people lost their lives as a result of traffic accidents in 1990, this number increased to 1.4 million in 2013 [2]. For similar reasons, many large companies have increased their investments in autonomous vehicles and are working on the detection of objects in traffic. Although there is a standard size and shape of road signs in the world, many problems such as some environmental factors, inadequacy of lights and weather conditions sometimes force drivers to perceive the signs. In adverse conditions, traffic accidents can be prevented by making artificial intelligence-based traffic sign detection and ensuring that both drivers and autonomous vehicles carry out this process more healthily. Deep learning algorithms are used to solve the problem that arise to detection traffic signs. Researchers use object detection algorithms such as YOLO [3], SSD [4] and CNN [5] to detect traffic signs. There may be categories such as speed limit, turn prohibitions and warnings in the recognition of traffic signs [6]. Creating Artificial Intelligence models that consider all these categories will greatly ease the detection of signs and the implementation of the system.

In this study, three different YOLOv5 models will be used to detect traffic signs. With the comparisons between them, it will be possible to get the best result in YOLOv5.

The main contributions of the study are:

- Training the dataset with three different YOLOv5 models
- Analyzing the results obtained
- Determining at which values three different models are better
- Detection of real-time traffic signs with 3 different models

Each step of the study is designed as follows. Part 2 is divided into literature review, part 3 materials and methods, part 4 results, part 5 discussion and part 6 conclusion.

II. RELATED WORK

Sign detection in traffic is a new research topic that has been studied recently with the increase of autonomous vehicle number. In the literature, there are studies conducted in this field with different deep learning architectures and traditional methods. While in traditional methods, it is possible to classify with machine learning algorithms by obtaining the features of the image, classification studies obtained from instant data with deep learning are more limited. In addition, it is seen that traffic signs belonging to different countries are classified. Shao et al. [13] proposed the Faster R-CNN model for traffic sign detection. They increased the recognition speed of the network by using Gabor wavelets and reached an accuracy of 99.01% with their proposed method Zhanwen Liu et al. [14] created a training set by taking 9176 data from the Chinese traffic sign dataset TT100K. They divided the 221 different signals in the TT100K into 25 classes and found the accuracy rate as 89.7%. Lingcai Zeng et al. [15] have presented a model that proposes the addition of a contentious closure network (AON) to the CNN model in training and detection capacity of the traffic network. Zhang et al. [16] have changed the convolutional layers for YOLOV2 model and proposed an advanced single-stage traffic sign detector. They used the Chinese traffic sign dataset to make all these processes work better on Chinese roads. Belghaouti et al. studied a LeNet model for automatic traffic sign detection. In the study, they used the German traffic data set.





They obtained an accuracy of 99% with the method they proposed [17]. Tabernik et al. used a basic model and suggested some settings in the model for better traffic sign detection. This method reached 97.5% accuracy with Mask R-CNN [18].

III. MATERIAL AND METHOD

A. DATASET

A open source kaggle dataset consisting of 741 traffic signs was used for training the model [19]. Initial data is German Traffic Sign Detection Benchmark (GTDRB). These photos are categorized in 4 classes. These classes are set to prohibitory, danger, mandatory and other. The prohibition category consists of images that are prohibited from speeding, overtaking, traffic, and truck entry. Danger category includes priority at next intersection, left and right bend, bend, rough road, slippery road, road narrowing, construction, traffic signal, pedestrian crossing, school crossing, bicycle crossing, snow, animals traffic signs. In the mandatory category, there are images of right, left or straight going and different directions taken in the roundabout area. Finally, in the other category, the restriction ends, there are basic traffic signs such as priority pedestrian giving way, giving way, stopping and traffic-free area, no-traffic zone. 592 of 741 plates were set as trains and 149 as test. Some of the plates inside the classrooms are shown in Table 1.

Table 1. Dataset image categories

Id	Class Name	Image
0	prohibitory	
1	danger	
2	mandatory	
3	other	

B. DEEP LEARNING BASED MODEL

CNN, which is the most popular of deep learning applications, is the basic architecture used in different areas such as image processing, object detection, classification. This architecture also includes basic algorithms such as YOLO, one of the single-stage object detections in deep learning object detection. Its performance, especially in fast and single-stage detection, enables it to be used in traffic sign detection as well. You Only Look Once (YOLO) is an object recognition algorithms, has been widely used since its first day due to the simplicity of the network structure and high detection speed. The difference of YOLO from the detection algorithms developed in previous times is that it handles object detection as a single regression [20]. By optimizing YOLO, the loss function was reduced, as a result of which the detection speed of the object increased, but it started to give lower accuracy than other object recognition models [21].

The Yolo algorithm has developed continuously since its release and different versions have been published. In this context, the YOLOV5 model was introduced. The number of different studies with YOLOv5 is limited. With YOLO models, applications such as pedestrian detection [22], apple detection [23], license plate recognition [24], diseased tomato detection [25] and mask detection [26] have been made. In this study, the s, m and l models of YOLOv5 were compared.

In the basic structure, the backbone, neck and output are the parts that make up the YOLOv5 architecture [27]. The input images pass through the focus images in the backbone. Then, feature maps are created by extracting the features of the input images. YOLOv5 uses the CSPNet structure to extract features [28]. The advantage of the CSP structure is that iterative gradient information can be reduced in optimization. The backbone takes the base layer's replicated feature map and uses a dense block to pass it on to the next layer. The CBL structure in the backbone represents the combination of Conv2D, BatchNormal and LeakyRelu [29].

In the proposed model, the number of epochs of 200 is determined to show all the training data to the network. This value is limited to 200 in order to prevent excessive adaptation and memorization. The batch size value is set to 16. While the neural network was being weighted, the system learning step was started by using 16 images in each refresh. The learning rate was determined as 0.01.

All images are fixed at 608x608x3 size. The img values in which the training was carried out were also used in the test data. Hyperparameters were applied as standard for all models, thus making the comparative analysis more objective. In Table 2, parameter numbers for s, m and l models in YOLOV5 are given.

Table 2. Parameter numbers of models

Model Name	Parameter (million)
YOLOv5s	7.2
YOLOv5m	21.2
YOLOv5l	46.5

YOLOv5 uses (spatial pyramid pooling) SPP to provide better detection of objects with different scales, (Path aggregation network) PANET for feature aggregation, and neck section includes two network (Feature Pyramid Network) FPN and the other one is (Path Aggregation Network) PAN [30]. With this combination, the features in a small area are better extracted, increasing the detection sensitivity. Figure 1 shows the YOLOv5 architecture.

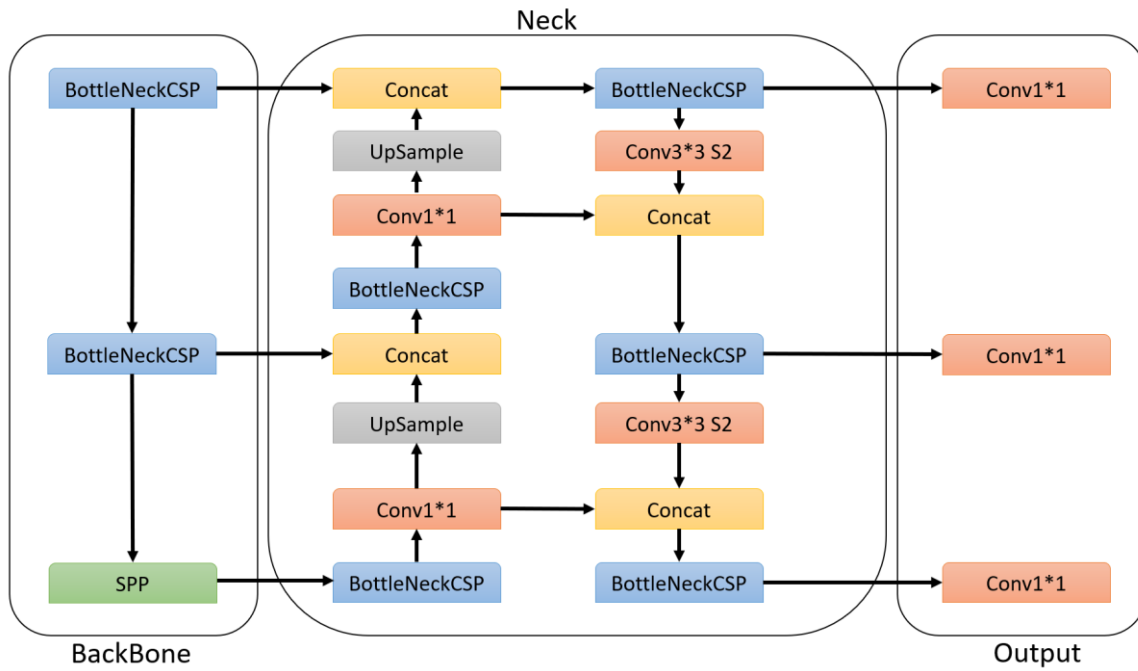


Figure 1. YOLOv5 architecture

C. PERFORMANCE METRICS

There are many criteria to analyse the correct performance of an (Artificial intelligence) AI architecture model. Examples of these criteria are precision, recall, (Intersection over Union) IoU. In the formulas, TP true positive, FP false positive, c define the number of categories in the system, n reference threshold number and k threshold value. The P(k) precision value is the R(k) recall value. Map value gives the average of multiple AP values. The map value takes a value in the range of 0-1, and the higher the value it takes, the better the result. Ground Truth is the actual location in the image where the object is tagged. The actual location is bounded by boxes. Intersection over Union (IoU) is one of the performance measure which finds the difference with ground truth of the object and bound box predicted by the model. In object detection algorithms, many bounding boxes are drawn for the object and each bounding box has a confidence value. Bounding boxes that do not exceed the threshold value are removed. When the IoU value exceeds the threshold value, it is detected as object [31].

Precision: It is the evaluation of how close or scattered the measurements are.

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (1)$$

Recall: Indicates the true positive rate. It is used for probability of correctly detecting objects.

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

mAP: Average of all AP scores

$$mAP = \frac{1}{c} \sum_{k=i}^N P(k) \triangleq R(k) \quad (3)$$

IV. RESULTS

The software tests of the system were created using the Python 3.7 programming language. Python libraries were used to evaluate and visualize the results obtained in the study. The performance of each model was run on google colab. Colab is a cloud-based, easy-to-use programming environment. All parameters are set the same in all models. For this reason, the models were compared under the same values.

The test phase of the study was also carried out with real-time mobile camera images of the traffic signs on the E-88 highway in the city center of Yozgat. Algorithm application results obtained from sample image sections of different signs on the route are shown in Figure 3.

In evaluating the performance of the network, studies were carried out by applying different parameter values. Each parameter value is fixed in all models for accurate determination of the performances of all models. Precision, recall and mAP (mean average precision) results for YOLOv5s, YOLOv5m and YOLOv5l models were compared. For the purpose of measuring the recognition quality of the models, the mAP metric, which references the 0 to 1 value range and determines the average precision of the results obtained in this range, was used. In training, precision, recall and map@0.5 values of each model were determined. The results of each model according to the classes are shown in detail in Tables 3, 4 and 5. When Table 3 is examined, it is seen that the Yolo V5s model reaches the highest map@0.5 value with 99.4% in speed limit images. When the precision and recall values were examined, the best results were obtained in the yield class with 100% precision and 97% recall values. When all three models are examined comparatively, it is seen that the "yield" class has the highest precision value. In addition, Map50 values in four classes in speed limit, yield, mandatory and other categories are over 92%, which is an indication of how excellent the performance of YOLO models is. In addition, the speed limit achieved a higher value than the others, with a recall value of 99.1%.

Table 3. Yolov5s performance results

Model	Class	Precision	Recall	mAP50
YOLOv5s	Prohibitory	0.969	0.984	0.994
	Danger	1	0.97	0.977
	Mandatory	0.975	0.881	0.938
	Other	0.977	0.885	0.974

Table 4. Yolov5m performance results

Model	Class	Precision	Recall	mAP50
YOLOv5m	Prohibitory	0.972	0.991	0.995
	Danger	0.995	0.964	0.985
	Mandatory	0.982	0.935	0.964
	Other	0.999	0.909	0.982

Table 5. Yolov5l performance results

Model	Class	Precision	Recall	mAP50
YOLOv5l	Prohibitory	0.986	0.991	0.995
	Danger	1	0.966	0.995
	Mandatory	0.986	0.833	0.924
	Other	1	0.954	0.96

Finally, the average results of the data set in all classes with the YOLOv5 models are given in Table 6.

Table 6. Average performance results

Model Adi	Precision	Recall	mAP50
YOLOv5s	0.98	0.93	0.971
YOLOv5m	0.987	0.95	0.981
YOLOv5l	0.993	0.936	0.968

The results show that the yolov5m model has the highest training quality, with the mAP metric of 98.1% at the end of 200 epochs, when all four different categories are considered. In addition, the YoloV5l model reached 99.3% precision in the average results. According to the Recall values, the YoloV5m model gave the highest result with 95%. Precision-sensitivity confidence curve plots of all models are shown in Figures 2, 3 and 4.

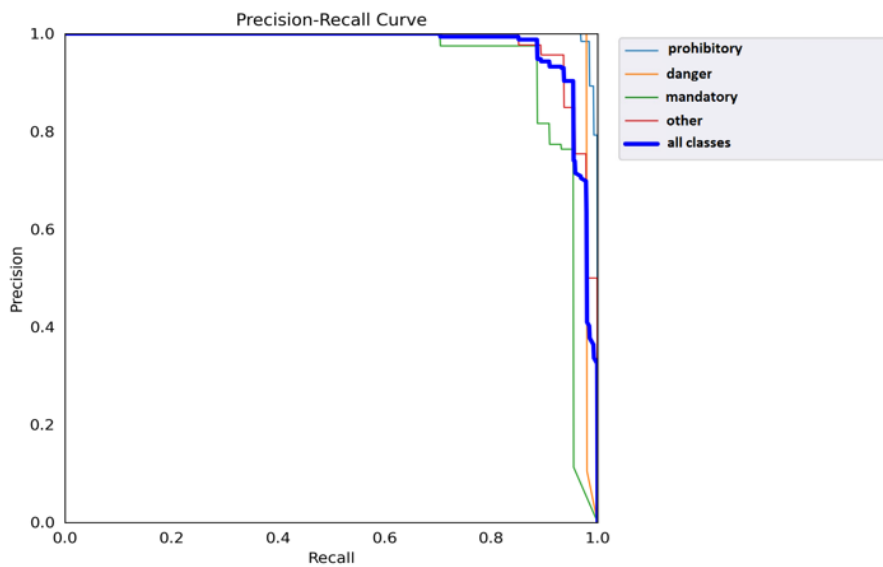


Figure 2. YOLOv5s Confidence Curve Plots

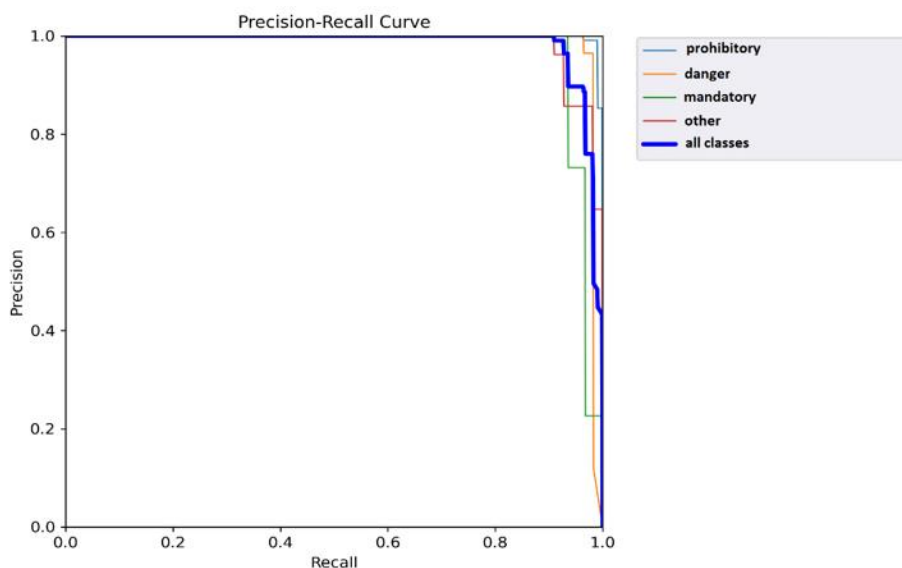


Figure 3. YOLOv5m Confidence Curve Plots

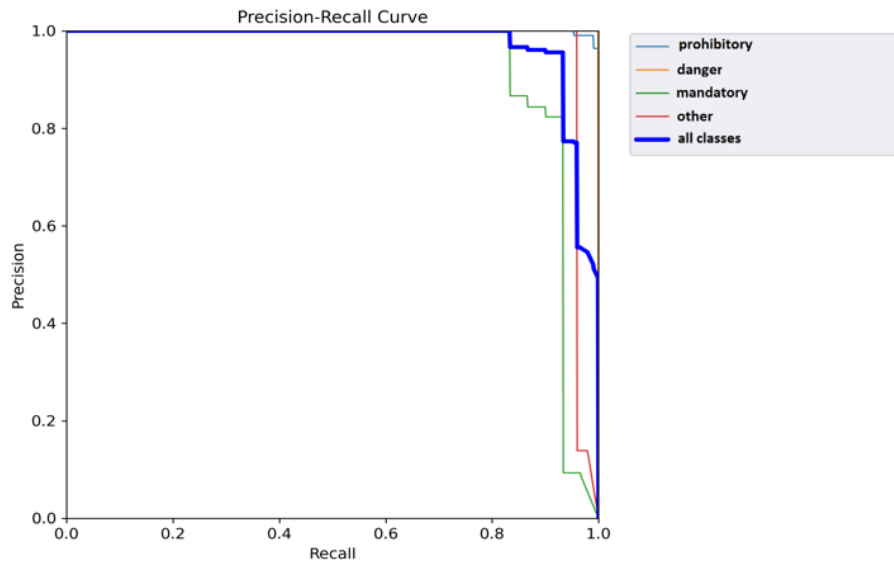


Figure 4. YOLOv5l Confidence Curve Plots

In Figure 5, the result sections of the traffic signs, which were determined from the real video image created for testing purposes, obtained in 3 models are given. The performances of the models on the real-time video created for traffic signs were examined comparatively. When Figure 5 is examined, the traffic sign in sample a was obtained by the yolov5 algorithm with the highest rate of 96%. When sample b was examined, it was seen that the yolov5m and yolov5l models reached 97% accuracy. Finally, in sample c, it was seen that the yolov5l model reached the highest accuracy with 97% in detecting the result of the traffic sign. Considering the average results for all three traffic signs, it was seen that the yolov5l model was the most successful algorithm with 96.3%. It has been observed that all three models, including different traffic sign images, detect them with very high success. Yolov5L model has achieved a very high accuracy in detecting these traffic signs.










Samples	Models		
	YOLOV5s	YOLOV5m	YOLOV5l
(a)			
(b)			
(c)			

Figure 5. Traffic Sign Recognition Results YOLOv5 Models

V. DISCUSSION

The comparison of the Yolo models applied in the study with the literature and model precision results is shown in Table 7. Although the data sets and the number of images used in the studies differ, the precision values obtained by the algorithms were compared with the Yolo models. Considering the number of original images used and the results obtained, it can be said that the study showed a remarkable success in detecting traffic signs with different YOLO models.

The reason for choosing the YOLOv5 algorithm in mark detection is that it can detect objects high accuracy and quick. In the other side YOLOv5 preferable for traffic sign detection from real-time videos. In this study, the s, m and l models of YOLOv5 were compared and the best model among them was determined. Studies in the literature are only for a certain model. Obtaining higher values than the results obtained in the literature also supports the success of the applied model.

As a result of the study, YOLOv5s reached 0.98 precision, YOLOv5m 98.7 and YOLOv5l 99.3 precision. When the results obtained are compared with the literature, it is seen that the study provides high success.

Table 7. Literature review

#	Ref.	Author(s)	Dataset	Model	Results
1	[7]	Yanzhao Zhu, Wei Qi Yan	Custom Dataset	YOLOV5	0.97
2	[8]	Haifeng Wan et al.	GTSDB	TSYOLO	0.83
3	[9]	Eric Hsueh-Chan Lu et al.	Custom Dataset	YOLOV5	0.88
4	[10]	Li Yi et al.	TT100K	YOLOV4	0.92
5	[11]	Linfeng Jiang et al.	TT100K	YOLOV5	0.87
6	[12]	Ammar Aggar et al.	IQTSDb	YOLOV5	0.90
7		Our model	Traffic Signs	YOLOV5S	0.98
8		Our model	Traffic Signs	YOLOV5M	0.98
9		Our model	Traffic Signs	YOLOV5L	0.99

VI. CONCLUSION

Automatic detection of traffic signs has become very important in the world. In this study, traffic sign detection application was carried out with YOLO object detection models. Labeled traffic signs in the dataset were tested using Turkish traffic signs with three different YOLO models. In the study, the highest mAP50 value with 98.1% was reached with the YOLOv5m model. The mAP50 values of all models used in the study are over 96%, which is very promising in automatic detection of traffic signs.

It is seen that the models in the study can help experts in the use of unmanned vehicles. It is considered that the high accuracy obtained in real-time image detection will be applied at longer distances and different traffic signs in future studies.

In line with the successful results obtained in the study, it has been seen that the use of Artificial Intelligence technology and deep learning algorithms in traffic sign classification will become widespread in the coming years with the developing technology.

VI. REFERENCES

- [1] R. Timofte, K. Zimmermann, and L. Van Gool, "Multi-view traffic sign detection, recognition, and 3D localisation," *Machine vision and applications*, vol. 25 no. 3, pp. 633-647, 2014.

- [2] P. S. Zaki, M. M. William, B. K. Soliman, K. G. Alexsan, K. Khalil, and M. El-Moursy, "Traffic signs detection and recognition system using deep learning," arXiv Prepr. arXiv2003.03256, 2020.
- [3] C. Dewi, R.C. Chen, Y.T. Liu, X. Jiang, and K. D. Hartomo, "Yolov4 for advanced traffic sign recognition with synthetic training data generated by various GAN," IEEE Access, vol. 9, pp. 97228-97242, 2021.
- [4] S. You, Q. Bi, Y. Ji, S. Liu, Y. Feng, and F. Wu, "Traffic sign detection method based on improved SSD," *Information*, vol. 11, no. 10, pp. 475, 2020.
- [5] A. Shustanov, and P. Yakimov, "CNN design for real-time traffic sign recognition," *Procedia Engineering*, vol. 201, pp. 718-725, 2017.
- [6] Z. Liu, Y. Musha, and H. Wu, "Detection of traffic sign based on improved Yolov4," In 2022 7th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing (ICSP), 2022, IEEE, pp. 444-448.
- [7] Y. Zhu, and . Q. W. Yan, "Traffic sign recognition based on deep learning," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 81, no. 13, pp. 17779-17791, 2022.
- [8] H. Wan, L. Gao, M. Su, Q. You, H. Qu, and Q. Sun, "A novel neural network model for traffic sign detection and recognition under extreme conditions," *Journal of Sensors*, 2021.
- [9] E. H. C. Lu, M. Gozdzikiewicz, K. H. Chang, and J. M. Ciou, "A hierarchical approach for traffic sign recognition based on shape detection and image classification," *Sensors*, vol. 22, no 13, pp. 4768, 2022.
- [10] L. Yi, L. Jinguo, Z. Yongjie, and M. Ping, "Detection of self-explosive insulators in aerial images based on improved Yolov4," In *Journal of Physics: Conference Series* vol. 2320, no. 1, pp. 012025, IOP Publishing, 2022.
- [11] L. Jiang, H. Liu, H. Zhu, and G. Zhang, "Improved Yolov5 with balanced feature pyramid and attention module for traffic sign detection," In *MATEC Web of Conferences* vol. 355, EDP Sciences, 2022.
- [12] A. Aggar, and M. Zaiter, "Iraqi traffic signs detection based on Yolov5," In 2021 International Conference on Advanced Computer Applications, 2021, IEEE, pp. 5-9.
- [13] F. Shao, X. Wang, F. Meng, J. Zhu, D. Wang, and J. Dai, "Improved faster R-CNN traffic sign detection based on a second region of interest and highly possible regions proposal network," *Sensors*, vol. 19, no. 10, pp. 2288, 2019.
- [14] Z. Liu, M. Qi, C. Shen, Y. Fang, X. Zhao, "Cascade saccade machine learning network with hierarchical classes for traffic sign detection," *Sustainable Cities and Society*, 67, 102700, 2021.
- [15] L. Zeng, B. Sun, D. Zhu, "Underwater target detection based on Faster R-CNN and adversarial occlusion network," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 100, 104190, 2021.
- [16] J. Zhang, M. Huang, X. Jin , and X. Li , "A real-time Chinese traffic sign detection algorithm based on modified Yolov2," *Algorithms*, vol. 10, no. 4, pp. 127, 2017.
- [17] O. Belghaouti, W. Handouzi, and M. Tabaa, "Improved traffic sign recognition using deep ConvNet architecture," *Procedia Computer Science*, vol. 177, pp. 468-473, 2020.



- [18] D. Tabernik, and D. Skočaj, "Deep learning for large-scale traffic-sign detection and recognition," *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, vol. 21, no. 4, pp. 1427-1440, 2019.
- [19] V. Sichkar. (2020). *Traffic Signs Dataset in Yolo Format* [Online]. Available: <https://www.kaggle.com/datasets/valentynsichkar/traffic-signs-dataset-in-yolo-format>
- [20] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi, "You only look once: unified, real-time object detection," In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2016, pp. 779-788.
- [21] M. Sozzi, A. Kayad, D. Tomasi, L. Lovat, F. Marinello, and L. Sartori, "Assessment of grapevine yield and quality using a canopy spectral index in white grape variety," In *Precision agriculture 19*, pp. 111-129, Wageningen Academic Publishers, 2019.
- [22] W. Lan, J. Dang, Y. Wang, and S. Wang, "Pedestrian detection based on Yolo network model," In *2018 IEEE international conference on mechatronics and automation (ICMA)*, 2018, IEEE, pp. 1547-1551.
- [23] Y. Tian, G. Yang, Z. Wang, H. Wang, E. Li, and Z. Liang, "Apple detection during different growth stages in orchards using the improved Yolo-v3 model," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 157, pp. 417-426, 2019.
- [24] R. N. Babu, V. Sowmya, and K. P. Soman, "Indian car number plate recognition using deep learning," *2nd international conference on intelligent computing, instrumentation and control technologies*, 2019, IEEE, pp. 1269-1272.
- [25] J. Liu, and X. Wang, "Tomato diseases and pests detection based on improved Yolov3 convolutional neural network," *Frontiers in Plant Science*, vol. 11, pp. 898, 2020.
- [26] J. Yu, and W. Zhang, "Face mask wearing detection algorithm based on improved Yolo-v4," *Sensors*, vol. 21, no. 9, pp. 3263, 2021.
- [27] S. Tan, G. Lu, Z. Jiang, and L. Huang, "Improved Yolov5 network model and application in safety helmet detection," *2021 IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics*, 2021, IEEE, pp. 330-333.
- [28] J. Wan, B. Chen, and Y. Yu, "Polyp detection from colorectum images by using attentive Yolov5," *Diagnostics*, vol. 11, no. 12, pp. 2264, 2021.
- [29] F. Zhou, H. Zhao, and Z. Nie, "Safety helmet detection based on Yolov5," In *2021 IEEE International Conference on Power Electronics, Computer Applications*, 2021, IEEE, pp. 6-11.
- [30] S. Liu, L. Qi, H. Qin, J. Shi, and J. Jia, "Path aggregation network for instance segmentation," *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2018, pp. 8759-8768.
- [31] H. Rezatofighi, N. Tsoi, J. Gwak, A. Sadeghian, I. Reid, S. Savarese, "Generalized intersection over union: a metric and a loss for bounding box regression," *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2019, pp. 658-666.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Derleme Makalesi

Lityum Hava Pillerinde Kullanılan Grafen Elektrotlar

 Özge KILINÇ^{a,*},  Nil TOPLAN^a

^a *Metaller ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, TÜRKİYE*
* Sorumlu yazarın e-posta adresi: ozgekilinc1998@gmail.com
DOI: 10.29130/dubited.1142965

Öz

Grafen; karbon atomunun altıgen şeklinde bulunduğu, dünyadaki tek iki boyutlu malzemedir. Sahip olduğu üstün özellikleri sebebiyle farklı alanlarda kullanılabildiği için birçok çalışmaya konu olmuştur. Günümüzde teknolojik öneme sahip araştırma konularından biri de enerji üretimi ve enerjinin depolanmasıdır. Bu çalışmalarda ana hedef; verimli, ucuz enerji üretimini ve enerjinin depolanmasını sağlamaktır. Teknolojinin hızlı ilerlemesiyle, uzun ömürlü, yüksek güç yoğunluğuna ve küçük boyuta sahip pil geliştirme çalışmaları önemli bir konu olmuştur. Lityum hava pili, diğer pillere kıyasla daha fazla enerji depolayabilen sistemlerdir. Bu pillerde daha fazla enerji depolanabilmesinin nedeni, diğer pil sistemlerine göre daha hafif katot malzemesi kullanılmasıdır. Lityum hava pilinde oksijen geçişini sağlamak için katot olarak gözenekli karbon kullanılmaktadır. Karbon esaslı malzemelerden olan grafen, üstün özellikleri sayesinde lityum-hava pillerinde elektrot olarak tercih edilmektedir. Bu makale grafen yapısının özellikleri, grafenin üretim yöntemleri, bu yöntemlerin kıyaslaması ve potansiyel uygulama alanları konusundaki araştırmaları kapsamaktadır. Ayrıca pillerin tarihsel gelişimi, mevcut lityum-hava pil teknolojileri ve Li-hava pillerinde yeni nesil grafen esaslı elektrotların kullanımı konuları incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Lityum Hava Pilleri, Grafen Elektrotlar, Grafen Oksit

Graphen Electrodes Used in Lithium Air Batteries

ABSTRACT

Graphene; it is the only two-dimensional material in the world in which the carbon atom is located in a hexagonal shape. It has been the subject of many studies because it can be used in different areas due to its superior properties. Today, one of the research topics with technological importance is energy production and energy storage. The main target in these studies; to provide efficient, cheap energy production and energy storage. With the rapid progress of technology, battery development studies with long life, high power density and small size have become an important issue. Lithium air batteries are systems that can store more energy than other batteries. The reason why more energy can be stored in these batteries is the use of lighter cathode material compared to other battery systems. Porous carbon is used as the cathode to provide oxygen passage in the lithium-air battery. Graphene, which is one of the carbon-based materials, is preferred as an electrode in lithium-air batteries due to its superior properties. This article covers research on the properties of graphene structure, production methods of graphene, comparison of these methods and potential applications. In addition, the historical development of batteries, current lithium-air battery technologies and the use of New Generation Graphene-based electrodes in Li-air batteries are examined.

Keywords: Lithium Air batteries, Graphene Electrodes, Graphene Oxide

I. GİRİŞ

Son yıllarda küresel ısınma, dünyada nüfusun hızlı artışı ve teknolojinin gelişmesi nedeniyle, iklim değişikliği ile ilgili endişeler artmaktadır. Fosil yakıtlardan enerji karşılanması ve bu rezervlerin sınırlı olması sürdürülebilir ve yenilenebilir alternatif enerji kaynakları arayışı söz konusudur. Bu arayış; çevreye zararsız, petrole olan bağımlılığı kaldıracak ve yüksek enerji verimliliği olan yakıt pillerinin keşfine yol açmıştır [1].

Piller için kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine çeviren elektrokimyasal sistemler denilmektedir. Pil hücreleri; anot, katot, separatör ve iyon geçişini sağlayan elektrolitten oluşan galvanik hücrelerdir. Piller; cep telefonlarında, işitme cihazlarında, bilgisayarlarda, hesap makinelerinde, saatlerde, radyolarda, oyuncaklarda, ev aletlerinde ve çeşitli alanlarda kullanılmaktadır [1,2].

Lityum piller, birim kütle başına enerji kapasitesinin yüksek olmasıyla araştırmaların konusu olmuştur. Bu piller arasında lityum iyon piller, lityum polimer piller lityum hava pilleri ve lityum sülfür piller en yaygın olarak kullanılmaktadır [2].

Lityum hava pilleri, anotta depolanmış olduğu enerjiyi kullanması ve katotta dışarıdan hava gönderilerek enerji üretebilmesi açısından ilgi görmektedir. Lityum hava pillerinin yaygın olarak kullanımı, lityum iyon pillerinin yerine geçebilmesi için gözenekli karbon katot elektrotu geliştirilmelidir [2].

Son yıllarda karbon esaslı malzemeler arasında önemli hale gelen grafenin, üstün özellikleri sayesinde, enerjinin depolanması konusunda oldukça gelecek vaat eden lityum-hava pillerinde elektrot olarak kullanımı ve üretimi alanında da önemli çalışmalar devam etmektedir

II. GRAFEN VE YAPISI

Karbon, sıfır boyuttan üç boyuta kadar izomerlere sahip olan tek elementtir [3].

- Grafit, grafen tabakalarının üst üste istiflenmesi ile oluşmaktadır.
- Grafen, karbon atomlarının bal peteği örgüsünden oluşmuştur.
- Karbon nanotüpler, grafenin nanometrik çapa ve mikrometrik uzunluğa sahip içi boş silindirik şekilde rulolanmış halidir [4].
- Fullerenler ise karbon atomlarından oluşan içi boş küre, elipsoid veya tüp şeklindeki yapılardır [5].

Grafen; kovalent bağ ile bağlı olan karbon atomlarının düzgün ve tek tabakalı sp² hibritli olarak bir araya gelmesinden oluşan bal peteği görünümünde bir yapıya sahiptir ve iki boyutlu petek kafes içine paketlenmiştir. Ayrıca farklı boyutlardaki diğer grafitik malzemelerin temel yapı taşıdır [6]. Grafen Bravais örgü kristal kafes yapısında değildir [7]. İdeal grafen, yapısındaki karbon-karbon arası bağ uzunluğu 0,142 nm olan tabakalı, ortohegzagonal kafes yapısına sahip, iki boyutlu atomik kristallerden oluşmaktadır [8]. Grafen sahip olduğu özellikleriyle son yıllarda birçok çalışmaya konu olmuştur. Elektronik, uçak sanayisi, robot yapımı, biyokimya, tıp, bataryalar, savunma sanayisi, bilişim teknolojileri gibi farklı alan ve sektörlerde kullanımı mevcuttur.

Grafenin en önemli özelliklerinden biri içindeki elektronların, 800 km/s gibi bir hızda hareket edebiliyor olmasıdır [3]. Bunun yanında geniş yüzey alanı (2630 m²/g), yüksek elektron mobilitesi (200.000 cm²/Vs), yüksek ısıl iletkenliği (5000 W/mK), elektrik iletkenliği ve yüksek elastik modülü (~1100 GPa) grafenin üstün özelliklerindedir [9]. Grafen bilinen en ince malzeme olmasına karşın güçlü karbon bağları ona en sağlam malzeme olma özelliği kazandırmaktadır [3]. Grafenin sağlam yapıda olmasının sebebi s, p_x, p_y orbitallerinden oluşan 120° açılı sp² hibritleşmesi ve sıkı paketlenmiş olan karbon atomlarıdır [7]. Grafenin yapısındaki boşta kalan p_z orbitalleri, elektronik özelliklerinin

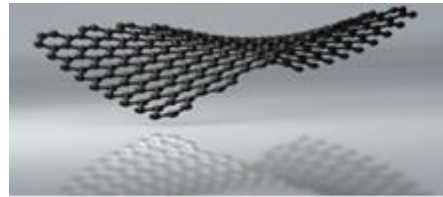
belirlenmesinin yanı sıra yüksek yüzey alanı ve optik transparanlık ($\sim 97.7\%$) gibi özellikler de kazandırır [10]. Karbon atomlarının bağ yapması için dört elektronu mevcuttur. İki boyutlu grafen üç bağ yaptığından, dördüncü elektron kristalde serbestçe dolaşarak grafene yüksek iletkenlik kazandırmaktadır [11]. Tablo 1’de grafenin özellikleri yer almaktadır.

Tablo 1. Grafenin özellikleri [9,10,12,13]

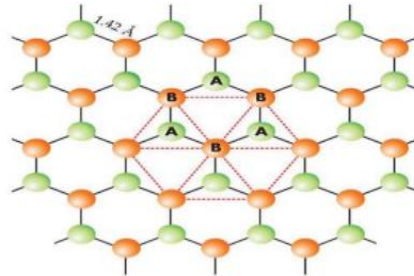
Parametre	Değer
Oda sıcaklığındaki hareketlilik (mobilité)	200.000 ($cm^2V^{-1}s^{-1}$)
Çekme mukavemeti Kırılma mukavemeti	1100 130 (GPa)
Spesifik Yoğunluk	2.26 (g/cm^3)
Spesifik yüzey alanı	2360 (m^2g^{-1})
Işık geçirgenliği	$\sim 97.7\%$
Elastik limit	$\sim 20\%$
Termal iletkenlik	5000 (W/mK)

Grafen ayrıca yasak enerji aralığı olmayan bir yarıiletkendir çünkü grafenin iletim ve valans bantları Dirac noktasında buluşmaktadır [7]. Dirac noktaları, değerlik bandı ile iletim bandı arasındaki geçiştir.

Grafen çelikten yaklaşık 100 kat daha mukavemetli, kolayca esneyebilen ve farklı formlarda olan malzemelerin yüzeylerine kolayca kaplanabilen ayrıca eğilip bükülmeden kendi ağırlığının 40 bin katını taşıyabilen önemli bir malzemedir. Yapılan araştırmalarla elmas keskinliğine bile dayanıklı olduğu ispatlanmıştır [3]. Şekil 1’de grafen tabakası ve örgü yapısı verilmiştir.



(a)

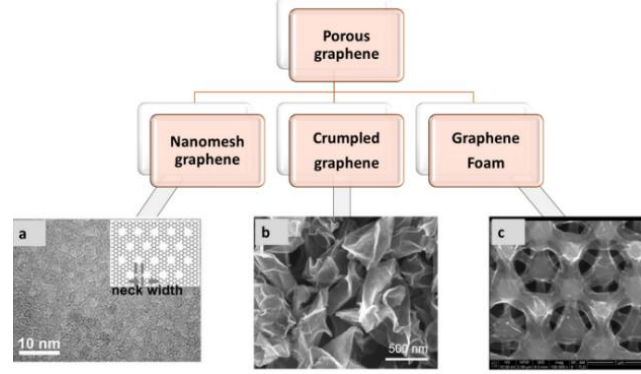


(b)

Şekil 1. (a) Grafen Tabakası ve (b) Örgü Yapısı [14,15]

A. GÖZENEKLİ GRAFEN

Güçlü π - π yığılması ve zayıf van der Waals bağları, etkili yüzey alanını sınırlayan grafen levhaların geri dönüşsüz olarak yığılmasına neden olmaktadır. Ayrıca, aglomerasyon nedeniyle grafen levhaların kullanımı sınırlanmaktadır. Gözenekli grafen; yüksek gözenekliliğe ve düşük yoğunluğa sahiptir ve gözenekli grafen ağı, yüzey alanlarını ve optoelektrik özellikleri daha da geliştirmektedir. Gözenekli grafen, şekil 2'deki gibi grafen nanomesh, buruşuk grafen ve grafen köpük formunda olabilir [16].



Şekil 2. Gözenekli Grafenin Türleri [14]

2 boyutlu grafenin kağıt top benzeri yapıya dönüştürülmesine buruşuk grafen topları denir. Buruşuk grafen topları, grafen tabakalarının istenmeyen şekilde yeniden istiflenmesini önlemenin yollarından birisidir [16].

Yüksek basınçla şekillendirildiğinde, buruşuk grafenin iyi yüzey alanını koruyabildiği, spesifik yüzey alanının (BET) ise 567'den 255 m²/g'a düştüğü bulunmuştur [16]. Buruşuk grafen genel olarak daha iyi ve kararlı bir yüzey alanı sağlamakla birlikte, grafen aglomere olursa, spesifik yüzey alanı, 407'den 66 m²/g'a düşmektedir [17].

Gözenekli grafen yapısını geliştirmek grafenin aglomerasyonunu azaltmanın yollarından biridir ve aglomerasyonun başlamasından sorumlu grafen tabakaları arasındaki π etkileşimlerini azaltır [16]. Gözenekli grafenin yoğun grafen elektrotlarından daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Elektrot yüzeyindeki kompakt grafen tabakası, hızlı elektrolit difüzyonunu etkiler, bu da grafen ile modifiye edilmiş elektrotun düşük performansına neden olmaktadır. Ancak grafen gözenekli yapısı, elektrolitin grafen tabakalarından daha verimli bir şekilde aşmasını (difüzyonunu) kolaylaştırır ve sürekli iyon taşınmasına izin verir [18].

III. GRAFENİN ÜRETİMİ

Karbon ürünü olan grafenin sentezlenmesinde; kömür, kalem ucu gibi grafit kaynakları, ileri teknoloji ürünlerinde ise; asetilen, metan gibi karbon kaynakları kullanılmaktadır [3].

1970'lerin sonlarında geçiş metali yüzeylerinde ince grafit tabakalar şeklinde karbonun çökeltilmesi ile başlayan çalışmalar; Geim ve arkadaşlarının, grafeni SiO₂ altlık üzerinde izole etme ve elektriksel özelliklerini ölçmelerinden sonra hızlanmıştır. 2004 yılında grafenin keşfinden sonra, ince grafit filmler ve birkaç katmanlı grafen üretmek için çeşitli teknikler geliştirilmiştir [19].

Günümüzde grafenin elde edilmesinde dört farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunlar katman ayırma yöntemi, epitaksiyel büyütme, kimyasal buhar biriktirme yöntemi ve kimyasal ayrıştırma yöntemleridir [3].

A. KATMAN AYIRMA YÖNTEMİ (KAYDIRMA YÖNTEMİ, EKSFOLİYASYON)

Bu yöntem ilk kez Geim ve arkadaşları tarafından sentezlenen tekniğin diğer bir adı da Selo bant yöntemidir [20]. Grafit tabakası bir zeminin üzerine kaydırılmasıyla grafen tabakalarının ayrılması sağlanır (Şekil 3.a). 100 mikrometre büyüklükteki grafen parçacıkları bu metot ile sentezlenebilmektedir. Mikromekanik ayırıştırma, başlangıç olarak yüksek kaliteli tek kristal grafit kaynağı kullanıldığında elde edilen grafenin elektriksel ve yapısal kalitesi çok yüksek olmaktadır [21]. Bu yöntemde grafen yapısının yapıştırıcı içeriğinin kirlenmesi ve sadece düşük verimler için uygun olması dezavantajlarındandır [20].

Ayrıca, üretilen malzemenin saflığı genellikle peeling ajanı kalıntıları içerir ve bir substrat üzerinde biriktirme sırasında grafen tabakası üzerinde gerilmeye neden olabilir böylece atomik kusurlar, kırışıklıklar veya dalgalanmalar gibi çeşitli kusurlar ortaya çıkarabilir [19]. Bu kusurlar da öteleme veya dönme simetrisini bozdukları için grafen cihazlarının elektrik performansını düşürebilir.

B. EPİTAKSİYEL BÜYÜTME YÖNTEMİ

Bir diğer yöntem ise tek kristal SiC'ün grafitlenerek metal altlıklar üzerinde büyütülmesidir [3]. Bu yöntemde SiC tabakası 1150°C-2000°C arası bir sıcaklığa ısıtılır. Isıtma sonucunda silisyum desorpsiyonu meydana gelmektedir ve kalan karbonlar epitaksiyel olarak bir araya geldiklerinde grafeni oluştururlar. Karbon kaynağı, SiC tabakası olması sebebiyle yeni katmanlar, ilk oluşan katmanın altında oluşur ve bu sayede çok katmanlı grafenler elde edilir. Şekil 3.b'de görülen Epitaksiyel Büyütme ile Grafen Üretiminde grafenin katman sayısı SiC tabakasının kalınlığı ile ilişkilidir [22].

Grafenin SiC üzerindeki epitaksiyel büyümesiyle doğrudan elektronik cihazlara modellenebilir olması grafen filmlerin, elektronik uygulamalar için çok umut verici bir aday olarak kabul edilmiştir [23].

C. KİMYASAL BUHAR BİRİKTİRME YÖNTEMİ (CVD)

Bu yöntem verimli, ucuz, kaliteli ve tekrarlanabilir bir üretim metodu olup [22];. büyük boyutlarda grafen üretimi için sıklıkla kullanılır. Grafen, Cu, Ru, Ir ve Ni gibi birçok metal yüzeyi üzerinde CVD tekniği ile büyütülebilir ve bu yöntemde Cu en çok tercih edilen metal altlıktır [21]. Cu metalinin altlık olarak tercih edilmesinin sebebi; ucuz, aşındırılması kolay ve grafen ile etkileşiminin fiziksel düzeyde olmasıdır [3]. Şekil 3.c'de gösterilen CVD yöntemi, geçiş metalleri üzerine buhar fazındaki düşük molekül ağırlığa sahip hidrokarbonların karbon kaynağı olarak biriktirilmesi ve ayırıcı ajan ile yüzeyden alınması prensibine dayanmaktadır. Kullanılacak biriktirme yüzeyi epitaksiyel olarak grafenle uyumlu olmalıdır [22].

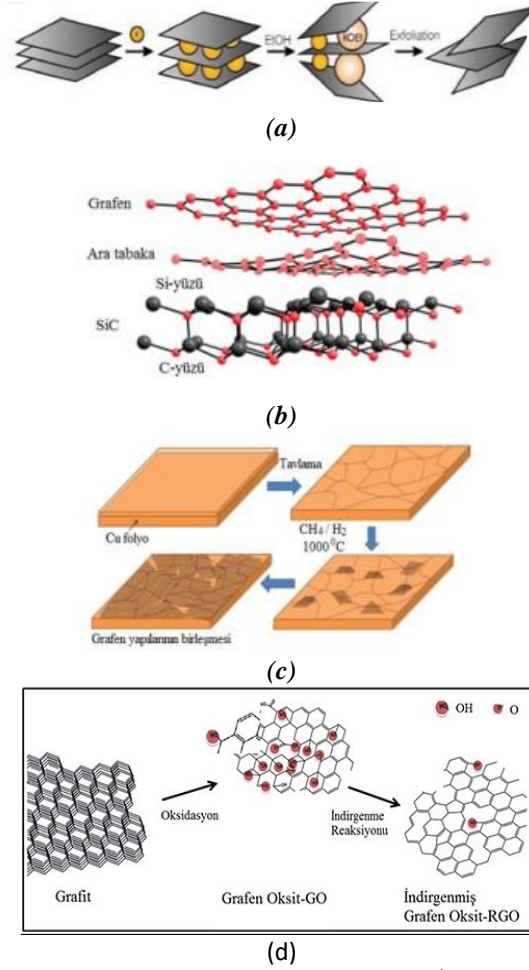
CVD yöntemi laboratuvarlardaki kurulum kolaylığı, endüstriyel ortamlarda başarılı uzun vadeli kullanımı, hem ekolojik hem de maliyet faktörleri göz önüne alındığında grafen bazlı malzemelerin sentezi için mevcut en iyi yöntemler arasındadır [24].

D. KİMYASAL AYRIŞTIRMA YÖNTEMİ (HUMMERS METODU)

Bu metotta grafit, katalizör görevi gören potasyum permanganat, sodyum nitrat gibi kuvvetli oksidasyon ajanları ve yüksek konsantrasyonlu olan sülfürik asit ile reaksiyona sokulmaktadır [25,26]. Oksidasyon sonrası epoksi ve hidroksil fonksiyonel gruplar grafit yapısı içine yerleşmektedir. Su ve oksijen içeren fonksiyonel grupların, karıştırma işlemi ile tabakalar arasına yerleştirilerek kuvvetli etkileşime girmesi ve tabakaların birbirinden uzaklaştırılması sağlanır. Bu sayede grafit hidrofobik formdan, hidrofilik ve dağılma gösteren grafen oksite dönüşmüş olur [25,26].

Şekil 3.d.'de gösterilen üretim yöntemi, büyük miktarlarda grafen üretilmesi için tercih edilecek en uygun tekniktir. Üretilen malzeme grafen oksittir ve yapısındaki oksitler sebebiyle yalıtkan özellik

göstermektedir. Oksitlerin yapıdan uzaklaştırılarak tekrar iletkenlik kazanması için kimyasal veya termal yöntemler kullanılarak indirgeme işlemine tabi tutulur [3].



Şekil 3. (a) Katman Ayırma Yöntemiyle [21], (b) Epitaksiyel Büyütme İle [21], (c) CVD Yöntemi ile Grafen [21] ve (d) Grafitten Grafen Oksit Eldesi [9]

IV. LİTYUM-HAVA PİLLERİ

A. PİLLERİN TARİHSEL GELİŞİMİ

Piller, kimyasal enerjiyi elektriksel enerjiye çeviren elektrokimyasal hücrelerdir. Kimyasal reaksiyonlar sonucunda elektrik enerjisini depolayabilen, elektrik akımını (+) ve (-) uçları cihaza bağlandığında ileten farklı tip ve boyutlardaki araçlardır [27].

Volta pili ticari olarak kullanılan ilk pildir. 1800'lü yıllarda Alessandro Volta tarafından keşfedilmiştir ve asidik, iletken bir ortamla ayrılmış farklı metaller arasında oluşan kimyasal reaksiyonlar sonucunda elektrik akımı iletebileceği ispatlanmıştır. Bir metalde oksidasyon, diğer metalde hidrojen iyonları indirgenmektedir.

Daniell pili olarak da anılan John Frederic Daniell tarafından 1836 yılında geliştirilen volta pili, sülfürik asit ile suyun karıştırılmasıyla elde edilen elektrolit sayesinde daha verimli bir halde gelmiştir. Daniell pili, elektrokimyasal devrelerde hidrojen ve bakırdan yüksek potansiyele sahip çinkonun, negatif yüklenmiş sülfat (SO_4^{2-}) ile tepkimeye girmesiyle çalışmaktadır [28]. Daniell pili, katot aktif materyalinden kaynaklı kendiliğinden deşarj olma sorunu nedeniyle ticarileşememiş, bu nedenle Plante'nin 1859'da keşfettiği kurşun asit pillerinin önemi artmıştır. Kurşun asit pillerle birlikte,

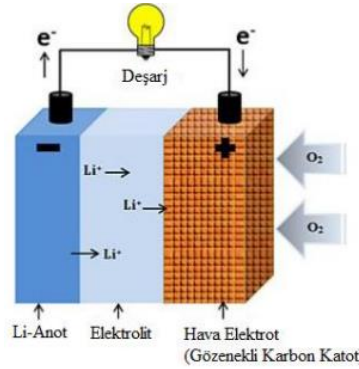
bilinirliği fazla olan Ni-Cd ve Ni-metal hidrit (Ni-MH) pillerle birlikte pil teknolojisi ilerlemiş ve günümüzde kullandığımız lityum iyon pil teknolojisinin ortaya çıkmasına katkısı olmuştur [28]. Lityum-hava pillerinde güç yoğunluğunun yüksek olması oksijen geçişi sağlayacak daha hafif katot malzemesi olarak gözenekli karbon kullanılmasından ve pilde depo edilmesine gerek olmamasından dolayı lityum-iyon pillerden sonra lityum-hava pilleri geliştirilmiştir [1].

Otomotiv sektöründe güç yoğunluğu yüksek ve hafif pillere olan ihtiyaç lityum-hava pilinin gelişmesinde önemli sebeplerden biri olmuştur. Böylece elektrikli arabaların kullanımı şehirlerde oluşan hava kirliliği için de bir çözüm olacaktır [1].

B. Lİ-HAVA PİLLERİNİN TASARIMI VE ÇALIŞMA PRENSİBİ

Tüm pillerde bir anot, katot ve elektrolit mevcut olup; lityum-hava pili, lityum-iyon pili bir lityum metal anot, gözenekli bir karbon katot ve Li^+ iyonlarının iletilmesini sağlayacak bir elektrolitten oluştuğundan büyük derecede benzerdir. Elektrik üretimi, anotta lityumun yükseltgenmesi sonucu Li^+ iyonlarının elektrolitten katoda doğru oksijenin indirgenmesi için göç etmesiyle oluşur [2].

Lityum-hava piline adını veren "hava", pilin açık hücreli tasarımından gelmektedir; burada katottaki deşarj işlemi sırasında oksijen doğrudan atmosferden emilmektedir ve lityum dış ortamdaki serbest oksijen molekülleriyle elektrolitte hızlıca oksitlenmektedir [29]. Bu özel katoda "hava elektrotu" adı verilmektedir. Genel olarak piller, kullanıldıktan sonra atılan ve tekrar şarj edilebilen piller olarak ikiye ayrıldığında [30]; lityum-hava pili şarj edilebilir piller arasında yer almaktadır. Şekil 4'deki lityum-hava pilinin deşarjı sırasında iyon haline geçen lityum anottan katoda doğru ilerlemekte ve oksijen gazı ile birleşerek Li_2O_2 oluşturmaktadır. Şarj sırasında ise lityum iyonları anota doğru ilerlemektedir, anot lityum metal ile kaplanmaktadır ve oksijen gazı oluşmaktadır [29]. Lityum-hava pillerinin verimini birkaç kat artırabilmek için katot malzemesinin kapasitesinin yüksek olması gerekir.



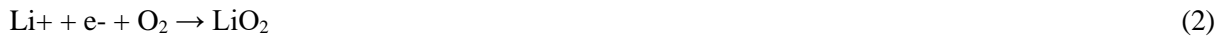
Şekil 4. Lityum-Hava Pilinin Deşarjı [29].

Anotta kullanılan metalik lityum bir elektron vererek 1 nolu eşitlikteki gibi yükseltgenir [1]. Anottaki yarı reaksiyon aşağıdaki gibidir;



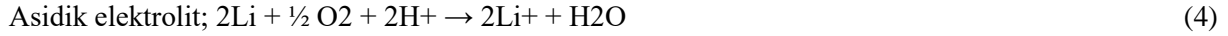
Anot olarak metalik lityum kullanıldığında, lityum aktif bir metal olduğu için nemden etkilenmesi, lityum tuzları katmanlı olarak biriktirmesi ve lityum-elektrolit arasındaki birikme bir difüzyon bariyeri oluşturması gibi bazı önemli sorunlar vardır [1].

Lityum oksitler, katotta 2 ve 3 nolu indirgeme reaksiyonları ile üretilir: [2]



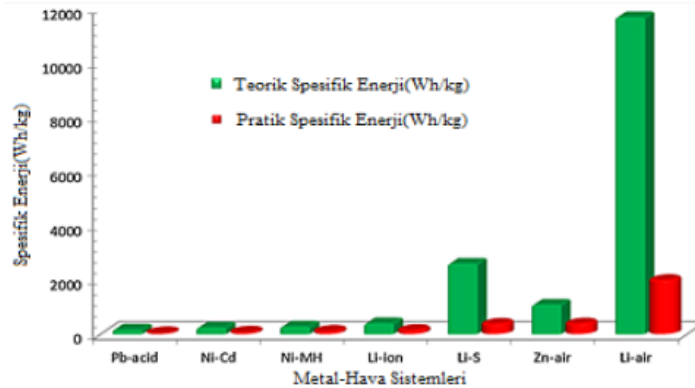
Gözenekli karbon katotta oksijenin indirgenmesi lityum iyonlarıyla birlikte oluşur. Oksijen indirgenme kinetiğini ve kapasitesini artırmak için karbon içine metal katalizörler eklenerek farklı katot malzemeleri de hazırlanabilmektedir.

Lityum-hava pilinde önemli olan katot reaksiyonunun verimliliğidir ve bu durum performansı etkilemektedir. Katot gözeneklerinin tıkanmasına neden olmayacak katalitik etkinliği yüksek olan katot malzemelerin geliştirilmesi önemlidir. Aynı zamanda şarj sırasında LiO₂, Li₂O₂, oksijen ve lityum iyonlarına yükseltgenmeyi etkin şekilde sağlayacak katalizörler geliştirilmesi gerekmektedir [2]. Lityum-hava pillerinde asidik ve alkali sulu elektrolit içeren hücrelerde katotta 4 ve 5 nolu indirgenme reaksiyonları gerçekleşmekte olup; sulu ortamdaki çalışmalar çok yaygın değildir [1].



C. Lİ-HAVA PİLİNİN ÖZELLİKLERİ

Bir lityum-hava pilinin teorik enerji yoğunluğu, lityum-iyon pilinin enerji yoğunluğundan çok daha büyüktür. Bunun nedeni, lityum-iyon pilinin aksine, lityum-hava pilindeki katot aktif maddenin oksijen olması ve havadan oksijenin deşarj işlemi sırasında emilmesi ve böylece pil hacminden herhangi birisini kullanmamasıdır. Bu nedenle lityum-hava pili, lityum-iyon pilinden daha küçük bir hacimde, büyük miktarda enerji depolayabilmektedir. Lityum, 1.14x10⁴ Wh/kg kadar çok yüksek spesifik enerjiye (birim kütle başına enerji) sahiptir [29]. Şekil 5'teki diyagram lityum-hava pilinin yüksek teorik spesifik enerjisinin diğer pil teknolojileri ile karşılaştırıldığında ne kadar yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 5. Lityum-Hava Pilinin Spesifik Enerjisinin Diğer Piller İle Karşılaştırılması [29].

Teorik olarak bir lityum-hava pili, yeşil sütunun spesifik enerjisine sahip olabilmesine rağmen, araştırmacılar yalnızca kırmızı sütunun spesifik enerjisini elde edebilmişlerdir. Dolayısıyla, ticari olarak kullanılabilmesi için geliştirilmeye ihtiyacı vardır.

Lityum-hava pilleri dört farklı elektrolit türüne göre sınıflandırıldığında bunlar; katı elektrolit ve üç çeşit sıvı elektrolitlerdir (susuz elektrolit, sulu elektrolit, sulu/susuz elektrolit). Sulu/susuz elektrolitte hidrofobik zarın, sulu ve susuz elektrolit arasında ayıraç görevi görmesi gerekmektedir. Lityum iyonunun iyonik iletkenliği, lityum iyonlarının hareketliliği ve hareketli iyonların sayısı ile doğru orantılıdır. Düşük viskoziteli elektrolitler lityum iyonlarının kolay hareket etmeleri için istenen bir özelliktir [1].

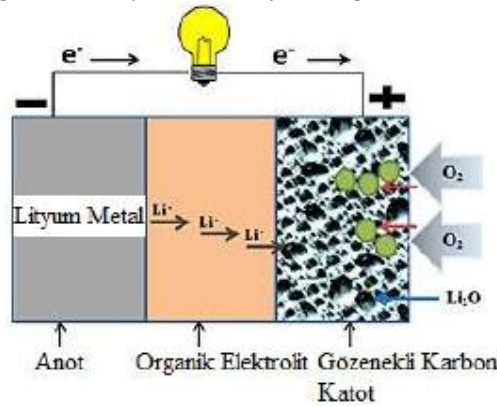
Doldurulabilir lityum-hava pillerde LiClO₄ gibi bir inorganik tuzun propilen karbonat gibi bir organik sıvıdaki çözeltisi geniş bir elektrokimyasal aralığa sahip olması nedeniyle elektrolit olarak kullanılır. Susuz elektrolit iyi bir iyonik iletken olmalı, kimyasal olarak kararlı, ucuz ve güvenli olmalıdır [1].

D. MEVCUT Lİ-HAVA PİL TEKNOLOJİLERİ

D. 1. Aprotik Li-Hava Pili

Aprotik lityum-hava pili; lityum metal anot, organik bir sıvı elektrolit ve gözenekli karbon katottan oluşan EIC Laboratuvarlarında Kuzhikalail Abraham tarafından geliştirilen lityum-hava pilinin en temel şeklidir [31]. Deşarj sırasındaki kimyasal reaksiyonlar katotta Li_2O_2 ve daha az miktarda Li_2O bileşiklerini yaratmaktadır. Bu deşarj ürünleri, organik elektrolit içinde çözünmediğinden katottaki gözenekleri potansiyel olarak tıkaçabilmektedir ve katodun katalizörlerine zarar verebilmektedir [19]. Bu deşarj ürünlerinin katottaki birikimi (Şekil 6'daki katottaki siyah alanlar), deşarj işlemi gerçekleşirken oksijen emilimini önemli ölçüde azaltabilmektedir [19]. Bu durum, katodun performansını ve deşarj kapasitesini (şarj başına enerji çıkışı miktarı) etkilemektedir. Bu problem pilin ömrünü ve pilin pratik enerji yoğunluğunu potansiyel olarak sınırlayabilmektedir.

Temel Aprotik lityum-hava pilinin diğer bir olumsuz tarafı, oksijenden başka havadaki diğer maddelerin (örneğin su) filtrelenmesidir [19]. Bu istenmeyen maddelerin varlığı lityum-metal anot ile reaksiyona girebilmektedir ve deşarj için gerekli kimyasal reaksiyonlar gerçekleşmeyebilmektedir.



Şekil 6. Organik Elektrolit İçeren Lityum-Hava Pili [19].

D. 2. Sulu Li-Hava Pili

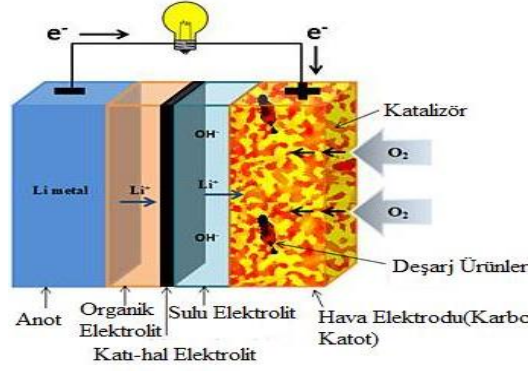
Japonya'daki Mie Üniversitesi'nden Nobuyuki Imanishi tarafından araştırılan sulu lityum-hava pili, katodun gözeneklerinde çözünmeyen deşarj ürünlerinin tıkanmasını önlemek için geliştirilmiştir [32]. Sulu lityum-hava pilleri metalik lityum anot, sulu elektrolit ve bir hava katodundan oluşmaktadır. Anot ve katot arasındaki elektrolit, katottaki ürünleri çözecek sulu bir çözeltidir [19]. Dolayısıyla bu ürünler, pildeki elektron akışını yavaşlatmadan katot zarından serbestçe geçebilecek ve böylece enerji çıktısı artırılmış olacaktır. Bu tasarımda potansiyel olarak kullanılacak iki eşsiz sulu çözelti alkali elektrolit çözeltisi ve asidik elektrolit çözeltisi olup; yüksek iyonik iletkenlik sağlamak ve daha düşük maliyettedir [19].

Sulu lityum-hava pilleri, aprotik lityum-hava pillerinin havadaki nemden dolayı oluşan sorunlarına çözüm getirmektedir. Elektrolit olan sulu solüsyon suyun varlığı ile dengelendiği için havadaki oksijeni tamamen filtrelemek zorunda kalmayacağından dolayı havadan oksijeni daha hızlı alabilmektedir. Bununla birlikte, lityum-metal anodun pilin içindeki suyla şiddetle reaksiyona girmesini önlemek için güvenlik önlemlerinin alınmasına hala ihtiyaç duyulmaktadır [19]. Sulu lityum-hava pili, aprotik tasarımın tüm sorunlarını (lityum-metal anotların su ile reaksiyona girmesi gibi) çözümüyle olsa da, üretim için hazır bir lityum-hava pilinin oluşturulması için büyük bir adım atmaktadır.

D. 3. Hibrit Li-Hava Pilleri

Nanjing Üniversitesinde Ping He tarafından araştırılan hibrid lityum-hava pili, bir organik elektrolit içine daldırılmış lityum-metal anot ve bir sulu elektrolit ile ara yüzey olan bir hava elektrotu (gözenekli

karbon katot) içermektedir [33]. Bunların arasında, sulu ve sulu olmayan elektrolitleri ayıran, ancak lityum iyonlarının içeriye nüfuz etmesini sağlayan, katı hal Li^+ iletken zarın ince bir filmi vardır. Şekil 7’de hibrit lityum hava pilinde deşarj işlemi gösterilmektedir. Hibrit lityum-hava pili, aprotik sistemin organik olmayan susuz elektroliti ile sulu sistemin sulu elektrolitini birleştirmektedir. Şekilde lityum iyonlarının sulu olmayan elektrolit içerisinde dağıldığı, katı hal zarından geçirildiği ve daha sonra sulu elektrolit aracılığıyla katottan geçirildiği gösterilmektedir [19].



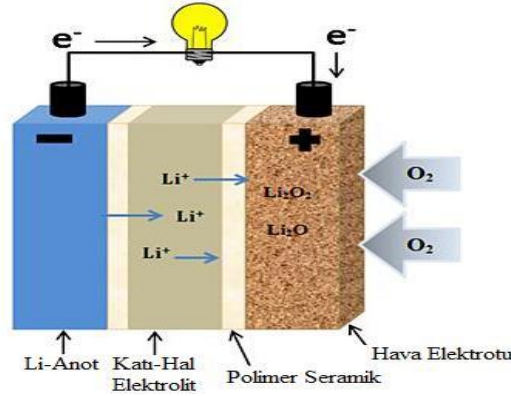
Şekil 7. Hibrit Lityum-Hava Pilinde Deşarj İşlemi [19].

Bu pilin iki önemli avantajı deşarj ürünlerinin etkileri ve havadaki nemle mücadele etmesidir [19]. Örneğin, karbon katot sulu elektrolit ile bağlandığından, deşarj ürünleri sulu elektrolit içinde çözünür oldukları için katot gözeneklerini tıkamayacaktır. Ayrıca, lityum-metal anodu sulu olmayan çözeltiye batırıldığı için suyla olan herhangi bir negatif reaksiyona karşı korunur ve katı hal zarı, sulu solüsyondaki suyun yanı sıra herhangi bir nemin anoda erişmesini önlemektedir. Sonuç olarak bu prototipin deşarj ürünlerinin ve nemli havanın sorunlarını gidermekle birlikte, daha düşük bir güç yoğunluğu sağlaması uzun süreli kullanımda pili etkileyecektir. Bunun bir nedeni, hücrenin sulu ve sulu olmayan bölmelerini ayıran lityum iyon iletken zarından kaynaklanmaktadır. Bu zar, elektrolit iletkenliğini düşürmektedir.

D. 4. Katı-Hal Lityum-Hava Pilleri

Bir katı-hal pilinde, elektrolit, pildeki anodu koruyan ve aynı zamanda Li^+ iyonlarını iletken bir katı maddedir (Şekil 8) [19]. Katı kaplamanın, anodu havadaki nem, oksijen, karbondioksit ve azottan koruyabileceği ve yine de lityum iyonlarının içerisinde geçmesine izin veren bir elektrolit gibi davranabileceği anlamına gelmektedir [34]. Katı hal prototipinde bir başka faktör, onunla donatılmış filtredir. Çoğu filtre, havadan oksijen geçirme işlemlerinin yavaş olması nedeniyle pil reaksiyonunu belirgin şekilde yavaşlatırken, bu filtrenin tasarımı pil reaksiyonunu hızlandırmaktadır [34].

Filtrelenen pilin bileşenleri; gözenekli lityum alüminyum titanyum fosfat katot (lityum iyonlarının katoda girmesine müsaade etmek için), ultra-ince bir katı hal elektrolit tabakası (elektrolit üzerinde lityum iyonlarının yüksek difüzyon hızı sağlaması için) ve katodun gözenekli yüzeyleri üzerine kaplanan silisyum yağı filmleridir (reaksiyonun su gibi yabancı moleküllere müdahale etmesini önleyerek lityum ve oksijen reaksiyon oranını yüksek tutmak için) [34]. Lityum-hava pilinin çeşitli prototipleri mükemmel lityum-hava pili gerçekleşene kadar geliştirilmeye devam edecektir.



Şekil 8. Katı-Hal Lityum-Hava Pili Deşarj İşlemi [19].

E. Lİ-HAVA PİLİNİN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI

Lityum metaller içerisinde en hafif olmasının yanında (yaklaşık 6.94 g/mol) yüksek elektrokimyasal potansiyele sahiptir. Lityum anot malzemesi olarak diğer metal-hava pili malzemelerine göre (Çinko 2965 mA sa/g, Al 2965 mA sa/g) yüksek kapasiteye sahip (3842 mAsa/g) bir malzemedir. Lityum-hava pilleri yüksek miktarda (teorik olarak 5000 Wsa) enerji depolayabilmektedir. Performansı lityum iyon pillerinin 10 katından daha fazladır [1]. Bu pillerde saf lityum kullanımı sebebiyle pilin kısa devre yapması ve aktif bir metal olan lityumun su buharı ile reaksiyona girmesi önemli bir dezavantajdır. Lityum-iyon pilleri için de mevcut olan bu sorunların yanı sıra ayrıca lityum, katodun gözeneklerinin tıkanmasına da sebep olarak O_2 geçirgenliğinin azalmasına neden olmaktadır [1].

V. Lİ-HAVA PİLLERDE GRAFENİN KULLANIMI

A. GRAFEN-KOMPOZİT ANOTLAR

Grafen oldukça iletken, yüksek mekanik mukavemete sahip, esneklik ve kararlılık gösteren ve yüksek spesifik yüzey alanına sahip bir malzemedir. Grafen, aktif malzemenin boyutunu azaltabilir, elektriksel ve iyonik iletimi iyileştirebilir nano parçacıkların aglomerasyonunu önleyebilir ve mekanik kararlılığı iyileştirebilir. Bu iyileştirmeler, daha iyi kapasite ve oran performansının yanı sıra daha uzun pil ömrü sağlar. Pratik lityum-hava pili elde etmedeki en önemli zorluklardan biri, lityum metal anodun düşük nem toleransısıdır. Nem stabilitesi, çevrim ömrünü uzatmak ve çalışma güvenliğini iyileştirmek için çok önemlidir [35].

Lityumun yüksek kimyasal reaktivitesi, heterojen ve kararsız katı/elektrolit ara fazı, lityum dendrit ve lityum birikiminin neden olduğu dögüsel hacim genişlemesi lityum anot kullanımının zorluklarındandır [36]. Çeşitli malzemelerle lityum metal yüzeyinin pasifleştirilmesi, lityum kaplama/sıyırma ve dendrit oluşumunu bastırmak bu zorluklara çözüm önerisi olabilmektedir [36].

Bir çalışmada, suya dayanıklı lityum anot Lisurface; yüksek kaliteli CVD grafen tabakası ile pasifleştirilerek oluşturulmaktadır. Bu elektriksel olarak iletken ve mekanik olarak sağlam grafen kaplama, yapay bir katı/elektrolit ara fazı işlevi görerek lityum yüzeyini nem erozyonu ve yan reaksiyonlardan pasifleştirmeye olanak tanır. Sonuç olarak, pasifleştirilmiş Li anotlarla üretilen lityum-hava pilleri, 2300 saate kadar (1000 mA/g, 200 mA/g'de 230 dögü) üstün bir dögü performansı sergiler. Sonrasında geri dönüştürülen anot, 400 uzatılmış saat boyunca sürekli olarak çalışacak şekilde yeni bir katot ile yeniden birleştirilebilir [36].

İletkenliği artırmak için pil elektrotlarına grafit, asetilen siyahı ve Super P gibi iletken katkı maddeleri eklenmektedir. Karbon esaslı anotlarda, grafen, siyah asetilene kıyasla, deşarj dögüsü boyunca daha tutarlı iletkenlik sağlayacaktır. Bu durum, daha iyi dögü ve hız performansı sağlamaktadır. Grafenin

esnek yüzeyleri, daha az malzeme ile daha fazla iletkenlik sağlamaktadır. Grafen iletken katkı maddelerinin benimsenmesindeki en büyük engel, düşük performanslı olmasıdır.

Özellikle, kimyasal olarak dönüştürülmüş grafen, yüksek sayıda fonksiyonel gruba sahiptir ve bu da onu kompozit elektrotlar için bir substrat olarak faydalı hale getirir. Kalay ve silikon bazlı elektrotlar, grafen ile katılandığında iki malzeme arasındaki sinerjiyi en üst düzeye çıkarabilir [37].

B. KATOT MALZEMESİ OLARAK GRAFEN

Li-hava pillerin elektrokimyasal performansı, elektrolit bileşiminin yanı sıra bir katodun bileşimi, iletkenliği, yüzey alanı ve gözenekliliği gibi faktörlere bağlıdır [38,39].

Katotların iletkenliği, bir pilin etkinliğinin önemli bir sınırlandırıcıdır. Li-hava pil hücrelerinin gelişiminin ilk aşamalarında, Süper P ve Süper S gibi iletken maddeler geleneksel hava elektrotunun ana bileşeni olarak kullanılmıştır [40]. Deşarj kapasitesinin genellikle karbon malzemelerin yüzey alanı ile arttığı görülmüştür. En büyük özgül yüzey alanı olan 2.630 m²/g ile gözenekli grafen, prensipte, sadece reaksiyon bölgeleri için geniş bir etkili yüzey alanı sağlamakla kalmaz, aynı zamanda oksijen ve Li⁺ iyonlarının erişilebilirliğini de kolaylaştırır [41].

Katot karışımına grafen eklenmesi, elektrolit ve aktif katot malzemesi arasındaki arayüzey direncini azaltır ve Li⁺ iyon iletimini iyileştirir. Aynı zamanda katodun yüzeyine yerleştirilen grafen, metal oksitlerin çözünmesini veya dönüşmesini engelleyerek yapısal kararlılığı korur. Grafen, en yaygın olarak lityum demir fosfat katotlarıyla birlikte kullanılır. Bu kompozitlerde grafen, akım toplayıcı kaplama ve iletken katkı maddesi olarak işlev görür. Grafenin iki boyutlu iletken yüzeyi, oldukça aktif ve iletken bir elektrot sağlayarak pilin iletkenliğini ve hız performansını iyileştirir [37].

Yapılan bir çalışmada, birleştirilen gözenekli grafen levhaların, saf oksijende ilave bir katalizör olmaksızın 15.000 mAh/g'lik çok yüksek bir kapasite sağladığı bildirilmiştir [42]. Bir başka makalede, rutenyum (Ru) nanokristal ilave edilmiş gözenekli grafenin Li-hava piller için katot olabilirliği çalışılmıştır. Gözenek boyutu ve şekillerinin, gözeneksiz grafen muadili aynı test koşullarında çok daha küçük kapasite gösterdiği gerçeğiyle elektrokimyasal performansını büyük ölçüde etkilediği doğrulanmıştır [43].

Xiao ve ark. gözenekli grafenden oluşan bir hava elektrodunda oksijenin hava elektrotunun iç boşluğuna ulaşması için katı-sıvı-gaz üçlü noktasını büyütmek için geniş spesifik yüzey alanına sahip gözenekli bir yapı tasarlamışlardır. Gözenekli reaksiyon bölgelerinin sayısındaki artış, yaklaşık 15.000 mAh/g'lik büyük ölçüde artan bir deşarj kapasitesi sağlamış, ayrıca, grafen üzerindeki kusurların ve fonksiyonel grupların izole edilmiş nano boyutlu Li₂O₂ parçacıklarının oluşumunu desteklediğini ve hava elektrotunda hava tıkanmasını önlemeye yardımcı olduğunu gözlemlemişlerdir [42].

Li ve ark. grafenin kendi başına Li-O₂ pillerde yaklaşık 8.705 mAh/g'lik yüksek bir deşarj kapasitesi sağlayabildiğini, bu değer BP-2000 (1.909 mAh/g) ve Vulcan XC-72 (1.053 mAh/g) gibi diğer karbon substrat türleri ile karşılaştırıldığında oldukça yüksek olduğu belirtilebilir [44].

Wang ve ark. grafen oksitten üretilen gözenekli karbon yapısının Li-hava pil hücreleri için etkili bir hava elektrotu olarak kullanılabilirliğini bulmuşlardır. Deşarj sırasında, makro gözenekli yapı oksijen difüzyonunu kolaylaştırmış, modifiye edilmiş grafen yapısı, 0,2 mA/cm²'lik bir akım yoğunluğunda yaklaşık 11,060 mAh/g'lik bir spesifik kapasite sağlamıştır [45].

Çetinkaya ve arkadaşları lityum hava piller için katot malzemesi olarak esnek bir grafen oksit (GO) kağıdı kullanmıştır. Vakumla filtrelenmiş grafen oksit kağıdı, O₂ difüzyonu için yeterli gözeneklilik sağlayarak Li₂O₂'nin oluşum ve ayrışma verimliliğini arttırmıştır. Lityum hava pilinde katot olarak kullanıldığında, 10 döngüden sonra 612 mAh/g deşarj kapasitesi ve 585 mAh/g şarj kapasitesi

sağlamaktadır. Ancak bu grafen oksit kağıdının zayıf iletkenliği nedeniyle, cihazın kapasitesi ve çevrim ömrü, pratik kullanım talebini karşılayamamıştır [46].

Kang ve arkadaşlarının bir çalışmada vakum destekli filtrasyon yöntemiyle esnek GNP (nanoplatelet)/GO filmleri hazırlanmış, elde edilen bu kağıt benzeri film, iyi bir elektriksel iletkenlik (164 S/cm), esneklik, 100 mA/g akım yoğunluğu ve 9760 mAh/g yüksek tam deşarj kapasitesi sağlamıştır. Böylece iletken katkı maddeleri ve bağlayıcılar kullanmadan doğrudan bağımsız bir katot olarak kullanılması sağlanmıştır [47].

Çeşitli grafen kompozitlerden G/LMO(lityum manganez oksit), G/LCMO(LiCr_{0.05}Mn_{1.95}O₄) ve G/LNMO(LiNi_{0.05}Mn_{1.95}O₄), üretildiği başka bir çalışmada; geniş spesifik yüzey alanları ve gözenek hacimleri nedeni ile elektrolit/elektrotun temas alanı artırılmış, bu da kompozitlerin Li iyon pillerde bir katot olarak kullanıldığında akım yoğunluğunun azaltılmasını sağlamıştır [20]. Tüm bu özelliklerin katot malzemelerinin iletkenliğini iyileştireceği ve lityum iyon iletimini artıracak umulmaktadır.

VI. SONUC

Bu araştırmada grafen yapısı ve üretim yöntemlerinden bahsedilmiş, ayrıca pillerin tarihsel gelişimi, lityum-hava pil teknolojileri ve lityum hava pillerinde yeni nesil grafen esaslı elektrotların kullanımı incelenerek kıyaslamalar yapılmıştır. Volta tarafından 1800'lü yıllarda üretilen ilk pilden bu yana farklı tür ve özelliklerde piller üretilmiştir. Günümüzde hafif ve güç yoğunluğu yüksek olan piller tercih edilmektedir [2].

Lityum-iyon piller piyasada en yaygın kullanılan ticari piller olmuştur. Ancak sınırlı teorik kapasiteleri ve yüksek maliyetleri nedeni ile bu konudaki araştırmalar artarak devam etmektedir. Günümüzde pil hücrelerinin geliştirilmesi, birçok farklı alanda kullanım bulabilmesi nedeniyle önemlidir. Lityum-hava pili tarafından sağlanan enerji yoğunluğu diğer lityum esaslı pillere göre oldukça yüksektir [1]. Fakat bu piller henüz gelişme aşamasındadır ve laboratuvar ortamında çalışılmaktadır. Lityum-hava pillerin gerektiğinde, havadaki oksijen ile tepkimeye girmesi avantajlı yönüdür.

Tersinirliği ve iyi özgül kapasitesi nedeniyle grafen, birçok alana konu olmuş ve kullanım alanları günden güne genişlemekte olan bir malzemedir. Moleküler olarak ince bir karbon tabakası olan grafen, enerji depolama türleri için ihtiyaç duyulan, yüksek performansa sahip piller elde etmek için geliştirilen en ilginç yeni malzemeler arasındadır. Grafitin düzlemsel yapısı, katmanlar arasındaki bağların çok zayıf olmasına ve katmanların kendilerinin özünde güçlü olmasına sebep olur, bu nedenden dolayı malzemeleri veya mukavemeti artırmaya ilişkin uygulamaları güçlendirmek için grafit kullanmak mantıklı değildir. Ayrıca, grafitin iletkenliği, katmanlardan geçerken ve katmanlar boyunca çok farklıdır. Elektriğin veya ısının katmanlardan geçmesi gereken elektron taşıma miktarı nedeniyle çok zordur. Dolayısıyla grafenin yapısı bu iki yönden daha üstündür.

Grafenin gözenekli ve yüksek iyonik iletken olması ona yüksek yüzey alanı ve dikkat çekici elektrokimyasal performans sağlamak ve pillerde hız kapasitesini ve döngü kararlılığını artırmaktadır [3]. Grafen yapısından dolayı elektriği iletmektedir Grafendeki karbon atomları diğer 3 karbon atomuna kovalent bağla bağlı iken; dördüncü atom, bir elektrik yükü taşıyabilen ve iletebilen serbest 'lokalize olmayan' elektron içermektedir. Grafen levhası, arzu edilen fiziksel ve kimyasal özellikleri sergileyen gözenekli yapılar halinde birleştirilebilir veya işlenebilir. Gözenekli grafen, sonuç olarak, saf grafenden farklı benzersiz yapısal ve elektrokimyasal özelliklere sahip olan, tabaka üzerinde veya tabakalar arasında gözeneklere sahip modifiye edilmiş bir grafendir. Gözenekli grafen, enerji depolama, artan yüzey alanı ve artan elektrokimyasal performans nedenleri ile ilgi çekici bir malzemedir.

Grafenin çeşitli üretim yöntemlerinden SiC üzerinde epitaksiyel olarak büyütmede üretim maliyetleri, CVD ile üretilenlerden daha yüksektir ve bu farkın gelecekte daha da artması beklenmektedir. Grafenin, hidrojen depolama, süper kapasitörler, lityum-kükürt piller, lityum-hava pilleri ve diğer teknolojilerdeki

uygulamalar için çok fazla potansiyeli vardır. İleriye dönük olarak grafen, birçok sektörde potansiyeli olan ve gelişmiş özellikleriyle gelecekte çok etkili olacak bir malzemedir.

VII. KAYNAKLAR

- [1] M. Farsak, “Lityum hava pilleri için karbon temelli gözenekli katot malzemesi geliştirilmesi,” Doktora tezi, Kimya, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye, 2015.
- [2] F. Tezcan, “Katot üzerinde oksijen gazı indirgenmesi için MoO₃ katalizörünün kullanılması,” Yüksek lisans tezi, Kimya, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çukurova Üniversitesi, Adana, 2013.
- [3] M.A., Çakal, C. Çiftçi, E.B., Eymirli, “TRA1 bölgesi linyit ve oltu taşı madenlerinin grafen hammaddesi olarak kullanımına yönelik analiz çalışması,” T.C Kuzeydoğu Anadolu Kalkınma Ajansı, ss. 4-20, 2016.
- [4] A. H. Castro Neto, F. Guinea, N. M. R. Peres, K. S. Novoselov, and A. K. Geim, “The electronic properties of graphene,” *Reviews of Modern Physics*, vol. 81, no. 1, pp. 109-162, 2009.
- [5] R. Mishra and J. Militky, “Carbon-based nanomaterials,” *Nanotechnology in Textiles*, pp. 163–179, 2019.
- [6] İ. Tiyek, U. Dönmez, B. Yıldırım, M.H. Alma, M.S. Ersoy, Ş. Karataş ve M. Yazıcı, “Kimyasal Yöntem ile İndirgenmiş Grafen Oksit Sentezi ve Karakterizasyonu,” *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 20, s. 2, ss. 349-357, 2016.
- [7] E. Adlı, “Grafen ve özellikleri,” Yüksek lisans tezi, Fizik, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, Türkiye, 2019.
- [8] J. Wang, F. Ma and M. Sun, “Graphene, hexagonal boron nitride, and their heterostructures: properties and applications,” *RSC Adv.*, vol. 7, no. 27, pp. 16801–16822, 2017.
- [9] H. Gedikoğlu. (2017). *Grafen nedir? Grafen nasıl üretilir? Grafen nerelerde kullanılır?*. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://malzemebilimi.net/grafen-uretimi-ve-kullanim-alanlari.html>
- [10] Y. Zhu, S. Murali, W. Cai, X. Li, J. W. Suk, J. R. Potts and R. S. Ruoff. “Graphene and Graphene Oxide: Synthesis, Properties, and Applications,” *Advanced Materials*, vol. 22, no. 35, pp. 3906–3924, 2010.
- [11] Ç. Agin, “Fiziksel ve kimyasal yöntemlerle nano boyutlu grafit tabakaların eldesi ve iletken kompozit uygulamalarında kullanımı,” Yüksek lisans tezi, Kimya Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2013.
- [12] The Graphene Council. (2020, April 14). *Detailed Insight into the Properties and Applications of Graphene*. [Online]. Available: <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=5470>
- [13] W. Luo, K. Yarn, Z. Zheng, F. Fasya, D. Faridah, C. N. Chen, “Performance Analysis of Direct Methanol Fuel Cell With Catalyst and Graphene Mixture Coated On To Fuel Channels,” *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, vol. 13, no. 3, pp. 765-775, 2018.
- [14] Sabancı Üniversitesi. (2016, Ağustos). *Grafen Projesi tüm hızıyla devam ediyor*. [Çevrimiçi]. Erişim: <http://gazetesu.sabanciuniv.edu/tr/2016-08/grafen-projesi-tum-hiziyla-devam-ediyor>

- [15] B. Kozal, “Karbon tabanlı petek örgülerin elektronik özellikleri,” Doktora tezi, Fizik Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2012.
- [16] N. Baig, A. Waheed, M. Sajid, I. Khan, A. Kawde, M. Sohail, “Porous graphene-based electrodes: Advances in electrochemical sensing of environmental contaminants,” *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, vol. 30, pp. 2214-1588, 2021.
- [17] J. Luo, H.D. Jang, T. Sun, L. Xiao, Z. He, A.P. Katsoulidis, M.G. Kanatzidis, J.M. Gibson, J. Huang, “Compression and aggregation-resistant particles of crumpled soft sheets,” *ACS Nano* vol. 5, no. 11, pp. 8943–8949, 2011.
- [18] E. Asadian, S. Shahrokhian, A. Iraj Zad, F. Ghorbani-Bidkorbeh, “Glassy carbon electrode modified with 3D graphene–carbon nanotube network for sensitive electrochemical determination of methotrexate,” *Sens. Actuators B Chem.* vol. 239, pp. 617–627, 2017.
- [19] S.A. Bhuyan, N. Uddin, M. Islam, F.A. Bipasha and S.S. Hossain, “Synthesis of graphene,” *International Nano Letters*, vol. 6, no. 2, pp. 65–83, 2016.
- [20] H. Akbulut. (2018, Haziran). *Grafen Sentezinde Yeni Bir Yaklaşım ve Yeni Nesil Grafen Esaslı Li-Pil Elektrotları*. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://acikerisim.sakarya.edu.tr/bitstream/handle/20.500.12619/95062/214M125.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [21] D. Ickecan. (2015, 29 Eylül). *Grafen Sentezi*. [Çevrimiçi]. Erişim: <http://fizikakademisi.com/2015/09/29/grafen-sentezi/>
- [22] A. Bedeloğlu ve M. Taş, “Grafen ve Grafen Üretim Yöntemleri,” *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 16, s. 3, ss. 544-554, 2016.
- [23] F. Ming, “Theoretical studies of the epitaxial growth of graphene,” Ph.D. dissertation, Dept. Physic, Georgia Institute of Technology, Atlanta, ABD, 2011.
- [24] J.H. Warner, F. Schäffel, A. Bachmatiuk and M.H. Rummeli, “Graphene: Fundamentals and emergent applications,” *Amsterdam: Elsevier*. 2013.
- [25] Ö. Kurt, “Grafen oksit ve nanoselüloz katkılı kitosan esaslı polimer membranların geliştirilmesi ve atık su arıtımında kullanılması,” Yüksek lisans tezi, Kimya Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, 2018.
- [26] M. Yazıcı, İ. Tiyek, M.S. Ersoy, M.H. Alma, U. Dönmez, B. Yıldırım, T. Salan, Ş. Karataş, S. Uruş, İ. Karteri ve K. Yıldız, “Modifiye Hummers Yöntemiyle Grafen Oksit (GO) Sentezi ve Karakterizasyonu,” *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, c. 4, s. 2, ss. 41-48, 2016 .
- [27] S. Arna, “Atık Pillerin Yönetimi,” *Kimya Mühendisliği Dergisi*, s. 172, ss. 32-34, 2009.
- [28] A. Üçtepe, “Lityum iyon bataryalarda silisyum/karbon kompozitlerinin anot malzemesi olarak kullanılması ve optimizasyonu,” Yüksek lisans tezi, Kimya Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü Gebze Teknik Üniversitesi, İzmit, Türkiye, 2019.
- [29] N. Akhtar and W. Akhtar, “Prospects, challenges, and latest developments in lithium-air batteries,” *International Journal of Energy Research*, vol. 39, no. 3, pp. 303–316, 2015.
- [30] Norm Enerji Sistemleri. (2012, Aralık). *Pil Akü Batarya Çeşitleri, Teknolojileri*. [Çevrimiçi]. Erişim: http://www.normenerji.com.tr/menu_detay.asp?id=10125

- [31] P. Ball. (2012, December). *Up in the air*. [Çevrimiçi]. Available: https://www.zurich.ibm.com/pdf/news/lithium_air_batteries.pdf
- [32] H. Minami, H. Izumi, T. Hasegawa, F. Bai, D. Mori, S. Taminato, Y. Takeda, O. Yamamoto, N. Imanishi, "Aqueous Lithium--Air Batteries with High Power Density at Room Temperature under Air Atmosphere," *Journal of Energy and Power Technology*, vol. 3, no. 3, pp. 1-12, 2021.
- [33] P. He, T. Zhang, J. Jiang and H. Zhou, "Lithium Air Batteries with Hybrid Electrolytes," *The Journal of Physical Chemistry Letters*, vol. 7, no. 7, pp. 1267-1280, 2016.
- [34] X. Zhu, T.S. Zhao, Z. Wei, P. Tan, L. An, "A high-rate and long cycle life solid-state lithium-air battery," *Energy Environ. Sci.*, vol. 8, no. 12, pp. 3745-3754, 2015.
- [35] K. Liao, S. Wu, X. Mu, Q. Lu, M. Han, P. He, Z. Shao, H. Zhou, "Developing a "Water-Defendable" and "Dendrite-Free" Lithium-Metal Anode Using a Simple and Promising GeCl₄ Pretreatment Method," *Advanced Materials*, vol. 30, no. 36, pp. 1-8, 2018.
- [36] Y. Ma, P. Qi, J. Ma, L. Wei, L. Zhao, J. Cheng, Y. Su, Y. Gu, Y. Lian, Y. Peng, Y. Shen, L. Chen, Z. Deng, Z. Liu, "Wax-Transferred Hydrophobic CVD Graphene Enables Water-Resistant and Dendrite-Free Lithium Anode toward Long Cycle Li-Air Battery," *Advanced Science*, vol. 8, no. 16, pp. 1-11, 2021.
- [37] China Energy Storage Alliance. (2015, July 21). *Applications of Graphene in Lithium-ion Batteries*, [Online]. Available: <http://en.cnesa.org/latest-news/2015/7/21/applications-of-graphene-in-lithium-ion-batteries>
- [38] Z. Ma, X. Yuan, L. Li, Z. Ma, D.P. Wilkinson, L. Zhang and J. Zhang, "A review of cathode materials and structures for rechargeable lithium-air batteries," *Energy Environ. Sci.*, vol. 8, no. 8, pp. 2144-2198, 2015.
- [39] D. Aurbach, B.D. McCloskey, L.F. Nazar, P.G. Bruce, "Advances in understanding mechanisms underpinning lithium-air batteries," *Nature Energy*, vol. 1, no. 9, pp. 1-11, 2016.
- [40] S. S. Zhang, X. Ren and J. Read, "Heat-treated metal phthalocyanine complex as an oxygen reduction catalyst for non-aqueous electrolyte Li/air batteries," *Electrochim. Acta*, vol. 56, no. 12, pp. 4544-4548, 2011.
- [41] S. Stankovich, D. A. Dikin, R. D. Piner, K. A. Kohlhaas, A. Kleinhammes, Y. Jia, Y. Wu, S. T. Nguyen, R. S. Ruoff, "Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide," *carbon*, vol. 45, no. 7, pp. 1558-1565, 2007.
- [42] J. Xiao, D. Mei, X. Li, W. Xu, D. Wang, G. Graff, W. Bennett, Z. Nie, L. Saraf, I. Aksay, W. Liu, J. Zhang, "Hierarchically Porous Graphene as a Lithium-Air Battery Electrode," *Nano letters*. vol. 11, no. 11, pp. 5071-5078, 2011.
- [43] B. Sun, X. Huang, S. Chen, P. Munroe and G. Wang, "Porous Graphene Nanoarchitectures: An Efficient Catalyst for Low Charge-Overpotential, Long Life, and High Capacity Lithium-Oxygen Batteries," *Nano Letters*, vol. 14, no. 6, pp. 3145-3152, 2014.
- [44] Y. Li, J. Wang, X. Li, D. Geng, R. Li, X. Sun, "Superior energy capacity of graphene nanosheets for a nonaqueous lithium-oxygen battery," *Chemical Communications*, vol. 47, no. 33, pp. 9438-9440, 2011.

- [45] Z. Wang, D. Xu, J. Xu, L. Zhang and X. Zhang. “Graphene Oxide Gel-Derived, Free-Standing, Hierarchically Porous Carbon for High-Capacity and High-Rate Rechargeable Li-O₂ Batteries,” *Advanced Functional Materials*, vol. 22, no. 17, pp. 3699-3705, 2012.
- [46] T. Cetinkaya, S. Ozcan, M. Uysal, M. Guler, H. Akbulut, “Free-standing flexible graphene oxide paper electrode for rechargeable Li–O₂ batteries,” *Journal of Power Sources*. c. 267. ss. 140–147, 2014.
- [47] D.Y. Kim, M. Kim, W. Dong, J. Suk, O. Park, Y. Kang, “Flexible binder-free graphene paper cathodes for high-performance Li-O₂ batteries,” *Carbon*, vol. 93, ss. 625–635, 2015.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Elektromanyetik Radyasyon Maruziyet Algısı Ölçeğinin Geliştirilmesi: Geçerlilik ve Güvenilirlik Analizleri

 Osman ÇEREZCİ^a,  Aylin TUTGUN ÜNAL^{b,*},  Feyza SELAMET^c

^a Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Üsküdar Üniversitesi, İstanbul, TÜRKİYE

^b Yeni Medya ve Gazetecilik Bölümü, İletişim Fakültesi, Üsküdar Üniversitesi, İstanbul, TÜRKİYE

^c Bilgisayar Mühendisliği, Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi, Sakarya Üniversitesi, İstanbul, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: aylin.tutgununal@uskudar.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1241168

ÖZ

Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte yeni çevre sorunlarıyla karşılaşmaktayız. Son zamanlarda, duyularımızla fark edemediğimiz, iletişim teknolojilerinin ve elektriğin yaygın kullanımının çevresel bir atığı olan elektromanyetik radyasyonun olumsuz sağlık sonuçları tartışılmaktadır. Elektromanyetik radyasyon seviyesinin oluşturduğu olumsuz etkiler ile alınacak kişisel ve toplumsal önlemler için algı çalışmalarının yapılması gereklilik haline gelmiştir. Bu çalışmada, elektromanyetik radyasyon maruziyet algısı ile önlem almaya yönelik algı seviyesinin boyutsal olarak ölçülebilmesi amacıyla 1187 kişiden oluşan bir çalışma grubunda Elektromanyetik Radyasyon Maruziyet Algısı Ölçeğinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Yapılan geçerlilik ve güvenilirlik çalışmaları sonucunda, 11 madde ve 3 boyuttan (Farkındalık, Bilinçlilik, Endişe) oluşan geçerli ve güvenilir bir ölçek elde edilmiştir. Ölçek toplam varyansın %57,6'sını açıklamıştır. Ayrıca yapılan doğrulayıcı faktör analizi ile elde edilen üç faktörlü ölçek yapısı modellenmiş ve doğrulanmıştır. Elde edilen uyum iyiliği değerleri kabul edilebilir aralıkta bulunmuştur (Ki-kare/serbestlik değeri: 2,94; RMSEA: ,07; NFI: ,91; NNFI: ,92; CFI: ,96; GFI: ,92; AGFI: ,87). Ölçeğin güvenilirlik katsayısı Cronbach Alpha değeri "Farkındalık" boyutu için ,82, "Bilinçlilik" boyutu için ,74, "Endişe" boyutu için ,64 ve ölçek toplamı için ,77 olarak bulunmuştur. Böylece, Elektromanyetik Radyasyon Maruziyet Algısı Ölçeği adında geçerli ve güvenilir bir ölçek ortaya çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektromanyetik, Radyasyon, Geçerlilik, Güvenilirlik, Ölçek

Development of The Electromagnetic Radiation Exposure Perception Scale: Validity and Reliability Analysis

ABSTRACT

With the advancement of technology, we are faced with new environmental problems. The negative health consequences of electromagnetic radiation, which is an environmental waste of communication technologies and widespread use of electricity, which we cannot detect with our senses, are currently being discussed. It has become a necessity to carry out perception studies for what the electromagnetic radiation level should be, the negative effects it creates, and personal and social precaution to be taken. In this study, it was aimed to develop the Electromagnetic Radiation Exposure Perception Scale in a study group consisting of 1187 people in order to

measure the electromagnetic radiation exposure perception and precautionary perception. As a result of the validity and reliability studies, a valid and reliable scale structure consisting of 11 items and 3 dimensions (Awareness, Consciousness, Anxiety) was obtained. The scale explained 57,6% of the total variance. In addition, the three-factor scale structure obtained by the validating factor analysis was modelled and verified. The obtained goodness of fit values were found acceptable (Ki- square/freedom value: 2,94; RMSEA: ,07; NFI: ,91; NNFI: ,92; CFI: ,96; GFI: ,92; AGFI: ,87). The Cronbach Alpha value of the scale was found to be ,82 for the “Awareness” dimension, ,74 for the “Consciousness” dimension, ,64 for the “Anxiety” dimension, ,77 for the scale total. Thus, a valid and reliable scale named ‘Electromagnetic Radiation Exposure Perception Scale’ has emerged.

Keywords: Electromagnetic, Radiation, Validity, Reliability, Scale

I. GİRİŞ

Elektromanyetik kirlilik bir çeşit çevre sorunu ile ilgili bir kavramdır. Birçok ülkede yaygın bir şekilde kullanılan bu terim teknolojinin çevremizde oluşturduğu ve sağlığımızı etkileyecek özellikteki elektromanyetik radyasyon seviyesine dair farkındalığı ifade etmektedir [1]. Teknolojik ilerlemelerle birlikte hayatımıza dahil olan çeşitli elektronik cihazların yaydığı radyasyonun seviyesi, çevreye ve sağlığa etkileri ve bunlara yönelik algının oluşması, son zamanlarda giderek önemli hale gelen konulardır. Bu yönüyle, bireysel ve toplumsal farkındalığı da içermektedir.

Elektromanyetik radyasyon, baz istasyonu, yüksek gerilim hatları, cep telefonları gibi herhangi bir elektriksel kaynaktan çıkarak her yöne ışık hızıyla yayılan enerji konvoyunu ifade etmektedir. İletişim teknolojileri ve elektriğin yaygın kullanımının çevresel bir atığı olan elektromanyetik radyasyonun olumsuz sağlık etkilerine yönelik tartışmalar mevcuttur [2],[3],[4],[5],[6]. Hatta “Elektromanyetik Alanlar ve Etkileri” sempozyumlarında bu konu bilimsel platformda tartışılmaktadır [7],[8],[9].

Elektromanyetik kirlilik duyularımızla fark edemediğimiz ve özellikle son zamanlarda çevremizde giderek arttığı için gözle görünen kirliliklere göre daha fazla hassasiyet gerektirmektedir. Önceleri çevre kirliliği olarak su kirliliği, gürültü kirliliği, hava kirliliği biliniyorken şimdilerde iletişim teknolojisi kaynaklı yeni tür kirlilik ile karşı karşıya kalmaktayız. Çevre sorunlarını ele alan pek çok araştırmada, elektromanyetik radyasyon kirliliğinin çevre sorunlarını oluşturan faktörlerin bir bileşeni olduğu ifade edilmektedir. Vücudumuzun anatomik yapısı, beynimiz elektronik bir makine gibi çalıştığı için çevremizde oluşan elektromanyetik alanlardan etkilenmesi kaçınılmazdır [10],[11].

Sağlıklı bir çevrede yaşayabilmek için, günlük yaşantıda elektromanyetik alan maruziyetinin olabildiğince en düşük seviyede tutulmasının başarılması gerekmektedir. Ev ve ofislerdeki elektromanyetik radyasyon özellikle baz istasyonundan ve yüksek gerilim hattından kaynaklanabilmektedir. Hatta evin elektrik tesisatından veya evin tavan yüksekliği düşüklüğünden, tasarruf ampulden mikro dalga fırından ya da yattığımız odada başımızın bitişiğindeki komşumuzun odasındaki kablosuz erişim anteninden ortaya çıkabilmektedir [12],[13],[14]. Gelişen mobil iletişim sistemleri farklı güç yoğunluğu dağılımı ve frekansları olan baz istasyonlarını gerektirmektedir. Her geçen gün yeni nesil kablosuz haberleşme teknolojileri ile dönüşüm yaşanan dünyada, elektromanyetik kirlilik seviyesi de bu dönüşüme paralel olarak değişim göstermektedir.

Ülkemizde uygulanan limitlere bakıldığında ve şehirlerimizde sürekli yaşam alanları olan evlerde yapılan ölçüm sonuçları incelendiğinde, maalesef bazı evlerde; baz istasyonları ve yüksek gerilim hatlarından kaynaklanan elektromanyetik alanların uygun olmayan miktarlarda olduğu görülmektedir [15]. Bu noktada, halkın bilinçli olması ve söz konusu miktarlardan haberdar olarak kendi önlemini alması elektromanyetik radyasyon maruziyetine yönelik risklerin azaltılmasında önemli rol oynamaktadır.

Alanyazın incelendiğinde, elektromanyetik radyasyon maruziyetine yönelik risk algısını ve önlem almaya yönelik algıyı ölçebilen geçerli ve güvenilir bir ölçeğin bulunmaması bu alandaki ihtiyacı gündeme getirmektedir. Yapılan saha çalışmalarında pek çok ölçüm yapılarak raporlamalar

oluşturulmakta ve bu raporlar ilgili mercilerle paylaşılmaktadır [16],[17]. Bununla birlikte, elektromanyetik radyasyon maruziyetine yönelik algı seviyesinin de geçerli ve güvenilir ve hatta boyutsal olarak ölçülmesi, yapılacak yeni çalışmalar için farkındalık, bilinçlendirme ve önlem alma çalışmalarının planlanmasına yön vereceğinden önem arz etmektedir.

Bu çalışmada, bilimsel yazındaki ihtiyaca yönelik Elektromanyetik Radyasyon Maruziyet Algı (ERMA) seviyesini belirleyebilecek, geçerli ve güvenilir bir ölçeğin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Buradan hareketle, bu çalışmada “Elektromanyetik Radyasyon Maruziyet Algısı Ölçeği’nin (ERMA-Ö) geçerlilik ve güvenilirlik çalışmaları” problem olarak ele alınmıştır.

II. ELEKTROMANYETİK RADYASYON

A. ELEKTROMANYETİK RADYASYON GÜVENLİK LİMİTLERİ

Elektrik güç sistemleri ve elektriksel cihazlardan yayılan non-iyonize EM (EM-Elektromanyetik) alanlar şiddetine ve etki süresine bağlı olarak olumsuz sağlık etkisine neden olabilirler. Bu nedenle non-iyonize radyasyondan insanların korunması için ülkeler yönetmelikler hazırlayarak halkı istem dışı EMR’ye (EMR-Elektromanyetik Radyasyon) maruziyetleri ile ortaya çıkabilecek olumsuzluklardan korumaya çalışır. Ulusal ve uluslararası EMR maruziyet limitleri kişileri riski kontrol etmesinde ve insan sağlığına zararlı olabilecek durumlardan sakınmasında önemli rol üslenirler. Yüksek Gerilim Hatlarından yayılan Elektromanyetik radyasyon konusunda her ülke kendi standartlarına göre limit değerler belirlemiştir. Avrupa Birliği’ne üye ülkeler ve ABD dâhil olmak üzere birçok Dünya ülkesinde ortak olarak kabul gören ve uygulanan limit değerler bulunmaktadır. Bu limit değerler Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından da tanınan ve uluslararası bir komisyon olan ICNIRP (International Commission on Non- Ionizing Radiation Protection – İyonize olmayan radyasyondan koruma komisyonu) tarafından belirlenmiştir. Limit değerler yayılan elektromanyetik radyasyonun frekansına bağlı olarak değişmektedir [18].

Türkiye’de ise, elektromanyetik radyasyon sınır değerlerine yönelik olarak baz istasyonları ve radyo televizyon yayınları için Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu (BTK) ile Yüksek gerilim hatlarından yayılan elektromanyetik alanlar için ise Çevre orman Bakanlığı tarafından yayınlanan yönetmelik bulunmaktadır [19]. BTK yönetmeliğine göre Baz istasyonları için ortamda aşılması gereken sınır değer 42.9 V/m ve Çevre Orman Bakanlığı yönetmeliğine göre yüksek gerilim hatları için manyetik alan sınır değeri de 200 μ T olarak belirlenmiştir.

Bu sınır değerler elektromanyetik alanların insan vücudunda dokularda oluşturacağı sıcaklık artış parametresine göre hazırlanmış olup ısı artışı dışında Elektromanyetik radyasyonun sınır değerlerin altında biyolojik etkisi de olduğu bilinmektedir. İsviçre gibi bazı ülkelerde ülkemize göre daha düşük limitler uygulanmaktadır. Örneğin; ülkemizde 200 μ T olan limit değeri çocuk kreşleri ve yaşam alanlarında İsviçre’de 1 μ T değerindedir. Baz istasyonları için yüksek frekanslardaki ülkemizde 42.9 V/m olan sınır değer 5V/m olarak belirlenmiştir.

Elektromanyetik radyasyon maruziyetinin insan üzerindeki etkilerine yönelik Bioelektromanyetik (BEM), epidemiyolojik araştırmalar (işyeri ve ikamet maruzları) ve laboratuvar deneyleri yapılmaktadır [20]. Buna göre, iyonize etmeyen radyasyonun “ısısal olmayan” bazı etkileri şu şekildedir:

- Kan Beyin Bariyeri (BBB, Blood Brain Barrier) sızıntısı (Alzheimer’s, Parkinson hastalığı, ALS; ADD /ADHD ve diğer sinirsel hastalıklar)
- Nöronların ölümü ve beyin hücrelerinin zarar görmesi
- Kalsiyum akışı
- Kalp ritim bozukluğu ve kalp durması
- Habis ve kötü huylu beyin tümörleri
- Sperm hücrelerinin zarar görmesi ve ölümü
- Büyüme etkilemek ve ölüm

- Kusurlu doğum ve kısırlık
- Akustik neuroma
- Alzheimer's (şayet Alzheimer beyinde yassı şekil gösteren küçük tanecik (plaque)lerin artışıyla ve nörolojik(sinirsel) verici problemlerinden ise, BBB'nin sızıntısı hastalığa yol açmıştır.
- Bunama
- Leukemia ve Lymphoma
- Gelecek nesillere geçen kalıcı genetik etkiler

Uluslararası literatürde bulunan bilimsel araştırmalarda, çocukların $0,3 \mu T$ 'nin üzerindeki manyetik alan değerlerinde bilhassa 6 yaş altındaki çocuklarda kansere yakalanma riskinde yüksek artış olduğu rapor edilmektedir. Bu nedenle Dünya sağlık örgütü, WHO, elektromanyetik alanları sigara gibi 2B sınıfı kanserojen olarak kabul etmektedir (WHO, 2014). Elektromanyetik etkilerden korunmaya yönelik olarak öneriler ise, ekranlama (shielding), topraklama (grounding), bağlama (bonding), filtreleme (filtering), kablolama (cabling) ve fiziksel ayırım (separation) yapılmasının gerekli olduğu belirtilmektedir [21],[22]. Elektromanyetik radyasyon maruziyetine yönelik incelemelerde ev ve ofislerde risk azaltma çalışmalarında, elektromanyetik radyasyon ölçümü yapılarak ölçüm seviyelerinin sınır değerlere göre karşılaştırılması yapılmaktadır [23],[24],[25]. Bu çalışmalar sayesinde, kişiler bireysel olarak tedbir alabilmektedirler.

Ülkemizde yürürlükte olan yönetmelikte baz istasyonlarının çalıştığı frekanslar için geçerli olduğu kanaatine varılan sınır değerler Şekil 1'deki gibidir.

Radyo-TV / GSM Elektrik Alan Limitleri (V/m)	
Radyo-TV (10-400MHz) Ortamın toplamı için: 21 V/m (V/m)	Baz İstasyonları (900MHz/1800 MHz) Ortamın toplamı için: 40,7 V/m
3GHz Üstü Baz İstasyonları (4G-5G) Ortamın toplamı için: 42,9 V/m	

Şekil 1. Ülkemizde Baz İstasyonları İçin Geçerli Elektromanyetik Radyasyon Limitleri.

Günümüzde gelişen mobil iletişim sistemleri farklı güç yoğunluğu dağılımı ve frekansları olan baz istasyonlarını gerektirmektedir. Her geçen gün yeni nesil kablosuz haberleşme teknolojileri ile dönüşüm yaşanan dünyada, elektromanyetik kirlilik seviyesi de bu dönüşüme paralel olarak değişim göstermektedir.

Sonuç olarak, dijital çağda iletişim teknolojilerine olan talebin artmasıyla birlikte, artan kullanıcı sayıları ve buna bağlı olarak uzun tutulan kullanım süreleri elektromanyetik alan kirliliğini artırmaktadır. Buradan hareketle, yeni nesil teknolojik araçların kullanımında farkındalık, bilinçlilik ve önlem almaya yönelik algının oluşması önem arz etmektedir. Hatta elektromanyetik radyasyon maruziyetine yönelik risklerin kendimizle birlikte çevreyi ve etrafımızdaki kişileri etkileyeceği düşünüldüğünde, bilinçli kullanımı sorumluluk olarak ifade etmek yerinde olacaktır.

B. ELEKTROMANYETİK RADYASYON MARUZİYET ALGISI

Elektromanyetik radyasyon gündelik hayatla iç içe geçmiş bir gerçektir. Yaşamın her alanında elektromanyetik radyasyon kirliliğine maruz kalmaktayız. Radyasyon maruziyeti yakınımızda olan bir kaynakla oluşabileceği gibi uzaktaki bir kaynaktan da gerçekleşebilmektedir. Gelişen teknoloji çağında, yaşantımızda bu denli yer alan elektromanyetik radyasyonun varlığı ve yayılımı hakkında bilgi sahibi olmak önemlidir.

Elektromanyetik radyasyon maruziyetine yönelik algı çalışmaları, sahada yapılan ölçüm çalışmalarının bir nevi kamuoyu yoklaması rolündedir. Yapılan araştırmalarda birtakım kavramların birbiriyle karıştırıldığı belirtilmektedir. Bu kavramların, radyasyon, radyoaktif madde, radyon maruziyeti, radyasyonun taşınması, radyasyon yayılımı gibi kavramlar olduğu raporlanmaktadır [26],[27],[28],[29],[30],[31],[32],[33].

Alanyazın incelendiğinde, halkın çeşitli kesimleriyle yürütülmüş, görüş almaya yönelik farkındalık çalışmalarına rastlanmaktadır. 90 lise öğrencisi, 33 velilerden oluşan halk grubu ile yürütülen bir araştırmada, 30 sorudan oluşan açık uçlu anket görüşme formu ile radyasyonun iletimi hakkında görüşler toplanmaya çalışılmıştır. Araştırmada, örnekleme oluşturan öğrencilerin ve halkın radyasyon ve radyoaktiflik kavramlarını karıştırarak birbirinin yerine kullandıkları ortaya çıkmış, yapay radyasyon kaynaklarını da radyoaktif madde olarak bildikleri belirlenmiştir.

Radyasyon farkındalığına yönelik diğer bir araştırma, Gündoğdu ve Kebapçı (2019) tarafından, tıp fakültesi 5. Sınıf hekim adayları ile yürütülmüştür. Buna göre, 50 öğrenciye, radyasyon kaynakları, radyolojik tetkikler, radyasyondan korunmaya yönelik olarak çoktan seçmeli anket formu ile sorular yöneltilmiştir. Araştırmada, iyonize radyasyona yönelik bilgi düzeyinde %70,4 doğru cevabın sağlandığı, fakat gelişmiş ülkelerde iyonizan radyasyon kaynağı olarak doğal radyasyona maruz kalındığına yönelik cevabın yanılgıya düşürdüğü bulunmuştur [27].

Algı çalışmaları kapsamında yapılan diğer araştırmalar incelendiğinde, radyasyon çalışanlarının radyasyon bilinci anketi [33], radyasyonun zararlı etkileri hakkında hastaların bilgi düzeyinin değerlendirilmesi [34], radyasyondan korunma ve radyasyonun biyolojik etkileri konusundaki farkındalığının değerlendirilmesi [35], ameliyathane çalışanlarının radyasyon güvenliğine yönelik bilgi, tutum ve davranışları [36], diş hekimliği öğrencilerinin radyasyondan korunma ve uygulama bilgilerinin değerlendirilmesi [37], tıp fakültesi öğrencilerinin iyonize olmayan radyasyon bilgi farkındalıklarının değerlendirilmesi [38] ve öğrencilerle yürütülmüş daha birçok araştırmaya rastlanmaktadır [39].

Söz konusu araştırmalarda hem iyonize olan hem de iyonize olmayan radyasyon maruziyetine yönelik farkındalığın araştırılması amaçlanırken, bu araştırmalarda çoğunlukla sağlık çalışanlarının / sağlık çalışanı adaylarının işlerinin bir parçası olan iyonize radyasyon ele alınmıştır. Birtakım araştırmalar ise, hastaların birtakım tetkikleri yaptırırken maruz kaldıkları iyonize radyasyon alanlarının farkında olup olmadığına yönelik gerçekleştirilmiştir.

Gündelik hayatta kullanılan mobil cihazlar ve bu cihazlarla birlikte kullanılan birtakım kablosuz cihazlar, evdeki elektronik aygıtlar ve pek çok teknolojiyi ele aldığımızda, hayatımızın her anında iç içe olduğumuz elektromanyetik radyasyon alanlarının farkındalığı çok daha geniş kitleleri etkisi altında bırakmaktadır. İncelemeler yapıldığında, açık uçlu sorular, testler ya da araştırmacılar tarafından oluşturulan anket soruları ile araştırmaların yürütüldüğü görülmektedir. İyonize olmayan elektromanyetik radyasyon maruziyetini ölçebilecek geçerli ve güvenilir bir ölçeğin olmayışı dikkat çekmektedir. Bu durum, iyonize olmayan radyasyon maruziyetine yönelik farkındalık çalışmalarında ölçek ihtiyacını gündeme getirmektedir.

Alanyazın incelendiğinde, radyasyon farkındalık düzeylerini ve radyasyondan korunma bilgilerini belirlemeye yönelik ölçüm yapabilmek için Saraçlı ve Ulucan'ın (2021) geliştirildiği güncel bir ölçeğe rastlanmaktadır [40]. Ölçeğin geçerlilik ve güvenilirlik çalışmaları 580 üniversite öğrencisi ile yapılmış, ölçekte birtakım boyutlar elde edilmiştir (Fizik Bilgisi, Teknik Cihaz Bilgisi, Mesleki Bilgi, Radyasyon Güvenliği Bilgisi/Radyasyondan Korunma Bilgisi). Boyutlarda yer alan, fizik bilgisi, teknik cihaz

bilgisi ve mesleki bilgi gibi konuların akademik bilgileri gerektirmesi, ölçeğin bu bilgilere sahip olan kişilere uygulanabileceğini göstermektedir.

Diğer yandan, gündelik hayatta etrafımızda bulunan cihazların yaydığı radyasyona yönelik farkındalığın tüm bilgi seviyesindeki kişilerde temel düzeyde oluşmasına ön ayak olacak geçerli ve güvenilir bir ölçek ihtiyacı gündeme gelmektedir. Bu çalışmada, bireysel ve toplumsal olarak geniş kitleleri içine alan araştırmalarda kullanılabilecek geçerli ve güvenilir bir Elektromanyetik Radyasyon Maruziyeti Ölçeğinin (ERMA-Ö) geliştirilmesiyle alanyazında yapılan algı çalışmalarındaki ölçek ihtiyacının da karşılanabileceği düşünülmektedir.

III. MATERYAL VE METOT

A. ÇALIŞMA GRUBU

Çalışma grubu yaşı 18 ve üzeri olan 1187 kişi ile oluşturulmuştur. Araştırmada veriler ulaşılabılır örnekleme yolu ile internet aracılığıyla toplanmıştır. Katılımcıların yaş aralığı 18 ile 72 arasında olup yaş ortalaması 29,6'dır. Çalışmanın da konusu olan ölçek geliştirmede gerçekleştirilen faktör analizi gibi çok değişkenli analizlerin gerçekleştirilebilmesi için ulaşılması hedeflenen örneklem büyüklüğüyle ilgili farklı birtakım görüşler bulunmaktadır. Alanyazın incelendiğinde, en az örneklem büyüklüğünün 100 ile 250 arasında olması uygun olduğu, ölçekteki madde sayısının en az beş katı, hatta on katı olması gerektiği gibi görüşler dikkat çekmektedir [41,42,43]. Böylece, en az örneklem büyüklüğüne ulaşılması hedeflenerek veri toplama işlemi yapılan araştırmada 1187 kişiye ulaşılmıştır. Çalışmada geçerlilik ve güvenilirlik analizleri gerçekleştirilecek ölçeğin madde sayısının ilk aşamada 16 olduğu dikkate alındığında, madde sayısının yetmiş katından fazla kişiye uygulama yapılmış olması örneklem sayısı açısından yeterli bulunmuştur. Çalışmada ulaşılan 1187 kişinin %61,1'i kadın (725 kişi), %38,6'sı erkek (458 kişi) katılımcıdır. Katılımcıların %31,5'i (n=374) evli, %67,8'i (n=805) bekarıdır. Öğrenim durumları ise, %62,8'i (n=745) Üniversite, %19,5'i (n=231) Lisansüstü, %10,4'ü (n=123) Yüksekokul, %5,1'i (n=60) Lise, %1,6'sı (n=19) İlköğretim olarak belirlenmiştir.

B. VERİ TOPLAMA ARAÇLARI

Demografik Bilgi Formu: Araştırmacılar tarafından oluşturulan demografik bilgi formunda, katılımcıların cinsiyeti, yaşı, öğrenim bilgileri, sosyal medya kullanım alışkanlıkları gibi bilgilerine yönelik sorular yer almaktadır.

Elektromanyetik Radyasyon Maruziyet Algısı Ölçeği (ERMA-Ö): Elektromanyetik Radyasyon Maruziyet Algısı Ölçeğinin (ERMA-Ö) geçerlilik ve güvenilirlik çalışmaları için öncelikle madde havuzu oluşturulmuş, uzman görüşleri alınmıştır. Ardından, ölçeğin kapsam geçerliliği, açıklayıcı faktör analizi (AFA) ile yapı geçerliliği, ayırt edicilik geçerliliği ve iç tutarlılık güvenilirlik analizleri yapılmıştır.

Ölçeğin madde havuzu, elektromanyetik radyasyon maruziyeti ve buna yönelik risk algısı ile ilgili güncel alanyazın incelenerek oluşturulmuştur. Daha sonra, uzmanların görüşlerine başvurulabilmesi için 16 maddeden oluşan aday ölçeğin yer aldığı uzman görüşü envanteri oluşturulmuş ve 6 uzmanın görüşüne sunulmuştur. Uzmanların 1'i çocuk gelişimi uzmanı, 1'i psikolojik rehberlik ve danışmanlık uzmanı, 2'si Elektrik Elektronik Mühendisi, 1'i Bilgisayar Mühendisi, 1'i Çevre Mühendisi, 1'i İletişim Uzmanı ve 1'i Psikoloji uzmanıdır. Uzman görüşü envanterinde "Maddenin ölçekte kalması uygun", "Madde ölçekte kalabilir ama gereksiz" ve "Maddenin ölçekte kalması uygun değil" seçenekleri yer almaktadır ve sonundaki "yorum" bölümüne değerlendirmeler yazılabilmektedir.

Uzmanlara envanterlerin elektronik posta ile gönderimi sağlanmıştır. Daha sonra, Miles ve Huberman'ın [44] önerdiği formül aracılığıyla maddelerin uyum oranları hesaplanmıştır. Uyum oranı hesaplamaları Huberman'ın belirttiği şekilde gerçekleştirilmiştir. Buna göre, her bir madde için uzman görüşleri değerlendirme toplamının uzman görüşleri sayısının yarısına bölünmesi sağlanmış ve elde edilen

sonuçtan 1 eksiltme ile yapılmıştır. Uyum oranları hesabı için her bir maddenin aldığı puan işe katılmıştır. Buna göre, ilgili madde “maddenin ölçekte kalması uygun” seçeneği 1, “madde ölçekte kalabilir ama gereksiz” seçeneği 0 ile 1 arasında ve “maddenin ölçekte kalması uygun değil” seçeneği de 0 (sıfır) olarak puanlanmıştır. Puanlama sonucunda .80 düzeyinde bir uyumluluk düzeyini yakalamış maddeler, aday ölçeğe alınmıştır. Ek olarak, uzmanların görüş bildirdiği yorum bölümü göz önüne alınarak her bir madde gözden geçirilmiş, yazım ve dilbilgisi açısından düzenlenmiştir.

Uzman görüşü incelemeleri sonrasında, maddelerin ,80 uyum oranını yakaladığı görülmüştür. 16 maddeden oluşan aday ölçek beşli likert tipinde “Hiçbir zaman”, “Nadiren”, “Bazen”, “Sık Sık” ve “Her Zaman” olarak derecelendirilmiştir. Aday ölçek, 2022 yılı Aralık ayında ulaşılabilir örnekleme yoluyla gönüllülük esasına uygun olarak çevrimiçi anket yoluyla katılımcılara uygulanmıştır. Veri toplama aşamasından sonra açımlayıcı faktör analizi (AFA) aşamasına geçilerek uygun yapı elde etme çalışmalarına başlanmıştır.

Açımlayıcı Faktör Analizi (AFA), ölçeğin yapı geçerliliği kapsamında sıklıkla kullanılan istatistiksel hesaplama tekniklerinden biridir. AFA’ya başlanmadan önce, veri setinin faktör analizi için uygun olup olmadığı birtakım testler ile test edilmektedir. Bu işlem için, veri setine alanyazında belirtilen Bartlett testi ve Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) testi uygulanmıştır [45]. Bu testlerin sonucunda, KMO değerinin uygun aralıkta olması ve Bartlett Sphericity değerinin anlamlı olması beklenmektedir. KMO değerinin ,90 ve üzerinde olması “mükemmel”, ,80-,89 aralığında olması “çok iyi”, ,70-,79 aralığında olması “iyi”, ,60-,69 aralığında olması “orta”, ,50-,59 aralığında olması “zayıf”, daha altı ise “kabul edilemez” olarak değerlendirilmektedir. Bartlett Sphericity değerinin anlamlı olması gerekmektedir ($p < ,05$). Belirtilen uygunlukların sağlanması durumunda AFA yapılarak faktör sayısı belirleme işlemine geçilebilmektedir.

Faktör sayısı belirleme işleminde özdeğer istatistiğinden (Eigenvalue) faydalanılmaktadır. Özdeğer istatistiğine göre, bu değer 1’e eşit veya büyük olması faktörleri belirlemektedir. Eğer değer 1’den küçük olursa dikkate alınmamaktadır, yani faktör oluşturmadığı düşünülmektedir [46]. Diğer yandan, faktör analizi sonucunda elde edilen açıklanan varyans oranı sosyal bilimlerde %40-%60 aralığında ise kabul görmektedir [47]. Yapı geçerliliği çalışmalarında ek olarak, elde edilen faktörlerin birbiriyle ve toplam puan ile ilişkisine yani korelasyon değerine de bakılmaktadır. Korelasyon değeri yorumlanırken bu değer 0,30-0,70 arasında olması “orta ilişki”, 0,70’in üzerinde olması “yüksek ilişki” ve 0,30’ın altında olması “zayıf ilişki” olarak değerlendirilmektedir [47].

Daha sonra diğer aşama olan ayırt edicilik geçerliliği çalışmasına geçilmektedir. Bu aşamada ölçülecek özelliğe dair ölçekte yer alan maddelerin ne derece ölçüm özelliğinde olduğu, yani uygunluğu belirlenmektedir ve buna yönelik ayırt edicilik indeksi hesaplanmaktadır.

Bu noktadan hareketle, her bir maddeye verilen yanıtların puan olarak artan şekilde sıralaması yapılarak, üst grup ve alt gruptan %27’lik kesitler alınmaktadır ve iki grup arasındaki fark bağımsız grup t-testi ile incelenmektedir. Çıkan sonuçlar aynı zamanda ölçeğin ne derece tutarlı olduğu hakkında da fikir vermektedir [47]. Böylece bu çalışmada 1187 katılımcıdan sağlanan veriler 439 kişilik iki ayrı gruba ayrılarak fark incelemesi yapılmıştır.

Güvenirlilik çalışmaları aşamasında ise, madde varyanslarına göre hesaplanan madde iç tutarlılık analizleri yapılmış, Cronbach Alpha katsayısı hesaplanmıştır. Yapılan tüm çalışmalar sonucunda, geçerli ve güvenilir ERMA-Ö ortaya çıkmıştır.

C. UYGULAMA

Araştırmaya, Üsküdar Üniversitesi Girişimsel Olmayan Araştırmalar Etik Kurulu tarafından 61351342/Aralık 2022-51 sayı ile etik açıdan uygunluk onayı verilmiştir. Veri toplama işlemi 15-30 Aralık 2022 tarihleri arasında online anket aracılığıyla gönüllülük ilkesine göre yapılmıştır. Çalışma grubu ulaşılabilir örnekleme yoluyla elde edilmiş, 18 yaş ve üzeri bireylerden oluşmuştur. Ankette yer alan sorular, güncel alanyazın incelemesi ve uzman görüşlerinden yararlanılarak oluşturulmuştur.

Böylece, demografik form ile ölçeğin yer aldığı anket formu çevrimiçi ortamda uygulanmıştır. Katılımcıların anketi doldurabilmesi için ortalama 12 dk. yeterli olmuştur.

D. İSTATİSTİKSEL ANALİZ

ERMA-Ö geçerlilik ve güvenilirlik çalışmaları için öncelikle elde edilen 1187 kişilik veri setinin 887 kişiden oluşan bir bölümüne yapı geçerliliği çalışmaları için açımlayıcı faktör analizi (AFA) uygulanmıştır. 300 kişiden oluşan diğer bölümüne ise doğrulayıcı faktör analizi (DFA) uygulanmıştır. Açımlayıcı Faktör Analizi akabinde ölçek boyutları ile ölçeğin ilişkisi Pearson momentler çarpımının korelasyon katsayısı hesaplanarak tespit edilmiştir. Geçerlilik çalışmaları kapsamında ayırt edicilik geçerliliği hesaplamaları yapılmıştır. Bunun için veri setindeki üst grup ve alt gruptan %27'lik dilimler alınarak iki grubun farkı bağımsız grup t-testi ile incelenmiştir ve akabinde ölçeklerin güvenilirlik katsayısı Cronbach Alfa değeri hesaplamaları ile belirlenmiştir. Tüm yapılan geçerlilik ve güvenilirlik analizleri için SPSS 26.0 istatistik programı kullanılmıştır. Doğrulayıcı faktör analizi aşamasında, AMOS programında boyutların birbiri ile ilişkisi ve uyumunun incelenmesi için modelleme yapılmış ve uyum iyiliği değerleri (Ki-kare/serbestlik değeri, RMSEA, NFI, NNFI, CFI, GFI, AGFI) hesaplanmıştır.

IV. BULGULAR

Bu bölümde, Elektromanyetik Radyasyon Maruziyet Algısı Ölçeği (ERMA-Ö) için istatistiksel analizler ve değerlendirmeler yapılmıştır. Ölçeğin geliştirilmesine yönelik kapsam geçerliliği, yapı geçerliliği, ayırt edicilik geçerliliği ve güvenilirlik çalışmalarına yer verilmiştir. Elektromanyetik Radyasyon Maruziyet Algısı Ölçeği (ERMA-Ö) madde havuzu ilk olarak 16 maddeden oluşturulmuştur. Kapsam geçerliliği çalışmaları için uzman görüşleri alınarak disiplinlerarası incelemelerin çalışmaya dahil edilmesi sağlanmıştır. Böylece, 6 uzman, uzman envanteri eşliğinde maddeleri incelemiştir ve uzmanlardan alınan veriler ile madde uyum indeksleri hesaplanmıştır. Çalışmada ,80 uyum oranı aranmış, uygun olan 16 maddenin ölçek havuzunda kalması sağlanmıştır. Böylece, 16 maddeden oluşan aday ölçek 1187 kişiye uygulanarak veri seti elde edilmiştir. Daha sonra, veri setinin içinden alınan 887 kişilik veri setine açımlayıcı faktör analizi (AFA) uygulanmıştır.

ERMA-Ö'nün faktör yapısının belirlenebilmesi için faktör analizi yapılırken, öncelikle verilerin faktör analizi için uygun olup olmadığı Kaiser-Meyer-Olkin katsayısı (KMO) ve Bartlett Küresellik analizleri ile incelenmiştir. Buna göre, KMO katsayısı ,83 bulunmuştur. Bartlett Küresellik Testi sonucu da anlamlı bulunmuştur ($X^2=3790,545$; sd:55; p=0,000). Buna göre, elde edilen değerler verilerin faktör analizi için uygun olduğunu ortaya koymuştur [45]. Buradan hareketle, 16 maddeli aday ölçeğin uygulanmasıyla oluşturulan verilere faktör analizi uygulanmıştır. AFA ile ortaya çıkan özdeğeri (Eigenvalue) 1'den büyük değerler üç faktörlü bir yapı oluşturmuştur. Özdeğer istatistiğine göre, ölçeğin faktörlü bir yapı oluşturabilmesi için özdeğer 1'den büyük olmalıdır.

Tablo 1. Faktör Yapısı ve Açıklanan Varyans Oranı.

Boyutlar	Özdeğer	Varyans	Yığılmalı Varyans
1. Boyut	3,89	35,40	35,40
2. Boyut	1,40	12,72	48,13
3. Boyut	1,04	9,51	57,64

Tablo 1 incelendiğinde, özdeğeri 3,89 olan birinci faktörün açıkladığı varyans oranı %35,4; özdeğeri 1,40 olan ikinci faktörün açıkladığı varyans oranı %12,7; özdeğeri 1,04 olan üçüncü faktörün açıkladığı varyans oranı %9,5'tir. Faktör sayısı belirleme işleminden sonra faktörler ile maddelerin ilişkisinin belirlenebilmesi için Varimax Rotasyon Tekniği tercih edilmiştir.

Tablo 2. ERMA-Ö Maddelerinin Faktör Yük Değerleri.

Maddeler	Boyut 1	Boyut 2	Boyut 3
M4- Elektromanyetik kirlilik daima endişe ettiğim bir çevre sorunudur.	,85		
M2- Evimin yakınındaki baz istasyonlarından yayılan elektromanyetik radyasyonun ailemi etkileyeceğini düşünürüm.	,82		
M3- Evimin çok yakınında yüksek gerilim hattı olsa endişelenirim.	,74		
M11- Elektromanyetik radyasyon yayan cihazlardan mümkün olduğunca uzak dururum.	,53		
M15- Cep telefonumda Airpod (kablolu) yerine kablosuz kulaklık tercih ederim.		,69	
M13- Elektromanyetik radyasyondan korunmak için saç kurutma makinasını az kullanırım.		,65	
M14- Yüksek gerilim hatları ve baz istasyonu yakınından ev almak veya kiralamak istemem.		,59	
M12- Yüksek gerilim, baz istasyonu ve trafo bulunan parklarda çocukların oynamaması gerektiğini düşünürüm.		,59	
M5- Elektromanyetik kirlilik endişe ettiğim bir çevre sorunudur. Ancak artık alıştım.			,68
M10- Yatarken cep telefonumu baş ucunda tutarım.			,66
M6- Elektromanyetik kirlilik bir problem olmakla birlikte onu engellemek için bir şey yapamayacağımı biliyorum.			,66

Tablo 2’de yer aldığı gibi faktör yük değerleri maddelerin ilgili boyutu açıklayan katsayı değerleridir. Maddelerin faktör yük değerleri alt kesim noktası ,50 olarak belirlenerek faktör yapısı serbest bırakıldığında, binişiklik gösteren maddeler ve düşük faktör yükü alan maddeler gözlenmiştir. Buna göre, 5 madde (1,7,8,9,16) ölçekten çıkartılmış, ilk aşamada 16 maddeli olan aday ölçeğin bu aşamada 11 maddeye indiğinde uygun yapı oluşturduğu anlaşılmıştır.

Faktör yük değerleri analiz edildiğinde, birinci faktörün 4 maddeden oluştuğu, madde yük değerinin en yüksek ,85 ve en düşük ,53 olduğu görülmektedir. İkinci faktörün 4 maddeden oluştuğu, madde yük değerinin en yüksek ,69 ve en düşük ,59 olduğu görülmektedir. Üçüncü faktörün ise, 3 maddeden oluştuğu, madde yük değerinin en yüksek ,68 ve en düşük ,66 olduğu gözlenmektedir. Ölçeğin boyutsal yapısının ortaya çıkmasından sonra, boyutlara dağılan maddelerin içerikleri incelenerek boyutlar isimlendirilmiştir. Ayrıca, ERMA-Ö maddeleri faktör sırasına göre yeniden artan şekilde numaralandırılmış olup 5’li likert türünde “Hiçbir Zaman”, “Nadiren”, “Bazen”, “Sık Sık” ve “Her Zaman” olarak derecelendirilmiştir (Ek-1).

Tablo 2’de görüldüğü gibi, ERMA-Ö’de yer alan 2, 3, 4, 11. Maddeler birinci boyutu oluşturmuştur. Maddelerin içerikleri incelendiğinde “*Farkındalık*” ile ilgili olduğuna karar verilmiştir. Bu boyutta yer alan maddelerin içerikleri ise; “Evimin yakınındaki baz istasyonlarından yayılan elektromanyetik radyasyonun ailemi etkileyeceğini düşünürüm”, “Evimin çok yakınında yüksek gerilim hattı olsa endişelenirim”, “Elektromanyetik kirlilik daima endişe ettiğim bir çevre sorunudur”, “Elektromanyetik radyasyon yayan cihazlardan mümkün olduğunca uzak dururum” şeklindedir.

ERMA-Ö’de yer alan 12, 13, 14, 15. Maddeler ikinci boyutu oluşturmuştur. Maddelerin içerikleri incelendiğinde, “*Bilinçlilik*” ile ilgili olduğu anlaşılmaktadır. Buna göre maddelerin içeriği; “Yüksek gerilim, baz istasyonu ve trafo bulunan parklarda çocukların oynamaması gerektiğini düşünürüm”, “Elektromanyetik radyasyondan korunmak için saç kurutma makinasını az kullanırım”, “Yüksek gerilim hatları ve baz istasyonu yakınından ev almak veya kiralamak istemem”, “Cep telefonumda Airpod (kablolu) yerine kablolu kulaklık tercih ederim” şeklindedir.

ERMA-Ö’de yer alan 5, 6, 10. Maddelerin üçüncü boyutu oluşturduğu görülmektedir. Madde içerikleri incelendiğinde “*Endişe*” ile ilgili olduğuna karar verilmiştir. Maddelerin içerikleri ise; “Elektromanyetik kirlilik endişe ettiğim bir çevre sorunudur. Ancak artık alıştım”, “Elektromanyetik kirlilik bir problem olmakla birlikte onu engellemek için bir şey yapamayacağımı biliyorum”, “Yatarken cep telefonumu baş ucunda tutarım” şeklindedir. ERMA-Ö boyut belirleme ve boyut isimlendirme çalışmaları akabinde, elde edilen boyutların birbiri ve ERMA-Ö ile ilişkisi Pearson Korelasyon katsayısı hesaplanarak incelenmiş Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. ERMA-Ö ve Boyutlarının Birbiriyle İlişkisi.

Alt Ölçek/Ölçek	Farkındalık	Bilinçlilik	Endişe
Bilinçlilik	,57		
Endişe	,35	,39	
ERMA-Ö	,83	,81	,58

Tablo 3’te görüldüğü gibi, faktörlerin birbiri ve ölçek toplamı ile ilişkisine yönelik Pearson Korelasyon katsayıları hesaplanmıştır. Korelasyon katsayıları yorumlanırken, 0,30-0,70 arasındaki ilişki değeri “orta”; 0,70 üzerindeki değerlerin “yüksek” ilişkiyi, 0,30’un altında ise “zayıf” ilişkiyi gösterdiği belirtilmektedir [46]. Buna göre, “Farkındalık” ile “Bilinçlilik” ilişkisi orta seviyede (r: ,57); “Farkındalık” ile “Endişe” ilişkisi orta seviyede (r: ,35); “Bilinçlilik” ile “Endişe” ilişkisi orta seviyede (r: ,39) bulunmuştur. Bununla birlikte, “Farkındalık” ve “Bilinçlilik” boyutları ile “ERMA-Ö” ilişkisi yüksek seviyede çıkmıştır (r: ,83; r: ,81). “Endişe” ve “ERMA-Ö” ilişkisi ise, orta seviyede (r: ,58) bulunmuştur.

Daha sonra geliştirilen ölçeğin ayırt edicilik geçerliliği çalışması için faktörler ve ölçek toplamının %27’lik üst grubu ile %27’lik alt grubu alınarak bağımsız grup t-testi ile aradaki farkın anlamlı olup olmadığı incelenmiştir. Buna göre, 1187 katılımcılı veri setinin %27’si 439 olarak hesaplanmış olup en yüksek alan ve en düşük puan alan 439’arlık gruplar oluşturulmuştur. Yapılan bağımsız grup t-testi Tablo 4’te yer aldığı gibi anlamlı sonuçlanmıştır.

Tablo 4. ERMA-Ö’nün Ayırt Edicilik Geçerliliği.

Ölçek/ Boyutlar	Grup	N	X	SS	Sd	t	p
Farkındalık	Üst Grup	439	17,45	1,45	876	68,71	,000

Ölçek/ Boyutlar	Grup	N	X	SS	Sd	t	p
	Alt Grup	439	8,89	2,16			
Bilinçlilik	Üst Grup	439	17,68	1,45			
	Alt Grup	439	9,29	2,25	876	65,42	,000
Endişe	Üst Grup	439	10,98	1,54			
	Alt Grup	439	5,44	1,23	876	58,73	,000
ERMA-Ö	Üst Grup	439	42,31	3,68			
	Alt Grup	439	27,63	3,75	876	58,47	,000

Bu doğrultuda, ölçekten alınabilecek en düşük puan 11, en yüksek puan ise 55'tir. Bu çalışmada 1187 katılımcının ortalama puanı 34,96 bulunmuştur. AFA ile boyutsal yapının ortaya çıkmasından sonra, ERMA-Ö'nün doğrulayıcı faktör analizi aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada, açımlayıcı faktör analizinde elde edilen faktörlü yapının doğrulanması amaçlanmıştır. 1187 kişilik veri setinden ayrılan 300 kişilik veri seti ile 11 maddeli ERMA-Ö'nün modellenmesi yapılmış, uyum iyiliği değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 5. ERMA-Ö Uyum İyiliği İndeks Değerleri.

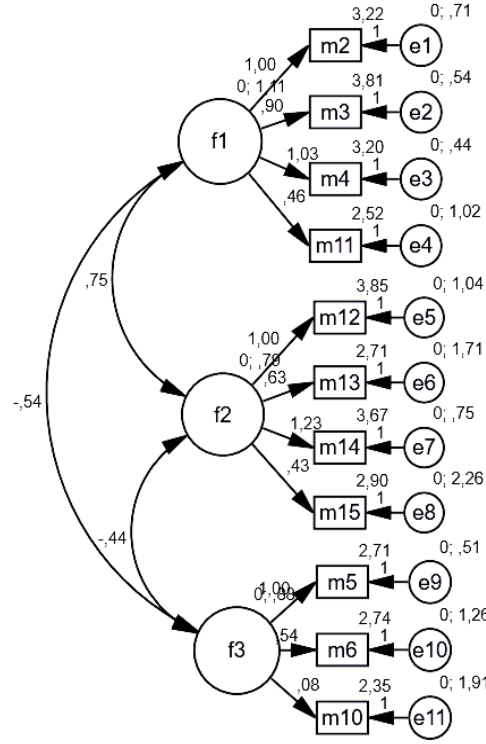
Uyum İyiliği İndeksi	Kabul Edilebilir Uyum İyiliği İndeks Değerleri	ERMA-Ö Uyum İyiliği Değerleri
X^2/sd	<3	120,661/41=2,94
RMSEA	<0,08	0,07
NFI	>0,90	0,91
NNFI	>0,95	0,92
CFI	>0,95	0,96
GFI	>0,90	0,92
AGFI	>0,85	0,87

Tablo 5, ERMA Ölçeğinin uyum iyiliği indeks değerlerini göstermektedir. Yapılan doğrulayıcı faktör analizi hesaplamalarında, Ki-kare/serbestlik değeri; df: 2,94; RMSEA: 0,07; NFI: 0,91; NNFI: 0,92; CFI: 0,96; GFI:0,92 ve AGFI: 0,87 olarak bulunmuştur. Böylece modelin kabul edilebilir uyum iyiliği değerlerini karşıladığı görülmüştür [46]. Ölçek model yapısı Şekil 2'de; standardize faktör yükleri (estimate) Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Standardize faktör yükleri (estimate)

Faktör	Madde	Standardize Faktör Yüğü (Estimate)
Farkındalık	M2	0,78
	M3	0,79
	M4	0,85
	M11	0,43
Bilinçlilik	M12	0,65

Faktör	Madde	Standardize Faktör Yüğü (Estimate)
	M13	0,39
	M14	0,78
	M15	0,54
EndiŖe	M5	0,79
	M6	0,50
	M10	0,55



Ŗekil 2. ERMA Ölçeği Modeli.

Son olarak, ölçeğin güvenilirlik alıŖmaları aŖamasına geçildiğinde, ERMA-Ö'nün boyutları ve toplamının madde iç tutarlılık katsayı hesaplamaları yapılmıŖtır. Tablo 7'de iç tutarlılık güvenilirliği hesaplamaları verilmiŖtir. Buna göre, ölçeğin boyutları ile ölçek toplamının madde sayıları ve Cronbach Alpha Katsayıları yer almaktadır. ERMA-Ö'nün iç tutarlılık katsayısı Cronbach Alpha değeri ,77 olarak bulunmuŖtur ve ölçeğin güvenilirliğe sahip olduğu anlaŖılmıŖtır [47].

Tablo 7. ERMA-Ö ve Boyutların Güvenirlikleri.

Ölçek/Boyutlar	Madde Sayısı	Cronbach Alpha Katsayısı
Farkındalık	4	,82
Bilinçlilik	4	,74
EndiŖe	3	,64
ERMA-Ö	11	,77

ERMA-Ö'nün boyutsal güvenilirliği incelendiğinde, Cronbach Alpha değeri *Farkındalık* boyutu için ,82, *Bilinçlilik* boyutu için ,74, *Endişe* boyutu için ,64 olarak bulunmuştur. Böylece boyutların da güvenilir olduğu sonucuna varılmıştır.

V. SONUC

Bu çalışmada, elektromanyetik radyasyon maruziyetine yönelik algının boyutsal olarak ölçülebilmesi için geçerli ve güvenilir bir ölçek geliştirmek amaçlanmıştır. Her ne kadar günlük yaşantımızda hayatımızı kolaylaştırır da adeta bir parçamız haline gelen, iç içe olduğumuz teknolojik aygıtların oluşturduğu elektromanyetik radyasyon alanına maruz kalmaktayız. Bu durumun ne kadar farkında olduğumuz sorgulandığında ise, geçerli ve güvenilir ölçme araçlarıyla yapılacak kapsamlı araştırmalara ihtiyaç olduğu ortaya çıkmaktadır.

Araştırmalarda çoğunlukla tıbbi cihazların yaydığı iyonize elektromanyetik radyasyon maruziyetinin konu alındığı ve bu çalışmaların sağlık çalışanları, sağlık çalışanı adayları olan öğrenciler ve hastalar ile yürütüldüğü görülmektedir. Yine çalışmalarda, farkındalık başlığı kullanılarak cihazlara yönelik bilgi düzeylerinin, güvenlik önlemlerinin hedef kitleler tarafından bilinme seviyesi tespit edilmiştir. Ve hatta bir araştırmada, Saraçlı ve Ulucan (2021) tarafından geliştirilmiş, radyasyon maruziyetine yönelik geçerli ve güvenilir bir ölçek geliştirme çalışmasına rastlanmış olup *fizik bilgisi, teknik cihaz bilgisi, mesleki bilgi, radyasyon güvenliği bilgisi/radyasyondan korunma bilgisi* olarak teknik bilgi seviyelerini de belirleyebilecek dört faktörlü ölçek üretilmiştir. Ölçek geliştirme çabasında, görüldüğü gibi iyonize radyasyon yayılımı da dikkate alınarak, teknik bilgi ölçümü dikkate alınmıştır. Bu durum hedef kitlenin ölçekte beklenen bilgi seviyesine uygun seçilmesini gerekli kılmaktadır [40].

Bu çalışmada geliştirilen *Elektromanyetik Radyasyon Maruziyeti Algısı Ölçeği (ERMA-Ö)*, yediden yetmişe herkese uygulanabilecek, alan araştırmalarındaki ölçek ihtiyacını karşılayabilecek bir ölçek olarak alanyazına sunulmuştur. İyonize olmayan radyasyon yayan tüm elektronik cihazlara yönelik farkındalık, bilinçlilik ve endişe boyutlarını ölçebilecek geçerli ve güvenilir bir ölçek olarak geliştirilen ERMA-Ö'nün, bu yönüyle geniş kitlelere uygulanabilmesi amaçlanmıştır.

Araştırmada, 11 madde ve üç faktörlü olarak geliştirilen ERMA-Ö'nün boyutsal yapısı aynı zamanda AMOS programında yapılan modelleme ile elde edilen uyum iyiliği değerleri ile doğrulanmıştır. Güvenilirlik çalışmalarında ölçeğin toplam iç tutarlılık güvenilirlik katsayısı ,77 bulunmuştur. ERMA-Ö için de, her yeni ölçekte olduğu gibi, farklı örneklem gruplarında tekrar uygulanarak geçerlilik ve güvenilirlik çalışmalarının tekrarlanmasına ihtiyaç vardır. Çalışmada gerçekleştirilen geçerlilik ve güvenilirlik çalışmalarında ERMA-Ö'nün geçerli ve güvenli olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada geliştirilen ERMA-Ö'nün ileride yapılacak elektromanyetik radyasyon maruziyeti algısını ölçmeye yönelik çalışmalarda fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

VI. KAYNAKLAR

[1] O. Çerezci, *Görülmez-Duyulmaz risk: Elektromanyetik alan kirliliği*, Bursa, Türkiye: Nilüfer Belediyesi Yayınları, 2017.

[2] R. Adey, "Bioeffects of mobile communications fields: possible mechanisms for cumulative dose" in *Mobile Communications Safety*, London, England: Chapman & Hall, 1997, pp. 95–131.

[3] K. Atakır, G. Özevci ve B. Ceyhan, "Elektromanyetik radyasyon ve insan sağlığına etkileri," *Environmental Toxicology and Ecology*, c. 2, s. 1, ss. 9–21, 2022.

- [4] S. Daşdağ, *Dalga dalga geliyorlar*, İstanbul, Türkiye: Hay Kitap, 2011.
- [5] A. Türkkan, K. Pala, O. Çerezci ve Z. Kartal, *Elektromanyetik alan ve sağlık etkileri*, Bursa, Türkiye: Bursa Nilüfer Belediyesi Yayınları, 2012.
- [6] N. E. Wertheimer, “Electrical wiring configuration and childhood cancer”. *American Journal of Epidemiology*, vol.109, pp. 273–284, 1979.
- [7] O. Çerezci, Ş.Ç. Yener, B. Kanberoğlu ve A.Y. Çitkaya, “Kentsel dönüşüm ve elektromanyetik kirliliğin azaltılması”, *EMANET 2013 (Elektromanyetik Alanlar ve Etkileri Sempozyumu)*, İstanbul, Türkiye, 2013, ss. 331–335.
- [8] O. Çerezci, B. Kanberoğlu ve Ş.Ç. Yener, “Yüksek gerilim hatlarından yayılan istem dışı elektromanyetik kirlilik ölçümleri,” *Çevre ve Halk Sağlığı için EMANET 2011 (Elektromanyetik Alanlar ve Etkileri Sempozyumu)*, İstanbul, Türkiye, 2011, ss. 217–220.
- [9] Ş.Ç. Yener, O. Çerezci ve A.Y. Çitkaya, “Yüksek gerilim ve trafolardan kaynaklanan çevremizdeki manyetik alanların risk analizi,” *EMANET 2015 (Elektromanyetik Alanlar ve Etkileri Sempozyumu)*, Mersin, Türkiye, 2015.
- [10] J. D. Brain, R. Kavet, D. L. McCormick, C. Poole, L. B. Silverman, T. J. Smith, P. A. Valberg, R. A. Van Etten and J. C. Weaver, “Childhood leukemia: Electric and magnetic fields as possible risk factors,” *Environ Health Perspect*, vol. 111, no. 7, pp. 962–970, 2003.
- [11] Z. D. Yakıncı, “Elektromanyetik alanın insan sağlığı üzerindeki etkileri,” *T.C.İnönü Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu Dergisi*, c. 4, s. 2, ss. 44–55, 2016.
- [12] F.S. Barnes and B. Greenebaum, *Handbook of biological effects of electromagnetic fields 3th Ed. biological and medical aspects of electromagnetic fields*, Taylor & Francis Group, 2007.
- [13] A.L. Galeev, “The effects of microwave radiation from mobile telephones on humans and animals,” *Neuroscience and Behavioral Physiology*, vol. 30, no. 2, pp. 187–194, 2000.
- [14] W.Y.H. Riadh, *Bioeffect and therapeutic applications of electromagnetic energy*, CRC Press Taylor & Francis Group, 2008.
- [15] Ş. Özen, S. Helhel ve Ö.H. Çolak, “Electromagnetic field measurements of radio transmitters in urban area and exposure analyses,” *Microwave and Optical Technology Letters*, s. 49, ss. 1572–1578, 2007.
- [16] T. Karadağ, A.R. Özdemir ve T. Abbasov, “Bir üniversite yerleşkesinde uzun süreli elektromanyetik alan ölçümleri ve kirlilik haritaları,” *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 20, s. 8, ss. 314–318, 2014.
- [17] U. Sorgucu ve I. Develi, “Measurements and Analysis of Electromagnetic Pollution Generated by GSM-900 Mobile Phone Networks in Erciyes University,” Turkey. *Electromagnetic Biology and Medicine*, c. 31, s. 4, ss. 404–415, 2012.
- [18] WHO (2014, December 22). *Health and environmental effects of exposure to static and time varying electric and magnetic fields*. World Health Organization [Online]. Available: http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/63860/1/WHO_EHG_97.14.pdf?ua=1
- [19] N. Akçam ve G.S. Şen, “Hava araçlarında elektromanyetik ışımanın personele zararları,” *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 20, s. 8, ss. 304–309, 2014.

- [20] N. Diler, M. Özker ve G. Özgürbüz, “Teknomerkez araştırma raporu,” BEM (Biyoelekromanyetik), İstanbul, Türkiye, ss. 3–16, 2009.
- [21] L. Gürel, “Savunma sistemlerinde elektromanyetik uyumluluk (EMC) ve EMC eğitimi,” *Savunma Sanayi Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, 2000.
- [22] F. Üstüner, “EMI önlemleri eğitim raporu,” *Tübitak UEKAE Ulusal Elektronik ve Kriptoloji Araştırma Enstitüsü*, Ankara, Türkiye, ss. 2–5, 2006.
- [23] Ç. Kurnaz ve T. Aygün, “Elektromanyetik Kirlilik Seviyesinin Belirlenmesi: Ankara Örneği,” *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 6, s. 2018, ss. 650–659, 2018.
- [24] T. Persson, C. Törnevik, L.E. Larsson and J. Lovén, “Output power distributions of terminals in a 3g mobile communication network,” *Bioelectromagnetics*, vol. 33, no. 4, pp. 320–325, 2012.
- [25] F. Üstüner, “Elektromanyetik uyumluluğa giriş ve temel kavramlar eğitim raporu,” *Tübitak UEKAE Ulusal Elektronik ve Kriptoloji Araştırma Enstitüsü*, Ankara, Türkiye, ss. 1–10, 2007.
- [26] H. Ağbulut ve M. Oktay, “Radyasyonun taşınması ve yayılımı hakkında öğrencilerin ve halkın görüşleri,” *Marmara Üniversitesi Atatürk Eğitim Fakültesi Eğitim Bilimleri Dergisi*, s. 44, ss. 1–13, 2016.
- [27] E. Gündoğdu ve M. Kebapçı, “5. Sınıf tıp fakültesi öğrencilerinde radyasyon farkındalığı,” *Kocatepe Tıp Dergisi*, s. 20, ss. 250–254, 2019.
- [28] M. Hammick, A. Tutt and D.M. Tait, “Knowledge and perception regarding radiotherapy and radiation in patients receiving radiotherapy: A qualitative study,” *European Journal of Cancer Care*, vol. 7, no. 2, pp. 103–112, 1998.
- [29] E.K. Henriksen, “Laypeople’s understanding of radioactivity and radiation,” *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 64, no. 3-4, pp. 191–196, 1996.
- [30] E.K. Henriksen and D. Jorde, “High school students’ understanding of radiation and the environment: Can museums play a role?,” *Science Education*, vol. 85, no. 2, pp. 189–206, 2001.
- [31] S. Neumann and M. Hopf, “Students’ conceptions about ‘radiation’: Results from an explorative interview study of 9th grade students,” *Journal of Science Education and Technology*, vol. 21, no. 6, pp. 826–834, 2012.
- [32] S. Ramanathan and J. Ryan, “Radiation awareness among radiology residents, technologists, fellows and staff: where do we stand?,” *Insights Imaging*, no. 6, pp. 133–9, 2015.
- [33] A. M. Şenışık, D. Tunçman Genç ve E. Mutlu, “Radyasyon çalışanlarının radyasyon bilinci anketi,” *Online Türk Sağlık Bilimleri Dergisi*, c. 5, s. 1, ss. 63–70, 2020.
- [34] Ö. Güdük, C.H. Kılıç ve Ö. Güdük, “Radyasyonun zararlı etkileri hakkında hastaların bilgi düzeyinin değerlendirilmesi: Bir hastane örneği,” *Adıyaman Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi*, c. 4, s. 2, ss. 874–889, 2018.
- [35] M. Başaran ve E. Bozdemir, “Diş hekimliği uzmanlık ve son sınıf öğrencilerinin radyasyondan korunma ve radyasyonun biyolojik etkileri konusundaki farkındalığının değerlendirilmesi,” *Düzce Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 11, s. 2, ss. 165–170, 2021.

- [36] F. Vural, Ş. Fil, S. Çiftçi, A. A. Dura, F. Yıldırım ve R. Patan, “Ameliyathanelerde radyasyon güvenliği: Çalışan personelin bilgi, tutum ve davranışları,” *Balıkesir Sağlık Bilimleri Dergisi*, c. 1, s. 3, ss. 131–136, 2012.
- [37] G. Akay, K. Güngör ve Ö. Üçok, “Diş hekimliği öğrencilerinin radyasyondan korunma ve uygulama bilgilerinin değerlendirilmesi,” *Selçuk Dental Journal*, ODMFR 2019 Kongre Kitapçığı Özel Sayısı, ss. 1–6, 2019.
- [38] L. Geofery, M. Basirat, C.U. Eze, N.I. Chigozie, A. Auwal, O. Kalu, N.F. Bobuin, N. Mohammed, A.S. Moi and A.G. Mathew, “Evaluation of the knowledge and awareness of non-ionizing radiation among final year students of college of medical science university of maiduguri,” *International Research Journal of Pure and Applied Physics*, vol. 3, no. 3, pp. 8–14, 2015.
- [39] O. Sarıgöz, A. Karakuş ve K. İrak, “Meslek yüksekokulu öğrencilerinin elektromanyetik kirlilik ile ilgili görüşlerinin değerlendirilmesi,” *Ejovoc (Electronic Journal of Vocational Colleges)*, c. 2, s. 2, ss. 1–8, 2012.
- [40] S. Saraçlı and O. Ulucan, “Examination of effects of radiation awareness on protection from radiation via structural equation modeling,” *Cumhuriyet Science Journal*, vol. 42, no. 2, pp. 434–440, 2021.
- [41] Ş. Kalaycı, *SPSS uygulamalı çok değişkenli istatistik teknikleri*. Ankara, Türkiye: Asil Yayın Dağıtım, 2010.
- [42] K. Preacher and R.C. MacCallum, “Exploratory factor analysis in behavior genetics research: factor recovery with small sample sizes,” *Behav Genet*, vol. 32, no. 2, pp. 153–61, 2002.
- [43] E. Tavşancıl, *Tutumların ölçülmesi ve SPSS ile veri analizi*. Ankara, Türkiye: Nobel Yayıncılık, 2002.
- [44] E. Tavşancıl, E. ve E. Aslan, *Sözel, yazılı ve diğer materyaller için içerik analizi ve uygulama örnekleri*, İstanbul, Türkiye: Epsilon Yayınları, 2021.
- [45] S. Sharma, *Applied Multivariate Techniques*. New York: John Wiley&Sons Inc, 1996.
- [46] H. Tinsley and D. Tinsley, “Uses of factor analysis in counseling psychology research,” *J Couns Psychol*, vol. 34, no. 4, pp. 414–424, 1987.
- [47] Ş. Büyüköztürk, *Sosyal bilimler için veri analizi el kitabı*. Ankara, Türkiye: Pegem Atf İndeksi, 2018.

VII. EK

A. ELEKTROMANYETİK RADYASYON MARUZİYET ALGI ÖLÇEĞİ (ERMA-Ö)

ERMA-Ö, elektromanyetik radyasyon maruziyetine yönelik algılar ile önlem almaya yönelik algıları boyutsal olarak ölçmek için geliştirilmiş bir ölçektir.

		Hiçbir Zaman	Nadiren	Bazen	Sık Sık	Her Zaman
1	Elektromanyetik kirlilik daima endişe ettiğim bir çevre sorunudur.					
2	Evimin yakınındaki baz istasyonlarından yayılan elektromanyetik radyasyonun ailemi etkileyeceğini düşünürüm.					
3	Evimin çok yakınında yüksek gerilim hattı olsa endişelenirim.					
4	Elektromanyetik radyasyon yayan cihazlardan mümkün olduğunca uzak dururum.					
5	Cep telefonumda Airpod (kablolu) yerine kablosuz kulaklık tercih ederim.					
6	Elektromanyetik radyasyondan korunmak için saç kurutma makinasını az kullanırım.					
7	Yüksek gerilim hatları ve baz istasyonu yakınından ev almak veya kiralamak istemem.					
8	Yüksek gerilim, baz istasyonu ve trafo bulunan parklarda çocukların oynamaması gerektiğini düşünürüm.					
9	Elektromanyetik kirlilik endişe ettiğim bir çevre sorunudur. Ancak artık alıştım.					
10	Yatarken cep telefonumu baş ucunda tutarım.					
11	Elektromanyetik kirlilik bir problem olmakla birlikte onu engellemek için bir şey yapamayacağımı biliyorum.					

Ölçekteki; 1, 2, 3, 4. Maddeler “Farkındalık” isimli birinci boyutu; 5, 6, 7, 8. Maddeler “Bilinçlilik” isimli ikinci boyutu; 9, 10, 11. Maddeler “Endişe” isimli üçüncü boyutu oluşturmaktadır. ERMA-Ö’nün 9, 10, 11 numaralı maddeleri yani üçüncü boyutun tüm ters kodlanmaktadır (1 yerine 5; 2 yerine 4; 4 yerine 2; 5 yerine 1).

B. ERMA-Ö DEĞERLENDİRME TABLOSU



Alt Ölçek/Ölçek	Puan Aralığı	ERMA Seviyesi
Farkındalık	4-9	Az
	10-15	Orta
	16-20	Yüksek
Bilinçlilik	4-9	Az
	10-15	Orta
	16-20	Yüksek
Endişe	3-6	Az
	7-11	Orta
	12-15	Yüksek
ERMA-Ö	11-25	Az
	26-40	Orta
	41-55	Yüksek



Düzce University Journal of Science & Technology

Research Article

Determination of Mechanical Properties of Walls Produced with Different Wall and Mortar Materials

 Behcet DÜNDAR^{a,*},  Hanifi TOKGÖZ^b

^a İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Osmaniye, TÜRKİYE

^b İnşaat Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: behcetdundar@osmaniye.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1374665

ABSTRACT

Walls produced using different masonry materials and mortars are among the structural elements that carry horizontal and vertical loads. In this context, the mechanical properties of walls produced with different wall and mortar materials have been investigated. In the production of wall samples, Harman Brick (HB), Masonry Brick (MB) and Bimsblok (BB) were chosen as the mesh material Reinforced Mortar (RM) and Polypropylene Fiber Added Mortar (PM) were used as binding materials in the construction of the walls produced in 900x900 mm dimensions. The volumetric mixing ratios of the mortar used were prepared as sand:cement:lime=6:1:1, according to the TSE 2510 standard. The bricked wall samples were subjected to diagonal loading tests after being kept in the laboratory environment for 28 days. Flexural and compressive strengths of the mortars used in wall building, displacement values of the walls, shear strength, rigidity modulus, energy absorption capacity and collapse patterns of the walls were determined. The graphs of the displacement values obtained by examining the behaviors observed in the test samples and the cracks formed were interpreted. It was observed that the shear strength of the walls built using PM was higher than the shear strength of the walls built using RM. The energy absorption capacity was highest in the fibrous specimen laid with masonry bricks. The average vertical load value of the wall specimens built with fibrous mortar, which is the BB of the masonry material, was 30% higher than the specimens built with non-fiber mortar.

Keywords: Fiber, Mortar, Shear strength, Walls

Farklı Duvar ve Harç Malzemeleri İle Üretilen Duvarların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

ÖZ

Farklı örgü malzemeleri ve harçlar kullanılarak üretilen duvarlar, yatay ve düşey yükleri taşıyan yapı elemanları arasında yer almaktadır. Bu kapsamda yapılan çalışmada farklı duvar ve harç malzemeleri ile üretilen duvarların mekanik özellikleri araştırılmıştır. Duvar numunelerinin üretilmesinde Harman Tuğla (HT), Yığma Tuğla (YT) ve Bimsblok (BB) örgü malzemesi olarak seçilmiştir. 900x900 mm boyutlarında üretilen duvarların örülmesi içinde bağlayıcı malzeme olarak, Takviyeli Harç (TH) ve Polipropilen Lif Katkılı Harç (PH) kullanılmıştır. Kullanılan harcın hacimsel olarak karışım oranları TSE 2510 standardına göre, kum:çimento:kireç=6:1:1 olacak şekilde hazırlanmıştır. Örülen duvar numuneleri laboratuvar ortamında 28 gün bekletildikten sonra diyagonal yükleme deneyine tabi tutulmuştur. Duvar örülmesinde kullanılan harçların eğilme ve basınç dayanımları ile duvarların deplasman değerleri, kayma dayanımı, rijitlik modülü, enerji yutma kapasitesi ve duvarların göçme biçimleri

belirlenmiştir. Deney numunelerinde gözlenen davranışlar ve oluşan çatlaklar incelenerek elde edilen deplasman değerlerinin grafikleri yorumlanmıştır. PH kullanılarak örülen duvarların kayma dayanımı, TH ile örülen duvarların kayma dayanımına göre daha fazla olduğu görülmüştür. Enerji yutma kapasitesi ise yığma tuğla ile örülen lifli numunede en fazla meydana gelmiştir. Örgü malzemesinin BB olan lifli harçla örülen duvar numunesi lifsiz harçla örülen numunelerle göre % 30 oranında daha fazla ortalama düşey yük değeri alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Lif, Harç, Duvar, Kayma dayanımı,

I. INTRODUCTION

Walls are structural elements created by laying natural and artificial stones or blocks with a mineral binder, with or without mortar. In wall construction, mesh materials such as MB, HB, BB and aerated concrete and also mortars as binders are used. MB, which is among the masonry materials and is widely used in residences in rural areas, is generally constructed using binding materials called bricks and mortar. BBs, which are among the wall knitting materials, are a preferred material due to their fire resistance, high sound and heat insulation and low unit volume weight [1]. The mesh materials and mortars used in wall construction have significant effects on the strength of walls [2], [3]. Walls made of MB are sufficient in terms of pressure resistance, but insufficient in terms of shear resistance. The weak adherence between MB and mortar causes insufficient shear strength [4]. Insufficiency of shear strength of brick walls is one of the most important problems of brick applications [5]. Walls built with bricks in buildings generally carry lateral loads resulting from earthquakes. The expected durability of a brick wall subjected to seismic loads largely depends on the shear strength of the wall, and the shear strength of brick walls may also decrease over time [6]. In order to directly estimate the shear strength of walls, appropriate tests are performed on wall samples produced according to TS EN 1052-3 standard or diagonal loading tests according to ASTM 519-2022 [7]–[9]. However, in order to maintain the integrity of walls under various loading conditions, it is important to improve the properties of the mortars used as binders and ensure good adherence [10]. The mortar used as a binding material in wall construction, the amount of cement or lime in it, the grain distribution and properties of the aggregate, and the amount of mixing water are important factors that affect the mechanical and physical properties of the mortars. The mortars used in wall construction are to transfer the forces that the stones and bricks are exposed to from one row to another when they are in a horizontal or near-horizontal layer, and also to connect the stones and bricks to each other when the mortar is in a vertical or near-vertical state [11]. There are many studies on the shear strength of brick walls produced with different mortars [12]–[19]. The shear strength of walls depends on many factors such as brick material, strength of mortar, construction technology and curing conditions, as well as the bond strength between brick and mortar. It is known that the high mortar strength, which is among these factors, will also increase the adherence between brick and mortar. Various studies have been conducted by adding different fibers to cement mortars to reduce plastic shrinkage [20]. Homogenously distributed fibers in the mortar delay the formation of the first crack and control crack development. It strengthens the mortar against disintegration by reducing the expansion of initial cracks and preventing microcracks from turning into macrocracks [21], [22]. For this reason, various fibers are used to prevent cracks, protect the mortar-brick contact surface, and provide greater adherence between the mortar and brick surface [23].

In this study, it was aimed to determine the appropriate wall mesh material and binding material by finding out the mechanical properties of walls produced with different wall and mortar materials. In addition to the previous studies, masonry materials were selected as blend brick, masonry brick and pumice block and the shear strengths of the walls were investigated using fiber mortar. For the experimental study, 18 wall samples with the same geometric properties and dimensions of 900x900 mm were produced. RM and PM were used as binding materials in wall building. The volumetric mixing ratios of the mortar used are sand:cement:lime=6:1:1. HB, MB and BB were chosen as mesh materials in the production of wall samples. Wall samples produced with different wall and mortar materials were evaluated by subjecting them to shear strength testing and examining the test results.

II. MATERIALS AND METHODS

A. MATERIALS

CEMI-42.5/R type portland cement obtained from BASTAS Cement Factory, produced according to TS EN 197-1 (2012) standard, was used as a binder in the production of mortar samples [24]. The physical and chemical properties of cement are given in Table 1. Slaked lime with a specific gravity of 2.38 gr/cm³ was used in the production of mortars used in wall building [25]-[28]. The physical and chemical properties of powdered lime are given in Table 2.

Table 1. Physical and Chemical properties of CEM I 42.5 R type cement

Chemical Analysis	CEM I 42.5
Al ₂ O ₃ (%)	5.65
SiO ₂ (%)	20.62
CaO (%)	62.08
Fe ₂ O ₃ (%)	4.05
K ₂ O (%)	0.69
SO ₃ (%)	2.57
MgO (%)	2.55
Na ₂ O (%)	0.27
Loss on ignition (%)	1.55
Physical Analysis	
Fineness (cm ² /g)	3400
Beginning of Set (min)	260
Ending of Set (min)	300

Table 2. Physical and chemical properties of lime

Chemical Analysis	Analysis Results
CaO (%)	85.78
R ₂ O ₃ (%)	0.47
SO ₃ (%)	1.47
MgO (%)	3.52
Loss on ignition (%)	22.51

In the production of mortar, river sand, whose 0-4 mm size granulometry is given in Figure 1, in accordance with TS 706 EN 12620+A1, was used [27]. The fineness modulus of the river sand used was calculated as 3.21. Water absorption percentages and densities of aggregates were found according to TS EN 1097-6 [28]. The surface dry water saturated density of the river sand is 2.67 g/cm³, and its water absorption percentage is 1.15%. Drinkable city tap water was used within the scope of the experimental study [29].

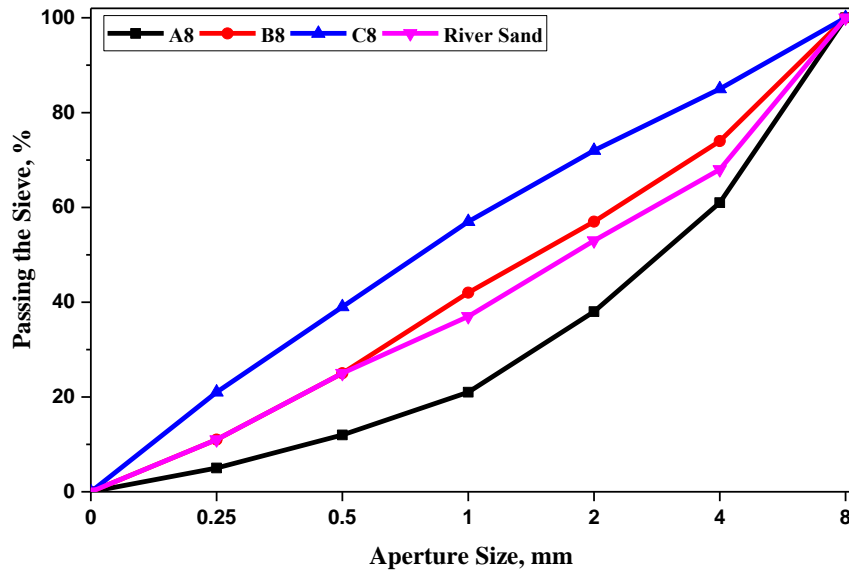


Figure 1. River sand sieve analysis

In the process of knitting the wall samples, commercially available 90x190x50 mm sized HB (Figure 2a), 190x290x135 mm sized MT (Figure 2b) and 190x390x185 mm sized BB (Figure 2c) were used. The technical specifications of HB, MB and BB used in the experimental study are given in Table 3. The technical properties of Sika fiber brand polypropylene fiber added to the RM mixture are given in Table 4.

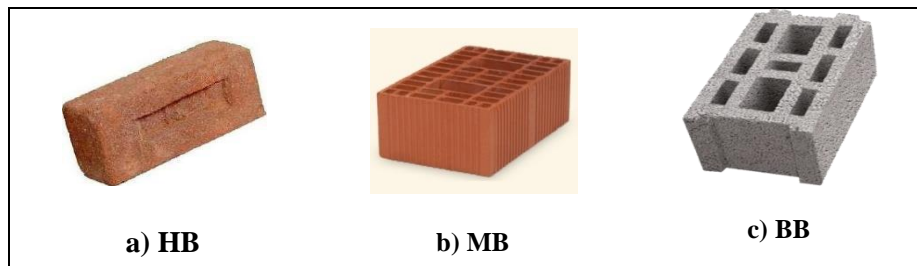


Figure 2. The appearance of (a) HB, (b) MB and (c) BB used

Table 3. HB, MB and BB technical properties

Technical Specifications	HB	BB	MB
Unit volume weight (kg/m ³)	1420	733	700
Compressive strength (MPa)	16	1.82	10
Amount of use (m ²)	98	12-13	22-25
Weight (kg)	2.15	8.5	4.5
Size (mm)	90x190x50	190x390x185	190x290x135

Table 4. Technical properties of polypropylene fiber

Technical Specifications	Description
Specific gravity	0.91 g/cm ³
Length	12 mm
Diameter	18 mikron-nominal
Specific surface area	250 m ² /kg
Tensile strength	300-400 MPa
Elastic modulus	~4000 MPa

B. METHOD

In the construction of the wall a sample produced in the study, HB, MB and BB, and as binder reinforced and fibrous mortar was used. Flexural and compressive strengths of the mortars used were determined. In order to determine the shear strength of wall samples, diagonal loading tests were performed on the samples. Horizontal and vertical displacement values were recorded from the front surfaces of the samples. Experimental results were interpreted by drawing various graphs and tables. The names of the walls included in the study, the masonry material and the type of mortar used are given in Table 5.

Table 5. Symbols and names of wall samples

Sample Names	Wall Materials	Mortar Type
HB1- HB2- HB3	Harman Brick	Reinforced Mortar
HF1-HF2-HF3	Harman Brick	Fiber Added Mortar
MB1- MB2- MB3	Masonry Brick	Reinforced Mortar
MF1-MF2-MF3	Masonry Brick	Fiber Added Mortar
BB1-BB2-BB3	Bimsblok	Reinforced Mortar
BF1-BF2-BF3	Bimsblok	Fiber Added Mortar

B.1. Preparation of Mortars

The volumetric mixing ratios of the RM used in wall building are sand:cement:powdered lime=6:1:1. RM production was carried out by adding cement into the lime mortar in accordance with the relevant standard, and then it was mixed by adding 1.5 volume of water into the dry RM [30]. Polypropylene fiber was included in the mixture as 600 g, as recommended by the manufacturer, into the RM with a volume of 1 m³. The amounts of materials used in the mortars prepared as binders are given in Table 6.

Table 6. Materials and Sample names and weights in Experiment (1 m³)

Type of Mortar	River Sand (kg)	Cement (kg)	Lime (kg)	Polypropylene Fiber (g)
RM	2025	395	300	-
FM	2025	395	300	600

Within the scope of the experimental study, plain knitting type as shown in Figure 3 was preferred in knitting the wall samples. Plain knitting is formed by stacking straight rows on top of each other and half blocks are used to connect the corners. The wall samples were produced with a vertical joint spacing of 10 mm and a horizontal joint spacing of 12 mm [30]. The appearances of wall samples built using HB, MB and BB are shown in Figure 3. The samples were produced in dimensions of 900x900mm, not wider than 1.2x1.2 m² specified in the standard [8]. Wall thickness varies depending on the type of wall mesh material tested.

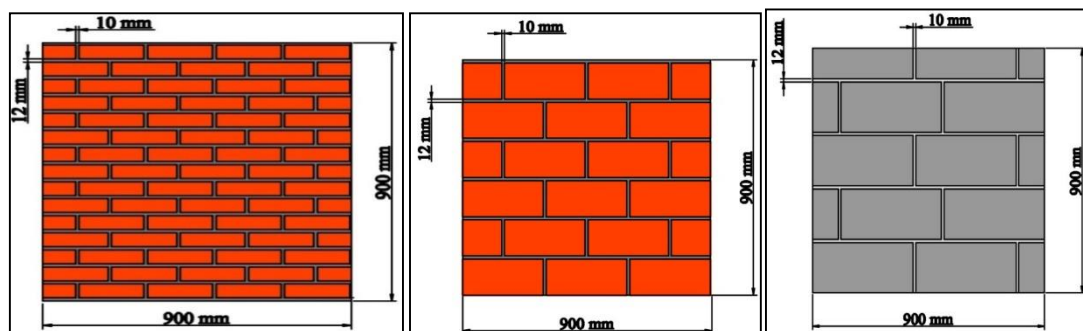


Figure 3. Schematic views of wall specimens

B.2. Experimental Studies

Flexural and compressive strength tests were carried out according to TSE 196-1 standard [31]. TS EN 196-1, 2016 on all mortar samples that were kept in the standard curing pool for 28 days. In order to apply vertical load to the wall sample, an experimental setup was created as shown in Figure 4a. During the preparation of the wall sample for the test, the sample was first rotated 45° and placed into the steel cap specially produced for the test. Care was taken to ensure that the sample placed inside the steel caps was in a vertical direction and that there was no gap between it and the cap. The loading mechanism is shown in Figure 4 by placing a hydraulic jack and load meter between the steel caps that are placed at the top and bottom of the sample and the loading frame. The load meter device is placed on the top of the loading device to measure the load acting on the wall. Strain gauges with a measuring length of 50 mm and a sensitivity of 0.001 mm were used to measure cracks in wall samples. To place the strain gauges in the experiment, holes were drilled at points 300 mm away from the intersection of the diagonals of the wall samples and the corner points. Then, anchor rods were placed at these points. Strain meters were installed so that one of these rods can be measured horizontally and the other vertically. Strain gauges were placed on the side surfaces of the produced test samples. A total of 2 channels were connected to the data cell for measuring cracks. Figure 4 shows the installation of strain gauges and the shear strength test setup. Shear strength, shear deformation and shear moduli of the samples were found with the help of ASTM 519 standard [8].

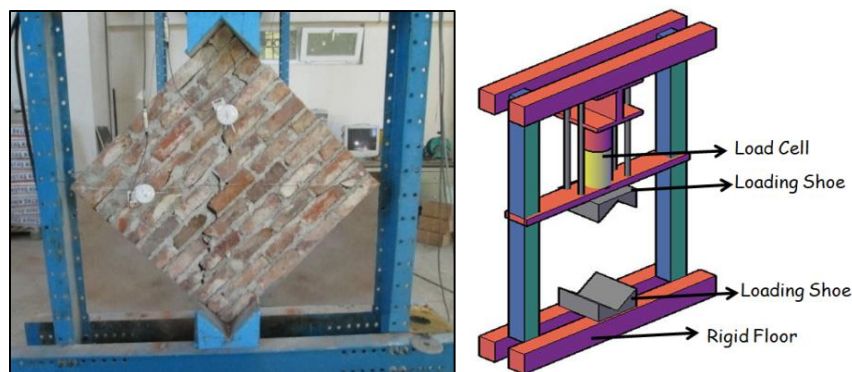


Figure 4. Test setup

III. RESULTS AND DISCUSSION

In this study, it was aimed to determine the mechanical properties of walls produced with polypropylene fiber RM and different masonry materials. In this context, the results obtained from the experiments performed on the walls are included in this section. With the flexural and compressive strengths of the mortars used as binders, the load/displacement graphs of the walls were interpreted by determining the collapse patterns of the walls, shear strength, stiffness modulus and energy absorption capacity.

A.1. Flexural and Compressive Strength Values of Mortars

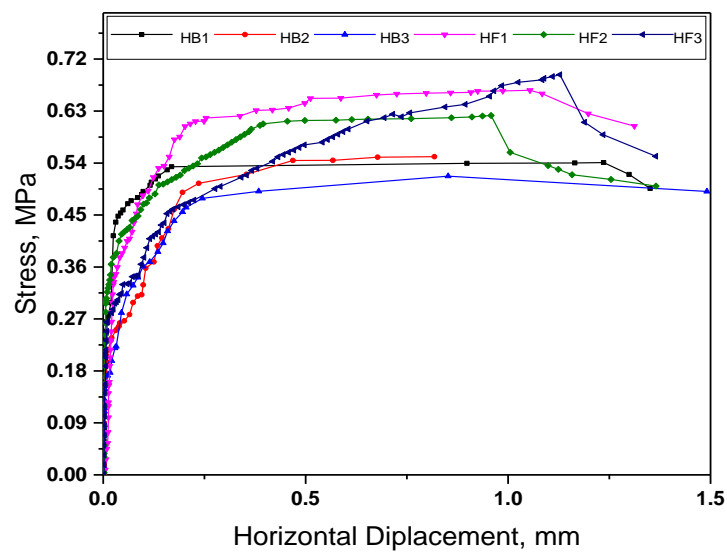
The flexural and compressive strengths of the mortars used in the knitting process of the knitting materials are shown in Table 7. It is seen that polypropylene fiber substitution causes a decrease in compressive strength, but an increase of approximately 15% in flexural strength. The compressive strength of reinforced mortars varies between 8 and 15 MPa [32]. The addition of slaked lime to cement mortars appears to provide less compressive strength but significantly higher flexural strength [33].

Table 7. Flexural and Compressive Strength of mortar samples, (MPa)

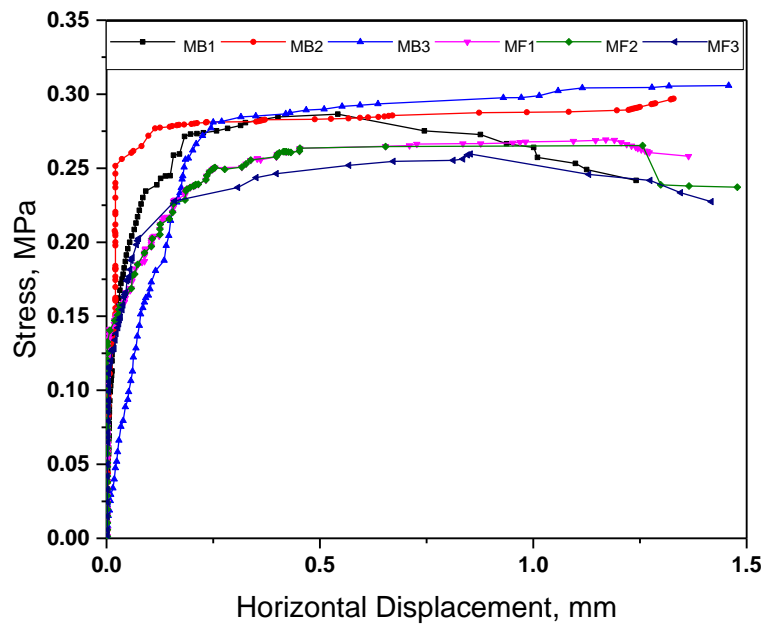
Type of Mortar	Flexural Strength	Compressive Strength
RM	6.7	9.5
FM	7.8	8.2

A.2. Stress-Horizontal Displacement Values

Stress-horizontal displacement graphs of wall samples are shown in 5. When the stress-horizontal displacement graphs of all wall samples were examined, the highest stress was seen in the wall samples built with FM, as 0.67 MPa. The lowest stress value was determined as 0.16 MPa in the sample knitted with BB. The addition of polypropylene fiber to the mortar used in wall knitting caused an increase in stress values in all samples.



(a)



(b)

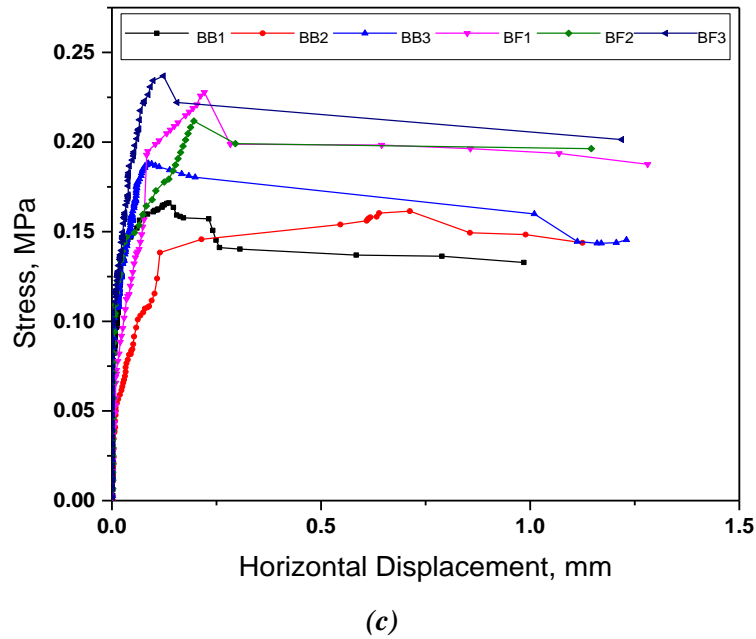


Figure 5. Stress-horizontal displacement graphs of wall Samples (a): HB, (b): MB, (c): BB

A.3. Shear Strength

The shear stress corresponding to the greatest load in the wall samples is calculated and given in Table 8. The shear stress corresponding to the highest load (74.4 kN) among the samples was calculated as 0.216 N/mm² in the MF03 sample. More shear strength occurred in samples knitted with PH. The shear strengths of the test samples corresponding to the highest load are shown in Table 8. The maximum shear modulus corresponding to a load of 72.25 kN was calculated as 0.00256. The reason why the shear modulus are different is that the vertical and horizontal displacements vary between the samples. It is seen that the average vertical load values are higher in the test samples knitted using polypropylene fiber. The average vertical load value of the wall sample built with FM, where the knitting material is HB, was approximately 20% higher than the samples built with fiberless mortar. The average vertical load value of the wall sample built with PH, where the knitting material is MB, was approximately 12% higher than the samples built with fiberless mortar. The average vertical load value of the wall sample built with polypropylene fiber-infused mortar, where the mesh material is BB, was approximately 30% higher than the samples built with fiber-free mortar. The mesh material also contributed to the walls produced using FM reaching the highest load at different values.

Table 8. Modulus of shear of test specimens

Samples	Highest Load (kN)	Average Load (kN)	Shear Stress (MPa)	Shear deformation (γ)	Vertical Displacement ΔV (mm)	Horizontal Displacement ΔH (mm)
HB01	34.48	34.70	0.21	0.00172	0.953	1.236
HB02	36.69		0.22	0.00207	0.985	1.651
HB03	32.93		0.20	0.00109	0.529	0.852
HF01	42.05	41.95	0.26	0.00176	1.152	1.084
HF02	39.65		0.24	0.00173	1.242	0.958
HF03	44.15		0.27	0.00198	1.395	1.128
MB01	65.17	64.04	0.19	0.00184	1.168	1.170
MB02	64.18		0.18	0.00167	0.864	1.256
MB03	62.78		0.18	0.00216	1.891	0.853
MF01	69.31	71.86	0.20	0.00075	0.411	0.542

MF02	72.25		0.21	0.00256	1.891	1.365
MF03	74.04		0.21	0.00193	0.803	1.657
BB01	40.18	41.58	0.11	0.00047	0.457	0.136
BB02	39.05		0.11	0.00091	0.450	0.712
BB03	45.52		0.13	0.00045	0.486	0.087
BF01	55.08	54.52	0.16	0.00046	0.368	0.221
BF02	51.20		0.15	0.00052	0.470	0.196
BF03	57.28		0.16	0.00032	0.279	0.123

A.4. Stiffness Module

The stiffness module values of the wall samples were calculated using vertical load-vertical strain values. Table 9 gives the calculation results of the stiffness modules of the samples. The highest stiffness modulus is seen in the HB03 sample with a value of 337.20 MPa, and the lowest is seen in the MB02 sample with a value of 82.57 MPa.

Table 9. Modulus of rigidity of the samples

Samples	Highest Load (kN)	Modulus of Rigidity (MPa)	Samples	Highest Load (kN)	Modulus of Rigidity (MPa)
HB01	34.48	222.73	HF01	42.05	265.92
HB02	36.69	196.81	HF02	39.65	254.85
HB03	32.93	337.20	HF03	44.15	247.45
MB01	65.17	103.72	MF01	69.31	270.63
MB02	64.18	112.65	MF02	72.25	82.57
MB03	62.78	85.14	MF03	74.04	112.00
BB01	40.18	252.13	BL01	55.08	347.98
BB02	39.05	125.05	BL02	51.20	286.11
BB03	45.52	295.61	BL03	57.28	530.25

A.5. Energy Depletion Values

The amounts of energy absorption capacity by the samples during the experiment were calculated from the areas under the vertical load-strain curves of the samples. While calculating the area, the area under the part up to 0.85 of the highest vertical load level on the falling arm of the vertical load and strain curve, where the highest load level begins to decrease, was taken into account for each sample [34]. Energy absorption capacity of wall samples are given in Table 10. The highest energy absorption capacity was calculated in the MB02 sample as 122.11 kNmm, and the least in the HF03 sample as 43.20 kNmm. It is seen that the addition of polypropylene fiber to the produced mortars causes an increase in the energy absorption capacity of the samples.

Table 10. Energy absorption capacity of wall samples

Specimens	Highest Load (kN)	Energy Absorption Capacity (kNmm)	Specimens	Highest Load (kN)	Energy Absorption Capacity (kNmm)
HB01	34.48	57.86	HF01	42.05	58.29
HB02	36.69	62.20	HF02	39.65	41.32
HB03	32.93	53.35	HF03	44.15	43.20
MB01	65.17	113.57	MF01	69.31	85.32
MB02	64.18	106.78	MF 02	72.25	122.11

MB03	62.78	89.45	MF 03	74.04	168.91
BB01	40.18	54.25	BL01	55.08	62.80
BB02	39.05	55.43	BL02	51.20	59.12
BB03	45.52	74.16	BL03	57.28	63.48

A.6. Immigration of Samples Formats

As a result of the observations made on the wall samples built with TH fibrous mortar, where HB was used as the masonry material, the collapse generally occurred with the formation of diagonal cracks along the joint and the vertical separation of the sample into two at the interface of HB and mortar. As a result of the crack propagating vertically and along the joint, it ended by splitting into two with a brittle fracture at the interface of HB and mortar. During the experiment, no crushing occurred on the upper and lower headings of the wall built with HB. The cracks formed after loading in wall samples built with HB and FM are shown in Figure 6.

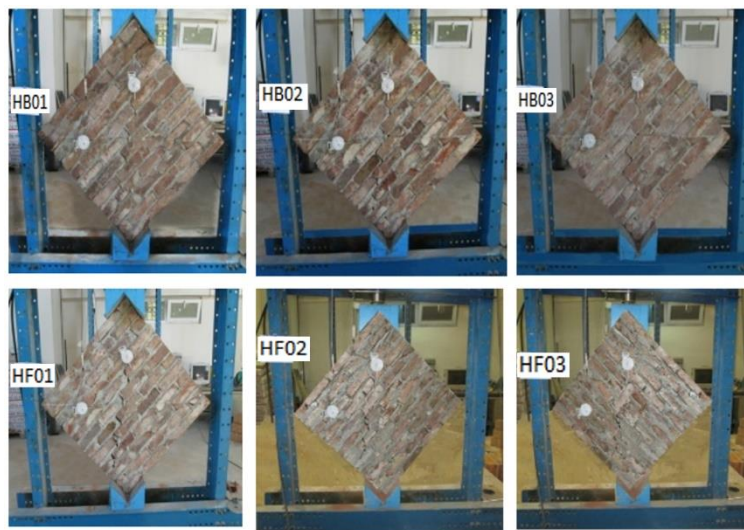


Figure 6. Failure patterns of wall samples built with HB

As a result of the observations made on the wall samples built with MB as a masonry material, the collapse pattern started with the formation of small cracks in the vertical direction. As a result of the crack propagating along the joint, the masonry brick and mortar interface separated from each other. A diagonal crack occurred in the MB element located on the upper side of some wall samples, but no crushing occurred in the upper and lower headings of the masonry brick walls. In some samples, cracks occurred due to the breaking of MBs. The cracks formed in the wall samples after loading are shown in Figure 7.

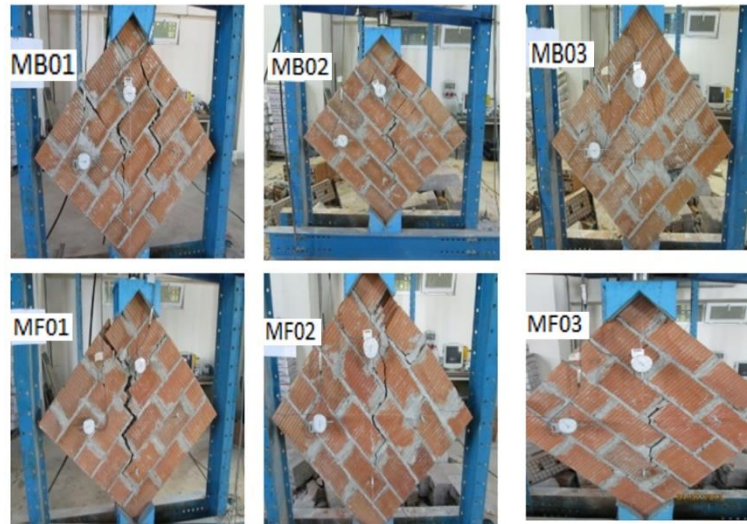


Figure 7. Failure patterns of wall samples built with MB

The collapse happening as a result of the observations made on the wall samples built with BT and FM as the masonry material occurred due to the formation of diagonal cracks along the joint and the vertical separation of the sample into two from the BB and mortar interface. A diagonal crack occurred in the middle area of the wall. During the experiment, no crushing occurred on the upper and lower heads of the wall built with BB. With the sudden increase in the crack width, the BT02 wall sample suddenly separated in the vertical direction due to the increasing load effect. The cracks formed in the wall samples after loading are shown in Figure 8.

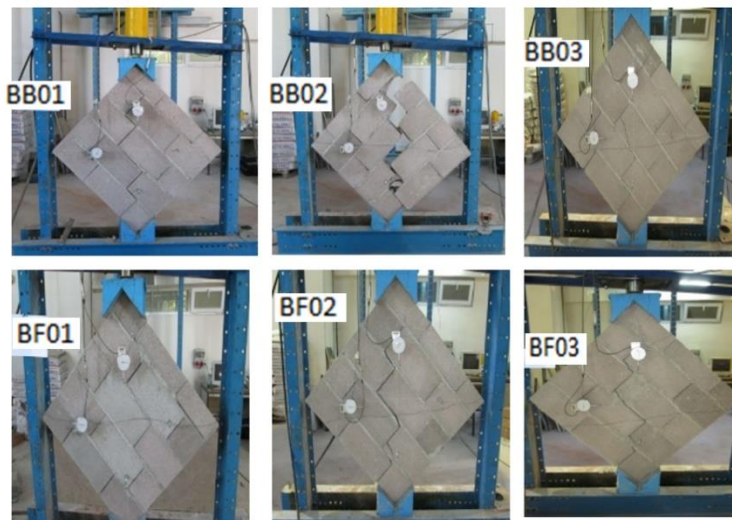


Figure 8. Failure patterns of wall samples built with BB

Cracks that occur as a result of shear strength tests performed on wall samples may occur predominantly through mortar joints or through blocks [35]. It was observed that they split into two at the brick and mortar interface [36]. In addition, there are other factors that affect brick wall strength, such as mortar thickness and bond strength between mortar and brick [37]. It is observed that the collapse of wall samples built with mortars with insufficient bond strength is caused by the insufficiency of the bond between the mortar and brick units, but in mortars with stronger adherence, the bricks crack [38].

IV. CONCLUSION

The mechanical properties of walls produced with different wall and mortar materials were determined experimentally. Experimental results were obtained by producing 18 wall samples of 900x900 mm in size with the same geometric features. The binding material used in the masonry was TH and PP fiber mortar, and HB, MB and BB were used as the masonry material. The test results performed on wall samples are given below.

- It is observed that substituting polypropylene fiber in mortars causes a decrease in compressive strength, but an increase of approximately 15% in flexural strength.
- When the stress values of all wall samples were examined, it was seen that the highest stress value was 0.67 MPa in the wall sample knitted with FM, and the lowest stress value was 0.16 MPa in the sample knitted with BB. The addition of polypropylene fiber to the mortar used in wall masonry caused an increase in stress values in all samples.
- When the shear stresses of the samples were examined, the shear stress corresponding to the highest load (74.4 kN) was calculated as 0.216 N/mm² in the MF03 sample. The reason why the shear modules are different is that the vertical and horizontal displacements that occur vary between samples. It is seen that the average vertical load values are higher in the test samples knitted using polypropylene fiber. It is seen that the wall samples built with fibrous mortar, where the mesh material is HB, MB and BB, receive 20%, 12% and 30% more average vertical load values, respectively, compared to the samples built with non-fibrous mortar. The mesh material also contributed to the walls produced using PH reaching the highest load at different values.
- It was observed that the shear strength value was highest in the samples knitted with MB. It is thought that the reason for this is the high adhesion of mortar and masonry bricks and that the mortar enters the holes in the brick and increases the slip resistance.
- It has been determined that wall samples built with PH contribute to the shear strength of the wall. Wall samples built using FM showed higher shear strength than wall samples built using RM.
- The collapse that occurred in almost all of the wall samples occurred due to the formation of diagonal cracks along the joint and the vertical separation of the wall sample into two at the interface of the mesh material and mortar. It has been determined that samples knitted with BB have more brittle fractures than other samples.
- It has been observed that MB wall samples knitted using polypropylene fiber have a higher ability to deform and carry the highest load than other samples.

The fact that the walls used in masonry structures are load-bearing for the structure increases the importance of masonry materials. For this reason, the addition of polypropylene fibers to mortars in masonry masonry work with mortar bricks, masonry bricks and pumice block will make the structures safer.

ACKNOWLEDGEMENTS: This work is supported by Gazi University Scientific Project (Project no: 07/2012-58).

V. REFERENCES

- [1] K. Arı, "Production of wall bricks with infills and comparison of thermal conductivity coefficients", PhD Thesis, The Graduate School Of Natural And Applied Science, Cukurova University, Adana, Türkiye, 2010.
- [2] Baran, B., Bozdoğan, K. B. & Atabey, İ. İ. "Comparison of masonry building constructed from different wall materials according to 2007 and 2018 Turkish earthquake codes". *Journal of Engineering Sciences and Design*, vol. 10, no. 3, pp. 1066-1075, 2022.
- [3] M. Yetkın, Y. Calayır and K. E. Alyamaç, " The effect of mortar and bond type on mechanical parameters of masonry walls", *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 39, no. 1, pp. 621-634, 2023.
- [4] P. Murthi, M. Akib, M. Imran, S. Ahmed, and V. Prasanna, "Studies on the strength variation of brick masonry using novel blended masonry mortar mixes and mortar thickness," in *Materials Today: Proceedings*, vol. 39, no. 1, pp. 126–130, 2020.
- [5] M. B. Ravula and K. V. L. Subramaniam, "Experimental investigation of compressive failure in masonry brick assemblages made with soft brick," *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 50, no. 19, pp. 1, 2017.
- [6] M. A. Sherafati and M. R. Sohrabi, "Probabilistic Model for Bed-Joint Shear-Sliding Strength of Clay-Brick Walls Based on Field Test Data," *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, vol. 2, no. 4, 2016.
- [7] V. Alecci, M. Fagone, T. Rotunno, and M. De Stefano, "Shear strength of brick masonry walls assembled with different types of mortar," *Construction and Building Materials*, vol. 40, pp. 1038–1045, 2013.
- [8] *Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages*, ASTM E 519, 2022.
- [9] *Methods of test for masonry – Part 4: Determination of initial shear strength*, Turkish Standards Institute TSE EN 1052-3, 2004.
- [10] S. Zheng, L. Niu, P. Pei, and J. Dong, "Mechanical Behavior of Brick Masonry in an Acidic Atmospheric Environment," *Materials*, vol. 12, no. 17, pp. 2694, 2019.
- [11] B. Postacıoğlu, *Construction material courses- binders, aggregates and concrete*, İstanbul: Istanbul Technical University, İstanbul, Turkey 1975, pp.302-304.
- [12] P. Alcaïno and H. Santa-Marla, "Experimental Response of Externally Retrofitted Masonry Walls Subjected to Shear Loading," *Journal of Composites for Construction*, vol. 12, no. 5, pp. 489, 2008.
- [13] A. Anzani, E. Garavaglia, and L. Binda, "Long-term damage of historic masonry: A probabilistic model," *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 2, pp. 713–724, 2009.
- [14] P. Croce et al., "Shear modulus of masonry walls: a critical review," *Procedia Structural Integrity*, vol. 11, pp. 339–346, 2018.
- [15] G. Cultrone, E. Sebastián, and M. O. Huertas, "Durability of masonry systems: A laboratory study," *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 1, pp. 40–51, 2007.

- [16] A. Gabor, E. Ferrier, E. Jacquelin, and P. Hamelin, "Analysis and modelling of the in-plane shear behaviour of hollow brick masonry panels," *Construction and Building Materials*, vol. 20, no. 5, pp. 308–321, 2006.
- [17] P. Murthi, S. Krishnamoorthi, K. Poongodi, and R. Saravanan, "Development of green masonry mortar using fine recycled aggregate based on the shear bond strength of brick masonry," *Mater Today Proc*, vol. 61, pp. 413–419, 2022.
- [18] M. T. Shedid, W. W. El-Dakhkhni, and R. G. Drysdale, "Behavior of fully grouted reinforced concrete masonry shear walls failing in flexure: Analysis," *Engineering Structures*, vol. 31, no. 9, pp. 2032–2044, 2009.
- [19] E. Verstrynghe, L. Schueremans, D. Van Gemert, and M. A. N. Hendriks, "Modelling and analysis of time-dependent behaviour of historical masonry under high stress levels," *Engineering Structures*, vol. 33, no. 1, pp. 210–217, 2011.
- [20] G. A. Hamdy, M. O. R. El-Hariri, and M. F. Farag, "Use of additives in mortar to enhance the compression and bond strength of masonry exposed to different environmental conditions," *Journal of Building Engineering*, vol. 25, p. 100765, 2019.
- [21] P. S. Song, S. Hwang, and B. C. Sheu, "Strength properties of nylon- and polypropylene-fiber-reinforced concretes," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 8, pp. 1546–1550, 2005.
- [22] W. Sun, H. Chen, X. Luo, and H. Qian, "The effect of hybrid fibers and expansive agent on the shrinkage and permeability of high-performance concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 31, no. 4, pp. 595–601, 2001.
- [23] C. Anderson and L. C. Held, "The effect of sand grading on mortar properties and the tensile bond of brickwork specimens," *British Masonry Society*, vol. 1, pp. 1–6, 1986.
- [24] *Cement – Part 1: Composition, specification and conformity criteria for common cements*, Turkish Standards Institute TS EN 197-1, 2012.
- [25] *Building lime- Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria*, Turkish Standards Institute TS EN 459-1, 2015.
- [26] *Specification for mortar for masonry- Part 2: Masonry mortar*, Turkish Standards Institute TS EN 998-2, 2017.
- [27] *Aggregates for concrete*, Turkish Standards Institute TS 706 EN 12620+A1, 2009.
- [28] *Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption*, Turkish Standards Institute TS EN 1097-6, 2022.
- [29] *Mixing water for concrete - Specifications for sampling, testing and assessing the suitability of water, including water recovered from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete*, Turkish Standards Institute TS EN 1008, 2003.
- [30] *Design and Construction methods for Masonry*, Turkish Standards Institute TSE 2510, 1977.
- [31] *Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength*, Turkish Standards Institute TS EN 196-1, 2016.



- [32] M. R. Maheri, F. Motielahi, and M. A. Najafgholipour, "The effects of pre and post construction moisture condition on the in-plane and out-of-plane strengths of brick walls," *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 44, no. 2, pp. 541–559, 2011.
- [33] P. Walker,; Kioy, Stella, ; Jowsey, and Amy. (2024 January 10) *An experimental comparison of hydrated lime and an admixture for masonry mortars*, [Online]. Available: www.masonry.org.uk
- [34] E. Atımtay, Regulation on Structures to be Built in Disaster Areas with Explanations and Examples Reinforced Concrete Structures 2. Ankara, 2000.
- [35] C. Calderini, S. Cattari, and S. Lagomarsino, "The use of the diagonal compression test to identify the shear mechanical parameters of masonry," *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 5, pp. 677–685, 2010.
- [36] A. Prota, G. Marcari, G. Fabbrocino, G. Manfredi, and C. Aldea, "Experimental In-Plane Behavior of Tuff Masonry Strengthened with Cementitious Matrix–Grid Composites," *Journal of Composites for Construction*, vol. 10, no. 3, pp. 223–233, 2006.
- [37] F. C. Christy and M. R. Shanthi, "Experimental study on axial compressive strength and elastic modulus of the clay and fly ash brick masonry," *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*, vol. 4, no. 4, pp. 134–141, 2013.
- [38] K. S. Gumaste, K. S. N. Rao, B. V. V. Reddy, and K. S. Jagadish, "Strength and elasticity of brick masonry prisms and wallettes under compression," *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 40, no. 2, pp. 241–253, 2007.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Derleme Makalesi

Tükenmiş Aktif Karbonun Rejenerasyonunda Yenilikçi Yaklaşımlar

 Nevim GENÇ^{a,*},  Esin KACIRA^b

^{a,b} Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: ngenc@kocaeli.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1178175

Öz

Granül aktif karbon (GAK), gaz ve sıvı akımlardan kirleticileri uzaklaştırmak için uygulanan adsorpsiyon proseslerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Karbon bazlı adsorbentlerin yeniden kullanılabilirliği adsorpsiyon prosesinin teknik ve ekonomik anlamda yaygınlaşmasını sağlar. Ancak doygunluk sonrası bertarafı ilgili yüksek maliyetler ve çevresel sorunlar nedeniyle uygulama sınırlıdır. Doymuş GAK'ın hizmet ömrünün uzatılması için uzun adsorpsiyon döngülerine imkan tanıyan, düşük maliyette, karbon kaybı minimum seviyede olan ve çevresel etkiyi en aza indiren farklı rejenerasyon teknikleri belirlenmiştir. Bu teknikler, iki ayrı yolla gerçekleştirilebilir: yalnızca aktif karbonda adsorbe edilen kirleticilerin desorpsiyonuna dayalı veya bu kirleticilerin ayrışmasına dayanan rejenerasyon. Genel olarak rejenerasyon metotları termal, kimyasal ve mikrobiyolojik olarak sınıflandırılmaktadır. Yeni geliştirilen rejenerasyon metotları, enerji verimliliği, seçiciliği, düşük maliyeti ve çevresel uyumluluğu açısından daha çok tercih edilmektedir. Ayrıca, yeni geliştirilen rejenerasyon metotları ile tükenmiş aktif karbonun rejenerasyonu yerinde yapılabilmektedir. Bu durum önemli avantaj sağlamaktadır. Bu çalışmada doymuş GAK'lerin rejenerasyonu ile ilgili literatür gözden geçirilmiş ve umut verici teknikler vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Aktif karbon, Kimyasal, Mikrobiyolojik, Rejenerasyon, Termal

Innovative Approaches in Spent Activated Carbon Regeneration

ABSTRACT

Granular activated carbon (GAC) is widely used in adsorption processes to remove pollutants from gas and liquid streams. The reusability of carbon-based adsorbents enables the adsorption process to become widespread technically and economically. However, its application is limited due to the high costs and environmental problems associated with post-saturation disposal. In order to prolong the service life of the saturated GAC, different regeneration techniques have been identified that allow long adsorption cycles, have low cost, have minimum carbon loss and minimize environmental impact. These techniques can be accomplished in two distinct ways: regeneration based solely on the desorption of pollutants adsorbed on activated carbon or based on the decomposition of these pollutants. Generally, regeneration methods are classified as thermal, chemical and microbiological. Newly developed regeneration methods are more preferred in terms of energy efficiency, selectivity, low cost and environmental compatibility. In addition, regeneration of depleted activated carbon can be done in situ with newly developed regeneration methods. This provides a significant advantage. In this study, the literature on the regeneration of saturated GAKs has been reviewed and promising techniques have been highlighted.

Keywords: Activated carbon, Chemical, Microbiological, Regeneration, Thermal

I. GİRİŞ

Aktif karbon, rastgele dağılmış haldeki mikrokristallerin oluşturduğu düzensiz kristalleşen yapıya sahip karbonlu malzemelerden elde edilen bir adsorbandır. Bu mikrokristal yapının geniş yüzey alanı (500-1500 m²/g), çok çeşitli fonksiyonel gruplar (karboksilatlar, karboniller, hidroksiller, aminler) ve gözenek boyutu dağılımı (< 1-100 nm) gibi özellikler sunması, aktif karbonun çeşitli molekülleri adsorbe edebilmesi için olağanüstü bir kapasite sağlamaktadır [1]. Aktif karbon, yüksek adsorpsiyon kapasitesi sayesinde sıvı ve gaz akımlarından organik ve inorganik kirleticilerin uzaklaştırılmasında, kimyasal geri kazanım proseslerinde ve endüstriyel arıtmada yaygın olarak kullanılan adsorbandır. Bunun yanı sıra, doğal biyolojik bozunma ile giderilemeyen organik bileşikler, mikro kirleticiler ve ağır metalleri, pestisitler, boyalar, klorlu çözücüler, tat ve koku veren diğer maddeler gibi organik bileşikler eser miktarlarda adsorbe ederek organik maddenin azaltılmasına yardımcı olmaktadır [2,3].

Ülkemizde tükenmiş aktif karbon Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından 06 13 02* atık kodu ile tehlikeli atık olarak değerlendirilmektedir [54]. Bunun yanı sıra Türkiye İstatistik Kurumu Dış Ticaret İstatistik verilerine göre 2013-2020 yılları arasında 10.000 ton aktif karbon ithal edilmiştir, bu yıllar arasındaki ihracat ise 300 ton dolaylarında gerçekleşmiştir. Bu verilerden aktif karbondaki dışa bağımlı olduğu ortaya çıkmaktadır. Tükenmiş aktif karbonun sürdürülebilir yönetimi kaynak geri kazanımı ve döngüsel ekonomi kapsamında ele alınmalıdır. Endüstriyel ölçekte tükenmiş aktif karbon yönetim sürecinde sistemin ekonomik ve çevresel fizibilitesinde tüm yönleri ile ele alınması gerekmektedir [4]. Tükenmiş aktif karbonlar için sahada veya saha dışında bertaraf, yakma ve rejenerasyon olmak üzere üç seçenek mevcuttur [5].

Tükenmiş aktif karbonun rejenerasyonu hem maliyeti düşürmek hem de sürdürülebilir olmak amacıyla yıllardır uygulanan bir yöntemdir [6]. Bu nedenle çevre dostu bir yaklaşım biçimi olarak rejenerasyon yöntemlerinin geliştirilmesi önerilmektedir [7,8]. Böylelikle rejenere olan aktif karbonlar birkaç rejenerasyon döngüsü için kullanılabilir. Rejenerasyonun amacı adsorbent kütle kaybı olmadan ve porozitesi değişmeden aktif karbonun orijinal adsorpsiyon kapasitesine ulaşmasını sağlamaktır. Bu yayında aktif karbon rejenerasyonunda uygulanan geleneksel ve yenilikçi yöntemler ele alınmıştır.

A.1. REJENERASYON TEKNİKLERİ

Rejenerasyon iki yol izi ile sağlanabilmektedir. İlki aktif karbon üzerine adsorplanan kirleticinin diğer bir faza kütle taşınımı ile desorpsiyondur. Desorpsiyon işlemi aktif karbon üzerinde herhangi bir reaksiyon gerçekleşmemektedir. İkinci yol izinde ise adsorplanan kirleticinin parçalanması yolu ile rejenerasyon gerçekleşmektedir. Geleneksel rejenerasyon metotları üç ana gruba ayrılmaktadır: Termal, kimyasal ve mikrobiyolojik rejenerasyon. Geleneksel rejenerasyon metotları modifiye edilerek yeni yöntemler geliştirilmiştir.

A.1.1 Termal Rejenerasyon

Geleneksel veya ısı rejenerasyonu olarak da bilinen bu yöntem, aktif karbonun yeniden kullanımı için endüstriyel ölçekte oldukça tercih edilmektedir. Termal rejenerasyon; kurutma, buharlaşma, piroliz ve pirolize olan maddenin oksitlenme süreçlerini içermektedir [9,10]. Rejenerasyon prosesi, kirleticilerin kuruma adımıyla akışkan yataklı fırınlar, sabit fırınlar ve tambur fırınlar ile düşük sıcaklıklara (105°C) maruz kalması, inert atmosfer altında oksitleyici gaz (su buharı veya CO₂) tarafından pirolizini ve organik kirleticilerin gazlaştırılmasını esas almaktadır [11,12]. 800 ile 1000°C gibi yüksek sıcaklık değerlerinin gerektiği bu yöntemde ısı kaynağı karbon yatağının dışında bulunmaktadır [13]. Dıştan içe doğru ısıtma yapıldığı için bu yöntemde aktif karbonlar tam olarak rejenere edilememektedir. Sıcaklık, zaman ve gaz akışı gibi bazı parametreler termal rejenerasyon yönteminin verimini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu parametreler kontrol edilmediği takdirde yüksek sıcaklık değerleri granül aktif karbonun (GAK) gözenek yapısını bozmakta ve yüzey kimyasında değişiklikler meydana getirmektedir [14]. Bunun yanı sıra, aktif karbonlarda aşınma, yanma ve yıkama esnasında % 5-10 kütle kaybına sebep

olmaktadır[12,15]. Eğer proses parametreleri iyi ayarlanmışsa, rejenerasyon ile GAK yüzey alanını ve mikro gözenek hacmini korumak ve hatta arttırmak mümkündür [16,17].

Kurutma işleminde uçucu adsorbatların giderimi sağlanmaktadır. Uçucu adsorbatların buharlaşması ve kararsız adsorbatların ayrışması ile uçucu bileşenler oluşmaktadır. Uçucu olmayan adsorbatların pirolizi ile aktif karbonun yüzeyinde karbonlu tortunun birikmesine sebep olmaktadır. Pirolize tortunun seçici oksidasyonu buhar, karbondioksit ve diğer oksitleyici ajanlar tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu aşamaların tümünde ısı transferi gerekmektedir [9]. Dolayısıyla yöntem ile sınırlı kalmaktadır. Bu sebeple, aktif karbonun rejenere olması için yüksek sıcaklık değerlerine maruz bırakılması istenmektedir [18]. Bu yüksek sıcaklık değerlerini korumak için gerekli yüksek enerji tüketimi, çevreye salınabilecek tehlikeli yan ürünlerin olası oluşumu ve ardışık ısıtma-soğutma döngülerinden sonra gözenek yapısının bozulması nedeniyle adsorpsiyon kapasitesinde kayıplara yol açma gibi bazı dezavantajları mevcuttur [19]. Bu metot yüzey oksijen gruplarının parçalanması yolu ile CO₂ veya CO içerikli gaz üretir ki bu yüzden hava kirliliği yaratma potansiyeli yüksektir. Termal rejenerasyon yöntemi her ne kadar nadiren ikincil kirliliğe neden olsa da yüksek sıcaklık değerlerine ihtiyaç duyması nedeniyle ekonomik olarak daha az uygulanabilir olarak kabul edilmektedir [20,21]. Ayrıca karbonun bulunduğu ortamdan taşınımı rejenerasyon prosesinin maliyetini artırmaktadır. Dolayısıyla bu durum aktif karbonlara ve çevreye az zararı olan daha verimli rejenerasyon yöntemlerinin arayışını önermekte ve geleneksel yöntemlerin optimizasyonuna yol açmaktadır [7].

Termal rejenerasyon doymuş aktif karbonun ısıtılarak gerekli enerji miktarı sağlanarak adsorbatın giderilmesi işlemidir. Adsorbatın termal stabilitesi ve adsorpsiyon enerjisi dikkate alındığında termal rejenerasyon dört sınıfa ayrılmaktadır [7]. Termal rejenerasyon teknikleri Şekil 1’de özetlenmiştir.



Şekil 1. Termal rejenerasyon teknikleri [7]

A.1.1.1. Termal Desorpsiyon Yolu İle Rejenerasyon

Termal enerji sağlanarak adsorbatları bozmadan tüm adsorpsiyon bölgelerinde adsorban-adsorbat etkileşimlerini kırma işlemidir. Uçucu organik bileşiklerin geri kazanılmasında kullanılmaktadır. Desorpsiyon sıcak inert gazlar (N₂, He, Ar), düşük sıcaklıklı buhar veya bir elektrik akımı uygulanarak gerçekleştirilir [7]. İnerit gaz kullanımında 300 °C aşmayan sıcaklıkta desorpsiyon sağlanabilir, ancak termal desorpsiyon ve dekompozisyon için 700-800°C'den daha yüksek sıcaklıklar gereklidir.

Buhar rejenerasyonu yaygın olarak kullanılmaktadır. 200°C'nin altındaki sıcaklıklarda buhar ile rejenerasyon mümkündür. 200°C gibi düşük sıcaklıklı proseslerde, buhar kirleticinin desorpsiyonunda bir enerji kaynağı olarak iş görür. Yüksek sıcaklıklarda buhar, termal olarak parçalanmış kirleticiden oluşan kömürleşmiş kalıntılar için gazifikasyon ajanı olarak iş görür. Buhar, endüstride yıllardır adsorbanların rejenerasyonu için kullanılmaktadır [22]. Bu yöntemde, buharın yardımı ile kirletici maddenin daha hızlı bir şekilde desorpsiyonu sağlanmaktadır [15]. Hidrofobik adsorbatların yoğunlaştırılmış sudan yerçekimi sayesinde ayrılabilirliği ile diğer adsorbatlara göre daha avantajlıdır. Hidrofobik adsorbatlar, buhar damıtma sıcaklığına yakın bir sıcaklık değerlerinde

desorbe olabilirken hidrofilik adsorbatlar, kaynama noktalarına yakın sıcaklık değerlerinde desorbe olmaktadır [23]. Aktif karbonlar ve hidrofobik zeolitlerin yeniden kullanımında buhar rejenerasyonu etkili ve ekonomik bir seçenektir [22]. Buhar rejenerasyonu yüksek sıcaklıkta gerçekleşmektedir. Buharın, adsorban-adsorbat ile oksidatif reaksiyonunu önleyebilmek amacıyla yüksek sıcaklıkta inert ortamda gerçekleştirilir. Bu durum, kok oluşumuna sebep olmaktadır. Buhar sıcaklığının seçiminde adsorbanın ısı kapasitesi, organik adsorbat kaynama noktası ve inorganik adsorbat çözünürlüğü önemlidir. Organik bileşikler için buhar sıcaklığı genellikle adsorbat kaynama noktasının 30-50°C'nin üzerinde olması istenmektedir [24]. Buharın yatağı hızla ısıtması buhar rejenerasyonunu başlatan adımdır. Böylece, kirlenici madde adsorbandan daha hızlı desorbe edilmektedir.

Düşük voltajlı elektrik akımı uygulanması ile rejenerasyon sağlanabilmektedir. Karbonlu maddenin elektrik direnci ile elektrik akımı termal enerjiye dönüşür. Üretilen ısı tutulan kirlenicileri desorbe eder. Desorbe olan kirleniciler ise soy gazlar ile temizlenir. Temizleme işlemi için vakum da kullanılabilir.

A.1.1.2 Termal Desorpsiyon Ve Dekompozisyon Metodu İle Rejenerasyon

Desorpsiyon ve dekompozisyon üç metot ile gerçekleşmektedir. İlk metot için sıcak inert gaz akımı (700-900 °C) kullanılmaktadır. İkinci metot olan termal katalitik rejenerasyonda, katalitik özelliğe sahip metaller (Cu, Fe) kirlenicilerin parçalanması için adsorban yüzeyine tutunur. Metaller hem desorpsiyonu hem de ayrışmayı kolaylaştırır. Üçüncü metot olan fiziksel dalgalar ile rejenerasyonda, elektromanyetik ve mekanik dalgaların kullanıldığı iki yöntem geliştirilmiştir.

Mikrodalgaların frekansı, elektromanyetik spektrumun kızılötesi ışınları ve radyo dalgaları arasındaki segmentte yer alan 300 MHz ile 300 GHz ($\lambda = 1$ mm ile 100 cm) aralığına sahip ışımadır [25]. Mikrodalga (MW) ışınlama, geleneksel ısıtmaya alternatif olan bir teknolojidir [6]. Çevre dostu bir rejenerasyon yöntemi olan mikrodalga, homojen ve hızlı termal reaksiyonlara yol açan moleküler şekilde ısıtılabilme kapasitesine sahiptir. Rejenerasyon süresini azalttığı ve enerji tasarrufu sağladığı için bir çok araştırmacı tarafından kullanılmıştır [26,27]. Buna ek olarak, hem organik hem de inorganik bileşikler ile doymuş GAK'ı rejenere edebilmek için potansiyel olarak uygulanabilir yaklaşım olarak önerilmektedir [28]. Aktif karbon içindeki delokalize π elektronlar, yüksek seviyelerde mikrodalga absorpsiyonuna olanak sağlar, bu da hızlı ısıtmayı gerçekleştirir [18]. MW cihazları ile geleneksel (termal) ısıtma sistemi arasındaki temel fark, ısının üretilme şeklidir. Geleneksel rejenerasyon döner fırınlarda veya dikey fırınlarda gerçekleştirilir, ısı kaynağı karbon yatağının dışında bulunur ve yatak konveksiyon/konduksiyon ile ısıtılır [26].

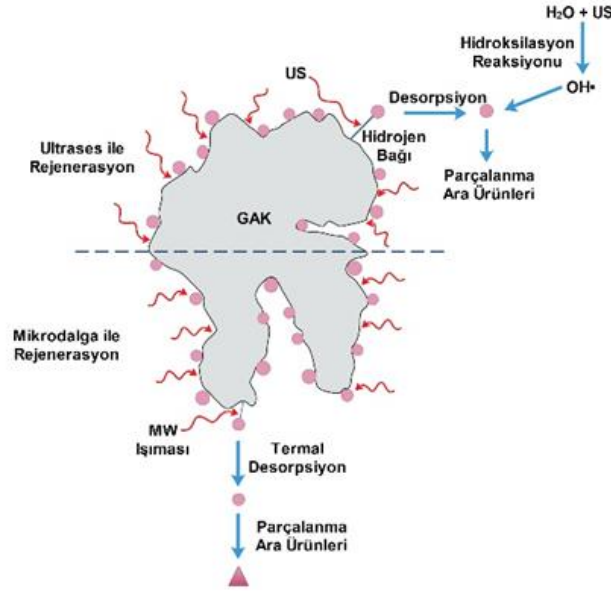
Kararlı durum koşullarına ulaşılan kadar malzemede bir sıcaklık gradyanı oluşturulur [13]. MW'de ise doğrudan karbon yatağında enerji sağlanır. MW ışıması ile ısıtmanın granül aktif karbona uygulanmasında GAK'un mikrodalga enerjisini daha hızlı ve daha kısa zamanda emmesi, bununla bağlantılı inert gaz tüketiminde azalma olduğu da öne sürmüştür [29]. Geleneksel ısıtmada karbon, konvektif ısı transferi ile ısıtıldığı için yüksek sıcaklık ve basınca maruz kalır. Bu durum gözenekli yapıda kok oluşumuna ve gözenek duvarlarının fiziksel olarak tıkanmasına sebep olur [30]. Geleneksel ısıtmanın en büyük dezavantajı olan kok, iyonik iletim yoluyla moleküler düzeyde enerji alan mikrodalga ile ısıtmada gözlenmez. Bu nedenle mikrodalga ile rejenerasyonu geleneksel termal rejenerasyona kıyasla daha fazla tercih edilebilir yapar.

Ultras (US) rejenerasyon geleneksel rejenerasyona alternatif olarak geliştirilen umut verici bir yöntemdir. Yüksek enerjiye sahip ses dalgaları, sıvı içerisinden geçerken hava kabarcıkları ile bir kaviteasyon meydana getirmektedir. Kaviteasyon, bir sıvıdaki mikro kabarcıkların oluşumu, büyümesi ve çökmesi olarak tanımlanmaktadır. Saniyeler içerisinde gerçekleşen çökme, yüksek sıcaklık ve basınç gibi koşulları yaratıp sudaki kimyasal bağları kırması ile birlikte $\cdot\text{OH}$, $\cdot\text{H}$, $\cdot\text{HO}_2$, H_2O_2 gibi reaktif türleri üretmektedir (Denklem 1 ve 2). Üretilen bu reaktifler sayesinde radikal zincir reaksiyonları başlamaktadır [31]. Ultras rejenerasyon verimi için ultrases yoğunluğu ve çözelti sıcaklığı oldukça etkilidir. Ultrases yoğunluğu, mikro kabarcıkların çökme süresi, çökme sonrası sıcaklık ve basıncına etki etmektedir. Böylelikle, kirlenicilerin daha fazla desorpsiyonu sağlanmaktadır. Ultrases frekansı ve yoğunluğunun yüksek olması adsorban için zarar verici potansiyelliktir. Dolayısıyla ultrases

yoğunluğu tükenmiş adsorbanı rejenere edebilmek için önemli bir kriter olmaktadır. Yüksek sıcaklıktaki çözelti kavitasyon kabarcıklarının üretilmesini kolaylaştırmaktadır. Bu da, yüksek basınçlı şok dalgalarının miktarını artırmaktadır [32].



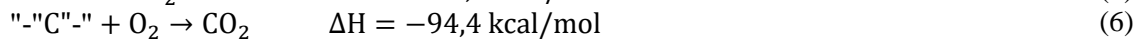
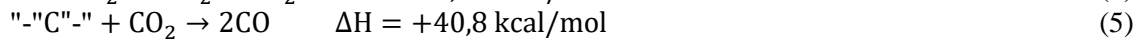
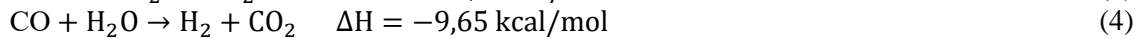
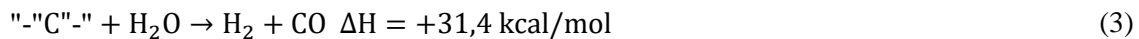
18 kHz' in üzerindeki frekanslardaki ultrases kısa dalga boyulu basınç dalgalarına yol açmaktadır. Bu işlem kirlilik faktörlerinin etkisizleştirilmesinde temel etken olan akustik kavitasyon (yüksek enerjili kabarcık oluşumu ve çökmesi) sonucu oluşan fiziksel etkiler ve pirolitik şartlardan meydana gelmektedir. Kavitasyonun etkisi ile oluşan hidroksil radikal oksidasyonu, yüksek basınçlı şok dalgalar ve yüksek hızlı mikrojetler ile aktif karbonun meso ve makro porları ve yüzey fonksiyonel özellikleri etkilenmektedir [33]. Ultrases ile arıtmada enerji tüketiminin az olması için rejenerasyon süresinin düşük tutulması gerektiği önerilmektedir. Rejenerasyon süresinin uzun tutulması kirlenici parçalamaya verimliliğinde önemli bir değişime sebep olmadığı ifade edilmiştir [34]. Şekil 2'de MW ve US rejenerasyon mekanizması özetlenmiştir.



Şekil 2. MW ve US rejenerasyon mekanizması

A.1.1.3 Gazifikasyon Metotları

Aktif karbonun termal arıtımı sırasında oluşan kömürleşmiş kalıntıların giderilmesinde kullanılan bir metottur. CO₂ ve buhar gibi gaz halindeki oksidantlar kalıntı maddeleri yüksek sıcaklıklarda gazlaştırır. CO₂ ve buhar ile gazlaştırma endotermik bir süreç iken O₂ ve hava kullanıldığında ekzotermik bir proses olmaktadır [7]. Denklem (3-6), gazifikasyon reaksiyonları gösterilmektedir.



O₂ veya hava kullanıldığında 500 °C yeterli iken, CO₂ ve buhar kullanılması durumunda 800-900 °C gerekmektedir, bu ise enerji tüketimini artırmaktadır.

A.1.2. Kimyasal Rejenerasyon

Rejenerasyon verimliliğinin artırılması ve enerji ihtiyacının azaltılması amacı ile termal rejenerasyona alternatif olarak kimyasal rejenerasyon yaklaşımı geliştirilmiştir. Bununla birlikte rejenerasyonun ekonomisi ve verimliliği ile birlikte çevresel yönü de dikkate alınarak konvansiyonel kimyasal rejenerasyon yöntemlerine (solventler, NaOH, ıslak hava ve termal oksidatif rejenerasyon) karşı yeni metotlar da geliştirilmiştir [7]. Tablo.1’de kimyasal rejenerasyonda kullanılan kimyasal ajanlar ve olası rejenerasyon mekanizması verilmiştir.

Tablo 1. Çeşitli rejener edici ajanların rejenerasyon mekanizmaları

Rejener edici ajanlar	Rejenerasyon mekanizması
Su (NaCl,NO ₃ ,yüzey aktif madde içeren çözelti)	Desorpsiyon
Solvent	Desorpsiyon
Süperkritik akışkanlar	Desorpsiyon
Elektrik akımı	Desorpsiyon-oksidasyon
Katalizör varlığında veya yokluğunda sıcak hava akımı (150-500°C)	Desorpsiyon-oksidasyon
Sulu ortamda oksijen varlığında yüksek sıcaklık ve basınç	Desorpsiyon-oksidasyon
TiO ₂ -UV	Oksidasyon
H ₂ O ₂ /UV/Fe ²⁺	Oksidasyon
S ₂ O ₈ ²⁻	Oksidasyon

A.1.2.1 Su ile Rejenerasyon

Atmosferik basınç ve sıcaklıkta su ile rejenerasyonun ana mekanizması ekstraksiyondur. Bu yöntemde su solvent olarak kullanılmaktadır. Ancak organik kirleticiler için zayıf bir çözücüdür [7]. Atık rejenerant içinde kirletici konsantrasyonu orijinal atık akımındaki konsantrasyonundan yüksek olmakla birlikte aynı sıvının aynı kirletici ile kirlenmesi gibi bir dezavantaja da sahiptir. Bunun yerine NaCl veya NaNO₃ içeren tuzlu su veya yüzey aktif maddelerinin kullanılması ile, suyun sıcaklığının ve basıncının artırılması ile rejenerasyon verimliliğinin arttığı belirlenmiştir [5]. Anyonik ve katyonik yüzey aktif maddelerin ilavesi ile misel oluşumu sağlanarak organik bileşikler ile doymuş aktif karbon rejener edilebilmektedir [31].

A.1.2.2 Solvent Rejenerasyonu

Bu yöntemde genellikle çevre açısından toksik organik çözücüler kullanıldığı için ekonomik ve çevre dostu bir yöntem değildir. Metanol, etanol ve aseton yaygın olarak kullanılan solventlerdir [35]. Bu yöntemde adsorbat yüzeyinden kirletici ekstre edilmektedir. Ekstraksiyon solvent, adsorbent ve adsorbant arasındaki etkileşime bağlıdır [8].

Ekstraksiyon sırasında aktif karbon üzerinde tutulan çözücünün sıcak N₂, sıcak ve soğuk su, buhar gibi yöntemler ile uzaklaştırılması gerekmektedir. Hem çözücünün geri kazanılması hem de rejener edilen aktif karbon yüzeyine kirleticinin adsorplanması açısından önemlidir [8]. Solvent ile rejenerasyon termal rejenerasyona alternatif bir metottur ve tükenmiş GAK'ın yerinde rejenerasyonunun yapılması, aktif karbon kaybının minimum olması ve karbon yüzeyi ve por yapısının bozulmaması gibi avantajları vardır [31].

A.1.2.3 Süperkritik Rejenerasyon

Akışkanların özellikleri kritik noktayı geçtikten sonra önemli değişikliklere uğrar. Viskozite ve dielektrik sabitleri düşüktür, difüzyon hızları yüksektir. Organik bileşikler için mükemmel çözücülere dönüşür. 221 bar ve 374°C sıcaklık şartları uygulanması bu yöntemin uygulanabilirliğini sınırlamaktadır. CO₂ ve su yaygın olarak kullanılan süperkritik akışkanlardır [7]. Birçok organik bileşik süperkritik akışkanda çözünür. Desorpsiyon işlemi genellikle adsorpsiyon ile aynı sıcaklıkta yapılmaktadır. Termal rejenerasyona göre kıyaslandığı zaman düşük enerji tüketimi ve düşük karbon kaybı bu metodun avantajını oluşturmaktadır [31].

A.1.2.4 Elektrokimyasal Rejenerasyon

Elektrokimyasal ve elektrotermal rejenerasyon ajanı olarak elektrik akımı kullanılır. Elektrotermal rejenerasyonda elektrik akımı gönderilir, uygulanan ısı ise kirleticinin aktif karbondan desorpsiyonunu sağlar. Elektrokimyasal rejenerasyonda ise güç kaynağına bağlı iki elektrot daldırılmış elektrolit çözeltisinden ibaret elektrokimyasal hücrede elektrik akımı uygulanarak gerçekleştirilmektedir[8].

Elektrokimyasal teknolojide farklı rejenerasyon mekanizmaları önerilmiştir[36-38]. 1-Bölgesel pH değişimlerinden dolayı desorpsiyonun kolaylaşması: Anot ve katot yüzeyinde sürekli olarak protonlar (H⁺) ve hidroksil iyonları OH⁻ oluşmaktadır, bu ise anot ve katot yüzeyinin yakın bölgelerinde pH'ın azalmasına ve artmasına neden olur. pH değişimi adsorpsiyon dengesini etkiler ve desorpsiyonu kolaylaştırır (denklem 7-8).



2-Bölgesel tuz konsantrasyonu değişiminden dolayı desorpsiyonunun kolaylaşması: Sodyum klorür yaygın olarak kullanılan elektrolittir. Na⁺'nın ve Cl⁻'in katoda ve anoda taşınması adsorplanan kirleticiler ile tepkimeye girmesi ile çözünürlüğü yüksek türlerin oluşması desorpsiyonu hızlandırmaktadır.

3-Elektrodesorpsiyon: Karbon bazlı adsorbentler iletken maddelerdir. Elektrik alanına maruz kaldıkları zaman ters yüklü organikler, yüklü adsorbent yüzeyine doğru hareket ederler. Yüklü organikler elektrik alanı ortadan kaldırıldıktan sonra elektrolit içine salınır.

4-Elektrooksidasyon: elektrokimyasal sistemlerde elektrooksidasyonun üç yol izi önerilmektedir.

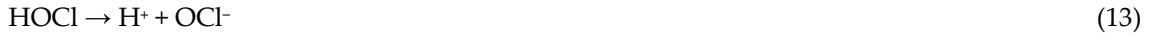
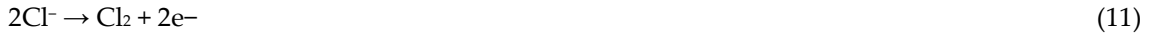
a-Direkt anodik oksidasyon: elektronlar organiklerden anot yüzeyine transfer olur (denklem 9).



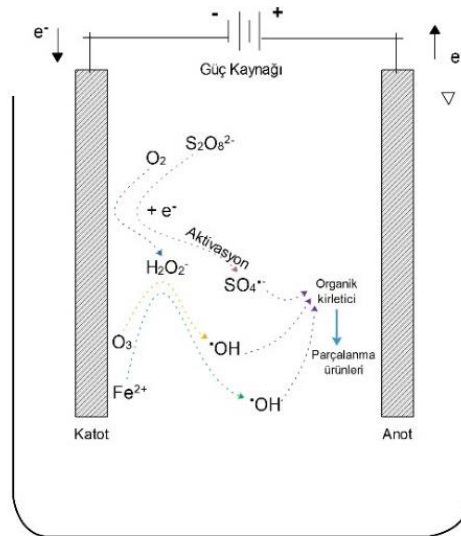
b-İndirekt oksidasyon: anot yüzeyine yakın bölgede üretilen yüksek oksidatif kapasiteye sahip •OH ile gerçekleştirilir (denklem 10).



c-Diğer oksidatif türler ile gerçekleştirilen indirekt oksidasyon: anodik olarak üretilen klor türleri (Cl₂, HOCl, ve OCl⁻) ve katodik olarak üretilen H₂O₂ ve aktif karbonun aktivasyonu sonucu oluşan •OH ile gerçekleştirilir (denklem 11-13).



Katot yüzeyinde O₂+2H⁺+2e⁻ → H₂O₂ tepkimesi ile H₂O₂ oluşmaktadır. Elektrokimyasal rejenerasyon mekanizması Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Elektrokimyasal rejenerasyon mekanizması

Anot ve katot pH'ındaki bu tür değişiklikler adsorbat ile adsorban arasındaki adsorpsiyon dengesini değiştirmek ve desorpsiyon süreçlerini teşvik etmek için genellikle yeterlidir. Bu durum yüksek çözünürlükteki organik bileşikler ile hidroksil iyonlarının rekabetli adsorpsiyonu olarak da bilinir, artan pH desorpsiyon sürecini uyarır. Aksine asidik ortamlar organik bileşiklerin çözünürlüğünü azaltır ve GAK'ın yüzeyindeki fonksiyonel grupları nötralize eder, sonuç olarak elektrostatik itme kuvvetlerinde ortaya çıkan azalma, bileşiklerin GAK'ın katı yüzeyine adsorpsiyonunu artırır. Diğer mekanizma, elektrodesorpsiyon ile rejenerasyondur, burada, GAK yüzeyi, onun yarı iletken özelliği ve yüksek yüzey alanından dolayı uygulanan elektriksel potansiyel ile yüklenebilir, ki bu benzer yüklü türlerin elektrostatik itmelerine neden olur. Çalışmalar göstermiştir ki, karbon yüzeyine negatif anodik potansiyelin uygulanması adsorplanan katyonların miktarını azaltır ve adsorbe edilen anyon miktarı artar. Doymuş aktif karbon yatağı anot veya katoda yakın tutularak katodik veya anodik rejenerasyona tabi tutulur. Bazen doymuş aktif karbon elektrotlar arasındaki tüm alanı doldurur.

Katodik rejenerasyonda ilk önce adsorbat karbon yüzeyinden desorbe edilir, katotda üretilen OH- iyonları pH artışına neden olur. Böylece yüzey gruplarının ve adsorbatın anyonik formlara dönüşümü sağlanır. Karbonlu yüzeyde oluşturulan negatif yükler ile adsorbat anyonları arasındaki itici elektrostatik etkileşimler desorpsiyona yardımcı olur. Desorbe olan adsorbat anoda doğru göç eder ve oksitlenmesi sağlanır. Anodik rejenerasyonda desorpsiyonun gerçekleşmediği elektrot yüzeyi üzerinde oksidasyonun gerçekleştiği ifade edilmektedir [7]. Kirleticilerin desorpsiyonunda pH değişimi, iyonize türlerin varlığı ve elektrik potansiyeli etki eder. Kirleticilerin parçalanmasında elektrokimyasal reaksiyonlar (direkt anodik oksidasyon ve indirekt katodik oksidasyon) yolu ile gerçekleşir [37].

A.1.2.5 Oksidatif Rejenerasyon

Bu yöntem ile sadece aktif karbonun adsorpsiyon kapasitesi artmaz ayrıca adsorplanan kirleticinin de oksidasyonu sağlanır. O₂ ve O₃ gibi oksidantlar kullanılmaktadır. Kataliz kullanılması ile proses modifiye edilebilmektedir.

A.1.2.5.1 Termal Oksidatif Rejenerasyon

Bu metotta tükenmiş yatak içinde sıcak hava akımı (kirletici türüne göre 150-500 °C) dolaştırılır. Bu metotta oksijen önce yüzeye kimyasal olarak sorbe edilir. Adsorbe olan kirleticiler oksitlenir ve oluşan gaz halindeki ürünler desorbe olur. Oksijen sadece kirletici ile değil ayrıca karbonlu maddenin aktif yüzeyleri ile de reaksiyona girebilir. Bu yöntemde kirletici iç mikro gözeneklerde tutulmuş ise dış bölgelerde adsorbe edilen oksijen birkaç aktif bölgeyi gazlaştırabilir. Ayrıca adsorbentin kütle kaybı söz konusu olup, por yapısı zarar görebilir. Kirletici homojen olarak dağılmış ise zarar minimum düzeydedir [8].

A.1.2.5.2 Katalitik Termal Oksidatif Rejenerasyon

Adsorbanlar kirleticinin parçalanmasını kolaylaştıran belirli metalik türler içerir. Adsorpsiyon aşamasından önce aktif karbon yüzeyi katalizör (örneğin Fe₂O₃-CuO) ile kaplanır. Termal oksidatif rejenerasyondan daha düşük sıcaklıklarda kirletici katalitik olarak oksitlenir. Kirletici parçalandıktan sonra desorbe olur.

A.1.2.5.3 Ozon Rejenerasyonu

Rejenerasyon ajanı olarak O₂/O₃ karışımı kullanılmaktadır. Havanın rejener edici ajan olarak kullanılması ucuz ve basit bir sistemdir. O₃'ün yüksek oksidant özelliğinden dolayı ısıtmaya gerek kalmadan ortam sıcaklığında rejenerasyonu sağlayabilir. İki farklı yolla kirletici parçalanır:

a-Moleküler O₃ ile direkt oksidasyon,

b-O₃ aktif karbonun yüzeyinde katalitik olarak ayrışarak yüksek dereceden reaktif hidroksil ve oksijen radikalleri (·OH ve (O₂·) oluşturur, bu radikaller kirleticiyi oksitleyebilir ve mineralizasyonu

sağlayabilir. Düşük O₃ dozları kirleticiyi yeterince parçalayamaz, yüksek O₃ dozları ise karbonlu matrikse kısmen zarar verebilir, ayrıca daha sonraki adsorpsiyon adımını engelleyebilecek oksijenlenmiş ürünler oluşabilir[8,39]. Aktif karbon O₃, HNO₃ veya H₂O₂ ile oksidatif arıtıma maruz kalırsa, karbon yüzeyinin kimyasal kompozisyonu değişime uğrar; bazik yerler asidik yere dönüşür ve yeni asidik yerler oluşur. Ayrıca, BET yüzey alanı ve mikropor hacmi azalır [40].

A.1.2.5.4 Islak Hava Rejenerasyon

Bu teknik, sulu ortamdaki kirleticilerin toksisitesinin düşürülmesi için ayrışması temel prensibine dayanır. Sulu bir çözelti içerisindeki tükenmiş aktif karbon oksijen varlığında 10-50 bar basınç altında 150-200°C aralığında ısıtmaya tabi tutulur [8,15]. Doymuş adsorbanın ılık su ile teması sonrası adsorbatın bir kısmı desorbe olmaya başlar. Suya beslenen oksijen daha sonra desorbe edilmiş adsorbatları oksitleyerek desorpsiyonun dengesini değiştirir ve sıvı faz içerisinde daha fazla adsorbat molekülünün hareket edebilmesini sağlar [41]. Sadece aktif karbonu yeniden kullanmakla kalmaz, aynı zamanda adsorbe edilmiş kirletici maddelerin çoğunu yok edebilir veya biyolojik olarak parçalanabilir formlara dönüştürebilir [42].

A.1.2.6 Oksijensiz oksidatif rejenerasyon

A.1.2.6.1 Fotokatalitik Rejenerasyon

Bu yöntem TiO₂ ile kaplanmış tükenmiş aktif karbonun rejenerasyonunda kullanılmaktadır. Sulu ortamda doymuş aktif karbonlar UV ışığına maruz bırakılmaktadır. Bu şartlar altında sudan ·OH radikalleri üretilir ve kirleticiler su, CO₂ ve mineral asitlere parçalanır.

A.1.2.6.2 H₂O₂ Rejenerasyonu

H₂O₂, organikleri yüksek dereceden oksitleme potansiyeline sahip hidroksil radikal kaynağıdır. Islak peroksit rejenerasyonunda tükenmiş aktif karbon içeren suya sıcak H₂O₂ ilave edilir. Kirleticiler su ile karbon yüzeyinden ekstre edilir ve H₂O₂'nin termal ayrışması ile oluşan hidroksil radikalleri ile okside edilir. Foto-ıslak peroksit rejenerasyon prosesinde ise UV ışığı hidroksil radikalinin oluşumunu teşvik eder. Fenton rejenerasyonda ise fenton oksidasyonu ile adsorbe edilen kirleticinin mineralizasyonu prensibine dayanmaktadır. Fe²⁺ iyonu ve H₂O₂ arasındaki reaksiyon ile ·OH radikallerinin üretilmesine dayanmaktadır. UV ışığı ile fenton rejenerasyon prosesinin performansı geliştirilebilir [8]. GAK'ın sıfır yüklü pH noktası vardır. Bu pH noktasında karbon yüzeyinin net yüzey yükü nötraldır ve pozitif yük sayısı ortalama olarak negatif yüke eşittir. GAK'a Fe katılmak için kuvvetli asidik Fe çözeltileri kullanılır. Fe çözeltilisinin pH'ı GAK'ın sıfır yüklü pH noktasından daha düşüktür. Bu şartlar altında, pozitif yüklü GAK yüzeyi ile çözeltideki Fe katyonları arasındaki itme kuvveti, GAK'ın içine Fe'in taşınmasını engelleyebilir. GAK'ın asidik işlemlerde karbon yüzeyi okside olacaktır. GAK'ın sıfır yüklü pH noktasından daha yüksek pH'a sahip Fe çözeltisi kullanıldığında, karbon yüzeyi deprotonated karboksil grupları ile kaplanır, negatif yükler çözeltiden katyonları çeker ve adsorplar, böylece metal katalizörler için uygun hale gelir, GAK Fe ile yüklenmiş olur. GAK yüzeyine tutuklanmış Fe ile H₂O₂ arasındaki reaksiyon ·OH üretir ve kirleticiyi okside eder [43].

A.1.2.6.3 Persülfat Rejenerasyonu

S₂O₈²⁻ anyonu güçlü bir oksidanttır, ancak tek başına kullanıldığında etkisiz bir rejenere edici ajandır. Çeşitli yöntemler ile aktive edilen S₂O₈²⁻, sülfat radikalleri (SO₄^{-·}) oluşturabilir. SO₄^{-·}'in oksidasyon gücü S₂O₈²⁻'den daha yüksektir, (SO₄^{-·}) 'nın redoks potansiyeli (E° = 2.4 V), S₂O₈²⁻ anyonunun ise E° = 2.01 V 'dır [44]. S₂O₈²⁻'in UV aktivasyonu ile de persülfat radikali oluşabilmektedir. UV ışığı ile aktif karbon rejenerasyonundan başarılı sonuçlar elde edilmiştir [45]. Ayrıca geleneksel ısıtma ile veya MW ısıtma ile de aktive edilebilmektedir (denklem 14).



Persülfat anyonu elektron taşınım yolu ile kimyasal olarak da aktive olabilmektedir. Aktif karbon aktivatör olarak kullanılabilir. Aktif karbon yüzeyi kısmen elektronlar ve fonksiyonel gruplar içerir ve sülfat radikali indirgenmiş form oluşturabilmektedir [44]. Aktif karbon üzerindeki oksijen fonksiyonel grupları persülfat anyonunun ayrışmasını kolaylaştırabilir [43]. Radikal oluşum mekanizması denklem 15-16'de verilmiştir.



Sodyum persülfat ile yapılan rejenerasyon işleminde, sülfür'ün sorpsiyon bölgelerini doldurduğu ve sorpsiyon kayıplarının olduğu ifade edilmektedir. pH artışı bu kalıntıların giderilmesinde etkili bir yöntem olarak önerilmektedir [43].

A.1.3 Mikrobiyolojik Rejenerasyon

Adsorpsiyondan önce veya sonrasında aktif karbona mikroorganizmaların aşılınması yolu ile gerçekleştirilir.

A.1.3.1 Biyolojik Aktif Karbonların Rejenerasyonu

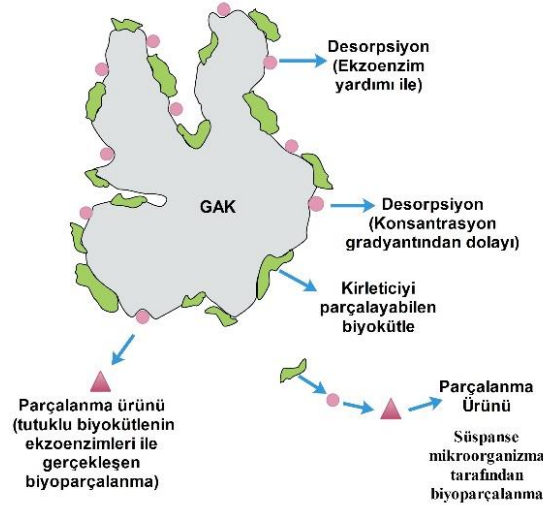
Adsorpsiyondan önce mikroorganizmalar ile aşılınan aktif karbonlar üzerinde biyolojik bozunmayı sağlayacak biyofilm tabakası oluşur. Ancak gözeneklerin tıkanması sebebi ile adsorpsiyon kapasitesi azalır. Biyolojik aktif karbon üzerinden geçen kirleticinin bir kısmı aktif karbon üzerinde tutulan mikroorganizmalar tarafından giderilir, kalan kısmı karbon yüzeyi tarafından adsorplanır ve zaman ile aynı mikroroganizmalar tarafından tüketilir. Bu yolla oluşturulan biyolojik aktif karbonlar aktif çamur birimlerine ilave edildiğinde aktif karbon üzerine adsorpsiyon ve mikrobiyolojik parçalanmanın sinerjistik etkisinden dolayı arıtım verimliliği artırılmış olur [8].

A.1.3.2 Biyorejenerasyon

Biyorejenerasyon, aktif karbonun yüzeyinde adsorbe olan kirletici maddelerin mikroorganizmanın aktivitesi ya da mikroorganizmanın salgıladığı enzimlerle bozunmasına dayanan bir yöntem olarak tanımlanmaktadır [47]. Biyolojik olarak parçalanabilir bileşiklerin desorpsiyonu, biyorejenerasyonu ve adsorbanın adsorpsiyon kapasitesinin yenilenmesini desteklemektedir. Adsorbanın biyorejenerasyonunu açıklama amacıyla literatürde iki farklı mekanizma bulunmaktadır [48]. İlk biyorejenerasyon mekanizması, mikroorganizmanın ekzoenzimatik aktivitesinden kaynaklanan adsorban yüzeyinde meydana gelen adsorbe edilmiş maddenin bozunmasıdır. Mikroorganizma tarafından hücrelerin içinde üretilen ekzo enzimler adsorbanın gözeneklerine dağılarak adsorbe edilmiş substrat ile reaksiyona girmektedir [49]. Adsorpsiyon bölgeleri, organik maddenin enzimle reaksiyona girmesinden sonra zayıfladığından ötürü kirletici maddenin desorpsiyonuna yol açmaktadır. Ancak, ekzoenzimler boyutlarından ötürü bazı mikro ve mezo gözeneklere tam olarak ulaşamamaktadırlar. İkinci biyorejenerasyon mekanizması ise adsorpsiyon-desorpsiyon dengesindeki farklılıktan kaynaklanan konsantrasyon gradyanına bağlı olarak gerçekleşmektedir [15]. Aktif karbon yüzeyi ile sıvı yüzeyin yarattığı konsantrasyon gradyanı ile desorpsiyonun gerçekleşmesinin ardından hedef bileşiklerin biyolojik olarak parçalanmasını içermektedir. Denge durumunda adsorbe olan organik maddeler, karbon yüzeyi ve sıvının içerisinde dağılmaktadır [49]. Mikroorganizmalar tarafından tutulan organik maddeler parçalanmakta, bu parçalanma ile denge bozulmakta ve ardından çözeltinin konsantrasyonu artarak desorpsiyon işlemi gerçekleşmektedir [50].

Desorpsiyon engellenmediği sürece ve yeteri kadar biyobozunma gerçekleşene kadar bu yöntem devam etmektedir. Dolayısıyla bu mekanizmaya göre mikrobiyolojik rejenerasyonu sınırlandıran ana faktörlerden biri adsorpsiyon tersinirliğidir ve mikrobiyolojik rejenerasyon prosesi için önemli bir kriterdir. Bunun yanı sıra biyorejenerasyon yöntemi için bir diğer önemli kriter de organik maddelerin

uzaklaştırılma verimliliğidir. Buhar rejenerasyonu ve kimyasal rejenerasyon aktif karbon yapısında bozulmalara sebebiyet verdiği için mikrobiyolojik rejenerasyon bu yöntemlere göre daha ekonomik, daha güvenli ve aktif karbonun kullanım süresini uzatan daha çevreci bir yöntem haline getirmektedir [15,51,52]. Ancak metabolitlerin oluşu ve yavaş desorpsiyon oranları ile mikrobiyolojik rejenerasyon yönteminin uygulamaları kısıtlanmaktadır [53]. Tükenmiş aktif karbonun biyolojik rejenerasyon mekanizması Şekil 4’te özetlenmiştir.



Şekil 4. Biyorejenerasyon mekanizması

B.1 EKONOMİK AÇIDAN REJENERASYON METOTLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Rejenerasyon metodunun seçiminde en önemli kriter desorbe edilecek kirlenici tipi olsa da maliyet, karbon kaybı, porozite ve yüzey özelliklerine etkileri gibi birçok kriter de etkilidir. Termal rejenerasyon pratikte uygulanabilir bir metot olmakla birlikte %5-10 oranında karbon kaybı yaratması ve 800°C gibi sıcaklıklarda yürütülen bir proses olduğu için enerji sarfiyatı yüksek olması sebebi ile alternatif rejenerasyon teknikleri uygulanmaya başlanmıştır. Biyorejenerasyon düşük maliyetli ancak düşük hızda yürütülen bir metottur [55]. Alvarez-Pugliese vd. [36] tarafından yapılan çalışmada katodik rejenerasyonda spesifik enerji tüketiminin 3,80 kWh kg GAK⁻¹ olduğu bunun ise 0,25 dolar GAK⁻¹'a karşılık geldiği belirlenmiştir. Rejenerasyon maliyetinin ham GAK maliyetinden (1-5dolar kg GAK⁻¹) oldukça düşük olduğu belirtilmiştir. Jatta vd. [44] tarafından yapılan çalışmada termal olarak aktive edilmiş persülfat ile rejenerasyon incelenmiştir. Sodyum persülfat ve elektrik tüketimi dikkate alınarak 1 kg GAK'ın rejenerasyon maliyeti 27 dolar olarak belirlenmiştir. Bu maliyetin termal rejenerasyon maliyetinden daha düşük olduğu ifade edilmiştir.

II. SONUÇ

Aktif karbonun hizmet süresinin uzatılması için, tükendikten sonra rejenere edilmesi gerekmektedir. Rejenerasyon işleminde aktif karbonun gözenek yapısının korunması, kütle kaybının olmaması, enerji ve kimyasal madde tüketiminin az olması, çok sayıda rejenerasyon işleminden sonra adsorpsiyon verimi düşmeden kullanılabilir olması gibi özellikler aranmaktadır.

Termal rejenerasyon işlemi aktif karbon kolonunda gerçekleşmeyip tükenmiş aktif karbonun fırınlara taşınması gereklidir. Yüksek sıcaklıkların korunması enerji maliyetini artırmaktadır. Ayrıca karbon kütle kaybı, ısınma-soğuma sürecinde gözenek yapısının bozulması ve gözeneklerde kömürleşmiş kalıntıların

oluşması gözlemlenmektedir. Bu yüzden rejenerasyon sonrası aktif karbonun adsorpsiyon kapasitesinin azalması olasıdır.

Kimyasal rejenerasyon işlemi desorpsiyonu sağlayacak ve desoplanmış/desorplanmamış kirleticiyi kimyasal olarak parçalayabilecek çeşitli ajanlar kullanılarak yürütülmektedir. En önemli avantajı düşük enerji tüketimi ile aktif karbon kolonunda gerçekleştirilebilmesidir.

Ancak kullanılan kimyasal ajanların veya parçalanma ürünlerinin ikincil bir kirlilik oluşturmaması önemlidir. Biyolojik rejenerasyon kirleticiyi biyolojik olarak parçalama yeteneği olan mikroorganizmaların adsorpsiyon öncesinde ve sonrasında aktif karbon ile birlikte kullanılması ile gerçekleşmektedir. Gerek aktif karbon yüzeyinde biyofilm tabakası gerekse süspanse durumundaki biyokütle kirleticiyi biyolojik olarak parçalayabilmektedir. Adsorpsiyon öncesinde biyofilm oluşturmak gözeneklerin tıkanmasına ve adsorpsiyon veriminin düşmesine sebep olur. Ara metabolitlerin oluşumu, bu rejenerasyon metodunun içme suyu artımında kullanımı sınırlamaktadır. Ancak atıksu arıtım ünitelerinde bu metodun kullanımı daha çevreci bir yaklaşım olacağı şeklinde değerlendirilmektedir. Uygun rejenerasyon metodu kirleticii tipine bağlı olarak değişmektedir. Bunun yanısıra uygun metodunun seçilmesinde karbon kaybı, gözenek boyutu bozulması, işletme maliyeti, olası çevresel etkiler gibi kriterlerin de dikkate alınması önerilmektedir.

III. KAYNAKLAR

- [1] J. Pallarés, A. González-Cencerrado, and I. Arauzo, “Production and characterization of activated carbon from barley straw by physical activation with carbon dioxide and steam,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 115, pp. 64–73, Aug. 2018, doi: 10.1016/J.BIOMBIOE.2018.04.015.
- [2] B. Ferrández-Gómez, R. Ruiz-Rosas, S. Beaumont, D. Cazorla-Amorós, and E. Morallón, “Electrochemical regeneration of spent activated carbon from drinking water treatment plant at different scale reactors,” *Chemosphere*, vol. 264, p. 128399, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128399.
- [3] S. K. Smolin, O. V. Zabneva, and N. A. Klymenko, “Chemical Regeneration of Biological Activated Carbon in Removing Nitrophenol,” *J. Water Chem. Technol.*, vol. 40, no. 3, pp. 126–130, 2018, doi: 10.3103/s1063455x18030025.
- [4] A. V. Baskar et al., “Recovery, regeneration and sustainable management of spent adsorbents from wastewater treatment streams: A review,” *Sci. Total Environ.*, vol. 822, p. 153555, 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153555.
- [5] E. O. Fagbohun et al., “Physicochemical regeneration of industrial spent activated carbons using a green activating agent and their adsorption for methyl orange,” *Surfaces and Interfaces*, vol. 29, p. 101696, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.SURFIN.2021.101696.
- [6] E. Gagliano, P. P. Falciglia, Y. Zaker, T. Karanfil, and P. Roccaro, “Microwave regeneration of granular activated carbon saturated with PFAS,” *Water Res.*, vol. 198, p. 117121, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.WATRES.2021.117121.
- [7] F. Salvador, N. Martin-Sanchez, R. Sanchez-Hernandez, M. J. Sanchez-Montero, and C. Izquierdo, “Regeneration of carbonaceous adsorbents. Part I: Thermal Regeneration,” *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 202, Elsevier, pp. 259–276, Jan. 15, 2015, doi: 10.1016/j.micromeso.2014.02.045.

- [8] F. Salvador, N. Martin-Sanchez, R. Sanchez-Hernandez, M. J. Sanchez-Montero, and C. Izquierdo, "Regeneration of carbonaceous adsorbents. Part II: Chemical, Microbiological and Vacuum Regeneration," *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 202, no. C, pp. 277–296, 2015, doi: 10.1016/j.micromeso.2014.08.019.
- [9] Z. Yue, A. Vakili, and J. Wang, "Activated carbon fibers from meltblown isotropic pitch fiber webs for vapor phase adsorption of volatile organic compounds," *Chem. Eng. J.*, vol. 330, pp. 183–190, Dec. 2017, doi: 10.1016/J.CEJ.2017.07.150.
- [10] A. H. Berger, J. A. Horowitz, T. Machalek, A. Wang, and A. S. Bhowan, "A Novel Rapid Temperature Swing Adsorption Post-combustion CO₂ Capture Process Using a Sorbent Polymer Composite," in *Energy Procedia*, Jul. 2017, vol. 114, pp. 2193–2202, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.1356.
- [11] D. W. Mazyck and F. S. Cannon, "Overcoming calcium catalysis during the thermal reactivation of granular activated carbon: Part I. Steam-curing plus ramped-temperature N₂ treatment," *Carbon N. Y.*, vol. 38, no. 13, pp. 1785–1799, Jan. 2000, doi: 10.1016/S0008-6223(00)00013-0.
- [12] J. E. Park, G. B. Lee, B. U. Hong, and S. Y. Hwang, "Regeneration of activated carbons spent by waste water treatment using KOH chemical activation," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 23, 2019, doi: 10.3390/app9235132.
- [13] F. K. Yuen and B. H. Hameed, "Recent developments in the preparation and regeneration of activated carbons by microwaves," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 149, no. 1–2, Elsevier, pp. 19–27, Jul. 30, 2009, doi: 10.1016/j.cis.2008.12.005.
- [14] A. L. Cazetta et al., "Thermal regeneration study of high surface area activated carbon obtained from coconut shell: Characterization and application of response surface methodology," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 101, pp. 53–60, May 2013, doi: 10.1016/J.JAAP.2013.02.013.
- [15] M. El Gamal, H. A. Mousa, M. H. El-Naas, R. Zacharia, and S. Judd, "Bio-regeneration of activated carbon: A comprehensive review," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 197, pp. 345–359, May 2018, doi: 10.1016/j.seppur.2018.01.015.
- [16] E. Sabio, E. González, J. F. González, C. M. González-García, A. Ramiro, and J. Gañan, "Thermal regeneration of activated carbon saturated with p-nitrophenol," *Carbon N. Y.*, vol. 42, no. 11, pp. 2285–2293, Jan. 2004, doi: 10.1016/J.CARBON.2004.05.007.
- [17] D. Xin-hui, C. Srinivasakannan, and L. Jin-sheng, "Process optimization of thermal regeneration of spent coal based activated carbon using steam and application to methylene blue dye adsorption," *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 45, no. 4, pp. 1618–1627, Jul. 2014, doi: 10.1016/J.JTICE.2013.10.019.
- [18] G. Durán-Jiménez et al., "Fast regeneration of activated carbons saturated with textile dyes: Textural, thermal and dielectric characterization," *Chem. Eng. J.*, vol. 378, p. 121774, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.CEJ.2019.05.135.
- [19] D. H. S. Santos, J. L. S. Duarte, J. Tonholo, L. Meili, and C. L. P. S. Zanta, "Saturated activated carbon regeneration by UV-light, H₂O₂ and Fenton reaction," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 250, p. 117112, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.seppur.2020.117112.
- [20] B. Sonmez Baghirzade, Y. Zhang, J. F. Reuther, N. B. Saleh, A. K. Venkatesan, and O. G. Apul, "Thermal Regeneration of Spent Granular Activated Carbon Presents an Opportunity to Break the Forever PFAS Cycle," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 55, no. 9, pp. 5608–5619, 2021, doi: 10.1021/acs.est.0c08224.

- [21] E. Zhou et al., "Study of the combination of sulfuric acid treatment and thermal regeneration of spent powdered activated carbons from decolourization process in glucosamine production," *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol. 121, pp. 224–231, Nov. 2017, doi: 10.1016/J.CEP.2017.09.008.
- [22] S. G. Ramalingam et al., "Recovery comparisons-Hot nitrogen V s steam regeneration of toxic dichloromethane from activated carbon beds in oil sands process," *J. Hazard. Mater.*, vol. 205–206, pp. 222–228, 2012, doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.12.062.
- [23] A. Jareteg, D. Maggiolo, H. Thunman, S. Sasic, and H. Ström, "Investigation of steam regeneration strategies for industrial-scale temperature-swing adsorption of benzene on activated carbon," *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.*, vol. 167, p. 108546, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.CEP.2021.108546.
- [24] H. Khas and N. Delhi, "Steam Regeneration of Adsorbents: An Experimental and Technical Review," *Chem. Sci. Trans.*, vol. 2, no. 4, pp. 1078–1088, 2013, doi: 10.7598/cst2013.545.
- [25] V. Becher, A. Goanta, and H. Spliethoff, "Validation of spectral gas radiation models under oxyfuel conditions - Part C: Validation of simplified models," *Int. J. Greenh. Gas Control*, vol. 11, no. April 2013, pp. 34–51, 2012, doi: 10.1016/j.ijggc.2012.07.011.
- [26] T. Kim, J. Lee, and K. H. Lee, "Microwave heating of carbon-based solid materials," *Carbon Lett.*, vol. 15, no. 1, pp. 15–24, 2014, doi: 10.5714/CL.2014.15.1.015.
- [27] X. Pi et al., "Microwave Irradiation Induced High-Efficiency Regeneration for Desulfurized Activated Coke: A Comparative Study with Conventional Thermal Regeneration," *Energy and Fuels*, vol. 31, no. 9, pp. 9693–9702, 2017, doi: 10.1021/acs.energyfuels.7b01260.
- [28] Z. Wang, C. Yu, H. Huang, W. Guo, J. Yu, and J. Qiu, "Carbon-enabled microwave chemistry: From interaction mechanisms to nanomaterial manufacturing," *Nano Energy*, vol. 85, p. 106027, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.nanoen.2021.106027.
- [29] D. A. Jones, T. P. Lelyveld, S. D. Mavrofidis, S. W. Kingman, and N. J. Miles, "Microwave heating applications in environmental engineering - A review," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 34, no. 2, pp. 75–90, Jan. 2002, doi: 10.1016/S0921-3449(01)00088-X.
- [30] R. Cherbański, "Regeneration of granular activated carbon loaded with toluene – Comparison of microwave and conductive heating at the same active powers," *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol. 123, pp. 148–157, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.cep.2017.11.008.
- [31] O. Zanella, I. C. Tessaro, and L. A. Féris, "Desorption- and decomposition-based techniques for the regeneration of activated carbon," *Chem. Eng. Technol.*, vol. 37, no. 9, pp. 1447–1459, 2014, doi: 10.1002/ceat.201300808.
- [32] H. Y. Hong, N. M. Moed, Y. Ku, and H. Y. Lee, "Ultrasonic regeneration studies on activated carbon loaded with isopropyl alcohol," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 21, pp. 1–13, 2020, doi: 10.3390/app10217596.
- [33] T. Zhang et al., "Adsorption characteristics of chloramphenicol onto powdered activated carbon and its desorption performance by ultrasound," *Environ. Technol. (United Kingdom)*, vol. 42, no. 4, pp. 571–583, 2021, doi: 10.1080/09593330.2019.1637464.
- [34] L. R. de Carvalho Costa, L. de Moraes Ribeiro, G. E. N. Hidalgo, and L. A. Féris, "Evaluation of efficiency and capacity of thermal, chemical and ultrasonic regeneration of tetracycline exhausted activated carbon," *Environ. Technol. (United Kingdom)*, vol. 43, no. 6, pp. 907–917, 2022, doi: 10.1080/09593330.2020.1811391.

- [35] H. Patel, "Review on solvent desorption study from exhausted adsorbent," *J. Saudi Chem. Soc.*, vol. 25, no. 8, p. 101302, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.JSCS.2021.101302.
- [36] C. E. Alvarez-Pugliese, J. Acuña-Bedoya, S. Vivas-Galarza, L. A. Prado-Arce, and N. Marriaga-Cabrales, "Electrolytic regeneration of granular activated carbon saturated with diclofenac using BDD anodes," *Diam. Relat. Mater.*, vol. 93, pp. 193–199, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.DIAMOND.2019.02.018.
- [37] R. V. McQuillan, G. W. Stevens, and K. A. Mumford, "The electrochemical regeneration of granular activated carbons: A review," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 355. Elsevier B.V., pp. 34–49, Aug. 05, 2018, doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.04.079.
- [38] W. Zhou, X. Meng, J. Gao, H. Zhao, G. Zhao, and J. Ma, "Electrochemical regeneration of carbon-based adsorbents: a review of regeneration mechanisms, reactors, and future prospects," *Chem. Eng. J. Adv.*, vol. 5, p. 100083, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.ceja.2020.100083.
- [39] X. He, M. Elkouz, M. Inyang, E. Dickenson, and E. C. Wert, "Ozone regeneration of granular activated carbon for trihalomethane control," *J. Hazard. Mater.*, vol. 326, pp. 101–109, Mar. 2017, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2016.12.016.
- [40] A. Cabrera-Codony, R. Gonzalez-Olmos, and M. J. Martín, "Regeneration of siloxane-exhausted activated carbon by advanced oxidation processes," *J. Hazard. Mater.*, vol. 285, pp. 501–508, 2015, doi: 10.1016/j.jhazmat.2014.11.053.
- [41] B. Ledesma, S. Román, E. Sabio, and A. Álvarez-Murillo, "Improvement of spent activated carbon regeneration by wet oxidation processes," *J. Supercrit. Fluids*, vol. 104, pp. 1–10, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.supflu.2015.05.007.
- [42] Y. Yuan, P. Gu, Y. Yang, and G. Zhang, "Regeneration of PAC used for reverse osmosis concentrate treatment by wet oxidation," *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 34, pp. 98–104, 2016, doi: 10.1016/j.jiec.2015.10.043.
- [43] A. Hutson, S. Ko, and S. G. Huling, "Persulfate oxidation regeneration of granular activated carbon: Reversible impacts on sorption behavior," *Chemosphere*, vol. 89, no. 10, pp. 1218–1223, Nov. 2012, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2012.07.040.
- [44] S. Jatta, S. Huang, and C. Liang, "A column study of persulfate chemical oxidative regeneration of toluene gas saturated activated carbon," *Chem. Eng. J.*, vol. 375, p. 122034, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.cej.2019.122034.
- [45] D. An, P. Westerhoff, M. Zheng, M. Wu, Y. Yang, and C. A. Chiu, "UV-activated persulfate oxidation and regeneration of NOM-Saturated granular activated carbon," *Water Res.*, vol. 73, pp. 304–310, Apr. 2015, doi: 10.1016/J.WATRES.2015.01.040.
- [46] F. Salvador, N. Martin-Sanchez, R. Sanchez-Hernandez, M. J. Sanchez-Montero, and C. Izquierdo, "Regeneration of carbonaceous adsorbents. Part I: Thermal Regeneration," *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 202, pp. 259–276, 2015, doi: 10.1016/j.micromeso.2014.02.045.
- [47] K. Y. Leong, S. L. Loo, M. J. K. Bashir, W. Da Oh, P. V. Rao, and J. W. Lim, "Bioregeneration of spent activated carbon: Review of key factors and recent mathematical models of kinetics," *Chinese J. Chem. Eng.*, vol. 26, no. 5, pp. 893–902, May 2018, doi: 10.1016/j.cjche.2017.09.018.

- [48] Ö. Aktaş and F. Çeçen, “Adsorption and cometabolic bioregeneration in activated carbon treatment of 2-nitrophenol,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 177, no. 1–3, pp. 956–961, May 2010, doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.01.011.
- [49] S. L. Ng, C. E. Seng, and P. E. Lim, “Bioregeneration of activated carbon and activated rice husk loaded with phenolic compounds: Kinetic modeling,” *Chemosphere*, vol. 78, no. 5, pp. 510–516, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.chemosphere.2009.11.041.
- [50] Ö. Aktaş and F. Çeçen, “Effect of activation type on bioregeneration of various activated carbons loaded with phenol,” *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 81, no. 7, pp. 1081–1092, 2006, doi: 10.1002/jctb.1472.
- [51] Ö. Aktaş and F. Çeçen, “Adsorption, desorption and bioregeneration in the treatment of 2-chlorophenol with activated carbon,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 141, no. 3, pp. 769–777, Mar. 2007, doi: 10.1016/j.jhazmat.2006.07.050.
- [52] J. Ren, W. Yang, M. Hua, B. Pan, and W. Zhang, “Bioregeneration of hyper-cross-linked polymeric resin preloaded with phenol,” *Bioresour. Technol.*, vol. 142, pp. 701–705, Aug. 2013, doi: 10.1016/j.biortech.2013.05.029.
- [53] A. Larasati, G. D. Fowler, and N. J. D. Graham, “Chemical regeneration of granular activated carbon: Preliminary evaluation of alternative regenerant solutions,” *Environ. Sci. Water Res. Technol.*, vol. 6, no. 8, pp. 2043–2056, 2020, doi: 10.1039/d0ew00328j.
- [54] Atık Yönetimi Yönetmeliği, T.C. Resmi Gazete, Sayı: 29314, 02.04.2015.
- [55] A. Larasati, G. D. Fowler, and N. J. D. Graham, “Insights into chemical regeneration of activated carbon for water treatment,” *J Environ Chem Eng*, vol. 9, no. 4, p. 105555, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.JECE.2021.105555.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

PIYASADAN TEMİN EDİLEN BAZI YAĞLARIN ANTİOKSİDAN AKTİVİTESİNİN ÇEŞİTLİ YÖNTEMLERLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Selen İLGÜN^{a*}, Semih YILDIRIM^b, Kübra KARAGÜL^b, Gökçe Şeker KARATOPRAK^b

^a Farmasötik Botanik ABD, Eczacılık Fakültesi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri TÜRKİYE

^b Farmakognozi ABD, Eczacılık Fakültesi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: erturkselen@gmail.com

DOI: 10.29130/dubited.1169407

Öz

Sabit yağlar ve uçucu yağlar, yüzyıllardır insanlar tarafından, hastalıkların tedavi edilmesinde, hastalıklardan korunmak amacıyla ve yaşam kalitesini artırmak için kullanılmaktadır. Ayrıca çoğu bitkisel kökenli olan, özellikle bitkilerin yağlı tohumlarından elde edilen yağlar, aromaterapide “taşıyıcı yağ” olarak kullanılmaktadır. Tedavide kullanılan bu yağların yapısı, kalitesi, elde ediliş şekli ve tedaviye uygun olarak seçilmesi, yağın tedaviye olumlu katkı vermesini sağlayan en önemli etmendir. Özellikle yaşlanma karşıtı ürünlerde tercih edilen yağlar antioksidan özellikleri ile ön plana çıkmakta ve bu yönüyle tedaviye destek olmaktadır. Çalışmada da bu amaca yönelik olarak piyasada bulunan bazı yağların antioksidan aktivitesi karşılaştırılmıştır. Yöntem olarak 1,1-difenil-2-pikrilhidrazil (DPPH) radikal süpürücü etki, 2,2'-azino-bis (3-etilbenzotiazolin-6-sulfonik asit) (ABTS⁺) radikal süpürücü etki ve askorbat-Fe (III)-katalizli fosfolipit peroksidasyonunu engelleyici etki tayini yöntemleri kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan buğday rüseyimi (*Triticum sativum*), keten tohumu (*Linum usitatissimum*), nar çekirdeği (*Punica granatum*), kişniş (*Coriandrium sativum*), çörek otu (*Nigella sativa*), sakız kabağı tohumu yağları (*Cucurbita sp.*) ve zerdeçal ekstresi (*Curcuma longa*) piyasadan temin edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda zerdeçal ekstresi ve buğday rüseyim yağı en aktif yağlar olarak belirlenmişlerdir.

Anahtar Kelimeler: Sabit yağ, antioksidan, ABTS, DPPH, lipit peroksidasyon

EVALUATION OF ANTIOXIDANT ACTIVITY OF SOME COMMERCIAL OILS BY VARIOUS METHODS

ABSTRACT

Fixed oils and essential oils have been used by people for centuries to treat diseases, prevent diseases, and improve quality of life. In addition, oils obtained from the oil seeds of plants, most of which are of vegetable origin, are used as "carrier oil" in aromatherapy. The structure, quality, method of obtaining, and selection of the oil used in the treatment are the most important factors that make the oil contribute positively to the treatment. The oils, which are especially preferred in anti-aging products, come to the fore with their antioxidant properties and support the treatment in this respect. In this study, the antioxidant activity of some commercially available oils was compared for this purpose. As a method, 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazil (DPPH) radical scavenging effect, 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS⁺) radical scavenging effect and ascorbate-Fe (III)-catalyzed phospholipid peroxidation inhibitory effect determination methods were used. Wheat germ (*Triticum sativum*), flax seeds (*Linum usitatissimum*), pomegranate seeds (*Punica granatum*), coriander (*Coriandrium sativum*), black cumin (*Nigella sativa*), pumpkin seed oils (*Cucurbita sp.*), and turmeric extract (*Curcuma longa*) used in

experimental studies were obtained from market. As a result of the studies, turmeric extract and wheat germ oil were determined as the most active oils.

Keywords: Fixed oil, antioxidant, ABTS, DPPH, lipid peroxidation

I. GİRİŞ

Bitkilerden elde edilen yağlar, yüzyıllardır insanlar tarafından aktif yaşamı destekleme, yaşam kalitesini artırma ve sağlıklı yaşlanma gibi amaçlarla kullanılmıştır. Genellikle tohumların işlenmesiyle elde edilen sabit yağların, beslenmede ayrı bir yeri olduğu gibi, bazı rahatsızlıklar için koruyucu ve tedavi edici olarak kullanılması açısından da büyük önemi bulunmaktadır [1]. Bitkilerde, tohumun endosperm ve kotiledonlarında, kısmen de mezokarpta depo maddesi olarak bulunan sabit yağlar, oldukça değerlidir. İçeriğinin % 95-98’lik kısmını gliseritler oluşturur. Mumlar, steroller, fosfatitler, yağda eriyen vitaminler, alifatik alkoller, hidrokarbonlar ve karotenoitler kalan kısmını oluşturan diğer maddeler olarak tanımlanabilir [2]. İnsanların gıda olarak tükettikleri yağlar, yaşamsal faaliyetlerin sürdürebilmesi için temel ihtiyaç olarak görülen, bitkisel ve hayvansal kaynaklardan elde edilebilen önemli bir besin kaynağıdır. Organizma için gerekli enerjinin sağlanmasında önemli bir rolü vardır. Ayrıca A, D, E ve K gibi önemli vitaminleri içerir, sentezlenemeyen temel yağ asitlerinin kaynağıdır ve organları dış etmenlerden korumakla görevlidir. Yemeklere lezzet ve tat vermeleri sebebiyle de diyetlerde ayrı bir öneme sahiptir [3].

Sabit yağlar, aynı zamanda içerdikleri yağ asitleri ve vitaminlerin sahip oldukları antioksidan aktiviteleri sayesinde, kozmetik amaçlı olarak, cilt yaşlanmasının yavaşlatılmasında ve cilt lekelerinin tedavi edilmesinde son yıllarda sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Güzellikten, sağlığa ve kozmetiğe kadar çok çeşitli kullanım alanı mevcut olan bu yağlar, kuru cilt tedavisinde de en basit tedavi yöntemidir. Çekirdek yağlarının çoğu, değişen karbon zinciri uzunluklarına sahip yağ asitlerinin basit karışımlarıdır. Hindistan cevizi, ayçiçeği, aspir, kolza tohumu, mısır ya da susam tohumu yağı, mükemmel bir şekilde ciltte bir kaplama sağlar ve yaygın olarak da esansiyel yağlar için taşıyıcı yağlar olarak kullanılırlar. Bu yağlar, cildi kaplayarak, trans epidermal su kaybını yavaşlatır ve onu koruyarak epidermis ve derminin üst katmanlarında hidrasyonun artmasını sağlar [4].

Çalışmada kullanılan buğday rüşeymi (*Triticum sativum*), keten tohumu (*Linum usitatissimum*), nar çekirdeği (*Punica granatum*), kişniş (*Coriandrum sativum*), çörek otu (*Nigella sativa*), sakız kabağı tohumu yağları (*Cucurbita* sp) ve zerdeçal ekstresi yağının (*Curcuma longa*), halk tarafından birçok rahatsızlığın tedavisinde kullanıldığı bilinmektedir. Çörekotu yağının (*N. sativa*) halk tarafından genellikle baş ağrısı, ateş, öksürük sinüzit gibi rahatsızlıklarda kullanıldığı, linoleik asit, oleik asit, palmitik asit ve güçlü bir antioksidan olan timokinon içerdiği bilinmektedir [5]. Yüksek miktarlarda vitamin E ve ağırlıklı olarak linoleik asit olmak üzere doymamış yağ asitleri içeren buğday rüşeym yağı (*T. sativum*) ise plazma ve karaciğer kolesterol düzeylerini azaltmasında etkilidir ve yaşlanmayı yavaşlattığı belirtilmektedir [6]. Keten tohumu yağı (*L. usitatissimum*) bileşenlerini ise α -linoleik asit, lignan ve fiber oluşturmaktadır. Geçmişten günümüze popüler ve yaygın kullanıma sahip bu yağın, geleneksel tıpta, yorgunlukla savaşılar ve yaşlanma sürecini kontrol ederek zihinsel ve fiziksel dayanıklılık sağladığına inanılır [7]. Bolluğun, bereketin ve doğurganlığın sembolü olarak bilinen, insanlık tarafından ilk kültüre edilen bitkilerden olan nar çekirdeğinin yağı (*P. granatum*) fitosteroller bakımından oldukça zengindir ve özellikle punisik asit farmakolojik etkileri bakımından oldukça dikkat çekici bir bileşik olarak birçok biyolojik aktiviteye sahiptir [8]. Halk tıbbında anksiyete, depresyon ve Alzheimer için kullanılan kişniş tohumu yağı (*C. sativum*), petroselinik asit, linoleik asit ve oleik asit bakımından zengindir [9]. Geçmişten beri yaygın bir kullanımı olduğu bilinen kabak çekirdeği (*Cucurbita* sp.), halk tarafından mide rahatsızlıklarında, böbrek taşı düşürmede ve bağırsak parazitleri için kullanılmıştır. Kabak çekirdeği yağı ise steroller ve E vitamini bakımından zengin olduğu için cilt problemlerinin tedavisinde kullanılır [10]. Zerdeçal (*C. longa*) ise geleneksel olarak deri, solunum ve kardiyovasküler sistemlerle ilgili rahatsızlıkların tedavisinde kullanılmıştır, kurkumin içeriği sebebiyle halen çok çalışılan bitkiler arasında yerini almaktadır [11].

Hastalıkların meydana gelişi ve yaşlanma sürecini etkileyen en önemli olaylardan birinin oksidatif stres olduğu ile ilgili teoriler oldukça güçlüdür ve üzerinde çalışmalar devam etmektedir [12]. Yaşam süresince oksidan ve antioksidan sistemler arasında denge durumunun bozulması oksidatif strese neden olur. Redoks dengesinin bozulması sonucunda da makromoleküllerde oksidatif hasar meydana gelir ve yaşlanmanın ana moleküler mekanizması incelendiğinde zamana bağlı oksidatif hasarın makromoleküllerde birikmesi, birincil sebep olarak önemlidir [13]. Organizmanın kendi mekanizmasında ürettiği doğal antioksidanlar yaş ile birlikte azalır. Bu sebeple bitkisel kaynaklı doğal antioksidanların dışardan alımı sistemdeki açığın kapatılmasına olanak sağlar [14].

Bu çalışma kapsamında ise dahilen ve haricen sıklıkla kullanılan, piyasadan temin edilen bazı sabit yağların antioksidan aktivitesi çeşitli yöntemler kullanılarak tespit edilmiştir.

II. MATERYAL VE METOT

A. DENEY MATERYALLERİNİN HAZIRLANMASI

DeneySEL çalışmalarda kullanılmak üzere; buğday rüşeymi, keten tohumu, nar çekirdeği, kişniş (% 2 uçucu yağ içeren), çörek otu, sakız kabağı tohumu yağları ve zerdeçal ekstresi (Buğday rüşeymi, zerdeçal ve karabiber hammaddelerini içeren) Tabia ® firmasından temin edilmiştir. Temin edilen bu yağlar Süper Kritik Karbondioksit (SC-CO₂) ekstraksiyonu yöntemi ile üretilen sentetik katkı maddesi içermeyen yağlardır. Yağlar, çalışmalar sırasında DMSO (dimetil sülfoksit) ile 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 oranında seyreltikten sonra kullanılmıştır.

B. ANTIOKSİDAN AKTİVİTE TAYİN YÖNTEMLERİ

B.1. 1,1-difenil-2-pikrilhidrazil (DPPH•) Radikalini Süpürücü Etki Tayini

Örneklerin DPPH• radikalini süpürücü etkileri Gyamfi ve ark.'nın yöntemine göre yapılmıştır [15]. Metanolde hazırlanan DPPH• çözeltisi, 50 nM, pH 7,4'de hazırlanan Tris-HCl ve yağ örnekleri hazırlanmıştır. 50 µL ekstre ve 450 µL Tris-HCl tamponu, 1,0 mL DPPH• ile karıştırılmıştır. Daha sonra oda sıcaklığında 30 dakika boyunca ışık görmeyen bir ortamda bekletilmiştir. İnkübasyon sonrası örnekler 517 nm'de okunmuştur ve pozitif kontrol olarak BHA (Bütillenmiş Hidroksi Anisol) kullanılmıştır. Üç paralel olarak çalışılan örneklerin daha sonra ortalama değerleri alınarak % inhibisyonu hesaplanmıştır.

B.2. 2,2'- azino-bis (3- etilbenziazolin-6- sulfonik asit) (ABTS⁺) Radikalini Süpürücü Etki Tayini

Örneklerin ABTS⁺ radikalini süpürücü etkileri Re ve ark. metoduna göre yapılmıştır [16]. ABTS⁺ radikali (7 mM) ABTS'in sulu çözeltisi ile K₂S₂O₈ (2,45 mM, son konsantrasyon)' un 12-16 saat bekletilmesi ile hazırlanmıştır. Daha sonra, etanol ile seyreltilerek stok çözeltinin absorbansı, 734 nm'de 0,700 (± 0,030) olacak şekilde ayarlanmıştır. Hazırlanan ABTS çözeltisinden 990 µL, yağ örneklerinden ise 10 µL alınarak karıştırılmıştır ve 734 nm'de 1 dakikalık aralıklarla 30 dakika boyunca reaksiyon kinetiği ölçülmüştür. Konsantrasyona karşı ölçülen inhibisyon yüzdeleri Troloks'a eşdeğer olarak (TEAC) hesaplanmıştır. Deneyler üç paralel olarak tekrarlanmış ve ortalama değerleri hesaplanmıştır.

B.3. Askorbat –Fe (III)-Katalizli Fosfolipit Peroksidasyonunun İnhibisyonu

Örneklerin hidroksil radikalini süpürücü aktiviteleri Aruoma ve ark.'larının yöntemine göre gerçekleştirilmiştir [17]. Sığır beyin ekstresi (Folch type VII) ve 10 mM PBS (pH 7,4) karıştırılıp, buz banyosu içerisinde şeffaf bir süspansiyon olana kadar (5 mg/mL fosfolipit lipozomu) ultrasonik banyoda

bekletilmiştir. 0,2 mL lipozom, 0,5 mL PBS tamponu, 0,1 mL 1 mM FeCl₃ ve 0,1 mL örnek ile karıştırılmıştır. Daha sonra peroksidasyon için 0,1 mL 1 mM askorbat ilavesi yapılmıştır. Karışım 37 °C’de 60 dakika bekletilmiştir. Son olarak 50 µL %2’lik (a/h) bütillenmiş hidroksi toluen (etanol içerisinde), 1 mL %2,8 (a/h) trikloroasetik asit ve 1 mL %1 (a/h) 2-tiyobarbitürik asit (TBA, 0,05 M NaOH içerisinde) eklenmiştir. Karışım 100 °C’de su banyosunda 20 dakika bekletilmiştir. Reaksiyon sonucunda oluşan (TBA)₂-MDA kromojenleri 2 mL n-bütanol ile muamele edilmiş ve bütanol fazı alınarak 532 nm’de okunmuştur. Deneyler üç paralel olarak tekrarlanmış ve ortalama değerleri hesaplanmıştır.

III. BULGULAR

Organizmadan zararlı radikallerin uzaklaştırılması adına, çeşitli antioksidan etki tayin yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden sıklıkla kullanılanlardan biri, azot merkezli stabil bir radikal olan DPPH• radikali süpürücü etkinin tayin edilmesi yöntemidir [18]. Yağ örneklerinin, çalışmada kullanılan yöntemde, radikal olan DPPH’ı, fizyolojik pH’da konsantrasyonda bağlı olarak süpürdüğü belirlenmiştir. Yağ örneklerine ait % inhibisyon değerleri Tablo 1’de verilmiştir. Zerdeçal ekstresi 1/16 dilüsyonda dahi %60 inhibisyon göstererek en aktif yağ olarak bulunmuştur. En düşük aktiviteye sahip olan yağ örneği ise sakız kabağı tohumu olarak belirlenmiştir. Sakız kabağı tohumu yağının seyreltilmemiş örneğinde dahi inhibisyon %49,87 olarak bulunmuştur.

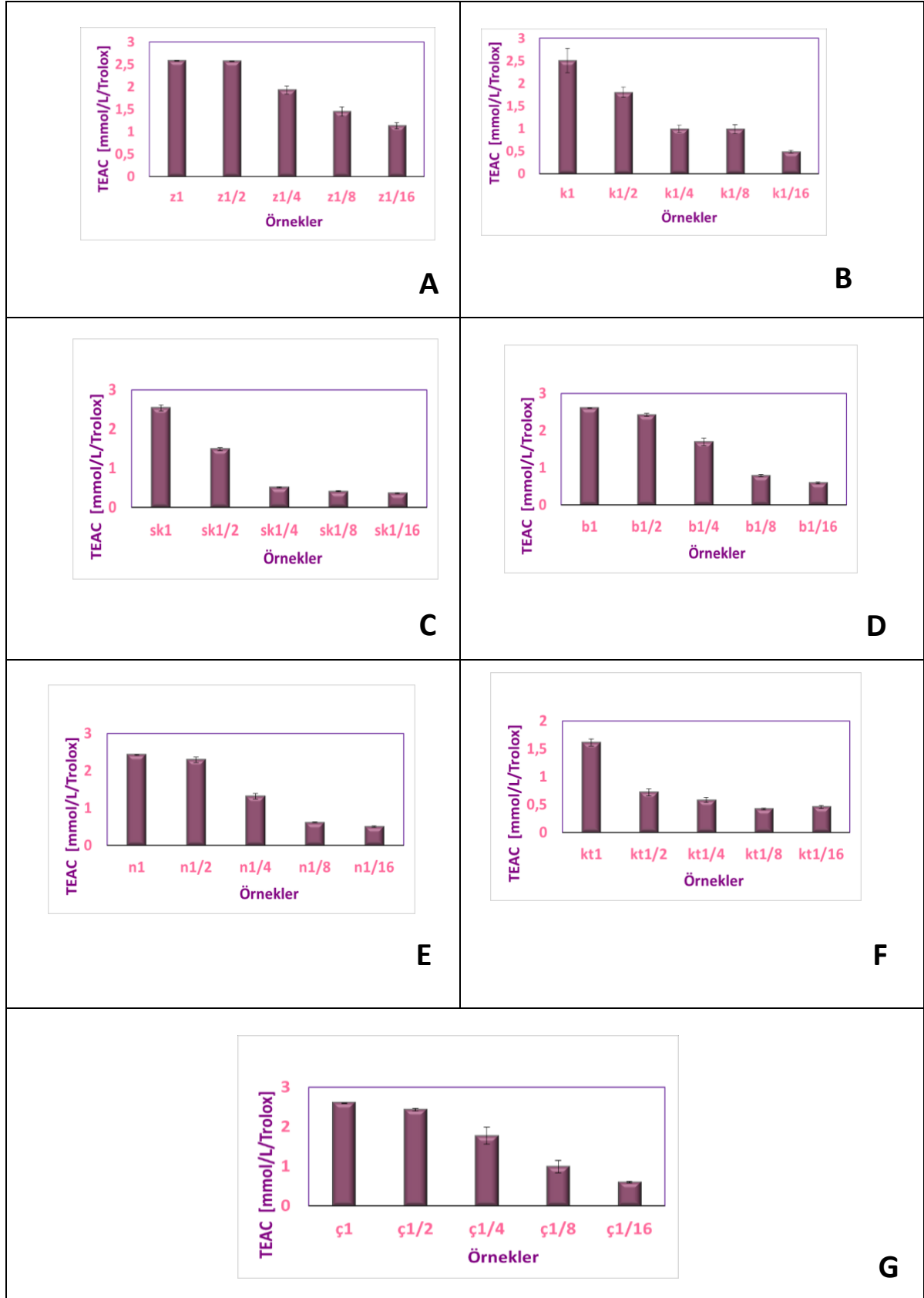
Tablo 1. Yağ örneklerinin DPPH• radikalini süpürücü aktiviteleri

	%İnhibisyon				
	1	1/2	1/4	1/8	1/16
Buğday rüşeymi	85,57±5,94	76,72±0,35	56,40±8,62	44,98±3,04	31,53±7,04
Zerdeçal	84,08±0,77	79,58±4,75	76,84±4,20	78,19±1,49	60,46±2,09
Çörekotu	75,32±2,54	67,11±2,04	61,62±1,89	52,1±4,41	28,15±3,17
Nar çekirdeği	67,13±3,45	56,08±2,37	38,09±4,86	21,11±6,11	9,17±2,06
Kışniş	77,49±5,53	67,75±1,42	59,88±0,37	51,65±1,5	21,89±3,46
Sakız kabağı	49,87±3,76	40,90±2,5	34,6±3,21	44,71±2,48	7,88±2,41
Keten tohumu	65,05±7,84	54,17±5,04	31,51±1,57	29,63±2,68	12,74±1,07

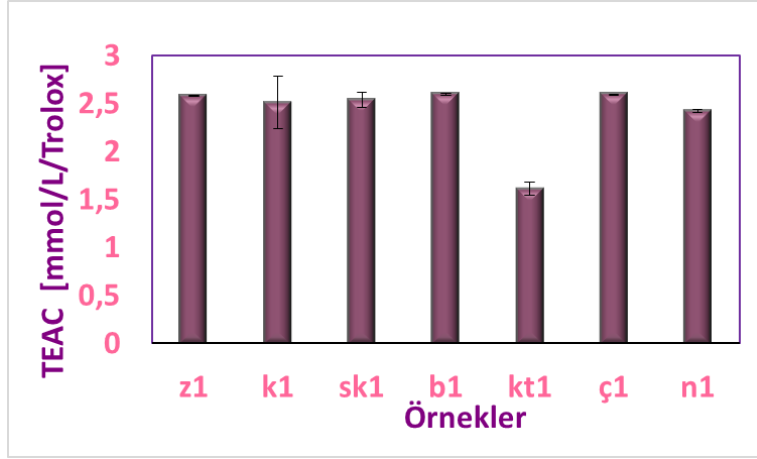
*Ortalama ± SD

Yağların, mavi/yeşil renkli bir bileşik olan ABTS^{•+} radikalini süpürücü etkileri, spektroskopik olarak ölçülmüştür. Flavonoidler, hidrokisisinnamik asitler, karotenoidler gibi hidrofilik ve lipofilik antioksidanlar sıklıkla bu yöntem kullanılarak antioksidan kapasite bakımından değerlendirilirler [19]. Tüm yağ örneklerinin ABTS^{•+} radikalini süpürücü etkileri değerlendirilmiş ve sonuçlar Şekil 1’de verilmiştir. Yağ örneklerinin kendi aralarında karşılaştırması yapılmış ve sonuçlara göre keten tohumu yağı hariç diğer yağlar aktif bulunmuştur. Yağların Şekil 2’de 1/16 dilüsyonları karşılaştırmalı olarak incelendiğinde ise zerdeçal ekstresinin 1,12 ± 0,07 mmol/L/Trolox aktivite göstermesi DPPH• radikalini süpürücü aktivite deney sonuçları ile de uyumlu bulunmuştur. Buğday rüşeymi yağı ise aynı dilüsyonda

0,59± 0,02 mmol/L/Trolox aktivite sergilerken en düşük aktivite 0,35± 0,01 mmol/L/Trolox değeriyle sakız kabağı tohum yağında bulunmuştur.



Şekil 1. Yağ örneklerini ABTS radikalini süpürücü etkileri **A**: zerdçal ekstresi, **B**: kişniş yağı, **C**: sakız kabağı yağı, **D**: buğday rüşeymi, **E**: nar çekirdeği, **F**: keten tohumu, **G**: çörekotu yağı



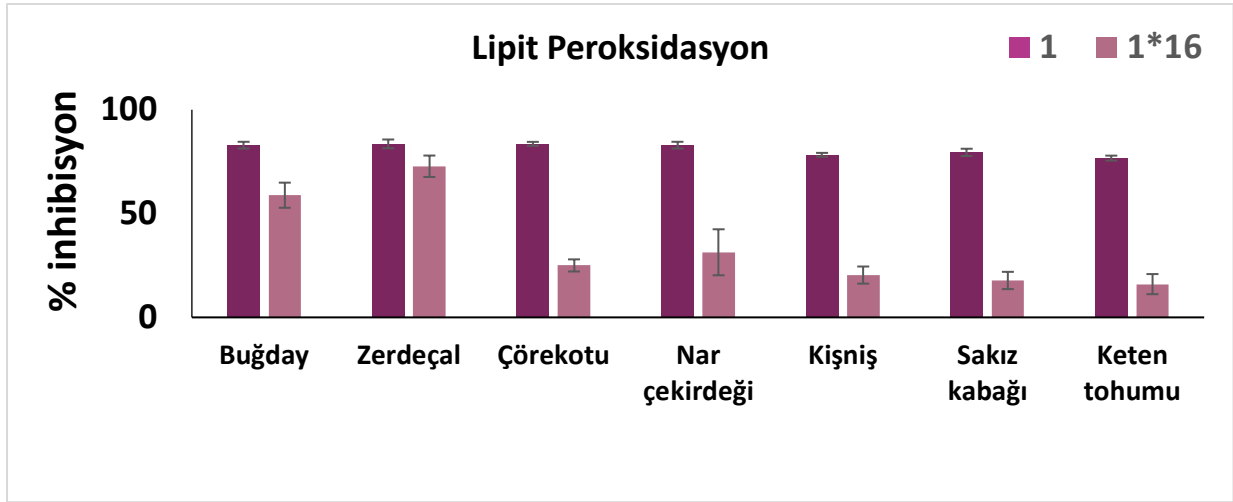
Şekil 2 Yağ örneklerinin karşılaştırmalı olarak ABTS^{•+} radikalini süpürücü etkileri **z:** zerdaçal ekstresi, **k:** kişniş yağı, **sk:** sakız kabağı yağı, **b:** buğday rüşeymi, **n:** nar çekirdeği, **kt:** keten tohumu, **ç:** çörekotu yağı

Biyolojik açıdan değerlendirildiğinde, hidroksil radikali kaynaklı bozulmaya oldukça yatkın olan çoklu doymamış yağ asitlerince zengin fosfolipitler oldukça önemlidir. Bu sebeple oksidatif hasarı önlemek adına bu moleküllerin korunmasını sağlamak için yapılan çalışmalar popülerliğini korumaktadır [20].

Tablo 2. Yağ örneklerinin Askorbat –Fe (III)-Katalizli Fosfolipit Peroksidasyonunun İnhibisyonu

	%İnhibisyon				
	1	1/2	1/4	1/8	1/16
Buğday rüşeymi	82,93±1,61	82,17±1,56	77,78±0,94	69,42±0,90	58,82±6,04
Zerdeçal	83,53±2,11	80,57±0,78	78,19±6,76	74,48±5,91	72,76±5,15
Çörekotu	83,57±0,94	78,28±0,91	74,61±1,43	54,74±2,54	25,01±2,92
Nar çekirdeği	82,94±1,61	81,33±2,33	69,32±1,79	55,05±2,73	31,34±11,07
Kişniş	78,29±0,91	75,29±1,89	59,26±5,70	35,44±2,51	20,36±4,11
Sakız kabağı	79,45±1,74	83,53±2,12	58,82±6,04	30,89±1,40	17,77±4,16
Keten tohumu	76,7±1,18	74,87±1,50	53,65±3,76	29,38±1,51	16,00±4,84

*Ortalama ± SD



Şekil 3. Yağ örneklerinin ve 1/16 dilüsyonlarının karşılaştırmalı olarak lipit peroksidasyonu önleme etkileri

Tüm yağ örneklerinin lipit peroksidasyonu engelleyici etkileri değerlendirilmiş ve sonuçlar Tablo 2’de verilmiştir. Şekil 3’te ise yağ örneklerinin ve 1/16 dilüsyonlarının karşılaştırması yapılmıştır. Sonuçlara göre dilüe edilmeyen örneklerin % inhibisyon değerleri %76,7-83,57 arasında birbirlerine yakın değerler gösterirken, 1/16 dilüsyona sahip örneklerden buğday yağı ve zerdeçal ekstresi sırasıyla %58,82 ve %72,76 inhibisyon göstererek aktif bulunmuşlardır. Aynı dilüsyonda keten tohumu, sakız kabağı, kişniş, çörek otu ve nar çekirdeği yağlarının inhibisyonları ise sırasıyla %16,00, %17,77, %20,37, %25,01 ve %31,34 olarak belirlenmişlerdir.

IV. TARTIŞMA

Bitkilerden elde edilen yağlar farklı amaçlar ve uygulamalar için yüz yıllardır kullanılmaktadır. Özellikle bitkisel kökenli bu yağlar, insan beslenmesinde önemli bir yere sahip olan ve yağlı tohumların işlenmesiyle elde edilen önemli gıda kaynaklarıdır. İçerdikleri yağ asitlerinin oranı ve çeşitleri, yağların fiziksel ve kimyasal özelliklerini, dolayısıyla kalitesini belirlemektedir [1].

Çalışma kapsamında, halk tarafından sıklıkla kullanılan ve piyasadan temin edilen bazı sabit yağların, antioksidan özelliklerinden dolayı kozmetikte kullanılması açısından önem arz ettiği ve potansiyel fitokozmetikler olarak dikkat çektiği göz önüne alınarak, çeşitli antioksidan aktivite tayin yöntemleri ile radikal süpürücü etkileri değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan buğday rüşeymi, keten tohumu, nar çekirdeği, kişniş, çörek otu, sakız kabağı tohumu yağları ve zerdeçal ekstresi piyasadan temin edilmiştir. Yağların antioksidan aktiviteleri, 1-difenil-2-pikrilhidrazil (DPPH[•]) radikal süpürücü etki, 2,2’- azino-bis (3-etilbenzotiazolin-6- sülfonik asit) (ABTS⁺) radikal süpürücü etki ve askorbat-Fe (III)-katalizli fosfolipit peroksidasyonunu engelleyici etki yöntemleri ile farklı dilüsyonlarda hazırlanan yağ örnekleri üzerinden test edilmiştir.

Örneklerin antiradikal etkilerinin ölçülmesinde ilk olarak DPPH[•] radikali süpürücü etki tayin yöntemi kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda 1/16 dilüsyonda zerdeçal ekstresinin %60’lık, buğday rüşeym yağının ise %30’luk bir inhibisyon göstererek en aktif iki yağ oldukları belirlenmiştir. Tüm ekstrelerin ABTS⁺ radikalini süpürücü etkileri değerlendirilip, sonuçlar yorumlandığında ise keten tohumu yağı hariç diğer yağların aktif olduğu gözlenmiştir. Yağların 1/16 dilüsyonları karşılaştırmalı olarak incelendiğinde, zerdeçal ekstresinin 1,12 ±0,07 mmol/L/Trolox aktivite göstermesi, DPPH[•] radikalini süpürücü aktivite deney sonuçları ile de uyumlu bulunmuştur (Tablo 1, Şekil 1 ve 2). Diğer bir antioksidan aktivite tayin yönteminde sığır beyni kaynaklı fosfolipit lipozomlarının askorbat-Fe (III)-katalizli hidroksil radikali bozunmasında hidroksil radikalini süpürücü etki esasına göre fizyolojik pH da TBA-reaktif bileşiklerin formasyonunun inhibisyonu ölçülmüştür. Tüm yağ örneklerinin lipit

peroksidasyonu engelleyici etkileri değerlendirilmiş, sonuçlara göre dilue edilmeyen örneklerin % inhibisyon değerleri %76,7-83,57 arasında, birbirlerine yakın sonuçlar gösterirken, 1/16 dilüsyona sahip örneklerden buğday ve zerdeçal yağı sırasıyla %58,82 ve %72,76 inhibisyon göstererek aktif bulunmuşlardır.

Zerdeçal bitkisinden hazırlanan ekstrelerin yüksek antioksidan etki gösterdiği yapılan birçok çalışma ile kanıtlanmıştır [21]. Özellikle bitkinin majör bileşenlerinden olan kurkumin oldukça önemli bir sekonder metabolit olarak bilinmektedir ve üzerinde detaylı araştırmalar yapılmıştır [22,23]. Çalışma kapsamında antioksidan aktivitesi değerlendirilen zerdeçal ekstresinde kurkuminin biyoyararlanımını arttırmak üzere karabiber ve E vitamini bakımından oldukça zengin olan buğday rüşeymi taşıyıcı olarak güvenilir ve etkili bir oranda karıştırılmıştır. Yağın yüksek antioksidan aktivite göstermesinde kurkumin içeriğinin yanı sıra diğer bileşenlerinde etkili olduğu düşünülmektedir. Sonuç olarak en aktif bulunan yağ örneğinin elde edildiği zerdeçal bitkisinin içerdiği fenolik bileşiklerin tayini ve antioksidan özelliklerinin tespit edilmesi, bu bitkinin insan sağlığı için ne kadar önemli olduğunu ortaya çıkarmıştır. Çünkü lipit peroksidasyonunun inhibisyonu enflamasyon, kalp hastalıkları ve kanserde oldukça önemlidir. Yapılan çalışmalarda zerdeçalın süperoksit dismutaz, katalaz, glutatyon peroksidaz gibi antioksidan enzimleri koruyarak lipit peroksidasyonunu engellediği belirlenmiştir. Ayrıca bitkiden izole edilen ve tanımlanan bileşikler beyindeki lipitlerin in vitro peroksidasyonunda yapılan çalışmalarda güçlü antioksidan aktivite göstermiştir [24-27]. Sonuçlar, zerdeçal ekstresinin (içeriğindeki buğday rüşeym yağı da düşünüldüğünde) en aktif bileşenlerinin kurkumin ve tokoferoller olduğunu göstermiştir. Zerdeçalın majör bileşenlerinden olan kurkumin fenolik yapıdaki bir sekonder metabolittir. Ayrıca yapılan birçok çalışma kurkuminin gıda sanayinde kullanımının uygun olduğuna dair sonuçlar elde etmiştir, bileşiğin antioksidan etkinliğinin oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir [28].

Rüşeym yağı, antioksidan özellikleriyle bilinir ve bu özelliği diğer taşıyıcı yağlara eklenmesinin nedenini açıklar. Buğday rüşeymi zengin bir B kompleksi vitamin kaynağı olup aynı zamanda tokoferol içeriği de zengindir. Bu yağ, vücut dokularında oksidasyon süreçlerinin inhibitörü olarak işlev gören kolayca yayılan E vitamini kaynağıdır. E vitamini, hücreleri, vücudun metabolizma ürünleri olan, potansiyel olarak zarar verici serbest radikallerin etkilerine karşı koruması ile bilinir [29,30]. Buğday rüşeym yağının, yüksek oranda E ve B vitamini içerdiği yapılan çalışmalarda belirtilmiştir [31]. Bizim çalışmamızda da belli oranlarda seyreltilerek antioksidan aktivitesi değerlendirilen buğday rüşeym yağının kullanılan her üç yöntemde de yüksek antioksidan aktivite gösterdiği gözlenmiştir (Tablo 1, 2 ve Şekil 1,2,3). Buğday rüşeym yağının farklı şekillerde hazırlanan ekstrelerinin antioksidan aktivitesinin değerlendirildiği çalışmalarda bakıldığında da buğday rüşeym yağının antioksidan aktivite gösterdiği tespit edilmiştir. Buğday rüşeym yağının DPPH radikalini süpürücü etkilerinin değerlendirildiği bir çalışmada, IC₅₀ değeri 147,81 ± 3,52 olarak hesaplanmış ve ancak standart olarak karşılaştırıldığı BHT (IC₅₀: 17,96± 1,89), Troloks (IC₅₀: 2,76 ± 0,14), Askorbik asit (IC₅₀: 1,96 ± 0,49) Vitamin E (IC₅₀: 3,85 ± 0,15) kadar etkili bulunamamıştır [32].

Çalışma kapsamında araştırılan diğer yağ örneklerinin antioksidan aktiviteleri değerlendirildiğinde ise zerdeçal ve buğday rüşeym yağından sonra en iyi aktivite sergileyen yağ örneklerinin nar çekirdeği yağı ve çörek otu tohum yağı olduğu tespit edilmiştir. Literatüre bakıldığında, çörek otunun hekzan ile ekstre edilmesi sonucu elde edilen yağın aktivitelerinin değerlendirildiği bir çalışmada da çörek otu yağının düşük konsantrasyonlarda ABTS ve DPPH radikalini süpürücü etkileri oldukça yüksek bulunmuştur [33]. Nar çekirdeği yağının antioksidan aktivitelerinin değerlendirildiği bir başka çalışmada ise yağ örneğinin DPPH ve ABTS radikalini sırasıyla %91,29 ve %98,28 inhibisyon yüzdesi ile süpürdüğü belirtilmiştir. Ayrıca yine nar çekirdeği yağının lipit oksidasyonu %95,99 oranında inhibe ettiği kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yağın fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre değişiklik gösterebilmektedir. Çünkü, yağ bitkilerinin, yağ asitleri kompozisyonu etkileyen birçok faktör bulunmakta ve buna bağlı olarak içerikleri değişiklikler göstermektedir. Yağın fiziksel ve kimyasal özellikleri yağ kompozisyonunu etkiler, yağın öğelerinden gliserol bütün yağ bitkilerinde aynı iken, özellikle yağ asitleri her bitkide farklı şekillerde bulunur. Çevresel (sıcaklık, enlem boylam farkı, kuralık, ekim zamanı vb.) genetik, morfolojik faktörler ve kültürel uygulamalar yağ bitkilerinin yağ asitleri kompozisyonunda değişiklik göstermesine neden olur. Bu durum yağ kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir [1].

VI. SONUC

Günümüzde sentetik ürünlerin giderek önemini yitirmesi ve insanların doğal olana yönelmesi, bitkilerin kullanımının her alanda önem kazanmasına sebep olmuştur. Bitkilerin, yağlı tohumlarından elde edilen sabit yağlarının, kimyasal içerikleri sayesinde, tıbbi amaçlarla kullanıldığı bilinmektedir. Bu sebeple tedavide sıklıkla kullanılan sabit yağların bu etkilerini nasıl gösterdiğinin açıklığa kavuşturulması, içeriklerinin ve buna bağlı olarak aktivitelerinin araştırılması önemlidir.

Bu çalışma da araştırılan yağ örneklerinin yüksek antioksidan aktivite gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu sonuç ürünlerin, tek başına veya taşıyıcı olarak kullanımlarının faydalı olacağını düşündürmektedir. Ayrıca elde edilen sonuçlar, ürünlerin özellikle ilaç ve kozmetik endüstrisinde, kullanılabilmesi sonucunu desteklemektedir. Elde edilen sonuçlar neticesinde, etki mekanizmalarının aydınlatılmasını sağlamak üzere çalışmaların detaylandırılması planlanmaktadır.

VI. KAYNAKLAR

- [1] E. Karaca ve S. Aytaç, “Yağ bitkilerinde yağ asitleri kompozisyonu üzerine etki eden faktörler”, *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, c.22, s.1, ss. 123-131, 2007.
- [2] MK. Sakar ve M. Tanker, “Fitokimyasal analizler”, *Ankara Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Yayınları*, ss 67, 1991.
- [3] AC. Dweck, “The internal and external use of medicinal plants”, *Clinics in dermatology*, vol 27, no 2 pp 148-158, 2009.
- [4] G. Demircan ve Ü. Güzelsoy, “Dermal fibroblast hücrelerinde oleuropeinin antioksidan özelliğinin ve yaşlanma üzerine etkilerinin araştırılması”, *Bozok Tıp Dergisi*, c.9, s. 2, ss. 16-24, 2019.
- [5] M. Mahboubi, “Natural therapeutic approach of *Nigella sativa* (Black seed) fixed oil in management of sinusitis”, *Integrative medicine research*, vol.7, no.1, pp 27-32, 2018.
- [6] MM. Hassanien, AG. Abdel-Razek, M. Rudzińska, A. Siger, K. Ratusz, R. Przybylski, “Phytochemical contents and oxidative stability of oils from non-traditional sources”, *European Journal of Lipid Science and Technology*, vol.116, no.11, pp.1563-1571, 2014.
- [7] A. Goyal, V. Sharma, N. Upadhyay, S. Gill, M. Sihag, “Flax and flaxseed oil: an ancient medicine & modern functional food”, *Journal of food science and technology*, vol. 51, no.9, pp.1633-1653, 2014.
- [8] MT. Boroushaki, H. Mollazadeh, AR. Afshari, “Pomegranate seed oil: A comprehensive review on its therapeutic effects”, *Int J Pharm Sci Res*, vol.7, no.2, pp.430, 2016.
- [9] S. Mandal, M. Mandal, “Coriander (*Coriandrum sativum* L.) essential oil: Chemistry and biological activity”, *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, vol.5, no:6, pp.421-428, 2015.
- [10] B. Düzeltir ve R. Yanmaz, “Kabak Çekirdeğinin (*Cucurbita Pepo* L.) Besin Değeri ve Sanayide Kullanım Olanakları”, *Popüler Bilim Dergisi*, c.11, s.125, ss.19- 24, 2004.
- [11] A. Sikha, A. Harini, “Pharmacological activities of wild turmeric (*Curcuma aromatica* Salisb): a review”, *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, vol.3, no.5, 2015
- [12] D. Fusco, G. Colloca, MRL. Monaco, M. Cesari, “Effects of antioxidant supplementation on the aging process”, *Clinical interventions in aging*, vol.2, no.3, pp.377, 2007.

- [13] A. Tanakol, TK. Uzunçakmak, ve Z. Kutlubay, Oksidatif Stres ve Yaşlanma, 2020.
- [14] G. Taner, Serbest radikallere karşı antioksidan savunma, Bilim Teknik, Ağustos s. 113, ss. 453, 2005.
- [15] MA. Gyamfi, M. Yonamine, Y. Aniya, “Free-radical scavenging action of medicinal herbs from Ghana *Thonningia sanguinea* on experimentally induced liver injuries”, *General Pharmacology: The Vascular System*, vol. 32, no, 6, pp. 661-667, 1999.
- [16] R. Re, N. Pellegrini, A. Proteggente, A. Pannala, M. Yang, C. Rice-Evans, “Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay”, *Free radical biology and medicine*, vol.26, no.9-10, pp. 1231-1237, 1999.
- [17] OI. Aruoma, JP. Spencer, D. Warren, P. Jenner, J. Butler, B. Halliwell, “Characterization of food antioxidants, illustrated using commercial garlic and ginger preparations”, *Food chemistry*, vol.60, no.2, pp. 149-156, 1997.
- [18] O. Bachmayer, “Antioxidant Properties of Aqueous Extracts from Selected Culinary Herbs” Yüksek Lisans Tezi, University of Helsinki, Division of Pharmacognosy, Helsinki, Finland, 85, 2004.
- [19] R. Amarowicz, RB. Pegg, P. Rahimi-Moghaddam, B. Barl, JA. Weil, “Free-Radical Scavenging Capacity and Antioxidant Activity of Selected Plant Species from the Canadian Prairies”, *Food Chemistry* vol.84, pp.551-562, 2004.
- [20] SN. Chatterjee, S. Agarwal, “Liposomes as a Membrane Model for Study of Lipid Peroxidation”, *Free Radical Bio Med*, vol.4, pp.51-72, 1988;
- [21] B. Jyotirmayee, G. Mahalik, “A review on selected pharmacological activities of *Curcuma longa* L.” *International Journal of Food Properties*, vol.25 no.1, pp.1377-1398, 2022.
- [22] A. Alsamydai, and N. Jaber, “Pharmacological aspects of curcumin”, *International Journal of Pharmacognosy*, vol.5, no.6, pp.313-26, 2018.
- [23] RK. Maheshwari, AK. Singh, J. Gaddipati, and RC. Srimal, “Multiple biological activities of curcumin: a short review”, *Life sciences*, vol.78, no.18, pp.2081-2087, 2006.
- [24] A. Jitoe, T. Masuda, IGP. Tengah, DN. Suprpta, IW. Gara, and N. Nakatani, “Antioxidant activity of tropical ginger extracts and analysis of the contained curcuminoids”, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 40, no.8, pp. 1337-1340, 1992.
- [25] T. Masuda, J. Isobe, A. Jitoe, and N. Nakatani, “Antioxidative curcuminoids from rhizomes of *Curcuma xanthorrhiza*”, *Phytochemistry*, vol.31, no.10, pp. 3645-3647, 1992.
- [26] OP. Sharma, “Antioxidant activity of curcumin and related compounds” *Biochemical pharmacology*, vol. 25, no.15, pp.1811-1812, 1976.
- [27] S. Toda, T. Miyase, H. Arichi, H. Tanizawa, Y. Takino, “Natural antioxidants. III. Antioxidative components isolated from rhizome of *Curcuma longa* L.”, *Chem Pharm Bull* (Tokyo), vol.33, no.4, pp. 1725-1728, 1985.
- [28] T. Ak ve İ. Gülçin, “Antioxidant and radical scavenging properties of curcumin”, *Chemico-biological interactions*, vol.174, no.1, pp.27-37, 2008.
- [29] P. Kumar, RK. Yadava, B. Gollen, S. Kumar, RK. Verma, S. Yadav, “Nutritional contents and medicinal properties of wheat: a review.” *Life Sciences and Medicine Research*, vol. 22, no.1, pp.1-10, 2011.

- [30] IA. Barakat, OA. Abbas, S. Ayad, AM. Hassan, "Evaluation of radio protective effects of wheat germ oil in male rats," *Journal of American Science*, vol. 7, no. 2, pp. 664-673, 2011.
- [31] M. Güven, HH. KARA, "Some chemical and physical properties, fatty acid composition and bioactive compounds of wheat germ oils extracted from different wheat cultivars" *Journal of Agricultural Sciences*, vol.22, no.3, pp.433-443, 2016.
- [32] F. Çetinyürek, "Buğday ruşeymi ve buğday ruşeym yağının antioksidan parametrelerinin incelenmesi", MS thesis, Adnan Menderes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.
- [33] S. Dinakaran, S. Sridhar, P. Eganathan, "Chemical composition and antioxidant activities of black seed oil *Nigella sativa* L.", *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, vol.7, no.11, 4473, 2016.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Kötü Amaçlı Yazılım Tespiti için Makine Öğrenmesi Algoritmalarının Kullanımı

 Pınar TÜFEKÇİ^{a,*},  Çetin Mutlu ÖNAL^a

^a Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: ptufekci@nku.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1287453

ÖZET

Gelişen teknoloji sayesinde bilgiye kolay erişim sağlansa da, bu durum kötü amaçlı eylemlerin artışına da sebep olmuştur. Android işletim sistemlerinde sıklıkla rastlanan kötü amaçlı yazılımlar (malware), kullanıcıların cihazındaki verilere erişerek büyük bir tehdit oluşturmaktadır. Bu çalışma, kötü amaçlı yazılımları tespit etmek amacıyla yüksek doğruluklu ve güvenilir bir model geliştirmeyi hedeflemektedir. Modelleme çalışmalarında popüler bir veri seti olan DREBIN-215 Android Malware Dataset kullanılmıştır. Makine Öğrenmesi algoritmaları arasında Support Vector Machines (SVM), Gradient Boosting (GB), Multi Layer Perceptron (MLP), Naïve Bayes (MNB), K-En Yakın Komşu (KNN) ve Random Forest (RF) algoritmaları uygulanmıştır. Algoritmaların performansları, varsayılan parametreler ve GridSearch yöntemiyle elde edilen en iyi hiperparametre değerlerinin kullanılmasıyla değerlendirilmiştir. En başarılı model, SVM algoritmasıyla en iyi hiperparametrelerin uygulanması sonucu %99.07 doğruluk oranıyla elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kötü amaçlı yazılım, Makine öğrenmesi, Support Vector Machines, Gradient Boosting, Multi Layer Perceptron.

Using Machine Learning Algorithms for Malware Detection

ABSTRACT

Although advanced technology has facilitated easy access to information, it has also led to an increase in malicious activities. Malware, frequently encountered in Android operating systems, poses a significant threat by accessing users' data on their devices. This study aims to develop a highly accurate and reliable model for detecting malware. The modeling work used the popular and imbalanced dataset, DREBIN-215 Android Malware Dataset. Machine Learning algorithms such as Support Vector Machines (SVM), Gradient Boosting (GB), Multi Layer Perceptron (MLP), Naïve Bayes (MNB), K-Nearest Neighbor (KNN) and Random Forest (RF) were applied. The performance of the algorithms was evaluated using default parameters and the best hyperparameter values obtained through the GridSearch method. The most successful model was achieved with an accuracy rate of 99.07% by applying the best hyperparameters in the SVM algorithm.

Keywords: Malware, Machine learning, Support Vector Machines, Gradient Boosting, Multi Layer Perceptron.

I. GİRİŞ

Malware, "Zararlı Yazılım" anlamına gelen İngilizce "Malicious Software" kelimelerinin kısaltması olup, bilgisayarlar ve akıllı telefonlar gibi teknolojik cihazlardan hassas bilgilere erişmeyi amaçlayan kötü niyetli programlardır. Android işletim sistemi, mobil cihazlarda yaygın bir şekilde kullanılmakta ve Android cihaz sayısı arttıkça, bu işletim sistemi için hedeflenen kötü amaçlı yazılımların sayısı da artmaktadır. Android cihazlar üzerindeki kötü amaçlı yazılımlar, donanım birimine, yerel dosya erişimine ve işletim sistemindeki okuma/yazma iznine izinsiz erişerek hassas verilere erişebilir [1].

Kötü amaçlı yazılımları tespit etmek için imza tabanlı [2, 3], makine öğrenimi tabanlı [4] ve derin öğrenme tabanlı [5, 6] yöntemler gibi çeşitli yöntemler önerilmiştir. Derin öğrenme algoritmalarının son zamanlarda kötü amaçlı yazılımları tespit etmede umut verici sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir, çünkü kötü amaçlı yazılımın evrimine adapte olabilme özelliği vardır [5, 6].

Android uygulamalarından özellik çıkarmak, kötü amaçlı yazılım tespitinin performansını artırmak için önemlidir ve bu amaçla iki ortak analiz yöntemi kullanılmaktadır: Statik Analiz [6, 7, 8] ve Dinamik Analiz [9, 10]. Statik Analiz, uygulamanın çalıştırılmadan önce Android uygulama ve kaynak kodu dosyalarından çıkarılan özelliklere dayanarak uygulamaları sınıflandırır. Örneğin, AndroPyTool [7], AndroidManifest.xml'deki izinlerden, niyetlerden, hizmetlerden ve sağlayıcılardan ve Smali kodundan API çağrılarında özellikler çıkarır. Dinamik Analiz, şüpheli uygulamaları izole bir ortamda çalıştırılarak sisteme veya ağ trafiği verilerine odaklanır ve bu verileri buna göre sınıflandırır. Statik Analizin avantajı, uygulamanın cihaza yüklenmeden önce kötü amaçlı yazılımın tespit edilebilmesidir, Dinamik Analizin avantajı ise uygulama çalıştırma sürecinde ortaya çıkan açıklıkların tespit edilebilmesidir [1].

Son zamanlarda, literatürde birçok çalışma, Statik Analizde grafiklerden semantik özellikler elde etmek için daha fazla odaklanmışlardır [6, 11, 12]. Bu, semantik özelliklerin, kötü amaçlı yazılımın kaçınması için sözdizimsel özelliklere göre daha sağlam olarak kabul edildiği için yapılmaktadır [13]. Bir Fonksiyon Çağrı Grafiği (FCG), bir APK'daki yöntemler arasındaki çağırıcı-çağrılan ilişkileri yakalar, bu da yöntemler arasındaki ilişkiler hakkında bir içgörü sağlayabilir. Grafik yapısı, makine öğrenme algoritmalarına daha derin bir şekilde gömülebilir ve son zamanlarda Grafik Sinir Ağları (GNN), FCG'leri gömme için kullanılmıştır [14]. GNN, topolojik yapı ve düğüm özelliklerini değerlendirerek her düğüm için bilgilendirici gömme oluşturmak için kullanılabilir [15].

Literatürde, Android malware tespiti için makine öğrenmesi algoritmalarını kullanan birçok çalışma bulunmaktadır. Rana ve arkadaşları DREBIN veri seti (123453'te gerçekleşen 11120 Android uygulamasından oluşan) üzerinde ağaç tabanlı makine öğrenimi algoritmaları kullanarak modeller geliştirmişlerdir. Veri seti, 5560 kötü amaçlı yazılım örneği içermektedir ve iki sınıfa eşit olarak bölünmüştür. Bu çalışmada, Karar Ağaçları (DT), RF ve GB algoritmaları ile geliştirilen modeller sırasıyla %96.13, %97.24 ve %93.68 doğruluk değerleri elde etmiştir [16]. Peng ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, Android sistemlerindeki zararlı kodlarla ilgili olarak, veri iletimi ve haberleşme sırasındaki riskleri analiz etme ve ölçme amaçlanmıştır. Bu çalışmada, olasılık tabanlı Naive Bayes algoritması kullanılarak %93.5 doğruluk başarısı elde edilmiştir [17].

Arp ve arkadaşları ise, çalışmalarında SVM algoritmasını kullanarak malware yazılım tespiti yapmaya çalışmışlardır. Bu çalışmada 131611 örnek içeren DREBIN veri seti ham haliyle kullanılmıştır. Veri setindeki malware olarak sınıflandırılan örnek sayısı 5560, dengesiz olarak iki sınıfa ayrılmıştır. SVM algoritması ile geliştirilen model ile %94 doğruluk başarısına ulaşıldığı belirtilmiştir [18]. Li ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, makine öğrenmesi yöntemleri kullanarak malware tespitinde izinler incelenmiştir. Malware olan ve olmayan uygulamaları ayırmak için, veri setinde bulunan tüm izinler yerine sınıflandırmada en etkili olan izinler belirlenmiştir. Belirlenen izinlere uygulanan modeller sonucunda, SVM ile %91.22 ve Fonksiyonel Ağaç ile %93.62 sınıflandırma başarılarına ulaşılmıştır [19].

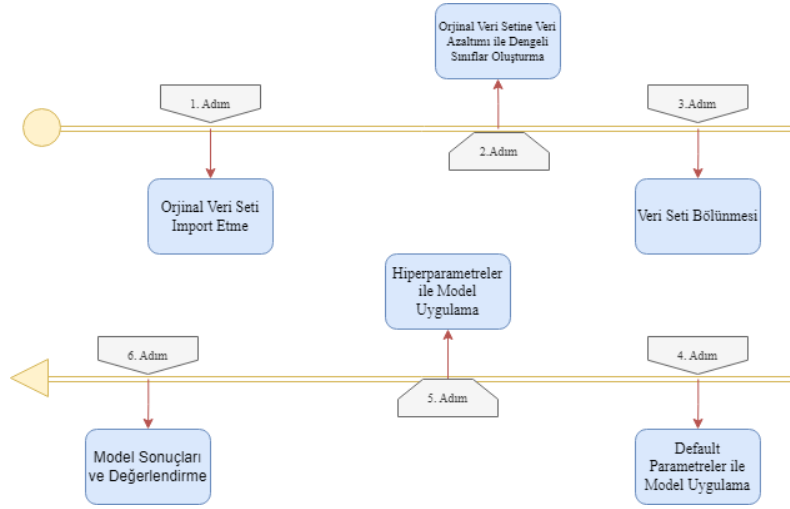
Qiao ve arkadaşlarının çalışmasında, veri setindeki 104 izin ve 654 API'den oluşan öznitelikler ikili ve sayısal tabanlı öznitelik çıkarımına tabi tutularak, RF, Yapay Sinir Ağları (ANN) ve SVM modelleri uygulanmıştır. En başarılı model, RF ile %94.41 olarak elde edilmiştir [20]. Aydın ve arkadaşları, çalışmalarında malware tespitinde izin tabanlı bir yöntem kullanmış ve yöntemin üzerinde performansı ölçülen SVM, NB, RF ve KNN modelleri arasından en yüksek doğruluk başarısına %95.65 ile RF modelinde ulaşılmıştır [21]. Güngör ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, Maling veri setinde bulunan APK dosyaları gri ölçekli görüntüye çevirerek öznitelik çıkarımı yapılmış ve sınıflandırma performansları bu şekilde elde edilmiştir. Bu çalışmada uygulanan KNN ve RF algoritmalarından sırasıyla %96.72 ve %97.44 doğruluk başarıları elde edilmiştir [22]. Utku ve arkadaşlarının çalışmasında ise, Android cihazlarda malware tespitinde Karar Ağacı (DT) tabanlı tespit sistemi üzerinde, C4.5 ve Hoeffding ağacı algoritmaları ile modeller oluşturulmuştur. C4.5 karar ağacı algoritması ile %95.86 ve Hoeffding ağacı algoritması ile de %93.18 doğruluk başarısına ulaşılmıştır [23].

Liu ve arkadaşları da çalışmalarında, Android kötü amaçlı yazılımlarını tespit etmek için SeGDroid adı verilen yeni bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntem, duyarlı işlev çağrısı grafiklerinden (FCG) semantik bilgi öğrenmeye odaklanmaktadır. SeGDroid, güvenlikle ilgili API çağrısı bağlamını koruyan ve gereksiz düğümleri çıkaran grafik budama kullanarak duyarlı bir FCG inşa etmektedir. SeGDroid, kötü amaçlı yazılım tespiti için bir grafik evrişimli sinir ağı algoritması kullanarak grafik gömütlemeleri indüklemekte olup, CICMal2020 veri kümesinde % 98 ve MalRadar veri setinde kötü amaçlı yazılım ailesi sınıflandırması için % 96 F-score değerine ulaşmıştır. Ayrıca, kötü amaçlı davranışları açıklamak için bir düğüm önemi hesaplama yöntemi önerilmiştir [24]. Yang ve arkadaşları, mevcut bilgilerin etkisini azaltmaya ve etiketlerin katılımı olmadan modeli önceden eğitmeye yönelik kontrastif öğrenmeye dayanan bir çalışma sunmuşlardır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, bu yöntemin halka açık veri setleri üzerinde zararlı yazılım tanımlama için %96'nın üzerinde ve çoklu sınıf tespiti (zararlı yazılım sınıfı ve ailesi) için %98'in üzerinde doğruluk oranına ulaşabildiği gözlemlenmiştir [25].

Bu çalışmada ise, bir uygulamanın malware olup olmadığını tespit edebilen yüksek doğruluklu ve güvenilir bir model oluşturulmaya çalışılmıştır. Bu amaçla Support Vector Machines (SVM), Gradient Boosting (GP) ve Multi Layer Perceptron (MLP), Naïve Bayes (MNB), K-En Yakın Komşu (KNN) ve Random Forest (RF) gibi makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak modelleme çalışmaları yapılmıştır. Modelleme sürecinde kullanılan veri seti (DREBIN-215 Android Malware Dataset) popüler bir veri seti olup, 2 sınıflı ve her sınıfta farklı sayıda örnek bulunan dengesiz bir veri setidir. Bu veri setine rastgele örnekleme uygulanarak veri azaltımı yapılmış ve her sınıfta eşit sayıda örnek içeren dengeli 3 yeni veri seti oluşturulmuştur. Yeni oluşturulan veri setleri, 70-30 oranında eğitim ve test veri seti olarak bölünerek algoritmalara uygulanmıştır. Algoritmaların varsayılan parametreleri ve GridSearch sonucu elde edilen en iyi hiper parametreleri ile model performansları karşılaştırılmış ve en iyi performansa sahip olan model bulunmaya çalışılmıştır. Sonuç olarak, en yüksek başarı, SVM modelinden, hiper parametre optimizasyonu ile %99.07 doğruluk başarısı ile elde edilmiştir.

II. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada Android'de kötü amaçlı yazılım tespiti için gerçekleştirilen modelleme süreci Şekil 1'de gösterilmiştir ve süreçte bulunan adımlar bu bölümde açıklanmıştır.



Şekil 1 Modelleme süreci.

Bu çalışma, Google Colab ortamında Python pandas, numpy, seaborn ve sklearn kütüphaneleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Python'da her işlem için kullanılan kütüphaneler Tablo 1'de belirtilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan Kütüphaneler

Kullanılan Kütüphane	Amaç	Kullanılan Aşama
Drive	Google Colab Drive Erişimi	Veri Seti Okunması ve İşlenmesi
Numpy	Matris İşlemleri	
Pandas	Veri Yapısı	
Seaborn	Veri Görselleştirme	
Random	Veri İşlemleri	
Sklearn	Sınıflandırma Algoritmaları, Veri Seti Bölümleme, Veri İşlemleri	Modelleme, Veri Bölümleme, Veri Önleme
Matplotlib.pyplot	Veri Görselleştirme	Model Sonuçları

A. 1. Veri Seti Tanımı

Bu çalışma halka açık olarak paylaşılan DREBIN veri seti kullanılarak yapılmıştır [18]. 2010-2012 yılları arasında 131611 gerçek Android uygulamasının verileriyle oluşturulan bu veri setinin güncel olarak erişilebilen ve bu çalışmada kullanılan versiyonunda 2 sınıfa ait toplamda 15036 tane örnek bulunmaktadır. Bu örnekler Android uygulamaların manifest.xml dosyası ve gömülü kaynak kodlarından elde edilen 216 tane özneliğe sahiptir. Bu iki kaynaktan elde edilen öznelikler, kaynaklara ait 4'er ana grup olmak üzere 8 grupta sınıflandırılmaktadır.

A.1.1. Manifest.xml Dosyasından Elde Edilen Öznelik Grupları

Android işletim sisteminde bulunan uygulamalar, Manifest.xml adında bir manifest dosyası içerir [26]. Ve bu dosyada, uygulamayla ilgili temel bilgiler ve veriler bulunur. Manifest.xml dosyasından elde edilen öznelikler şunlardır:

- **Donanım Bileşenleri:** Kamera, GPS gibi erişim istenen donanım bileşenlerini belirtir.
- **Erişim İstenen İzinler:** Yazılım üzerinde yürütülen bilgilere ve eylemlere erişim iznini belirtir.
- **Uygulama Bileşenleri:** Servisler, İçerik sağlayıcıları, yayın alıcıları gibi uygulama bileşenlerini belirtir.
- **Filtrelenmiş Amaçlar:** Android iç süreçleri tarafından yürütülen amaçları belirtir.

A.1.2. Gömülü Kaynak Kodlarından (.DEX) Elde Edilen Öznitelik Grupları

Android işletim sistemi üzerinde bulunan uygulamaların kaynak kodlarında bulunan erişim isteklerinden ve çağrılardan elde edilen öznitelikler gömülü kaynak kodlarından elde edilen özniteliklerdir. Bu özniteliklerin sınıflandırılması şu şekildedir:

- **Kısıtlanmış API Çağruları:** Manifest.xml dosyasında belirtilmeyen izinler kullanılarak API isteği gönderilmesini belirtir.
- **Kullanılan İzinler:** Bu özellik sayesinde API çağrısı için istenen iznin kötü amaçlı olup olmadığı anlaşılabilir.
- **Şüpheli API Çağruları:** Cihaz bilgileri gibi hassas verileri isteyen API çağrılarını belirtir.
- **Ağ Adresleri:** Kötü amaçlı yazılımlar tarafından harici komut çalıştırma veya veri aktarma için kullanılan ağ adreslerini veya URL'leri belirtir [16, 27].

A.2. Veri Önışleme

Model geliştirme sürecinde kullanılacak olan veri setine karar verme aşamasında, Drebin (Orijinal) veri setinin dengesiz bir veri seti olduğu görülmüştür. Bu veri seti, 2 sınıflı (“Malware” ve “Malware Değil”) olup, “Malware” sınıfı 5560 örnek, “Malware Değil” sınıfı ise 123453 örnek içermektedir. Bu çalışmada kullanılan ve orijinal veri setinin güncel olarak bulunabilen versiyonu (D0) ise toplam 15036 örnek, 5560 tanesinin Malware ve kalan 9476 tanesinin ise Malware değil olarak yine dengesiz bir dağılıma sahiptir. Oluşturulacak modelin güvenilir ve başarı değerlerinin tutarlı olması istendiğinden bu veri seti üzerinde veri dengeleme yapılması yoluna gidilmiştir. Bunun için, D0 veri setinden rastgele örnekleme yapılarak veri azaltımı uygulanmıştır ve sınıf başına düşen örnek sayıları eşitlenmiştir. Modelin çeşitli verilerle eğitilerek test edilmesi ve sonuçların birlikte kıyaslanması için veri azaltımı sonucunda rastgele 5560'ar tane örnek içeren 2 sınıfa sahip veri seti elde edilmiştir. Daha sonra bu işlem D0 veri seti üzerinde 2 defa daha uygulanarak toplamda 3 tane eşit sınıf dağılımına sahip veri seti (D1, D2 ve D3) elde edilmiştir. Tablo 2’de bu çalışmada kullanılan, D0, D1, D2 ve D3 veri setlerine ait detaylar paylaşılmıştır. Bu veri setlerine %70-%30 oranında eğitim ve test veri seti ayrımı uygulanarak modelleme çalışmalarına başlanmıştır.

Tablo2. Veri Setlerinin Kıyaslanması.

Veri Seti	Sınıf Adı	Her Bir Sınıftaki Örnek Sayısı	Toplam Örnek Sayısı
D0	Malware	5560	15036
	Malware Değil	9476	
D1	Malware	5560	11120
	Malware Değil	5560	
D2	Malware	5560	11120
	Malware Değil	5560	
D3	Malware	5560	11120
	Malware Değil	5560	

A. 3. Modellemede Kullanılan Makine Öğrenmesi Algoritmaları

Modeller, veri setlerine uygulanan SVM, GB, MLP, MNB, KNN ve RF algoritmaları kullanılarak geliştirilmiştir.

A.3.1. Support Vector Machines (SVM)

SVM algoritması, verileri iki veya daha fazla sınıfa ayırmak için en uygun ayırım hiper düzlemi (ayırıcı) bulmayı amaçlayan bir sınıflandırma yöntemidir. SVM, sınıflar arasında en geniş marjı sağlayacak şekilde bu ayırım hiper düzlemi oluşturarak sınıflandırma başarısını artırır. SVM, doğrusal ve doğrusal olmayan problemlerde kullanılabilen ve özellikle küçük veri setlerinde başarılı sonuçlar elde eden bir yöntemdir [28].

A.3.2. Gradient Boosting (GB)

GB algoritması, zayıf öğrenen modelleri, ardışık olarak eğiterek daha güçlü ve doğru bir sınıflandırıcı oluşturan bir yöntemidir. Her aşamada, önceki aşamalardaki hataları en iyi düzeltten model seçilir ve bu model, toplam modelin bir parçası haline gelir. GB, model performansını artırmak için hataların azaltılması sürecini optimize eder ve daha hızlı öğrenme sağlar [29].

A.3.3. Multi Layer Perceptron (MLP)

MLP algoritması, yapay sinir ağlarının bir türüdür ve özellikle sınıflandırma ve regresyon problemlerinde kullanılır. MLP, giriş, çıktı ve ara katmanlardan oluşan bir yapıya sahiptir ve her katmanda birden fazla nöron bulunur. Model eğitimi sırasında, ağırlıklar, geri yayılım algoritması kullanılarak güncellenir ve hedef değerlere yaklaşan bir yapı elde edilir [30].

A.3.4. Naive Bayes (MNB)

Naive Bayes algoritması, istatistiksel olarak Bayes teoremine dayanan bir sınıflandırma algoritmasıdır. Bu teorem, koşullu olasılıkların ilişkilerini hesaplamaya dayanır. Farklı türlerde Naive Bayes sınıflandırıcıları vardır, örneğin Gauss, Bernoulli ve MultiNominal Naive Bayes [31]. Bu çalışmada, Multi Nominal Naive Bayes (MNB) sınıflandırıcısı kullanılmıştır.

A.3.5. K-En Yakın Komşu (KNN)

K-En Yakın Komşu, bir veri noktasının sınıf üyeliğini, komşu veri noktalarına olan yakınlığına dayalı olarak ölçen tembel, parametrik olmayan bir sınıflandırma algoritmasıdır. Sorgu yapılmadığı sürece eğitim setine dayalı ayırım modeli oluşturmaz. Algoritma, temel veri dağılımı hakkında herhangi bir varsayım yapmaz ve verileri komşularına olan yakınlığına göre sınıflandırır [32].

A.3.6. Random Forest (RF)

RF algoritması, makine öğrenme teorisi temelinde çalışan bir denetimli öğrenme algoritmasıdır ve sınıflandırma ve regresyon için ensemble yöntemleri ailesine aittir. Adından da anlaşılacağı gibi, RF, bir topluluk olarak çalışan birçok bireysel karar ağacından oluşur. RF'deki her karar ağacı, bir sınıf tahmini verir ve en yüksek skorlu sınıf modelimizin tahmini olur [33].

A. 4. Performans Ölçütü

Bu çalışmada, karmaşıklık matrisi sonuçlarından doğruluk, özgüllük, duyarlılık ve kesinlik metriklerini elde etmek için öncelikle doğru pozitif (DP), doğru negatif (DN), yanlış pozitif (YP), yanlış negatif (YN) değerleri elde edilmiştir. Elde edilen değerler aşağıdaki eşitlikler [34] kullanılarak sonuç hesaplamasında kullanılmıştır.

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

$$\text{Duyarlılık (Recall)} = \frac{DP}{DP + YN} \quad (2)$$

$$\text{Özgüllük (Specifity)} = \frac{DN}{DN + YP} \quad (3)$$

$$\text{Kesinlik (Precision)} = \frac{DP}{DP + YP} \quad (4)$$

A. 5. Modelleme ve Performans Analizi

Modelleme sürecinde, SVM, GB, MLP, MNB, KNN ve RF algoritmaları varsayılan hiperparametrelerle dört veri setine (D0, D1, D2 ve D3) uygulanmıştır. Tablo 3, bu modellerin doğruluk, duyarlılık, özgüllük ve kesinlik sonuçları ile modellerin çalışma sürelerini göstermektedir.

Tablo 3. Varsayılan Hiperparametrelerle Modelleme Sonuçları.

Veri Seti	Model	Doğruluk (%)		Duyarlılık (%)		Özgüllük (%)		Kesinlik (%)		Süre (dk:sn)
		Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test	
D0	SVM	98.75	98.27	97.32	96.72	99.26	98.60	99.58	99.19	0:08
	GB	97.75	97.23	95.61	94.88	98.22	97.61	98.99	98.62	0:07
	MLP	99.94	98.63	99.85	97.92	98.38	98.38	100.00	99.05	0:013
	MNB	92.93	93.08	94.50	95.18	87.34	87.37	92.00	91.84	0:01
	KNN	98.68	98.14	97.78	97.20	98.62	97.78	99.20	98.69	0:07
	RF	99.94	98.65	99.85	97.38	100.00	98.97	100.00	99.40	0:012
D1	SVM	98.84	97.87	98.35	97.42	99.32	98.31	99.32	98.31	0:04
	GB	97.54	96.61	97.17	95.86	97.90	97.32	97.90	97.32	0:03
	MLP	99.92	98.77	99.85	98.68	100.00	98.86	100.00	98.86	0:08
	MNB	92.57	92.83	95.52	96.22	90.19	90.12	89.62	89.44	0:01
	KNN	98.37	97.42	98.17	97.48	98.55	97.37	98.56	97.36	0:03
	RF	99.92	98.41	99.85	97.90	100.00	98.91	100.00	98.92	0:06
D2	SVM	98.64	97.78	97.97	96.88	99.30	98.66	99.31	98.68	0:03
	GB	97.42	96.58	96.86	95.62	97.94	97.49	97.97	97.54	0:04
	MLP	99.92	98.50	99.85	98.56	100.00	98.44	100.00	98.44	0:16
	MNB	92.43	92.71	95.50	96.10	89.97	90.01	89.37	89.32	0:01
	KNN	98.32	97.36	98.17	97.42	98.45	97.31	98.46	97.30	0:03
	RF	99.92	98.26	99.85	98.02	100.00	98.49	100.00	98.50	0:01
D3	SVM	98.86	98.11	98.46	97.48	99.25	98.72	99.26	98.74	0:03
	GB	97.53	96.34	96.73	95.32	98.30	97.31	98.33	97.36	0:04
	MLP	99.91	98.71	99.82	98.38	100.00	99.03	100.00	99.04	0:08
	MNB	92.37	93.07	95.57	95.98	89.80	90.71	89.16	90.16	0:01
	KNN	98.29	97.60	98.25	97.48	98.33	97.72	98.33	97.72	0:06
	RF	99.92	98.59	99.85	98.02	100.00	99.15	100.00	99.16	0:01

Tablo 3'deki sonuçlar, MLP algoritmasının varsayılan hiperparametrelerle D0 haricindeki tüm veri setlerinde en yüksek doğruluk ve duyarlılık değerlerini ürettiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, RF algoritması D0 ve D1 veri kümelerinde özgüllük ve kesinlik açısından en iyi performansı gösterirken, SVM algoritması D2 veri kümesinde, RF algoritması da D3 algoritmasında özgüllük ve kesinlik açısından en yüksek değerler elde edilmiştir.

Modellemenin ikinci aşamasında, performansı artırmak amacıyla, GridSearch yöntemi kullanılarak en iyi hiperparametreler araştırılmıştır. Her algoritma için bulunan en iyi hiperparametrelerin uygulanmasıyla elde edilen doğruluk, duyarlılık, özgüllük, kesinlik değerleri ve çalışma süreleri ise Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4'deki sonuçlara göre, D0 veri seti için, SVM algoritmasından %99.07 ile en yüksek doğruluk başarısı elde edilmiştir. Aynı algoritma ile en yüksek duyarlılık, özgüllük ve kesinlik değerleri de, sırasıyla %98.21, %99.28 ve %99.58 olarak elde edilmiştir. MLP algoritması ise D0 veri seti için, %98.82 doğruluk başarısı ile ikinci en iyi performansı gösteren algoritma olmuştur. Ayrıca, duyarlılık,

özgüllük ve kesinlik skorları da sırasıyla %98.15, %98.68 ve %99.22 olarak bulunmuştur. GB ve RF algoritmalarının da %98.58 ve %98.51 doğruluk değerleri ile yüksek performans sergilediği görülmüştür. MNB algoritmasının başarı performansı, diğer sınıflandırıcıların performansları kadar yüksek olmasa da, zaman performansı açısından, en kısa sürede modelleme yapabilen algoritma olduğu görülmüştür. KNN algoritması da, %98.43 doğruluk başarısı ile diğer sınıflandırıcılara kıyasla nispeten düşük performans göstermiştir, zaman performansı açısından da en yavaş çalışan model olduğu gözlemlenmiştir.

D1 veri kümesi için, MLP algoritmasının, en yüksek doğruluk (%98.83), duyarlılık (%98.68), özgüllük (%98.98) ve kesinlik değerleri (%98.98) ile, en iyi performansı sergilediği görülmüştür. SVM algoritması ise, %98.59 doğruluk başarısı ile ikinci en yüksek performansı gösteren algoritma olmuştur. GB ve RF algoritmaları da %98.62 ve %98.41 doğruluk başarı değerleri ile iyi performans göstermişlerdir.

Tablo 4. En İyi Hiperparametrelerle Modelleme Sonuçları.

Veri Seti	Model	Doğruluk (%)		Duyarlılık (%)		Özgüllük (%)		Kesinlik (%)		Süre (dk:sn)
		Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test	
D0	SVM	99.91	99.07	99.77	98.21	100.00	99.28	100.00	99.58	1:10
	GB	99.92	98.58	99.79	97.80	100.00	98.38	100.00	99.05	3:23
	MLP	99.94	98.82	99.85	98.15	100.00	98.68	100.00	99.22	0:59
	MNB	92.97	93.08	94.48	95.18	87.44	87.37	92.08	91.84	0:09
	KNN	99.94	98.43	99.85	97.74	100.00	98.03	100.00	98.83	8:00
	RF	99.90	98.51	99.74	97.20	100.00	98.79	100.00	99.29	1:06
D1	SVM	99.90	98.59	99.79	98.50	100.00	98.68	100.00	98.68	0:27
	GB	99.92	98.62	99.85	98.50	100.00	98.74	100.00	98.74	2:09
	MLP	99.92	98.83	99.85	98.68	100.00	98.98	100.00	98.98	0:42
	MNB	92.70	92.83	95.57	96.22	90.37	90.18	89.83	89.44	0:03
	KNN	99.92	98.11	99.85	98.38	100.00	97.85	100.00	97.84	3:00
	RF	99.88	98.41	99.77	97.90	100.00	98.91	100.00	98.92	0:37
D2	SVM	99.90	98.71	99.79	98.44	100.00	98.98	100.00	98.98	0:34
	GB	99.92	98.50	99.85	98.50	100.00	98.50	100.00	98.50	2:04
	MLP	99.92	98.62	99.85	98.56	100.00	98.68	100.00	98.68	0:52
	MNB	92.46	92.77	95.50	96.10	90.00	90.10	89.42	89.44	0:06
	KNN	99.92	97.66	99.85	98.20	100.00	97.15	100.00	97.12	4:00
	RF	99.88	98.32	99.77	98.02	100.00	98.61	100.00	98.62	0:42
D3	SVM	98.91	98.74	99.82	98.26	100.00	99.21	100.00	99.22	0:23
	GB	99.92	98.68	99.85	98.44	100.00	98.92	100.00	98.92	2:00
	MLP	99.92	98.80	99.85	98.14	100.00	99.45	100.00	96.46	0:43
	MNB	92.38	93.04	95.57	95.92	89.82	90.70	89.19	90.16	0:03
	KNN	99.92	98.47	99.85	98.38	100.00	98.56	100.00	98.56	3:00
	RF	99.88	98.56	99.77	97.90	100.00	99.21	100.00	99.22	0:37

D2 veri kümesi için de SVM algoritması, %98.71 doğruluk başarı değeriyle en yüksek performansı gösteren algoritma olmuştur. MLP algoritması da, SVM algoritmasıyla benzer performans sonuçları sergilemiş, %98.62 doğruluk başarı değeri elde edilmiştir. GB ve RF algoritmalarının ise, sırasıyla %98.50 ve %98.32 doğruluk başarı değerleri ile saygın sonuçlar sergiledikleri görülmüştür.

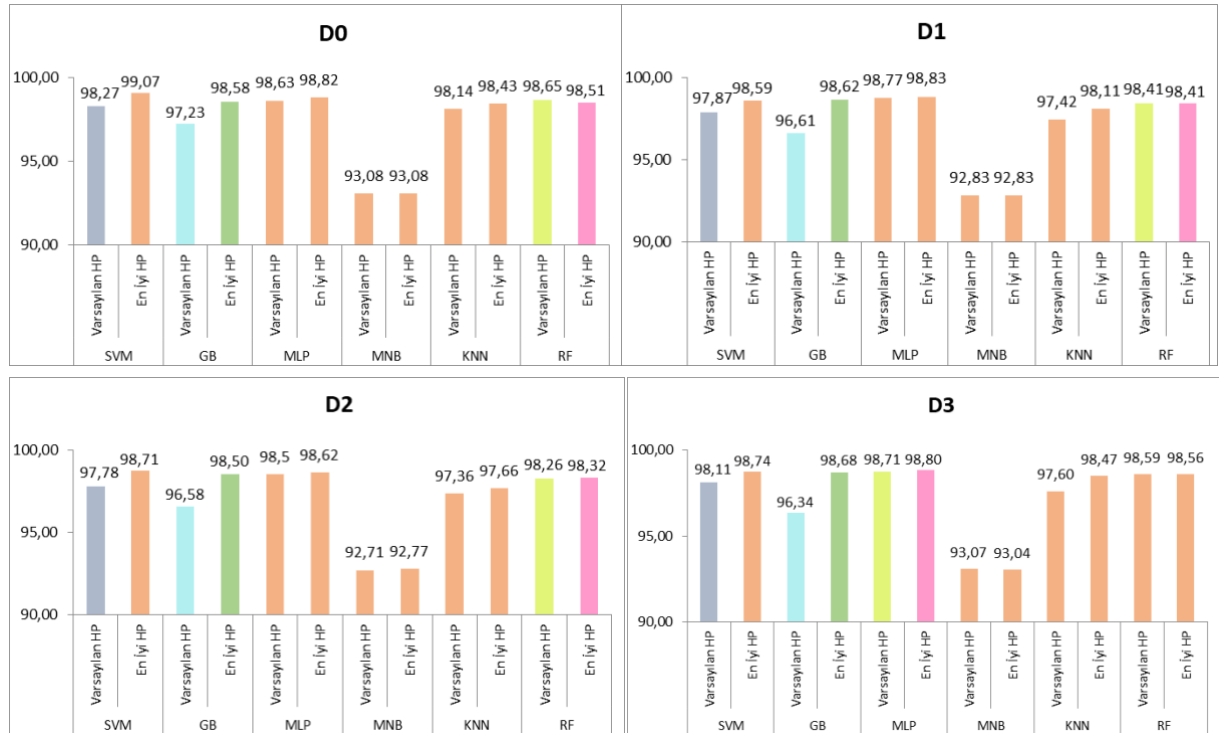
Son olarak, D3 veri kümesi için de, MLP algoritması ile en yüksek doğruluk başarısı, %98.80 olarak elde edilmiştir. SVM algoritması ise, %98.74 doğruluk başarısı ile ikinci sırada yer almıştır. GB ve RF algoritmalarının da %98.68 ve %98.56 doğruluk başarı değerleriyle, MLP ve SVM algoritmalarına yakın performanslar sergilediği görülmüştür.

Tablo 4'teki değerlere göre, GridSearch yöntemiyle bulunan en iyi hiperparametrelerle, D0 veri seti için en yüksek performans metrikleri SVM algoritması kullanılarak elde edilmiştir. D1 veri seti için ise, tüm performans metriklerine göre en başarılı model, MLP algoritması kullanılarak elde edilmiştir. D2 veri

seti için en yüksek doğruluk, özgüllük ve kesinlik başarıları SVM algoritması kullanılarak alınmıştır. D3 veri seti için ise en yüksek doğruluk ve özgüllük başarıları, MLP algoritması kullanılarak elde edilmiştir.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tüm veri setlerinin performansları, Tablo 3 ve 4'teki değerlere göre karşılaştırıldığında, genel olarak, GridSearch ile bulunan en iyi hiperparametreler kullanılarak elde edilen doğruluk başarıları sonuçlarının, varsayılan hiperparametrelerin kullanılmasıyla elde edilen sonuçlara kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum, her bir veri seti ve algoritma için Şekil 2'de de gözlemlenebilir.

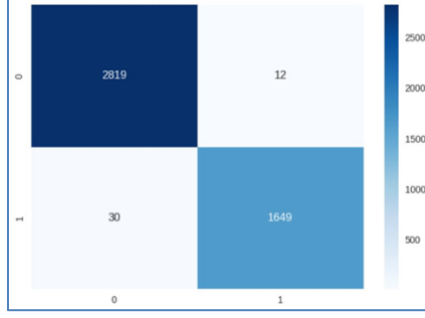


Şekil 2. Her bir veri seti için varsayılan ve en iyi hiperparametre doğruluk başarı sonuçlarının karşılaştırılması.

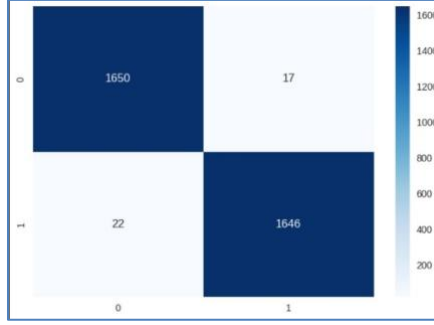
Şekil 2'de görüldüğü üzere, D0 veri seti için en iyi hiperparametre değerleriyle oluşturulan SVM modeli, en başarılı model olarak belirlenmiştir. GridSearch çalışmaları sonucunda SVM modeli için elde edilen en iyi hiperparametreler şunlardır: $C=10$, $\gamma=0.1$ ve $\text{kernel}=\text{rbf}$. Bu hiperparametre değerleri kullanıldığında, model D0 veri seti için en yüksek doğruluk (%99.07), özgüllük (%99.28) ve kesinlik (%99.58) değerlerine ulaşmıştır.

İlk aşamada amaç, varsayılan hiperparametrelerle elde edilen başarı sonuçlarını artırmak için hiperparametre optimizasyonu yapmaktır. Aynı modellerin varsayılan hiperparametre ve en iyi hiperparametrelerle elde edilen sonuçları karşılaştırıldığında, en fazla başarı artışının GB modelinde olduğu görülürken, D0 ve D2 veri setleri için en başarılı sonuçlar SVM algoritması ile; D1 ve D3 veri setleri için ise en başarılı modeller MLP algoritması ile elde edilmiştir.

Tüm modeller kıyaslandığında, dengesiz veri seti (D0) için en iyi hiperparametrelerin kullanıldığı SVM modeli, %99.07 doğruluk başarılarıyla en iyi model olarak belirlenmiştir. Bu modelin karmaşıklık matrisi Şekil 3'te gösterilmektedir. Dengeli veri setleri (D1, D2 ve D3) için uygulanan modeller arasında ise, D1 veri seti için en iyi hiperparametrelerin kullanıldığı MLP modeli %98.83 doğruluk başarılarıyla ikinci en iyi model olarak bulunmuştur ve bu modelin karmaşıklık matrisi de Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 3. D0 veri seti için en iyi hiperparametrelerin kullanıldığı SVM modeline ait karmaşıklık matrisi



Şekil 4. D1 veri seti için en iyi hiperparametrelerin kullanıldığı MLP modeline ait karmaşıklık matrisi

IV. SONUC

Bu çalışmada, Android kötü amaçlı yazılım tespiti için SVM, GB, MLP, MNB, KNN ve RF makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak modeller oluşturulmuş ve bu modellerin performansları karşılaştırılmıştır. DREBIN veri seti üzerinde gerçekleştirilen modelleme çalışmaları sonucunda, bu çalışma Android kötü amaçlı yazılım tespiti için ilk olarak, %99.07 doğruluk başarısına sahip olan SVM modelini ve ikinci olarak da %98.83 doğruluk başarısı ile MLP modelini önermektedir. Hiperparametre optimizasyonu ile geliştirilen bu modeller, diğer algoritmalara kıyasla daha yüksek doğruluk başarısı sunmaktadır. Bu nedenle, Android kötü amaçlı yazılım tespiti ve ilgili çalışmalarda kullanılacak model olarak SVM ve MLP modelleri önerilmektedir.

Önerilen modellerin başarısı yanında, bu çalışmada elde edilen sonuçlar hiperparametre optimizasyonunun önemini de vurgulamaktadır. Hiperparametre optimizasyonu, modelin performansını önemli ölçüde iyileştirerek, Android kötü amaçlı yazılım tespiti gibi kritik alanlarda daha güvenilir ve etkili sonuçlar elde etmeye yardımcı olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, makine öğrenmesi algoritmalarının Android cihazlarda kötü amaçlı yazılım tespiti için etkili ve güvenilir çözümler sunabileceğini göstermektedir. Bu çalışmaların devamı olarak, daha geniş veri setleri ve farklı algoritmalar kullanarak daha başarılı modeller geliştirilebilir. Ayrıca, gerçek zamanlı tespit sistemleri ve güvenlik uygulamaları ile bu modellerin kullanılması sayesinde kullanıcıların güvenliği daha da artırılabilir.

Gelecek çalışmalarda, farklı makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemleri, öznelik seçimi ve öznelik mühendisliği teknikleri, sınıf dengesizliği sorununun çözümüne yönelik yöntemler ve farklı performans metriklerinin kullanılması gibi öneriler dikkate alınarak, Android kötü amaçlı yazılım tespiti alanında daha başarılı ve güvenilir modeller geliştirilebilir. Bu sayede, Android işletim sistemine sahip cihazlarda güvenlik ve gizlilik risklerinin azaltılması ve kullanıcıların korunması sağlanabilir.

Sonuç olarak, bu çalışma ve önerilen SVM ve MLP modelleri, Android kötü amaçlı yazılım tespiti alanında önemli bir katkı sunmaktadır. Hiperparametre optimizasyonu ve model seçimi, bu alanda daha iyi sonuçlar elde etmek için kritik faktörlerdir. Gelecekteki çalışmalar, bu alandaki bilgi birikimini ve teknolojinin etkinliğini daha da artırabilir ve böylece kullanıcıların cihazlarını ve verilerini korumaya yönelik daha güvenilir ve etkili çözümler sunabilir.

V. KAYNAKLAR

- [1] A. T. Kabakuş, İ. A. Doğru and A. Çetin, "Android kötücül yazılım tespit ve koruma sistemleri", Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi, vol. 31, no. 1, pp. 9-16, Feb. 2015.
- [2] M. Grace, Y. Zhou, Q. Zhang, S. Zou and X. Jiang, "RiskRanker: scalable and accurate zero-day android malware detection", MobiSys '12: Proceedings of the 10th international conference on Mobile systems, applications, and services, June 2012, Pages 281–294, <https://doi.org/10.1145/2307636.2307663>
- [3] N. Zhang, Y. Tan, C. Yang and Y. Li, "Deep learning feature exploration for Android malware detection", Applied Soft Computing, Volume 102, April 2021, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.107069>
- [4] A. Razgallah, R. Khoury, S. Halle and K. Khanmohammadi, "A survey of malware detection in Android apps: Recommendations and perspectives for future research", Computer Science Review, Volume 39, February 2021, <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2020.100358>
- [5] A. Guerra-Manzanares, M. Luckner and H. Bahsi, "Concept drift and cross-device behavior: Challenges and implications for effective android malware detection", Computers & Security, Volume 120, September 2022, <https://doi.org/10.1016/j.cose.2022.102757>
- [6] F. Ou and J. Xu, "S³Feature: A static sensitive subgraph-based feature for android malware detection", Computers & Security, Volume 112, January 2022, <https://doi.org/10.1016/j.cose.2021.102513>
- [7] A. Martin, R. Lara-Cabrera and D. Camacho, "Android malware detection through hybrid features fusion and ensemble classifiers: The AndroPyTool framework and the OmniDroid dataset", Information Fusion, Volume 52, December 2019, Pages 128-142, <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2018.12.006>
- [8] D. Vasan, M. Alazab, S. Wassan, H. Naeem, B. Safaei and Q. Zheng, "IMCFN: Image-based malware classification using fine-tuned convolutional neural network architecture", Computer Networks, Volume 171, 22 April 2020, <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107138>
- [9] A. Ananya, P. Vinod and M. Shojafar, "SysDroid: A Dynamic ML-based Android Malware Analyzer using System Call Traces", Cluster Computing, December 2020, DOI:[10.1007/s10586-019-03045-6](https://doi.org/10.1007/s10586-019-03045-6)
- [10] K. Lin, X. Xu and F. Xiao, "MFFusion: A Multi-level Features Fusion Model for Malicious Traffic Detection based on Deep Learning", Computer Networks, Volume 202, 15 January 2022, <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.108658>
- [11] W. W. Lo, S. Layeghy, M. Sarhan, M. Gallagher and M. Portmann, "Graph neural network-based android malware classification with jumping knowledge", 2022 IEEE Conference on Dependable and Secure Computing (DSC) , 1–9, 2022.
- [12] L. Onwuzurike, E. Mariconti, P. Andriotis, E. D. Cristofaro, G. J. Ross and G. Stringhini, "Mamadroid: Detecting android malware by building markov chains of behavioral models", ACM Trans. Priv. Secur. 22, 14:1–14:3, 2019.

- [13] Y. Wu, X. Li, D. Zou, W. Yang, X. Zhang and H. Jin, "Malscan: Fast market-wide mobile malware scanning by social-network centrality analysis", in: 34th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering, ASE 2019, San Diego, CA, USA, IEEE. pp. 139–150, 2019.
- [14] P. Xu, C. Eckert and A. Zarras, "Detecting and categorizing android malware with graph neural networks", in: SAC '21: The 36th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing, pp. 409–412, 2021.
- [15] H. Gao, S. Cheng and W. Zhang, "Gdroid: Android malware detection and classification with graph convolutional network", *Comput. Secur.* 106, 2021.
- [16] M.S. Rana, S. S. M. M. Rahman, and A. H. Sung, "Evaluation of tree based machine learning classifiers for android malware detection", *Computational Collective Intelligence: 10th International Conference, ICCCI 2018, Bristol, UK, September 5-7, 2018, Proceedings, Part II 10*. Springer International Publishing, 2018.
- [17] H. Peng, C. Gates, B. Sarma, N. Li, Y. Qi, R. Potharaju, and I. Molloy, I. "Using probabilistic generative models for ranking risks of android apps", In *Proceedings of the 2012 ACM conference on Computer and communications security* (pp. 241-252), 2012.
- [18] D. Arp, M. Spreitzenbarth, M. Hubner, H. Gascon, K. Rieck, and C. E. R. T. Siemens, "Drebin: Effective and explainable detection of android malware in your pocket", In *Ndss*, Vol. 14, pp. 23-26, 2014.
- [19] J. Li, L. Sun, Q. Yan, Z. Li, W. Srisa-an and H. Ye, "Significant Permission Identification for Machine-Learning-Based Android Malware Detection", in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 7, pp. 3216-3225, July 2018, doi: 10.1109/TII.2017.2789219.
- [20] M. Qiao, A. H. Sung and Q. Liu, "Merging Permission and API Features for Android Malware Detection", 2016 5th IIAI International Congress on Advanced Applied Informatics (IIAI-AAI), Kumamoto, Japan, 2016, pp. 566-571, doi: 10.1109/IIAI-AAI.2016.237.
- [21] A. Aydın , İ. A. Doğru and M. Dörterler , "Makine Öğrenmesi Algoritmalarıyla Android Kötücül Yazılım Uygulamalarının Tespiti", *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 22, no. 2, pp. 1087-1094, Aug. 2018, doi:10.19113/sdufbed.20066
- [22] A. Güngör , İ. Dogru , N. Barışçı and S. Toklu , "Görüntü tabanlı özelliklerden ve makine öğrenmesi yöntemlerinden faydalanılarak kötücül yazılım tespiti", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 38, no. 3, pp. 1781-1792, Jan. 2023, doi:10.17341/gazimmfd.994289
- [23] A. Utku, İ. A. Doğru and M. A. Akcayol, "Decision tree based android malware detection system", 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Izmir, Turkey, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/SIU.2018.8404151.
- [24] Z. Liu, R. Wang, N. Japkowicz, H. M. Gomes, B. Peng and W. Zhang, "SeGDroid: An Android malware detection method based on sensitive function call graph learning", *Expert Systems with Applications*, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121125>
- [25] S. Yang, Y. Wang, H. Xu, F. Xu and M. Chen, "An Android Malware Detection and Classification Approach Based on Contrastive Learning", *Computers & Security* Volume 123, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.cose.2022.102915>
- [26] J. Sahs and L. Khan, "A Machine Learning Approach to Android Malware Detection," 2012 European Intelligence and Security Informatics Conference, Odense, Denmark, 2012, pp. 141-147, 2012

doi: 10.1109/EISIC.2012.34.

- [27] Ö. Kiraz and İ. A. Doğru, "Android Kötücül Yazılım Tespit Sistemleri İncelemesi", Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, vol. 5, no. 1, pp. 281-298, Jan. 2017.
- [28] S. Haykin, "Neural Networks: A Comprehensive Foundation", Prentice- Hall, Ontario, 837s, 1999.
- [29] J. Friedman, "Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine", The Annals of Statistics, 29(5), 11-28, 2000.
- [30] V. N. Vapnik "The Nature of Static Learning Theory", Springer, 314s, 2000.
- [31] J. VanderPlas, "Python Data Science Handbook Essential Tools for Working with Data", O'Reilly Media, 2016.
- [32] G. O. Campos, A. Zimek, J. Sander, R.J.G.B. Campello, B. Micenková, E. Schubert, I. Assent and M.E. Houle, "On the evaluation of unsupervised outlier detection: measures, datasets, and an empirical study", Data Mining and Knowledge Discovery, vol. 30, no. 4, pp. 891–927, 2016.
- [33] L. Breiman, "Random Forests", Statistics Department University of California Berkeley, 1- 33, 2001.
- [34] B. J. Erickson and F. Kitamura, "Magician's Corner: 9. Performance Metrics for Machine Learning Models", Radiology. Artificial intelligence vol. 3, 3e, 2021, doi:10.1148/ryai.2021200126.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Kaldırma Kuvveti ve Yüzey Işınımının Eğik Bir Plakanın Çarpan Jet ile Soğutulmasına Etkilerinin Sayısal Olarak İncelenmesi

 Buğra SARPER^{a,*}

^a Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Tarsus Üniversitesi, Mersin, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: bugrasarper@tarsus.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1280558

Öz

Bu çalışmada, eğik bir plakanın tek bir slot jet ile soğutulmasında kaldırma kuvveti ve yüzeyler arası ışınımın taşınım ısı transferine etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Çalışma jet Reynolds sayısının (Re_j) 100 ile 1000 değerleri arasında gerçekleştirilmiş olup Richardson sayısı (Ri) ise 0.1 ile 10 arasında değişmektedir. Yüzeyler arası ışınım ısı transferinin genel ısı transfer performansına etkileri hedef plaka ve sınırlandırıcı yüzeylerin üç farklı yayıcılık ($\epsilon=0.05-0.5-0.95$) değeri ve üç farklı eğim açısı ($\alpha=0^\circ-5^\circ-10^\circ$) için analiz edilmiştir. Boyutsuz hedef plaka-nozul çapı mesafesi (H/D_j) 4'e eşit olup havanın ($Pr=0.71$) ışınım açısından katılımcı olmadığı kabulüyle hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, yüksek Richardson sayılarında kaldırma kuvvetinin akış ve ısı transfer karakteristiklerinin üzerindeki etkisinin ihmal edilemeyecek düzeyde olduğu, yüzey yayıcılığının artışının ise genel ısı transfer performansını iyileştirdiği ve plaka eğiminin ısı transferini önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çarpan jet, Taşınım, Işınım, Yüzey yayıcılığı, Kaldırma kuvveti, Eğim

Numerical Investigation of the Effects of Buoyancy and Inter-Surface Radiation on Jet Impingement Cooling of an Inclined Plate

ABSTRACT

In this study, effects of buoyancy and inter-surface radiation on convective heat transfer from an inclined plate cooled by a slot jet are numerically investigated. The study is carried out between the values of jet Reynolds number (Re_j) 100 and 1000, and the Richardson number (Ri) varies between 0.1 and 10. Impact of inter-surface radiation on the overall heat transfer performance is analyzed for three emissivity ($\epsilon=0.05-0.5-0.95$) values of the target plate and confined surfaces and three different inclination angles ($\alpha=0^\circ-5^\circ-10^\circ$) of the target plate. The dimensionless nozzle-to-target plate spacing (H/D_j) equals to 4, and computations are performed assuming that air ($Pr=0.71$) is not participating for radiation. As a result of the study, it is determined that effect of buoyancy on the flow and heat transfer characteristics at high Richardson numbers cannot be neglected, while the increase in surface emissivity improves the overall heat transfer performance and inclination of the target plate significantly affects the heat transfer.

Keywords: Jet impingement, Convection, Radiation, Surface emissivity, Buoyancy, Inclination

I. GİRİŞ

İmalat süreçleri içerisinde malzemelerin soğutulması ve ısı işleme tabi tutulması [1], elektronik bileşenlerin soğutulması, optik yüzeylerde oluşan buğunun çözülmesi amacıyla yüzeylerin ısıtılması, türbin bileşenlerinin soğutulması, kritik makine elemanlarının soğutulması gibi birçok endüstriyel proseste çarpan jetler yoğun şekilde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, kurutma ve küçük partiküllerin yüzeyden temizlenmesi gibi kütle transferi uygulamaları da çarpan jetlerin kullanıldığı alanlardır [2]. Faz değişimi bulunmayan diğer ısı transferi metotları ile karşılaştırıldığında çarpan jetler daha yüksek ısı transferi vadetmektedir. Örneğin, çapraz akışın kullanıldığı konvansiyonel taşınım ile karşılaştırıldığında jet akışında ısı sınır tabakanın çapraz akışa oranla daha ince olması ve akışın daha erken türbülansa geçmesi ısı transfer katsayısında üç kata kadar artışı beraberinde getirir [2]. Dolayısıyla, yüksek ısı transfer hızlarının elde edilebilmesi ve akış karakteristiklerinin karmaşık doğası çarpan jetleri ilgi çekici bir araştırma alanı kılmaktadır [3].

Literatürde çarpan jetler ile akış ve ısı transfer karakteristiklerini araştıran çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Gardon ve Akfirat [4], Reynolds sayısının 450 ile 22000 aralığında farklı jet-plaka açıklıkları için hız, türbülans ve ısı transfer karakteristiklerini araştırmak amacıyla deneysel bir çalışma gerçekleştirdiler. Cadek [5] düz bir hedef plakanın çarpan jet ile soğutulmasında yerel ve ortalama ısı transfer karakteristiklerini deneysel ve teorik olarak inceledi. Araştırmacı, Reynolds sayısının 4500 ile 100000 değerleri arasında hız, basınç ve ısı transfer ölçümleri gerçekleştirmiştir. Miyazaki ve Silberman [6] laminer çarpan jet ile akış ve ısı transferini teorik olarak ele aldılar. Araştırmacılar ilk olarak potansiyel akım teorisi ile hız alanını incelediler, sonrasında ise sonlu fark yöntemi ile hedef plaka üzerinde sürtünme katsayısı ve Nusselt sayısı değişimini belirlediler. Sparrow ve Wong [7] farklı hedef plaka-jet mesafelerinde laminer jet için durma noktasındaki ısı transferini ve hedef plaka üzerindeki yerel Nusselt sayısı değişimini deneysel olarak incelediler. Heiningen [8] düz bir levhanın slot jet ile soğutulmasını geniş bir Reynolds sayısı aralığında deneysel ve sayısal olarak araştırdı. Garg ve Jayaraj [9] jet çarpma açısının yerel ısı transferi ve sürtünme katsayısı değişimine etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir. Yuan vd. [10] laminer çarpan jet ile ısı transferine jet mesafesi, Reynolds sayısı, Grashof sayısı ve Richardson sayısının etkilerini sayısal olarak ele aldılar. Çalışmada, belirtilen parametrelerin yüzey sürtünme katsayısı, sıcaklık değişimi ve ısı taşınım katsayısının değişimine olan etkileri değerlendirilmiş olup durma bölgesinden uzaklaştıkça kaldırma kuvvetinin etkisinin arttığını belirlemişlerdir. Lytle ve Webb [11] düz bir yüzeyin çarpan jet ile soğutulmasını Reynolds sayısının 3600 ve 27600 değerleri arasında incelemişlerdir. Çalışmada yerel ısı transferi ve yüzey sürtünme katsayısı değişimi üzerinde durulmuş olup düşük jet-levha açıklıklarında türbülans şiddetinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Lin vd. [12] laminer-geçiş rejimi ve türbülanslı rejimde çarpan jet ile ısı transferini deneysel olarak ele almışlardır. Çalışmada iki farklı deney koşulu çalışılmıştır: (i) yüksek güç yoğunluklu elektronik çiplerin soğutulması, (ii) sabit yüzey ısı akısına sahip düz bir yüzeyin soğutulması. Araştırmacılar jet karakteristiklerinin ortam havasından büyük ölçüde etkilendiğini, Reynolds sayısının 1226'dan küçük değerlerinde türbülans şiddetinin %5'ten küçük olduğunu ve türbülans başlangıcının $Re \geq 1226$ 'da gerçekleştiğini belirlemişlerdir. Yang vd. [13] farklı nozul tipleri ve nozul-hedef plaka mesafeleri için Reynolds sayısının 5920 ve 25500 değerleri arasında, çarpan jet ile soğutulan bir yüzeyin ısı transfer karakteristiklerini incelemişler ve nozul tipinin ısı transferi üzerinde önemli etkisinin bulunduğunu, konkav yüzeyden olan ısı transferinin ise düz yüzeye oranla daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Cornaro vd. [14] bağıl eğriliğin (0.18-0.38) yarı silindirik içbükey bir yüzeyin ısı transfer davranışına etkilerini deneysel olarak sıvı kristal yöntemi ile incelemişlerdir. Chiriac ve Ortega [15] sabit sıcaklıktaki düz bir yüzeyin çarpan jet ile soğutulmasını Reynolds sayısının 250 ile 750 değerleri arasında sayısal olarak incelemişlerdir. Araştırmacılar jet Reynolds sayısının 250 ile 500 değerleri arasında akışın sürekli rejimde olduğunu, jet Reynolds sayısının 585 ve 610 aralığında ise akışın zamana bağlı karakteristik sergilemeye başladığını belirlemişlerdir. Sahoo ve Sharif [16] farklı jet-levha mesafeleri (4-10), Richardson sayıları (0-10) ve Reynolds sayıları (100-500) için düz bir yüzeyden çarpan jet ile ısı transferini sayısal olarak analiz etmişlerdir. Çalışma kapsamında iki farklı konfigürasyon üzerinde durulmuş olup ilkinde jet nozulu aşağı yönlü iken ikincisinde nozul yukarı bakmaktadır. Araştırmacılar, çalışma sonucunda belirtilen Richardson sayısı aralığında kaldırma kuvvetinin akış karakteristiklerine etki etmediğini ve nozul konfigürasyonunun da akış ve ısı transferi

üzerinde etki göstermediğini belirlemişlerdir. Angioletti vd. [17] çarpan jet ile ısı transferini Reynolds sayısının 1000 ile 4000 aralığında deneysel olarak incelemişler ve verilerini farklı türbülans modelleri kullanılarak sayısal olarak hesaplanan sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Hu ve Zhang [18] Reynolds sayısının 1947 ile 19478 aralığında su jeti ile soğutulan düz ve yarı silindirik yüzeylerden ısı transferini farklı jet-levha mesafeleri için incelemişler ve dışbükey yüzeyin ısı transfer performansının düz yüzeye oranla daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Lemos ve Fischer [19] düz bir yüzey üzerinde konumlandırılan gözenekli malzemenin kalınlık, ısıl iletkenlik ve gözeneklilik gibi karakteristik özelliklerinin akış ve ısı transferine etkilerini sayısal olarak analiz etmişlerdir. Abishek ve Narayanaswamy [20] yüzeyler arası ışınlım ve kaldırma kuvvetinin düz bir yüzeyin slot jet ile soğutulmasına etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada Reynolds ve Richardson sayıları, yüzeylerin yayıcılıkları, kanal yüksekliği ve ışınlım etkileşim parametresinin etkileri üzerinde durulmuş ve ışınlım etkileşim parametresinin artışıyla birlikte ışınlımın toplam ısı transfer hızı içerisindeki payının arttığı belirlenmiştir. Cavadas vd. [21] sınırlandırıcı yüzeyi 12° 'lik eğime sahip akış bölgesinde tam gelişmiş sıvı jetinin akış karakteristiklerini laminer rejimde ($Re=275$) deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Öztekin vd. [22,23] konkav yüzeylerin slot jet ile soğutulmasında Reynolds sayısı, hedef plakanın boyutsuz bağıl eğriliği ve boyutsuz jet mesafesinin hidrodinamik ve ısıl etkilerini deneysel ve sayısal olarak analiz etmişlerdir. Yousefi-Lafouraki vd. [24] daralan bir kanalda sınırlandırılmış çarpan jet ile ısı transferini laminer rejimde farklı daralma açıları ($0^\circ-5^\circ$) için sayısal olarak incelemişler ve artan daralma açısının ortalama Nusselt sayısı ve yüzey sürtünme katsayısını artırdığını belirlemişlerdir. Sharif [25] bir çift eğimli jet ile soğutulan bir yüzeyden taşınım ile ısı transferini sayısal olarak incelemiş ve jet açısının ısı transfer karakteristikleri üzerindeki etkisinin yadsınamaz olduğunu belirlemiştir. Ying vd. [26] hedef plakanın eğriliğinin yerel ve ortalama ısı transfer karakteristiklerine etkilerini Reynolds sayısının 27000 ile 130000 aralığında incelemişlerdir. Ekiciler vd. [27] düz ve üçgen forma sahip dalgalı bir plakaların nanoakışkan (Al_2O_3) jeti ile soğutulmasında nanoparçacık şekli ve nanoparçacık hacim oranının ısı transferine etkilerini Reynolds sayısının 100 ile 500 değerleri arasında sayısal olarak incelediler. Pulat ve Beyazoğlu [28] Reynolds sayısının 10200 değerinde sınırlandırıcı plakanın farklı eğim açıları ($-2^\circ, 0^\circ, 2^\circ, 4^\circ, 6^\circ$ and 8°) slot jet ile ısı transferini sayısal olarak incelemişlerdir. Araştırmacılar plaka eğiminin 8° 'ye artışıyla birlikte ısı transferinde %18'e varan bir iyileşme ortaya çıktığını belirlemişlerdir. Han vd. [29] jet mesafesi ve yüzey geometrisinin (düz, içbükey ve dışbükey) çarpan jet ile soğutmaya etkilerini Reynolds sayısının 120 ile 600 aralığında deneysel olarak incelemişlerdir. Albayrak vd. [30] içbükey yarı silindirik bir yüzeyin slot jet ile soğutulmasında yüzeyler arası ışınlımın etkilerini farklı yayıcılık değerleri ($\epsilon=0.05, 0.45, \text{ and } 0.90$) için Reynolds sayısının 1185, 2370, 3555 ve 4740 değerlerinde sayısal olarak analiz etmişlerdir. Araştırmacılar, çalışma sonucunda Reynolds sayısının artışının yüzeyler arası ışınlımı zayıflattığını belirlemişlerdir. Singh vd. [31] spiral jet nozulu ile soğutulan bir levhadan taşınım ile ısı transferini farklı jet-plaka mesafeleri, jet Reynolds sayıları ve jet açıları için deneysel olarak incelemişlerdir.

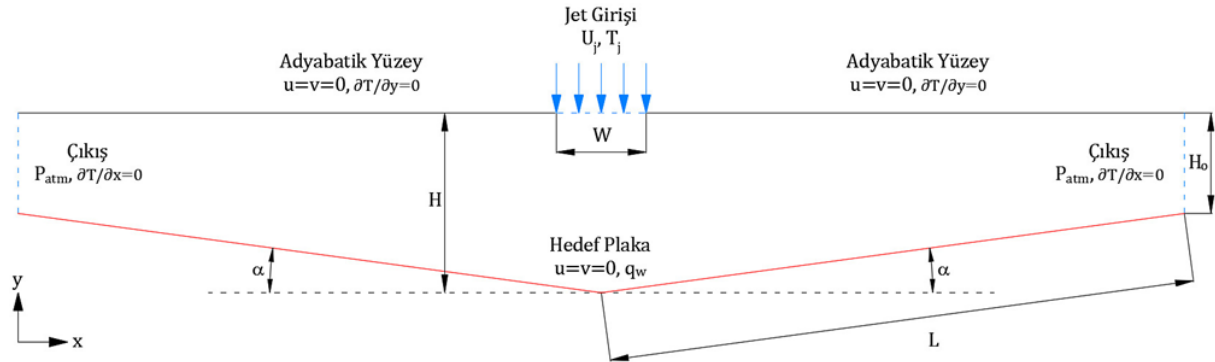
Literatür özetinden görüldüğü gibi, çarpan jetler üzerine yürütülen çalışmaların çoğunluğu düz, içbükey ya da dışbükey yüzeylerin ısı transfer davranışlarının türbülanslı rejimde farklı Reynolds sayıları ve farklı jet-plaka mesafeleri için incelenmesine yöneliktir. Bununla birlikte, az sayıda çalışma düşük Reynolds sayılarında-laminer rejimde kaldırma kuvveti ve yüzeyler arası ışınlımın akış ve ısı transfer karakteristiklerine etkilerini araştırmıştır. Bu çalışmanın amacı ise, eğim açısı değişen bir hedef plakanın tek bir slot jet ile soğutulmasında kaldırma kuvveti ve yüzeyler arası ışınlım ile ısı transferinin genel soğutma performansına olan etkilerini incelemektir.

II. MATERYAL VE METOT

A. PROBLEM GEOMETRİSİ

Bu çalışmada, sabit ısı akışı ile ısıtılmakta olan ve eğim açısı değişken olan düz bir hedef plakanın slot jet ile soğutulmasında kaldırma kuvveti ve yüzeyler arası ışınlımın akış ve ısı transfer karakteristiklerine olan etkileri analiz edilmektedir. Ele alınan problemin geometrisi ve kullanılan sınır koşulları Şekil 1'de

verilmiştir. Hava, akış bölgesine W genişliğindeki slot jet nozulundan girmekte olup nozul genişliği 10 mm'dir. Eğimli hedef plakasının x -ekseni ile arasındaki eğim açısı α , levhanın toplam uzunluğu ise 400 mm'dir. Hedef plaka ile jet nozulu arasındaki en geniş bölge (H) 40 mm olup çıkış genişliği (H_o) hedef plaka ile x -ekseni arasındaki eğim açısına bağlı olarak farklı değerler almaktadır.



Şekil 1. Problemin şematik gösterimi ve sınır koşulları

B. SAYISAL METOT VE SINIR KOŞULLARI

Problem ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak 2-boyutlu ve zamana bağlı olarak analiz edilmiştir. Çalışmanın amacı yüzeyler arası ışınlım ve kaldırma kuvvetinin eğik plakasının genel ısı transfer performansına etkilerini incelemek olduğundan dolayı taşınım ile ısı transferine ek olarak yüzeyler arası ışınlım ile ısı transferi (S2S) ışınlım modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Kaldırma kuvvetinin akış ve ısı transferine etkisi ele alınırken havanın yoğunluğundaki değişim sıkıştırılamaz ideal gaz modeli kullanılarak modellenmiştir [32]. SIMPLE algoritması hız-basınç çiftinin çözümü amacıyla kullanılırken, momentum ve enerji denklemleri 2. dereceden akış yönlü fark şeması ile ayrıklaştırılmış, basınç interpolasyonu ise kaldırma kuvveti etkisindeki akışlar için önerilen PRESTO algoritması ile gerçekleştirilmiştir [33].

Yukarıda belirtildiği gibi, problem 2-boyutlu olarak zamana bağlı ve laminer rejimde incelenmiştir. Lin vd. [12] gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada Reynolds sayısının 1500 altındaki değerlerinde türbülans şiddetinin oldukça düşük olduğunu belirtmişlerdir. Abishek ve Narayanaswamy [20] $Re_j \leq 1000$ iken akışın laminer olduğunu, Chiriac ve Ortega [15] ise $Re_j \geq 500$ iken akış dinamiğinin zamana bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Bu sebeple, $100 \leq Re_j \leq 1000$ aralığında akışın laminer ve zamana bağlı olduğu kabulüyle hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Laminer rejimde zamana bağlı akış için Navier-Stokes ve enerji denklemleri aşağıda verilmiştir:

Süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

x -doğrultusundaki momentum denklemi:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

y -doğrultusundaki momentum denklemi:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g\beta(T - T_j) \quad (3)$$

Enerji denklemi:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{k}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

Süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinde u ve v terimleri x ve y-doğrultularındaki hız bileşenlerini; T ve p terimleri sıcaklık ve basıncı; ρ , k, v ve c_p ise havanın yoğunluğunu, ısı iletkenliğini, kinematik viskozitesini ve özgül ısısını temsil etmektedir.

Akış bölgesini çevreleyen hedef plaka ve adyabatik yüzeyler arasındaki ışıınım etkileşimi S2S ışıınım modeli kullanılarak modellenirken yüzeylerin difüz ve gri olduğu kabul edilmiştir. Havanın ise ışıınım açısından katılımcı olmadığı kabul edilmiştir. Bu kabuller doğrultusunda S2S model denklemleri aşağıdaki şekilde ifade edilir [33,34]:

$$q_{in,k} = \sum_{j=1}^n F_{kj} q_{out,j} \quad (5)$$

$$J_k = E_k + \rho k \sum_{j=1}^n F_{kj} J_j \quad (6)$$

(5) numaralı denklem k yüzeyine gelen ışıınım akısını hesaplamak için kullanılırken, (6) numaralı denklem ise k yüzeyinin yaptığı ışıınımı hesaplamak için kullanılır. (5) ve (6) numaralı denklemlerde E_k ve F_{kj} , terimleri sırasıyla k yüzeyinin ışıınım yayma gücünü ve k ve j yüzeyleri arasındaki şekil faktörünü temsil etmektedir.

Yukarıda belirtildiği gibi, akışkanın yoğunluğundaki değişim sıkıştırılmaz ideal gaz modeli kullanılarak modellenmiştir [32,33]:

$$\rho = \frac{p_{op}}{\frac{R}{M_w} T} \quad (7)$$

Burada, p_{op} çalışma basıncını, R evrensel gaz sabitini, M_w havanın molekül ağırlığını temsil etmektedir.

Kullanılan sınır koşulları, problem geometrisi ile birlikte Şekil 1'de verilmiştir. Hava, akış bölgesine uniform hız (U_j) ve sıcaklıkta (T_j) girmekte olup jet sıcaklığı 300 K'dir. Akış bölgesinin çıkışında ise basınç çıkışı sınır koşulu kullanılmış olup akışkan basıncı atmosfer basıncına eşit alınmıştır. Eğimli hedef plaka sabit ısı akısı ile ısıtılırken akış bölgesini sınırlandıran üst yüzeyler ise adyabatiktir. Bununla birlikte, her iki yüzeyde de hidrodinamik olarak kaymama sınır koşulu kullanılmıştır. Yüzeyler arası ışıınımla ısı transferi hesaplanırken giriş ve çıkış sınırlarının yayıcılıkları (ϵ) 1'e eşit alınmış olup hedef plaka ve adyabatik yüzeylerin yayıcılıkları ise 0.05, 0.5 ve 0.95 olmak üzere farklı değerler almaktadır.

C. KULLANILAN PARAMETRELER

Çalışmada düşük akışkan hızlarında, yüzeyler arasındaki ışıınım ve kaldırma kuvvetinin genel soğutma performansına etkileri analiz edilmektedir. Bu doğrultuda, farklı Richardson sayıları ve plaka eğimlerinde hedef plaka yüzeyinde taşınım Nusselt sayısı (Nu_c), ışıınım Nusselt sayısı (Nu_r) ve toplam Nusselt sayısının (Nu_t) değişimi hesaplanmıştır.

Akış bölgesinin girişinde jet Reynolds sayısı aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$Re_j = \frac{\rho U_j W}{\mu} \quad (8)$$

Burada, U_j ve μ terimleri sırasıyla jet hızı ve havanın dinamik viskozitesini temsil etmektedir.

Hedef plaka sabit ısı akısı ile ısıtılmakta olup Grashof sayısı ısı akısının fonksiyonudur. Düzeltilmiş Grashof sayısı hesaplamalar boyunca sabit tutulmuş olup 10^5 'e eşit alınmış ve aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$Gr^* = \frac{g\beta\Delta T_{ref}W^3}{\nu^2} \quad (9)$$

Burada, g ve β terimleri sırasıyla yerçekimi ivmesi ve havanın hacimsel genişleme katsayısını temsil etmektedir. ΔT_{ref} terimi ise referans sıcaklık farkını temsil etmekte olup aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\Delta T_{ref} = \frac{qW}{k} \quad (10)$$

Burada, q terimi hedef plaka yüzeyindeki toplam ısı akısını temsil etmektedir.

Yukarıda belirtildiği gibi, düzeltilmiş Grashof sayısı toplam ısı akısının fonksiyonu olup hesaplamalar boyunca sabit tutulmuştur. Dolayısıyla, Richardson sayısı jet Reynolds sayısına bağlı olarak değişmektedir. Richardson sayısı aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$Ri = \frac{Gr^*}{Re_j^2} \quad (11)$$

Hedef plaka yüzeyindeki taşınım ve ışınlım Nusselt sayıları sırasıyla aşağıdaki şekilde hesaplanır [20,35]:

$$Nu_c = \frac{q_c}{k \Delta T/W} \quad (12)$$

$$Nu_r = \frac{q_r}{k \Delta T/W} \quad (13)$$

Toplam Nusselt sayısı ise aşağıdaki şekilde hesaplanır [20,36]:

$$Nu_t = Nu_c + Nu_r \quad (14)$$

D. AĞ YAPISI VE ÇALIŞMANIN DOĞRULANMASI

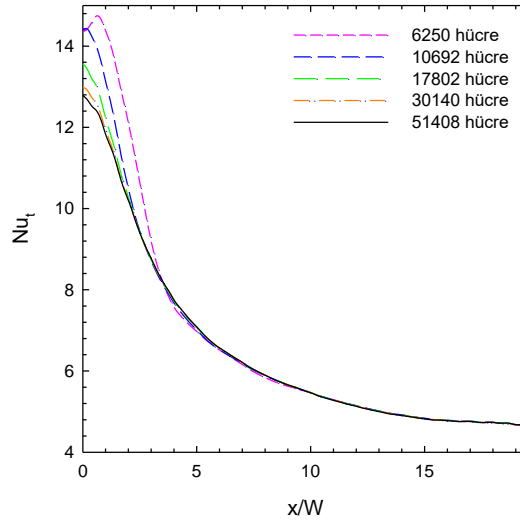
Sayısal hesaplamalarda dikdörtgen ağ yapısı kullanılmıştır. Şekil 2'de verilen ağ yapısı, akış bölgesini sınırlandıran hedef plaka ve adyabatik yüzeylere doğru yoğunlaşırken akış bölgesinin merkezinde ağ yoğunluğu daha düşüktür. Ağ bağımsızlık çalışmaları 6250 ile 51408 hücre sayısı aralığında gerçekleştirilmiş ve her bir hücre sayısında hedef plaka yüzeyindeki toplam Nusselt sayısının ortalama değeri hesaplanarak ardışık hücre sayıları için hesaplanan değerler karşılaştırılmıştır. Tablo 1'de görüldüğü gibi 17802 ile 30140 hücre sayılarında hesaplanan ortalama Nusselt sayıları arasındaki farkın %1'in altına inmesinden dolayı nihai çözümlere 30140 hücre sayısı ile devam edilmiştir.

Şekil 2. Analizlerde kullanılan ağ yapısı

Tablo 1. Ağ bağımsızlık çalışmasına ait sonuçlar

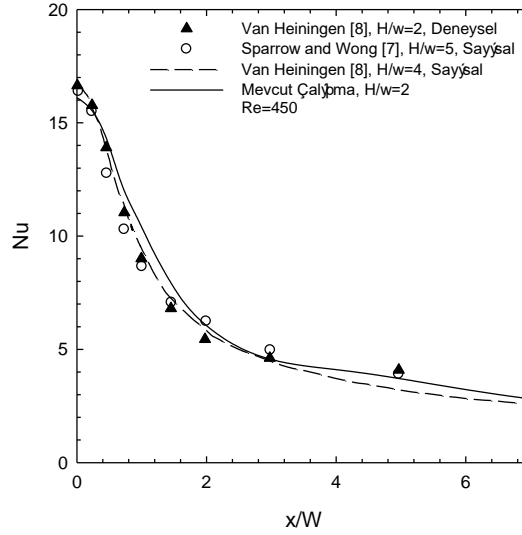
Hücre Sayısı	$Nu_{t,ave}$	% Bağıl Hata
6250	6.712	-
10692	6.563	2.220
17802	6.495	1.046
30140	6.467	0.427
51408	6.458	0.143

Ayrıca, seçilen her bir hücre sayısında referans durum ($\alpha=0^\circ$) için, $Ri=0.1$ ve $\varepsilon=0.95$ değerlerinde hedef plaka yüzeyinde toplam Nusselt sayısının (Nu_t) değişimi Şekil 3'te sunulmuştur. Şekil 3'te görüldüğü gibi hücre sayısının görece düşük olduğu ilk üç ağ sıklığı için durma noktasında yerel Nusselt sayısı değişiminde belirgin farklar ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte, duvar jeti bölgesinde tüm ağ sıklıkları için hesaplanan Nu_t değerleri birbirlerine oldukça yakındır. Son iki ağ sıklığında ise hem durma noktasında hem de duvar jeti bölgesinde Nu_t değerleri birbirleri ile oldukça uyumludur. Dolayısıyla, Çizelge 1'de belirtildiği gibi nihai hesaplamalar için 30140 hücre kullanımının yeterli olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 3. Farklı hücre sayıları için hedef plaka yüzeyinde Nu_t değişimi

Çözüm algoritmasının güvenilirliğini test etmek amacıyla mevcut çalışmaya ait sonuçlar literatürdeki deneysel ve sayısal verilerle karşılaştırılmıştır. Bu amaçla $Re_j=450$ 'de hedef plaka yüzeyindeki yerel Nusselt sayısı değişimi Sparrow ve Wong [7] ile Van Heiningen [8]'e ait deneysel ve sayısal veriler ile karşılaştırılmış ve sonuçların literatürdeki sonuçlar ile iyi bir uyum yakaladığı görülmüştür.



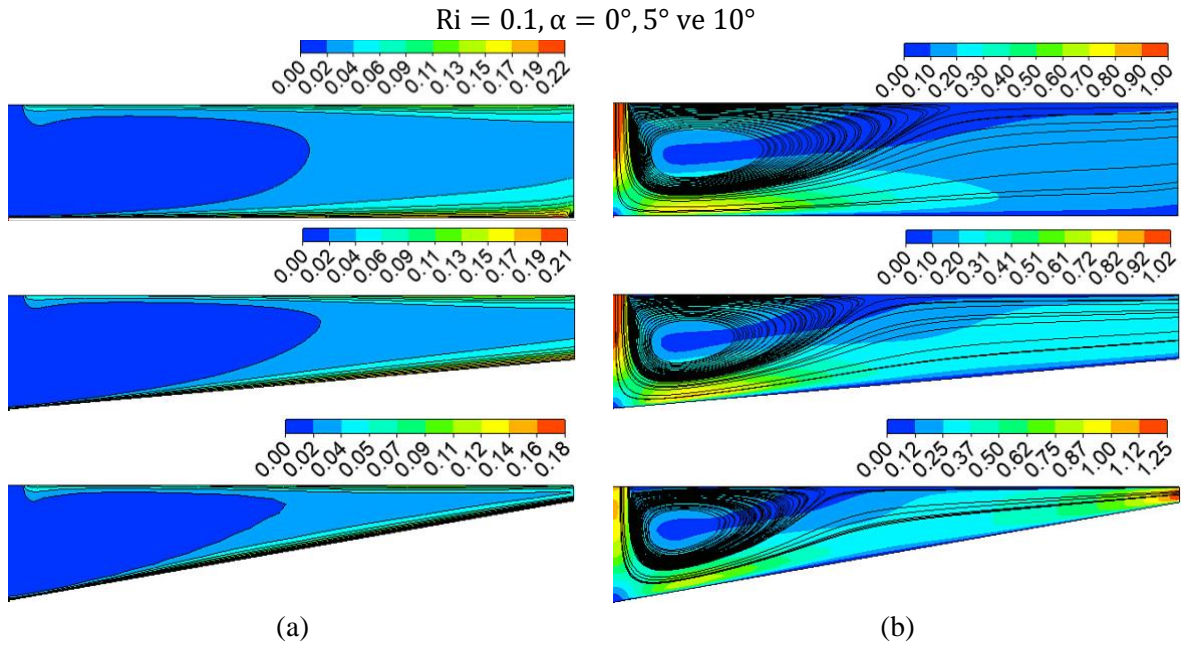
Şekil 4. Mevcut çalışmaya ait sonuçları literatürdeki veriler ile karşılaştırılması

III. BULGULAR

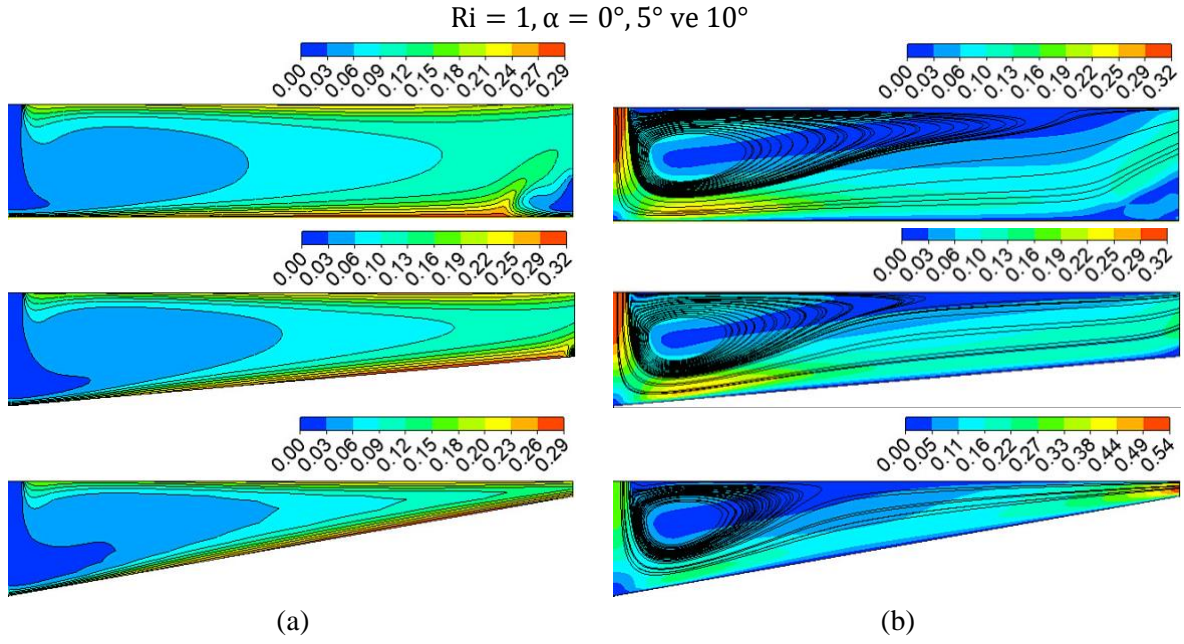
Bu çalışmada, sabit yüzey ısı akısı ile ısıtılan ve değişken eğime sahip bir levhanın tek bir slot jet ile soğutulmasında yüzeyler arası ışınlama ile ısı transferi ve kaldırma kuvvetinin genel ısı transfer performansına etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Bu amaçla, farklı Richardson sayıları ($Ri=0.1, 1$ ve 10), yüzey yayıcılığı ($\epsilon=0.05, 0.5$ ve 0.95) değerleri ve eğim açıları ($\alpha=0^\circ, 5^\circ$ ve 10°) için çalışmalar gerçekleştirilmiş olup ilgili parametrelerin sıcaklık ve hız bölgeleri ile yerel ve ortalama ısı transfer karakteristiklerine etkileri değerlendirilmiştir.

Şekil 5, 6 ve 7’de sırasıyla $Ri=0.1, 1$ ve 10 için farklı eğim açılarında boyutsuz sıcaklık ve hız konturları sunulmuştur. Kontur grafikleri hedef plaka ve adyabatik yüzeylerin yüzey yayıcılığının $\epsilon=0.95$ ’e eşit olduğu durumlar için elde edilmiştir. $Ri=0.1$ değerinde, viskoz kuvvetler kaldırma kuvvetlerine baskın olduğundan dolayı zorlanmış taşınım akışı domine etmektedir. Bu sebeple, jet nozulunun çıkışında jet akışı ve durgun akışkan arasındaki kayma sınır tabakasına bağlı olarak gelişen ikincil akışın dışında akış bölgesinde başka bir noktada kuvvetli bir ikincil akış meydana gelmemektedir. Ancak, çıkışta akım çizgileri hafifçe yukarı yönelmekte ve hedef plakanın hemen üstünde zayıf bir ters akış oluşmaya başlamaktadır. Jet nozulunun çıkışında, jetin sağında ortaya çıkan ikincil akış hücresi ise hedef plakanın eğim açısının artışıyla küçülmektedir. Hız konturlarından görüldüğü gibi, jetin gelişme bölgesi ile duvar jeti bölgesinin başlangıcında hava hızı oldukça yüksektir. Sonrasında ise, hedef plaka ile hava arasındaki kayma gerilmesinin sonucunda hava hızı çıkışa doğru azalmaktadır. Ancak, $\alpha=10^\circ$ iken çıkış kesitinin oldukça daralmasından dolayı en yüksek hız bu bölgede görülmekte ve çıkıştaki hava hızı jet hızının yaklaşık olarak 1.25 katına çıkmaktadır. $Ri=0.1$ ’deki sıcaklık konturları incelendiğinde, yüzeyler arasındaki ışınlama ile ısı transferinin sonucunda adyabatik yüzey ısınmakta ve bu bölgede ısıl sınır tabaka oluşumu gözlemlenmektedir. $Ri=0.1$ ’de hava hızının yüksek olmasından dolayı ısıl sınır tabaka kalınlıkları oldukça düşüktür. Bu durum eğim açısının artışıyla belirginleşir. Şekil 6’da viskoz kuvvetler ile kaldırma kuvvetinin dengede olduğu $Ri=1$ ’de elde edilen sıcaklık ve hız konturları sunulmuştur. Hız konturları incelendiğinde, $\alpha=0^\circ$ ’de kaldırma kuvvetinin etkisiyle hava yukarı doğru yönelmekte, akış bölgesinin çıkışında hedef plaka yakınında ters akış meydana gelmektedir. Plaka eğiminin artışıyla birlikte çıkışta oluşan ters akış zayıflamakta ve $\alpha=10^\circ$ ’de tamamen ortadan kalkmaktadır. Sıcaklık konturları incelendiğinde kaldırma kuvvetinin akış bölgesi içerisindeki sıcaklık değişimine etkileri $Ri=1$ ’de daha belirgindir. $\alpha=0^\circ$ ’de çıkıştaki ters akış soğuk havanın akış bölgesine girmesine sebep olurken akışkanın yukarı yönlü hareketine bağlı olarak ısıl sınır tabaka da yukarı yönde genişlemektedir. Şekil 7’de kaldırma kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere baskın olduğu $Ri=10$ ’daki sıcaklık ve hız konturları sunulmuştur. Hız konturları incelendiğinde, $\alpha=0^\circ$ ’de jetin komşuluğundaki ve çıkıştaki ters akışa bağlı

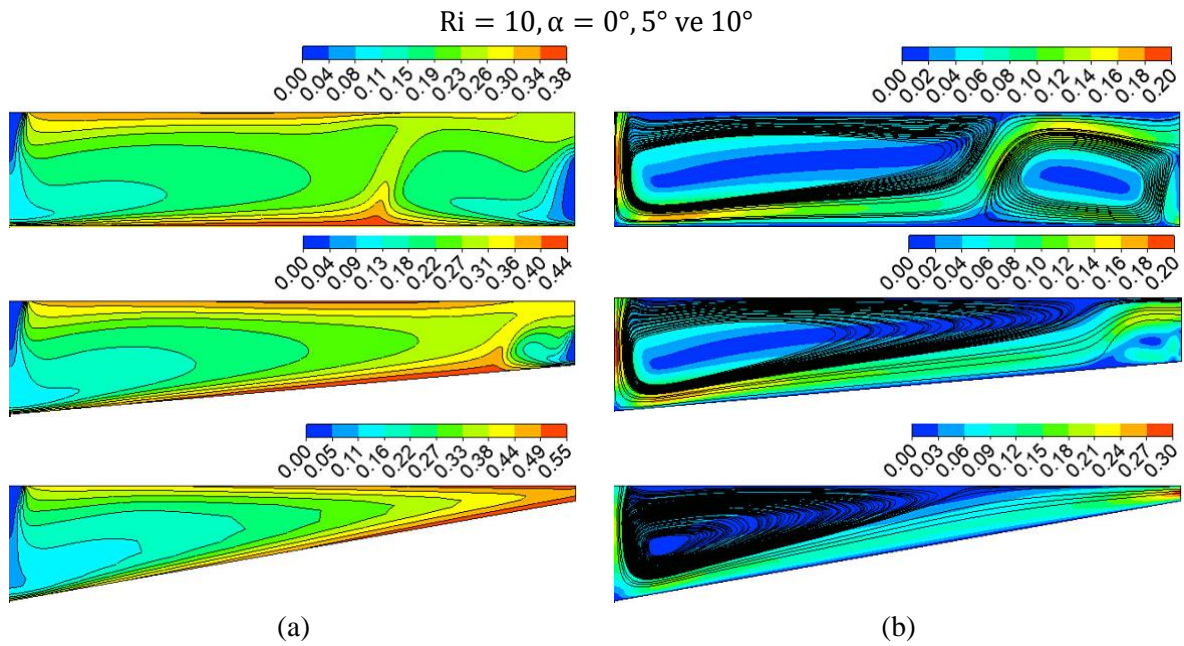
olarak ortaya çıkan resirkülasyon hücrelerinin akışı domine ettiği görülmektedir. Bu durum, $Ri=10$ 'da doğal taşınımın zorlanmış taşınımına baskın geldiğini kanıtlamaktadır. $Ri=0.1$ ve 1 için elde edilen bulgular $Ri=10$ için de geçerli olup plaka eğiminin artışı çıkışa yakın bölgede oluşan resirkülasyonu zayıflatmakta ve bu bölgede özellikle $\alpha=10^\circ$ 'de ana akışın momentumu çıkıştaki ikincil akış hücresine baskın gelmektedir. Sıcaklık konturları incelendiğinde, $Ri=10$ 'da $Ri=0.1$ ve 1 'e oranla ısıl sınır tabaka kalınlığının daha fazla olduğu ve akış bölgesi içerisindeki hava sıcaklığının çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Yukarıda belirtildiği gibi, $Ri=10$ 'da ikincil akışların baskın olmasından dolayı hedef plaka ile etkileşimde olan soğuk hava ısınarak ikincil akış hücreleri ile adyabatik yüzeye taşınmaktadır. Bu durum $\alpha=10^\circ$ 'de ortadan kalkmaktadır. $Ri=10$ 'da jet hızı oldukça düşük olduğundan dolayı $\alpha=10^\circ$ 'de daralan çıkış kesiti blokaj etkisi yaratmakta ve akış bölgesinin çıkışında hava sıcaklığı incelenen diğer çalışma durumlarına oranla çok daha yüksek olmaktadır.



Şekil 5. $Ri = 0.1, \theta = 0^\circ, 5^\circ \text{ ve } 10^\circ$ için elde edilen (a) boyutsuz sıcaklık konturları, (b) üst üste bindirilmiş boyutsuz hız konturları ve akım çizgileri ($\epsilon=0.95$)



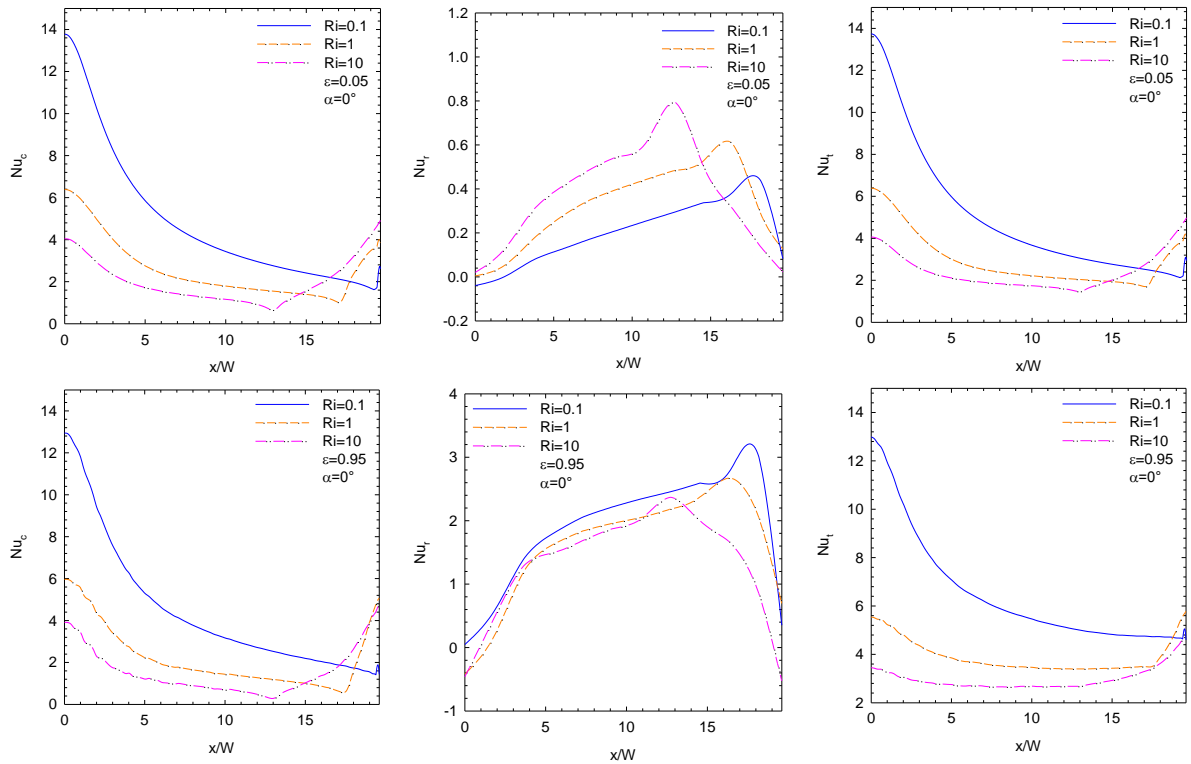
Şekil 6. $Ri = 1, \alpha = 0^\circ, 5^\circ \text{ ve } 10^\circ$ için elde edilen (a) boyutsuz sıcaklık konturları, (b) üst üste bindirilmiş boyutsuz hız konturları ve akım çizgileri ($\epsilon=0.95$)



Şekil 7. $Ri = 10, \alpha = 0^\circ, 5^\circ \text{ ve } 10^\circ$ için elde edilen (a) boyutsuz sıcaklık konturları, (b) üst üste bindirilmiş boyutsuz hız konturları ve akım çizgileri ($\epsilon=0.95$)

Şekil 8’de $\alpha=0^\circ$ için $Ri=0.1-1-10$ ve $\epsilon=0.05-0.95$ değerlerinde hedef plaka üzerindeki yerel Nusselt sayısı değişimi sunulmuştur. $Ri=0.1$ ve $\epsilon=0.05$ için hedef plaka boyunca Nu_c değişimi incelendiğinde yüksek jet hızına bağlı olarak çarpma bölgesinde taşınım ile ısı transferinin oldukça yüksek olduğu, çıkışa doğru Nu_c değerlerinin azaldığı ve çıkıştaki zayıf ters akışa bağlı olarak ani bir artış sergilediği görülmektedir. Yüzeydeki Nu_r değişimi incelendiğinde çarpma bölgesi ve duvar jeti bölgesinin başlangıcında yüksek hava hızına bağlı olarak yüzeyler arası ışınım ile ısı transferinin zayıf olduğu, duvar jeti bölgesinde hava hızının azalmasına bağlı olarak Nu_r değerlerinin arttığı görülmektedir. Ancak, çıkış bölgesindeki zayıf ikincil akış Nu_c ’nin aksine Nu_r ’nin azalmasına sebep olmaktadır. Hedef plaka

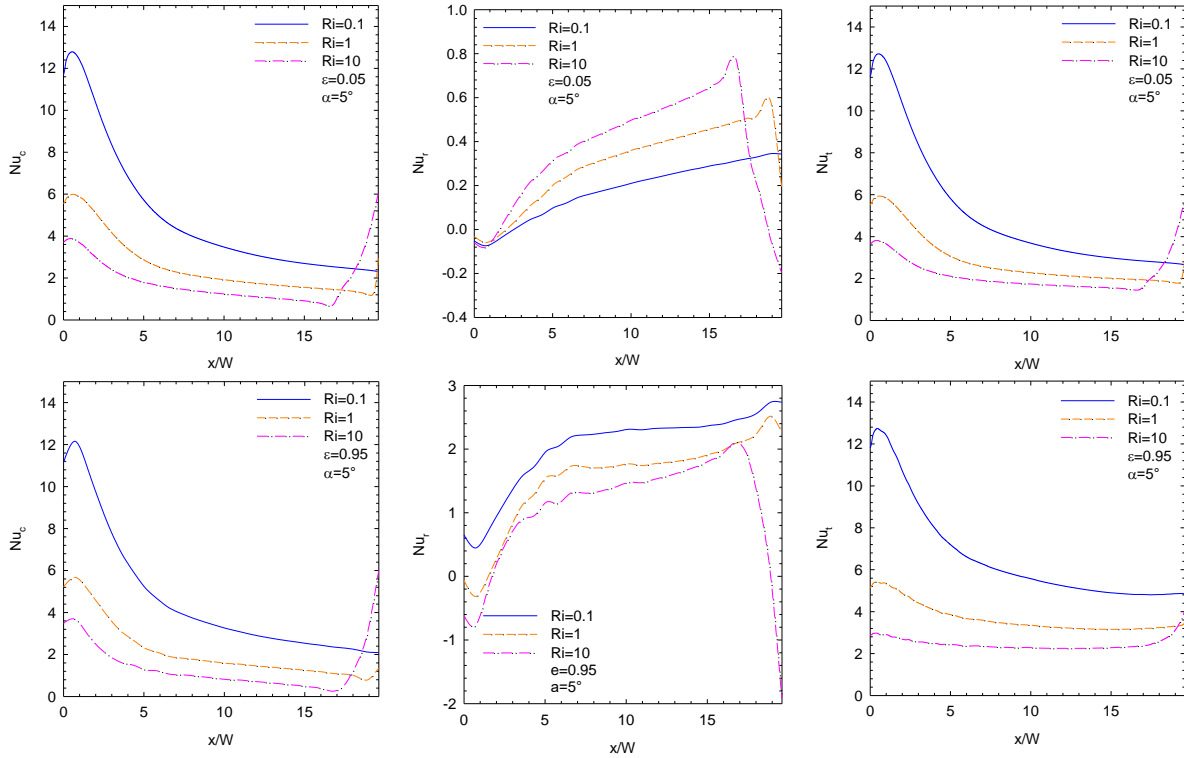
boyunca Nu_t değişimi incelendiğinde, yüzeydeki toplam ısı transferindeki (taşınım ve ışıınım) değişim trendinin Nu_c ile benzer olduğu görülmekte olup bu durum yüzeyler arası ışıınımın $Ri=0.1$ ve $\varepsilon=0.05$ 'te oldukça zayıf olmasından kaynaklanmaktadır. $Ri=1-10$ ve $\varepsilon=0.05$ 'te ise çarpma bölgesinde düşük jet hızına bağlı olarak Nu_c ve Nu_t 'nin $Ri=0.1$ 'e oranla daha düşük olduğu, kaldırma kuvvetinin akışı domine etmesine bağlı olarak çıkıştaki ters akış bölgesinin genişlediği ve zayıf ikincil akışların görüldüğü bu bölgede Ri 'nin artışıyla birlikte Nu_t 'nin da arttığı görülmektedir. $\varepsilon=0.95$ değerinde ise yüzeyler arası ışıınım etkileşimi çok daha belirgin olduğundan dolayı Nu_r değerleri $\varepsilon=0.05$ 'teki değerlere oranla çok daha yüksektir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, Şekil 6 ve 7'de görüldüğü gibi hedef plaka ile temas eden akışkanın kaldırma kuvvetinin etkisiyle adyabatik yüzeye doğru yükselmesidir. Akış bölgesi içerisindeki saat yönünün tersi yönde dönmekte olan ana resirkülasyon hücresinin varlığına bağlı olarak jet nozulu yakınında adyabatik yüzey üzerindeki ısıl sınır tabaka kalınlığı artmaktadır. Benzer bir durum çıkışa yakın bölgede de geçerlidir. Saat yönündeki resirkülasyonla birlikte, ısınan hava adyabatik yüzeye doğru yükselmekte ve akış bölgesini terk etmektedir. Dolayısıyla, her iki bölgede de adyabatik yüzeyin sıcaklığı hedef plaka sıcaklığından fazladır. Sonuç olarak, ışıınımla ısı transferinin yönüne bağlı olarak her iki bölgede de Nu_r negatif olup bu durum Nu_c ve Nu_t değişim trendlerinin birbirlerinden farklılaşmasına sebep olur. ışıınımla ısı transferinin yönü durma bölgesi ve akış bölgesinin çıkışında hedef plakadan olan toplam ısı transferini zayıflatmaktadır.



Şekil 8. $\alpha = 0^\circ$ ve farklı Ri değerlerinde hedef plaka üzerinde Nu_c , Nu_r ve Nu_t değişimi

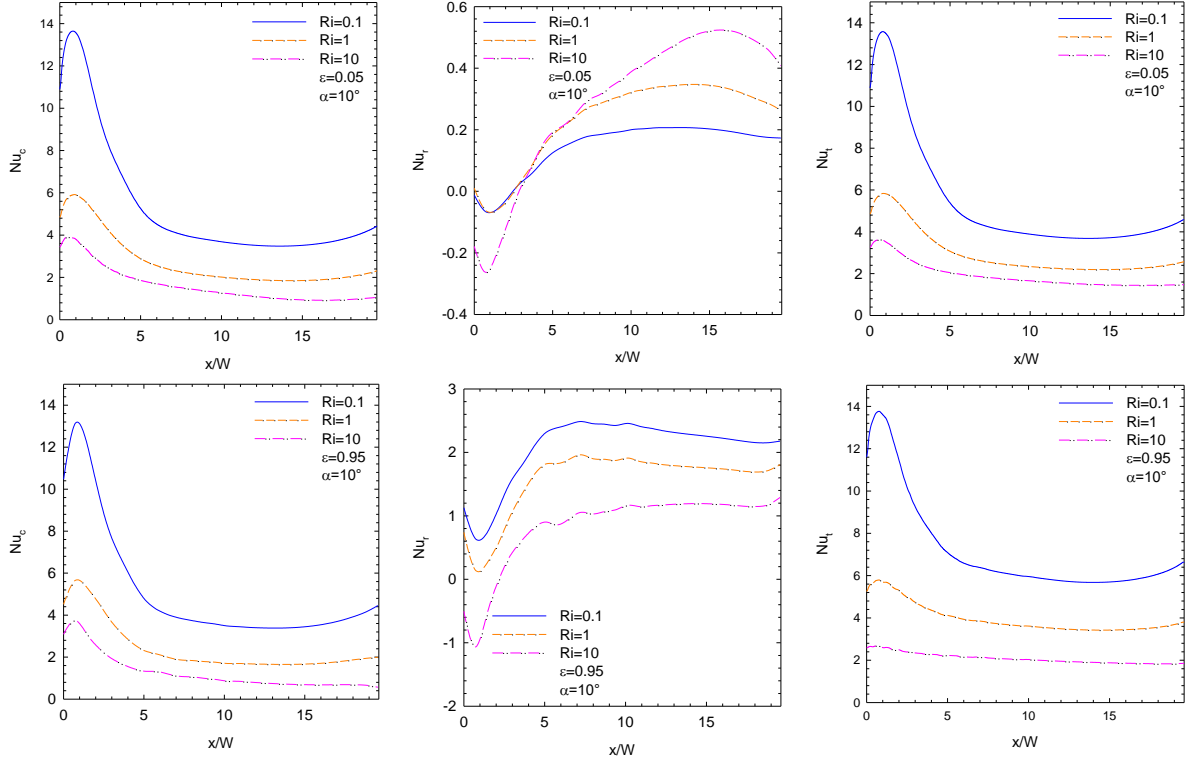
Şekil 9'da $\alpha=5^\circ$ için $Ri=0.1-1-10$ ve $\varepsilon=0.05-0.95$ değerlerinde hedef plaka üzerindeki yerel Nusselt sayısı değişimi sunulmuştur. Yukarıda belirtildiği gibi hedef plakanın eğiminin artışı ile ana akışın momentumundaki artışa bağlı olarak çıkıştaki ters akış zayıflamakta ve resirkülasyon hücresi küçülmektedir. $\varepsilon=0.05$ 'te hedef plaka boyunca Nu_c değişimi incelendiğinde $\alpha=0^\circ$ 'ye benzer şekilde $Ri=0.1$ 'de taşınım ile ısı transferinin çarpma bölgesinde oldukça yüksek olduğu, çıkışa doğru ise Nu_c 'nin azaldığı görülmektedir. $Ri=1$ ve 10 'da ise kaldırma kuvvetinin artan etkisi çıkıştaki ters akışın şiddetini artırmaktadır. Buna bağlı olarak, $Ri=10$ 'da çıkış bölgesindeki Nu_c çarpma bölgesinden daha yüksektir. Bu bölgede taşınım ile ısı transferinin artışına bağlı olarak ışıınımla ısı transferinde keskin bir azalma görülür. Çarpma bölgesinde, her üç Ri değeri için de Nu_r değerleri sıfıra oldukça yakınken duvar jeti bölgesinde artış meydana gelmektedir. Toplam ısı transferinin değişimi incelendiğinde ise yüzeydeki

değişimin taşınım ile ısı transferine benzer olduğu, ancak çıkış bölgesinde Nu_r değişiminin özellikle $Ri=10$ 'da toplam ısı transferini az da olsa zayıflattığı görülür. $\varepsilon=0.95$ 'te ise yüzeyler arası ışınlama ile ısı transferi etkisini artırmakta olup çarpma bölgesi ve çıkış bölgesi haricinde hedef plakadan ışınlama ile ısı transferinin toplam ısı transferini iyileştirdiği görülür. ε değerinin artışı yüzeyler arası ışınlama ile toplam ısı transferine etkisini artırırken bu katkı Nu_t değişiminden de net şekilde görülür. Durma bölgesi ve çıkışta yüzeyler arası ışınlama yukarıda belirtildiği gibi toplam ısı transferini zayıflatırken duvar jeti bölgesinde toplam ısı transferinde iyileşmeye sebep olur.



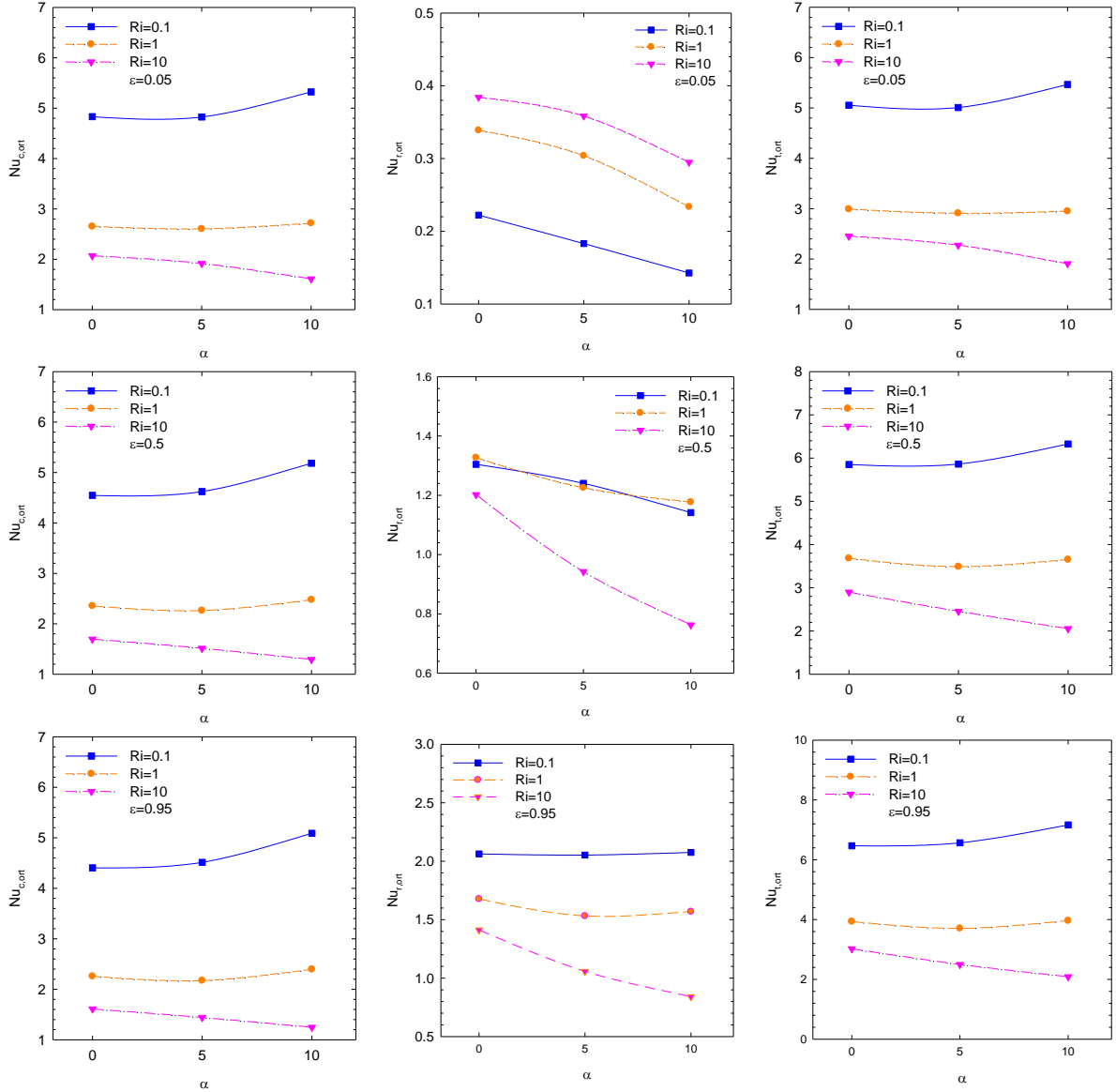
Şekil 9. $\alpha = 5^\circ$ ve farklı Ri değerlerinde hedef plaka üzerinde Nu_c , Nu_r ve Nu_t değişimi

Şekil 10'da $\alpha=10^\circ$ için $Ri=0.1-1-10$ ve $\varepsilon=0.05-0.95$ değerlerinde hedef plaka üzerindeki yerel Nusselt sayısı değişimi sunulmuştur. $\alpha=10^\circ$ 'de çıkış kesitindeki daralmanın çok belirgin olmasından dolayı çıkışta ana akışın momentumu artmakta olup $\alpha=0^\circ$ ve 5° 'de görülen ters akışı engellemektedir. Bunun sonucunda, akış bölgesinin çıkışında Nu_c ve Nu_t bir miktar artarken keskin artışlar meydana gelmemektedir. $Ri=0.1$ 'de hava hızının diğer Ri değerlerine göre oldukça yüksek olması çıkışta taşınım ile ısı transferi ve toplam ısı transferini az da olsa iyileştirmektedir. Ancak, $Ri=1$ ve 10 'da çıkış bölgesinde ısı transferinde belirgin bir iyileşme yoktur. Işınlama ile ısı transferi ise hem $\varepsilon=0.05$ 'te hem de $\varepsilon=0.95$ 'te çarpma bölgesinde sıfıra oldukça yakın olup duvar jeti bölgesi ve çıkışa yakın bölgede ise toplam ısı transferini iyileştirmektedir. $\alpha=10^\circ$ 'de Nu_t 'nin değişim trendi $\alpha=0^\circ$ ve 5° 'de ortaya çıkan değişim trendinden oldukça farklıdır. Ana akışın momentumundaki artış çıkış bölgesinde ters akış oluşumunu engellerken bu bölgede sıcaklık gradyanlarının ani değişiminin önüne geçmektedir. Bu durum Nu_c ve Nu_t 'nin çıkış bölgesinde keskin şekilde artmasını ya da azalmasını engellemektedir.



Şekil 10. $\alpha = 10^\circ$ ve farklı Ri değerlerinde hedef plaka üzerinde Nu_c , Nu_r ve Nu_t değişimi

Şekil 11’de farklı plaka eğimleri, Richardson sayıları ve yüzey yayıcılık değerleri için ortalama Nusselt sayısı değişimi karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Grafiklerden görüldüğü üzere, çalışılan tüm ϵ değerlerinde $Ri=0.1$ ’de $Nu_{c,ort}$ ve $Nu_{t,ort}$ hedef plakanın eğiminin artışıyla birlikte artmaktadır. Bu durum, yukarıda belirtildiği gibi $Ri=0.1$ ’de viskoz kuvvetlerin kaldırma kuvvetlerine baskın olmasından dolayı kesit daralmasına bağlı olarak çıkış bölgesinde ana akışın momentumunun artışından kaynaklanmaktadır. Benzer bir çıkarım $Ri=1$ için de yapılabilir. Ancak, kaldırma kuvvetleri ve viskoz kuvvetlerin dengede olduğu $Ri=1$ ’de $Nu_{c,ort}$ ve $Nu_{t,ort}$ ’nun α ile değişimi $Ri=0.1$ ’e kıyasla daha sınırlıdır. $Ri=10$ ’da ise plaka eğiminin artışı tüm ϵ değerlerinde $Nu_{c,ort}$ ve $Nu_{t,ort}$ ’yu azaltır. $Ri=10$ ’da kaldırma kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere baskın olmasından dolayı akış bölgesinde ikincil akışlar etkindir. Ancak, plaka eğiminin artışı çıkışta taşınım ile ısı transferinin artışını sınırlandırmaktadır. $Nu_{r,ort}$ ’nun α ve ϵ ile değişimi incelendiğinde, $\epsilon=0.05$ iken Richardson sayısının artışının yüzeyler arasındaki ışınım ile ısı transferini zayıflattığı görülmektedir. Bununla birlikte, $\epsilon=0.5$ iken $Ri=0.1$ ve 1 için farklı plaka eğimlerinde $Nu_{r,ort}$ değerlerinin birbirlerine oldukça yakın olduğu ve tüm Ri değerlerinde plaka eğiminin artışı ile ışınım ile ısı transferinin zayıfladığı görülür. $\epsilon=0.95$ ’te ise $Ri=0.1$ değerinde $Nu_{r,ort}$ ’nun plaka eğiminden neredeyse etkilenmediği, $Ri=1$ ve 10 ’da ise plaka eğimindeki artışın yüzeyler arası ışınım ile ısı transferini zayıflattığı görülmektedir.



Şekil 11. Farklı α , ε ve Ri değerleri için ortalama Nusselt sayısı değişimi

IV. SONUÇ

Bu çalışmada, eğim açısı değişken olan bir levhanın çarpan jet ile soğutulmasında plaka eğimi ($\alpha=0^\circ$, 5° ve 10°), kaldırma kuvveti ($Ri=0.1$, 1 ve 10) ve yüzeyler arası ışınlama ile ısı transferinin akış ve ısı transfer karakteristiklerine etkileri farklı yüzey yayıcılıklarında ($\varepsilon=0.05$, 0.5 ve 0.95) sayısal olarak analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen önemli sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Richardson sayısının ikincil akışlar ve sıcaklık dağılımı üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. $Ri=0.1$ 'de akış bölgesi içerisinde kuvvetli ikincil akışlar oluşmazken, $Ri=1$ ve 10 'da ise kaldırma kuvvetinin etkisinin artışıyla çıkış bölgesindeki ters akışın kapsadığı bölge genişlemektedir.
- Richardson sayısı arttıkça kaldırma kuvvetinin etkisi arttığından dolayı akış bölgesi içerisinde oluşan resirkülasyon hücreleri akışı domine etmektedir.
- Hedef plaka eğiminin artışı ile ana akışın artan momentumu çıkışta ters akış oluşumunu engellemektedir.

- Çarpma bölgesi ve çıkışta taşınım ile ısı transferi duvar jeti bölgesine oranla daha yüksektir.
- Yüzeyler arası ışınım ile ısı transferi yüzey yayıcılığının artışıyla artmakta olup ışınımın toplam ısı transferi içerisindeki payı da artmaktadır.
- Taşınım ile ısı transferinin yüksek olduğu bölgelerde ışınım ile ısı transferi daha zayıftır.
- Isıl sınır tabaka gelişimine bağlı olarak durma bölgesi ve çıkışa yakın bölgelerde ışınım ile ısı transferi adyabatik yüzeyden hedef plakaya doğru gerçekleşmektedir.
- $Ri=0.1$ 'de toplam ısı transferi plaka eğimi ile artmakta, $Ri=1$ 'de belirgin bir artış meydana gelmemektedir. $Ri=10$ 'da ise plaka eğiminin artışı toplam ısı transferini zayıflatmaktadır.

V. KAYNAKLAR

- [1] J. Ferrari, N. Lior, and J. Slycke, "An evaluation of gas quenching of steel rings by multiple-jet impingement", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 136, pp. 190-201, 2003.
- [2] N. Zuckerman and N. Lior, "Jet impingement heat transfer: physics, correlations, and numerical modeling", *Advances in Heat Transfer*, vol. 39, pp. 565-631, 2006.
- [3] M. Albayrak, B. Sarper, M. Saglam, S. Birinci, and O. Aydin, "The role of jet-to-crossflow velocity ratio on convective heat transfer enhancement in the cooling of discrete heating modules", *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 37, 101549, 2023.
- [4] R. Gardon and J.C. Akfirat, "The role of turbulence in determining the heat transfer characteristics of impinging jets", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 8, pp. 1261-1272, 1965.
- [5] F.F. Cadek, "A fundamental investigation of jet impingement heat transfer", Ph.D. thesis, University of Cincinnati, 1965.
- [6] H. Miyazaki and E. Silberman, "Flow and heat transfer on a flat plate normal to a two-dimensional laminar jet issuing from a nozzle of finite height", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 15, pp. 2097-2107, 1972.
- [7] E.M. Sparrow and T.C. Wong, "Impingement transfer coefficients due to initially laminar slot jets", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 18, pp. 597-605, 1975.
- [8] A.R.P. Van Heiningen, "Heat transfer under an impinging slot jet", Ph.D. Thesis, McGill University, Montreal, Quebec, 1982.
- [9] V.K. Garg and S. Jayaraj, "Boundary layer analysis for two-dimensional slot jet impingement on inclined plates", *Journal of Heat Transfer*, vol. 110, pp. 577-582, 1988.
- [10] T.D. Yuan, J.A. Liburdy, and T. Wang, "Buoyancy effects on laminar impinging jets", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 31, pp. 2137-2145, 1988.
- [11] D. Lytle and B.W. Webb, "Air jet impingement heat transfer at low nozzle-plate spacings", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 37, pp. 1687-1697, 1994.
- [12] Z.H. Lin, Y.J. Chou, and Y.H. Hung, "Heat transfer behaviors of a confined slot jet impingement", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 40, pp. 1095-1107, 1997.
- [13] G. Yang, M. Choi, and J.S. Lee, "An experimental study of slot jet impingement cooling on concave surface: effects of nozzle configuration and curvature", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 42, pp. 2199-2209, 1999.

- [14] C. Cornaro, A.S. Fleischer, M. Rounds, and R.J. Goldstein, "Jet impingement cooling of a convex semi-cylindrical surface", *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 40, pp. 890-898, 2001.
- [15] V.A. Chiriac and A. Ortega, "A numerical study of the unsteady flow and heat transfer in a transitional confined slot jet impinging on an isothermal surface", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 45, pp. 1237-1248, 2002.
- [16] D. Sahoo and M.A.R. Sharif, "Mixed-convective cooling of an isothermal hot Surface by confined slot jet impingement", *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, vol. 45, pp. 887-909, 2004.
- [17] M. Angioletti, E. Nino, and G. Ruocco, "CFD turbulent modelling of jet impingement and its validation by particle image velocimetry and mass transfer measurements", *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 44, pp. 349-356, 2005.
- [18] G. Hu and L. Zhang, "Experimental and numerical study on heat transfer with impinging circular jet on a convex hemispherical surface", *Heat Transfer Engineering*, vol. 28, pp. 1008-1016, 2007.
- [19] M.S.J. De Lemos and C. Fischer, "Thermal analysis of an impinging jet on a plate with and without a porous layer", *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, vol. 54, pp. 1022-1041, 2008.
- [20] S. Abishek and R. Narayanaswamy, "Coupled effects of surface-radiation and buoyancy on jet-impingement heat transfer", *Journal of Heat Transfer*, vol. 39, pp. 1631-1638, 2012.
- [21] A.S. Cavadas, F.T. Pinho, and J.B.L.M. Campos, "Laminar flow field in a viscous liquid impinging jet confined by inclined plane walls", *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 59, pp. 95-110, 2012.
- [22] E. Oztekin, O. Aydin, and M. Avci, "Hydrodynamics of a turbulent slot jet impinging on a concave surface", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 39, pp. 1631-1638, 2012.
- [23] E. Oztekin, O. Aydin, and M. Avci, "Heat transfer in a turbulent slot jet flow impinging on concave surfaces", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 44, pp. 77-82, 2013.
- [24] B. Yousefi-Lafouraki, A. Ramiar, and A. Ranjbar, "Laminar forced convection of a confined slot impinging jet in a converging channel", *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 77, pp. 130-138, 2014.
- [25] M.A.R. Sharif, "Heat transfer from an isothermally heated flat surface due to confined laminar twin oblique slot-jet impingement", *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, vol. 7, pp. 1-11, 2015.
- [26] Z. Ying, L. Guiping, B. Xueqin, B. Lizhan, and W. Dongsheng, "Experimental study of curvature effects on jet impingement heat transfer on concave surfaces. *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 30, pp. 586-594, 2017.
- [27] R. Ekiciler, M. Samet, A. Cetinkaya, and K. Arslan, "Effect of shape of nanoparticle on heat transfer and entropy generation of nanofluid-jet impingement cooling", *International Journal of Green Energy*, vol. 17, pp. 555-567, 2020.
- [28] E. Pulat and E. Beyazoglu, "Computational investigation of confined wall inclination effects on

impinging jet fluid flow and heat Transfer”, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 163, pp. 106749, 2021.

[29] S.H. Han, H.J. Park, Y.H. Kim, and D.H. Lee, “The effects of thermal boundary conditions on the heat transfer characteristics of laminar flow in mili-scale confined impinging slot jets”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 168, 120865, 2021.

[30] M. Albayrak, B. Sarper, S. Birinci, M. Saglam, and O. Aydin, “Effect of surface radiation on jet impingement cooling of a concave surface”, *International Symposium on Convective Heat and Mass Transfer*, June 5-10 2022, Izmir-Turkey.

[31] P. Singh, Y. Aider, and I. Kaur, Swirl jet impingement heat transfer: effect of jet-to-target spacing, jet Reynolds number and orientation with flat target”, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 184, 107993, 2023.

[32] Y. Zhou, M. Wang, M. Wang, and Y. Wang, “Predictive accuracy of Boussinesq approximation in opposed mixed convection with a high-temperature heat source inside a building”, *Building Environment*, vol. 144, pp. 349-356, 2018.

[33] Ansys Inc., “Ansys Fluent, Release 21 R2, Theory Guide”, 2021.

[34] B. Sarper, M. Saglam, and O. Aydin, “Constructal placement of discrete heat sources with different lengths in vertical ducts under natural and mixed convection”, *Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 140, 121401, 2018.

[35] M.A. Gad and C. Balaji, “Effect of surface radiation RBC in cavities heated from below”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 37, pp. 1459-1464, 2010.

[36] C. Balaji, M. Hölling, and H. Herwig, “Combined laminar mixed convection and surface radiation using asymptotic computational fluid dynamics (ACFD)”, *Heat and Mass Transfer*, vol. 43, pp. 567-577, 2007.



Düzce University Journal of Science & Technology

Research Article

Molecularly Imprinted Chitosan Modified Quartz Tuning Fork Sensors for Real Time Biosensing in Liquid Environment

 Gizem KALELİ-CAN^{a,*}

^a Department of Biomedical Engineering, İzmir Democracy University, İzmir 35140, TURKEY

* Corresponding author's e-mail address: gizem.kalelican@idu.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1351846

ABSTRACT

Several new sensing technologies have emerged to meet the escalating demand for accurate and rapid diagnosis. We present an overview of the development of highly sensitive and selective Quartz Tuning Fork (QTF)-based sensors in a liquid environment, which will be critically important for contemporary diagnostic methods reliant on sensing technologies. The purpose of this study is to modify QTF prongs using molecularly imprinted chitosan, in combination with the operation of a quartz tuning fork as a piezoelectric crystal for biomedical applications. Through real-time data acquisition, we evaluate QTF resonance frequency shifts in dry and liquid environments using a model protein, BSA. As a result, the QTF-based sensor fails to detect BSA in dry conditions. It is however possible to measure frequency shifts ranging from 5 to 25 $\mu\text{g}/\text{mL}$ within a liquid matrix. There is a rapid equilibration response time of 2 to 10 minutes depending on the concentration of BSA in the sensor. With the developed QTF-based sensor, a sensitivity of 1.1069 Hz/ μg has been achieved within the liquid matrix. As a result of the excellent properties of molecularly imprinted chitosan, it has been possible to develop a QTF-based biosensor capable of acquiring real-time data even when it is in liquid solutions.

Keywords: Quartz tuning fork, Mass sensitive sensor, Molecularly imprinted polymer, chitosan, bovine serum albumin

Sıvı Ortamda Gerçek Zamanlı Biyoalgılama için Moleküler Baskılı Kitosan Modifiye Kuvars Ayar Çatalı Sensör Geliştirilmesi

ÖZET

Yüksek hassasiyet ve seçicilikle çalışan, doğru ve hızlı teşhis talebini karşılamak üzere bir dizi yeni duyuşal teknoloji ortaya çıkmıştır. Bu çalışma kapsamında, sensör teknolojilerine dayalı çağdaş teşhis yöntemleri için kritik önem taşıyan sıvı ortamda çalışan Kuvars Ayar Çatalı (QTF) tabanlı sensörler tasarımı üzerine detaylı bilgi sunmaktadır. Bu çalışma, biyomedikal uygulamalar için bir çevirici olarak kuvars ayar çatalın piezoelektrik kristal olarak kullanılması ile, QTF çatallarını moleküler baskılı kitosan ile modifiye etmeyi amaçlamaktadır Gerçek zamanlı veri toplama ile, model bir protein olan BSA kullanarak QTF rezonans frekansındaki değişimleri hem kuru hem de sıvı ortamlarda takip edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, QTF tabanlı sensör, kuru koşullarda BSA tespiti yapamamaktadır. Ancak sıvı matris içinde 5 ila 25 $\mu\text{g}/\text{mL}$ aralığında frekans değişimleri ölçülebildiği gösterilmiştir. Sensördeki

BSA konsantrasyonuna bağlı olarak, tepki süresi BSA konsantrasyonuna bağlı olarak 2 ila 10 dakika arasında değişmektedir. Geliştirilen QTF tabanlı sensörle, sıvı matris içinde 1.1069 Hz/ μg hassasiyette ölçüm yapılabilmektedir. Moleküler baskılı kitosanın üstün özellikleri sayesinde, sıvı çözeltilerde bile gerçek zamanlı veri toplama yeteneğine sahip bir QTF tabanlı biyosensör geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kuvars ayar çatalı, Kütle hassas sensör, Moleküler baskılı polimer, Kitosan, Sığır serum albumin

I. INTRODUCTION

Modern healthcare systems are increasingly dependent on diagnosis technologies, which have revolutionized medical practice by providing accurate and timely disease identification. An accurate diagnosis is not only essential to enhancing patient outcomes, but also to improving the efficiency of healthcare management and reducing healthcare expenses. The advancement of diagnostic methodologies across various medical disciplines has been driven by sensing technologies, which have emerged as indispensable tools. The use of sensing technologies provides real-time and non-invasive methods for the detection of biomarkers, the monitoring of physiological changes, and the assessment of disease progression in real time. These tools have the potential to enhance the early detection and monitoring of disease, as well as the development of personalized treatment plans [1]. However, materials are a key component of an effective sensor, since they dictate the specificity of recognition, the limits of detection, and the overall quality and reliability of the results. Since polymer-based receptors are scalable, simple, offer an extended shelf-life and are cost-effective, they have gained significant attention. Furthermore, they promise to reduce performance variations between batches [2,3]. Polymer-based biosensors also offer automated manufacturing with predefined attributes for both single and multiple analyte detection, enabling enhanced personalized healthcare applications [4]. The sensor industry has access to a wide range of polymerization techniques. A particularly promising method for crafting high-quality functional materials on sensor substrates has emerged with the use of molecular imprinting.

Molecular imprinting is a technique used to create specific cavities within three-dimensional polymeric networks [5]. Upon eliminating the template molecules from the polymer structure, these cavities are revealed. These cavities possess complementary characteristics in terms of size and configuration. In addition, they possess complementary characteristics in relation to the interaction points and coordination spheres of template molecules. A broad range of research fields, including chromatography, biotechnology, environmental science, food safety, biomedical sciences, and notably, biosensors, have benefited from MIPs, which offer promising substitutes for their biological counterparts [4,6].

A crucial initial step in the synthesis of molecularly imprinted polymers (MIPs) is the selection of the appropriate functional monomer, as it determines how complementary interactions can be established with matrix molecules. An amino polysaccharide derived from chitin by deacetylation, chitosan contains three distinct reactive functional groups – one amine group, two primary and secondary hydroxyl groups – and is the most abundant nontoxic, biodegradable, and biocompatible amino polysaccharide in nature [7]. A wide range of chemical modifications can be carried out on this structure, including aldehyde-ketone interactions, grafting, hydrogen bonding with polar entities, crosslinking, etc. As a result of reactive functional groups present along the polysaccharide chain of chitosan, the material is flexible, has excellent film-forming capabilities, is highly adherent, is biocompatible, has a noteworthy mechanical resilience, and may be structurally modified. This material has phenomenal properties that make it an ideal material for the creation of MIPs and the construction of several types of transducers including electrochemical, optic, and physical transducers for sensor design [8,9].

There has been significant interest in mass-sensitive biosensors derived from Quartz Tuning Forks (QTFs) for biomedical applications in recent years, primarily due to the high-quality factor ($10^3 - 10^5$), the cost-effective fabrication, the low energy consumption, and the inherent stability of these devices. The use of QTFs has proven useful for a variety of applications, including time-frequency standard systems, atomic force microscopy, gas and humidity sensing, quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy (QEPAS), and, more recently, biosensing investigations [10-25]. The technique relies on the detection of biomolecules within gaseous or liquid media, whereby the mass of the target analytes is converted into a measurable signal, known as the resonant frequency (f). With the assistance of an oscillator circuit and a frequency counter, the frequency of this signal can be quantified. The effectiveness of this sensing mechanism is determined by the resonator's performance, which is closely linked to the quality factor and the dynamics of interactions between target biomolecules and the resonator surface [16]. Since the transducer's surface is chemically inert, the establishment of a recognition layer is critical for modifying the transducer. Not only is this layer useful for enhancing sensitivity and selectivity, but it also addresses the requirement that the transducer interact with the biomolecule being detected. Despite this, it is important to strike a balance between thickness and uniformity because excessively thick recognition layers can result in a precipitous decline in the transducer's quality factor and consequently its sensitivity [16].

Based on these above-mentioned advantages, the present study explored the potential integration of QTFs and molecularly imprinted technology, to establish an innovative paradigm for biosensor development. Throughout this research, molecularly imprinted chitosan was used as an interface layer between the prongs of the QTF and the model protein. By choosing molecular imprinting, it was possible to create a binding interface capable of recognizing a specific protein model, bovine serum albumin (BSA). Through dry state and real-time measurement of shifts in the QTF resonance frequency in response to varying BSA concentrations, the effectiveness of the molecularly imprinted chitosan thin film was assessed by taking advantage of QTFs' inherent responsiveness to mass changes on their surface. Based on the correlation between these frequency shifts and BSA concentrations, the molecularly imprinted chitosan-QTF system has proven to be highly specific and sensitive for the detection of proteins. This achievement highlights the potential for the combination of molecularly imprinted polymeric materials and QTF-based sensor technologies to create innovative diagnostic tools with many applications, ranging from medical diagnostics to environmental monitoring.

II. EXPERIMENTAL

A. MOLECULAR IMPRINTING OF BSA

Molecular imprinting of chitosan/glutaraldehyde resin is accomplished in the following manner described by Monier and El-Sokkary [26]. Hydrophilic glycol chitosan solution was prepared by mixing 15 grams of chitosan (Mw: 190,00-310,00, Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA) with 1000 mL of deionized water and 0.5% acetic acid solution (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA) was added to the mixture. To ensure mixing, it was vigorously stirred using a magnetic stirrer for 72 hours. As a next step, 10 mL of 0.1 M BSA (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA) was added to the chitosan solution, and it was stirred for two hours. In the following hour, 5 mL of glutaraldehyde solution (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA) was added and stirred. The gelatinous resin was dried in a 60°C oven for 24 hours after this period. A mortar and sieve were used to grind the dried resin into particles with a diameter of approximately 150 μm . To prepare the desired adsorbent to separate BSA from samples, 3 g of particles were stirred for 24 hours in 1000 mL of 0.1 M HCl solution to wash out the BSA molecules. To ensure maximum removal of the imprinted BSA molecules, this step was repeated three times to ensure that they were removed as much as possible from the chitosan network. The imprinted BSA molecules could cross-link with the chitosan network during the reaction, interfering with subsequent adsorption and extraction procedures. Non-imprinted chitosan was synthesized in a similar manner, without the addition of the BSA to the solution.

B. SURFACE MODIFICATION OF THE QTF'S PRONGS WITH MOLECULARLY IMPRINTED CHITOSAN

Before modification, the hermetic case of bare QTFs (32.768 kHz, Shoulder Crystal, China) was removed and crystals were sonicated in ethanol for 30 minutes. Then, the prongs were washed with deionized (DI) water several times and dried with a gentle flow of nitrogen [20,22,24-25]. The prongs of QTFs were modified with BSA imprinted chitosan solution by simple dipping method for 60 minutes. The repeatability of prongs' modified area was controlled with Asensis QTF F-master device. Real time monitoring of the frequency was performed during all surface modification periods with the Asensis QTF F-master device and the frequency of dried QTFs were also measured. The change in frequency ($\Delta f=f_1-f_2$) was calculated for each measurement [25].

C. CHARACTERIZATION OF QTF BIOSENSOR

The chemical groups were determined by attenuated total reflectance-Fourier transform infrared (ATR-FTIR) (PerkinElmer Spectrum TwoTM FT-IR Spectrometer, USA) analysis. ATR-FTIR spectra measured with a range of 4000-1000 cm^{-1} .

D. BSA DETECTION VIA MOLECULARLY IMPRINTED CHITOSAN MODIFIED QTF BIOSENSOR

Unmodified, non-imprinted and imprinted chitosan modified QTF-based biosensors were used in both dry and liquid state BSA monitoring. The interaction of prongs' modified area with BSA was controlled using the Asensis QTF F-master device. The specified immersion level of the device corresponded to a full revolution of the stepper motor which is 40 μm . When the "immerse" command was activated, it was moved 40 μm in one step, and the process continues until the fork was interacted with different BSA concentrations. Consequently, the interaction length of forks with liquid could be either 40 μm or less than that value with a single immerse command.

D. 1. Biosensor Testing in Dry State

Firstly, the biosensors were immersed in 200 μL of PBS solution for 10 min. Before interacting with BSA, prongs were washed with DI water, dried with nitrogen gas, and frequency measurements performed to monitor baseline frequencies. Then, the QTF-based biosensors mentioned above were immersed into different BSA concentrations (0-41 $\mu\text{g}/\text{mL}$ BSA in 0.1 % v/v in PBS, pH 7.4) for a period of 10 min, washed three times with PBS (pH 7.4, 4 $^{\circ}\text{C}$) to remove unbounded BSA and nitrogen dried. Frequency shifts before and after interaction were recorded in a dry state with the QTF controller [20,22, 24].

D. 2. Real Time Monitoring in Liquid State

Real time monitoring of BSA with QTF-based biosensor was performed by recording all changes occurred after immersion of prongs in solution. Unmodified, non-imprinted and imprinted chitosan modified QTF-based biosensors were interacted with different BSA concentrations (0-41 mM BSA in 0.1 % v/v in PBS, pH 7.4). The base frequency was recorded after frequency reached to equilibrium in BSA solution right after immersion. The frequency shifts after interaction with BSA were recorded real time with the QTF controller and the highest shift was accepted as a response of QTF-based biosensor.

III. RESULTS AND DISCUSSION

The chemical change after molecular imprinting process was evaluated with ATR-FTIR analysis (Figure 1). In the spectrum of hydrophilic glycol chitosan before molecularly imprinted (non-imprinted

chitosan), a broad peak was observed at 3310 cm^{-1} and 1642 cm^{-1} indicating -OH/NH_2 stretching and C-O stretching of the acetyl group (amide-I) [27-29]. In the molecularly imprinted chitosan's ATR-FTIR spectrum, the bands at 1520 cm^{-1} and 1245 cm^{-1} correspond to vibrations of the N-H bending and the -NO_2 stretching vibration, respectively. Other characteristic peaks for chitosan did not shift from their original position.

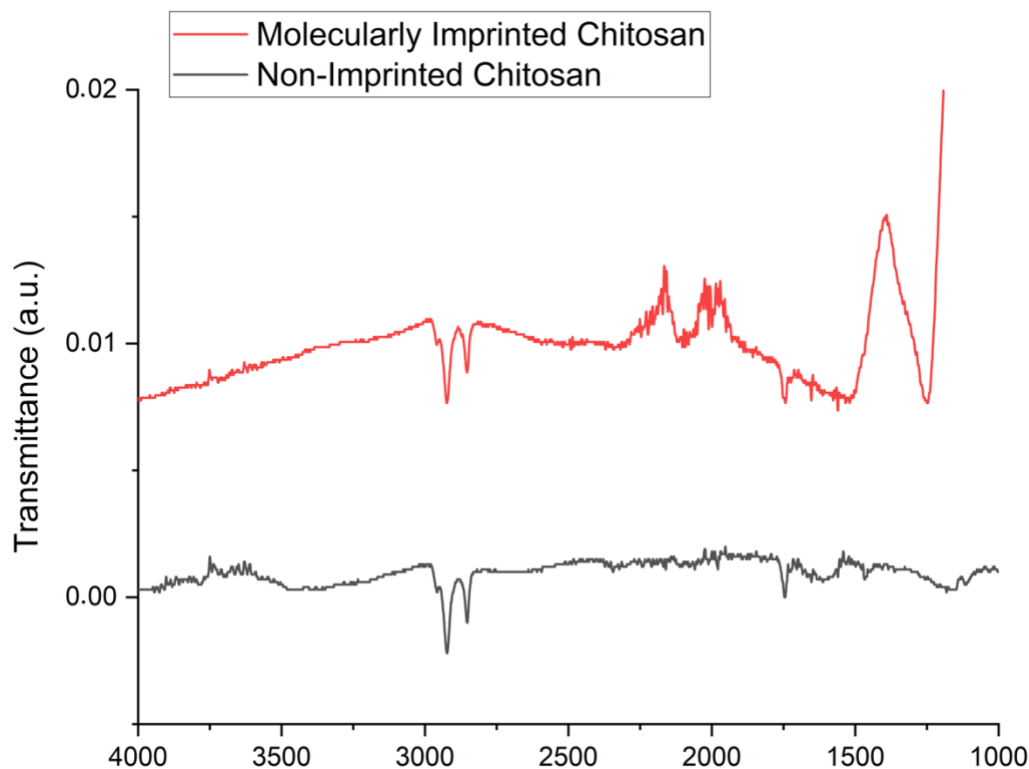


Figure 1. ATR-FTIR spectra of the non-imprinted and molecularly imprinted chitosan.

A novel biosensor designed as a model for BSA detection operates by monitoring changes in the resonance frequency of the QTFs. A change occurs when mass accumulates on the surface due to the selective interaction between molecularly imprinted chitosan and BSA biomolecules. Inert prongs on the QTFs are effectively activated by molecularly imprinted chitosan films using dip-coating technique, allowing selective interaction with BSA to be achieved. BSA detection is reflected in the observed decrease in the resonance frequencies of QTFs (Figure 2). Thus, in the initial phase of the experiments, the resonance frequencies of unmodified QTFs in air, and BSA were measured to determine how air damping and matrix effects affect frequency.

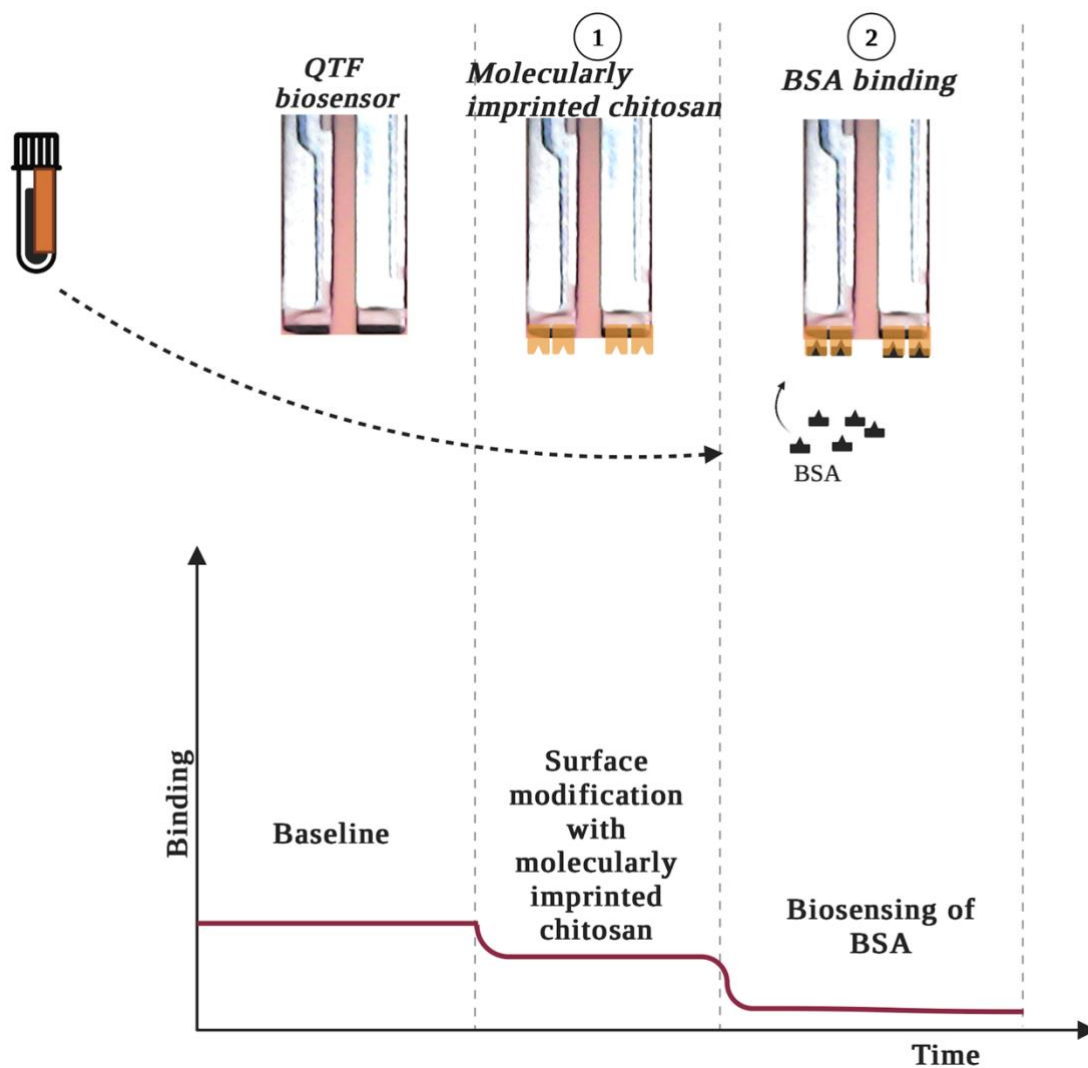


Figure 2. Schematic representation of biosensing of BSA with molecularly imprinted chitosan modified QTF-based sensor.

Due to their user-friendly design, QTFs with dimensions of 3.10x8.20 mm and a resonance frequency of 32,768 Hz in vacuum were selected and utilized for this purpose rather than QTFs with dimensions of 2.10x6.20 mm. Upon removal of the hermetic case and cleaning, the average frequency was calculated as $32,757.3 \pm 2.3$ Hz ($n=30$) because of the prongs having been cleaned and dampened by the air. Control experiments were conducted using a non-imprinted chitosan coating on the prong of the QTF, and frequency changes approximately 9.8 Hz ($n=10$) were caused by chitosan thin film formation. In the next step, BSA detection was conducted, and a frequency change of approximately 0.2 Hz ($n=10$) was detected. Since the frequency change is less than the error value of 2.3 Hz, the difference is not considered a change. This result indicates that the non-imprinted chitosan thin film does not detect BSA selectively from the matrix.

Then, first dry-state detection was performed with molecularly imprinted chitosan modified QTF-based biosensor with varied BSA concentration between 0-41 $\mu\text{g/mL}$. But no significant frequency change was observed in the given concentration range. However, during real time measurement, after the frequency reached to equilibrium, even in lowest concentration, a linear change in resonance frequency shift was observed until 25 $\mu\text{g/mL}$ of BSA. Due to the steric effect, remaining BSA cannot interact with the active side of thin film since the concentration-consequent active sites of molecularly imprinted

chitosan reduce the concentration of BSA in the prongs. As a result, when a concentration of 25 $\mu\text{g/mL}$ of BSA is exceeded, the surface of the QTF-based sensor also loses its sensitivity (Figure 3).

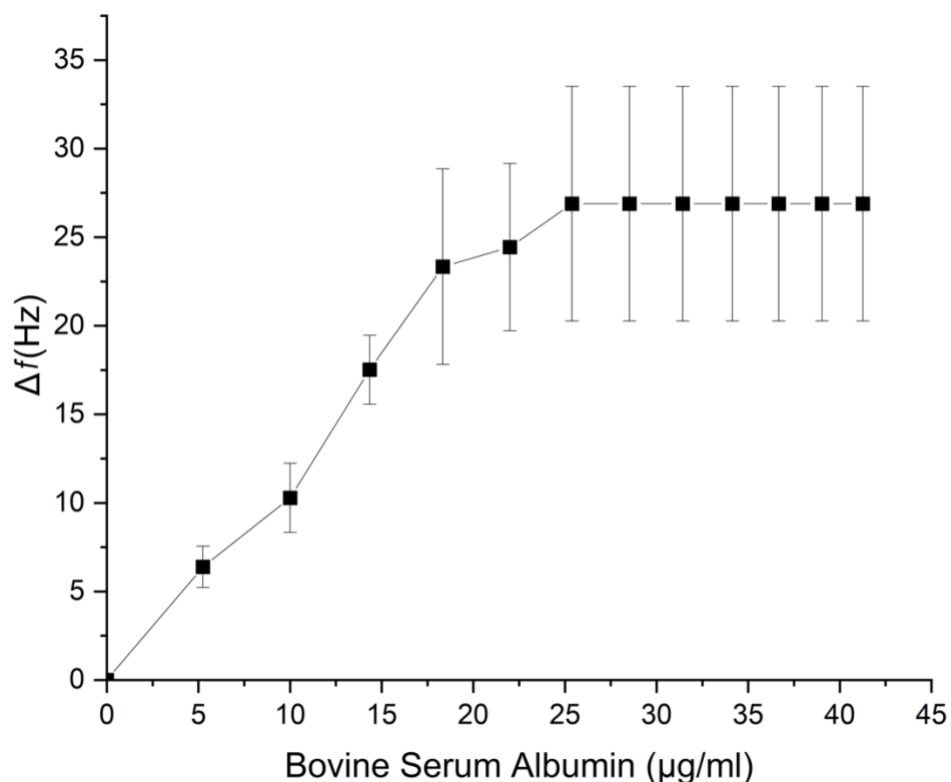


Figure 3. QTF response modified with molecularly imprinted chitosan, which is interacted with a solution containing BSA in certain amounts with real time monitoring ($n=3$)

This newly developed biosensor in liquid displayed a linear range of 5 to 25 $\mu\text{g/mL}$ with a correlation coefficient of $R^2 = 0.9796$ (Δf (Hz) = $1.1069C + 0.4789$). Due to the capillary effect formed between QTF prongs, the biosensor responded within 2-10 minutes. In this study, it was determined that the biosensor had a sensitivity of 1.1069 ± 0.1812 Hz/ μg ($0.09 \mu\text{g}/0.1$ Hz) (Figure 4).

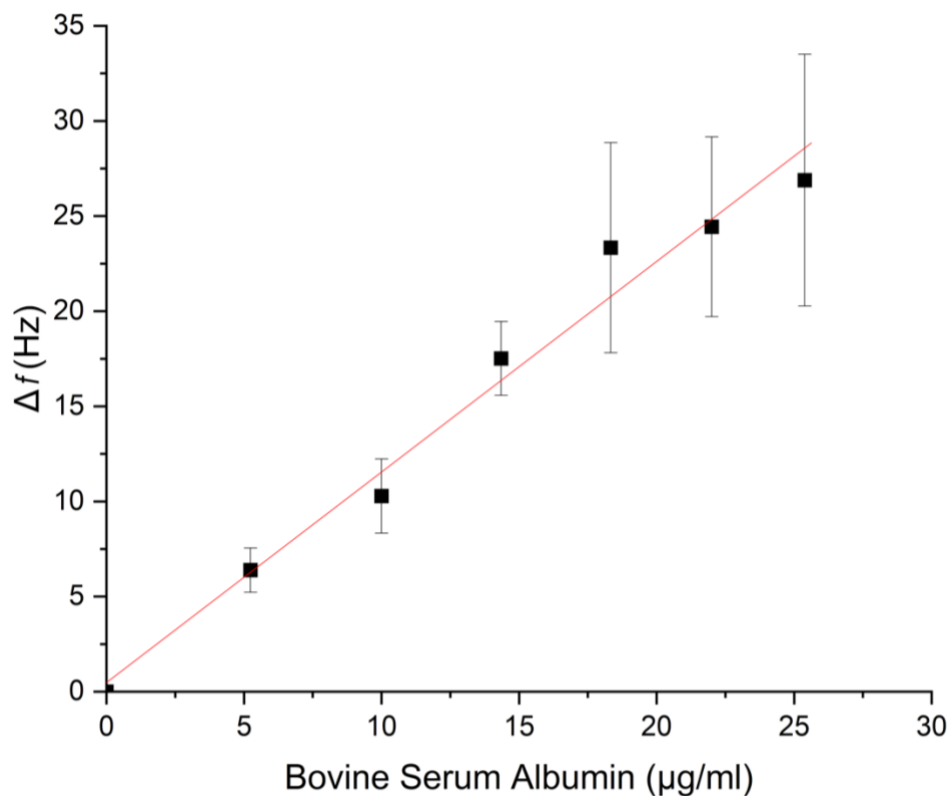


Figure 4. The calibration curve obtained for the QTF-based sensor for the detection of BSA with real-time monitoring ($n=3$)

We have recently conducted extensive studies in our research group investigating the adaptation of QTFs for biosensing applications by utilizing plasma polymerization processes and a variety of precursor materials [20,22,24-25]. Three different amino-containing precursors—amylamine, n-heptylamine, and diaminocyclohexane—were initially used to modify the QTF prongs. Amylamine-modified surfaces yielded the most favorable results following extensive optimization efforts. Testing of these amylamine-functionalized QTFs with 50 μg/mL of BSA resulted in a frequency shift response of approximately 5 Hz [20]. As a follow-up to our previous studies, we examined a two-step strategy that included the application of a hydrocarbon-based plasma film (heptane) as a pre-coating layer, and the application of an amino-group-containing precursor (ethylenediamine) as the capping layer. As a result of this configuration, there was a frequency shift of 20 ± 3.6 Hz for the same BSA concentration [22]. According to a recent study involving plasma polymerization, hexane pre-coating significantly enhanced QTF response, exhibiting a 32-fold increase in QTF response compared to amylamine-modified QTFs, and a fourfold increase in QTF response compared to those modified with heptane and ethylenediamine [24]. Despite this, due to the high cost of the plasma device and the challenges associated with reproducibility associated with thin film production by plasma polymerization, alternative methods to modify the surface of the film were explored.

The effective utilization of QTF-based biosensing strategies remains a crucial component despite progress in QTF-based biosensing strategies. Our current research is focused on developing a more accessible and reproducible method of surface enhancement like molecularly imprinted polymer modified QTF-based biosensor. The present study identifies a novel approach to addressing the limitations of plasma polymerization and presents a viable alternative for improving the performance and feasibility of QTF-based biosensors for improved diagnostic applications. As a result of this study, our lowest concentration that could be measured was 5 mM, which is 100 times higher than our previous studies, and the response was 100 times and 400 times lower with a 6.38 Hz frequency shift compared to our previous studies.

According to literature, the sensitivity of unmodified QTF sensors is calculated to be approximately 1.3 ng/0.1 Hz [28]. Interestingly, the surface modification of the QTF prongs resulted in a significant sensitivity reduction by approximately 6.9 times compared to bare crystals and 20 times compared to plasma modified QTFs. This decrease in sensitivity may be due to the thickness of thin films produced by dip coating. Based on these findings, even though dip-coating have been used for different applications due to their simplicity and easiness to operate, it is apparent that surface modification of QTF's prongs can be complex and impact the performance characteristics of resultant QTF-based biosensors by decreasing quality factor of crystals [30]. Therefore, more investigation could be performed to increase the sensitivity by changing dip coating parameter with a more controllable device. Apart from all these limitations, this study presents the first real-time monitoring of biomolecules using a QTF-based sensor.

IV. CONCLUSION

Medical practice has been transformed by diagnostic technologies, which facilitate the accurate and timely identification of diseases in healthcare systems. In addition to improving patient outcomes, accurate diagnosis improves the efficiency of healthcare management and reduces costs. Sensor technology has become an indispensable tool for sensitive and selective diagnosis across diverse medical domains. It is possible to identify biomarkers in real time, monitor physiological activity, and assess disease progression using these technologies. These technologies are highly promising in the areas of early disease detection, monitoring, and personalized treatment planning. This context makes the role of materials within sensing platforms paramount, since they influence the specificity of recognition, the limits of detection, and the quality of the results. Various polymer-based receptors have attracted substantial attention due to their scalability, simplicity, extended shelf-life, and cost-effectiveness, in addition to promising to reduce batch-to-batch performance variability. The availability of a variety of polymerization techniques has allowed innovative materials to be designed on sensor substrates, with molecular imprinting being particularly promising. Through the process of molecular imprinting, specific cavities may be created within three-dimensional polymeric matrixes to reveal complementary characteristics with respect to size, configuration, interaction points, and coordination spheres. Choosing the right monomer for complementary interactions with matrix molecules is one of the most critical steps in the synthesis of MIPs. The flexibility, film-forming capability, biocompatibility, mechanical resilience, and structural adaptability of chitosan make them an ideal substrate for MIPs, allowing sensor design.

A growing interest in mass-sensitive biosensors using QTFs has been observed in the biomedical field, given features such as high-quality factor, low cost, low energy consumption, and inherent stability. Although chemically inert prongs require a recognition layer for enhanced sensitivity and selectivity. In line with these advantages, our study examines the fusion of QTFs with molecularly imprinted technology to create an innovative biosensor paradigm for QTF-based sensor technologies. Molecular imprinting facilitates specific recognition of BSA by using molecularly imprinted chitosan as an interface between QTF prongs and model proteins. We have confirmed the efficacy of the molecularly imprinted chitosan film by using dry and real-time measurements of QTF resonance frequency shifts.

ACKNOWLEDGEMENTS: No funding was used during this research.

V. REFERENCES

[1] G. L. Coté, R. M. Lec, M. V. Pishko, "Emerging biomedical sensing technologies and their applications". *IEEE sensors journal*, 3(3), 251-266, 2003.

- [2] E. Reimhult, F. Höök, “Design of surface modifications for nanoscale sensor applications. *Sensors*”, 15(1), 1635-1675, 2015.
- [3] C. Alemán, G. Fabregat, E. Armelin, J. J. Buendía, J. Llorca, “Plasma surface modification of polymers for sensor applications”. *Journal of Materials Chemistry B*, 6(41), 6515-6533, 2018.
- [4] L. Uzun, A. P. Turner, “Molecularly-imprinted polymer sensors: Realising their potential”. *Biosensors and Bioelectronics*, 76, 131-144, 2016.
- [5] A. Bossi, F. Bonini, A. P. F. Turner, S. A. Piletsky, “Molecularly imprinted polymers for the recognition of proteins: the state of the art”. *Biosensors and Bioelectronics*, 22(6), 1131-1137, 2007.
- [6] U. Chadha, P. Bhardwaj, R. Agarwal, P. Rawat, R. Agarwal, I. Gupta, A. Chakravorty, “Recent progress and growth in biosensors technology: A critical review”. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 109, 21-51, 2022.
- [7] L. Xu, Y. A. Huang, Q. J. Zhu, C. Ye, “Chitosan in molecularly-imprinted polymers: Current and future prospects. *International Journal of Molecular Sciences*”, 16(8), 18328-18347, 2015.
- [8] F. Zouaoui, S. Bourouina-Bacha, M. Bourouina, N. Jaffrezic-Renault, N. Zine, A. Errachid, “Electrochemical sensors based on molecularly imprinted chitosan: A review”. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 130, 115982, 2020.
- [9] S. Chauhan, A. Thakur, “Chitosan-based biosensors-A comprehensive Review”. *Materials Today: Proceedings*, 2023.
- [10] S. Allen, X. Chen, J. Davies, M. C. Davies, A. C. Dawkes, J. C. Edwards, P. M. Williams, “Detection of antigen– antibody binding events with the atomic force microscope”. *Biochemistry*, 36(24), 7457-7463, 1997.
- [11] W. A. Atia, C. C. Davis, “A phase-locked shear-force microscope for distance regulation in near-field optical microscopy”. *Applied Physics Letters*, 70(4), 405-407, 1997.
- [12] F. J. Giessibl, “Atomic resolution on Si (111)-(7× 7) by noncontact atomic force microscopy with a force sensor based on a quartz tuning fork”. *Applied Physics Letters*, 76(11), 1470-1472, 2000.
- [13] H. Göttlich, R. W. Stark, J. D. Pedarnig, W. M. Heckl, “Noncontact scanning force microscopy based on a modified tuning fork sensor”. *Review of Scientific Instruments*, 71(8), 3104-3107, 2000.
- [14] J. U. Schmidt, H. Bergander, L. M. Eng, “Experimental and theoretical analysis of shear–force interaction in the non-contact regime with 100 pN force resolution”. *Applied surface science*, 157(4), 295-301, 2000.
- [15] S. Kühn, C. Hettich, C. Schmitt, J. P. Poizat, V. Sandoghdar, “Diamond colour centres as a nanoscopic light source for scanning near-field optical microscopy”. *Journal of Microscopy*, 202(1), 2-6, 2001.
- [16] X. Su, C. Dai, J. Zhang, S. J. O'Shea, “Quartz tuning fork biosensor”. *Biosensors and Bioelectronics*, 17(1-2), 111-117, 2002.
- [17] J. Zhang, S. O'shea, “Tuning forks as micromechanical mass sensitive sensors for bio-or liquid detection”. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 94(1), 65-72, 2003.
- [18] J. M. Friedt, E. Carry, “Introduction to the quartz tuning fork”. *American Journal of Physics*, 75(5), 415-422, 2007.

- [19] H. Wu, L. Dong, H. Zheng, Y. Yu, W. Ma, L. Zhang, F. K. Tittel, "Beat frequency quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy for fast and calibration-free continuous trace-gas monitoring". *Nature communications*, 8(1), 1-8, 2017.
- [20] G. K. Can, H. F. Özgüzar, G. Kabay, P. Kömürcü, M. Mutlu, "Simultaneous insulation and modification of quartz tuning fork surface by single-step plasma polymerization technique with amine-rich precursors". *MRS Communications*, 8(2), 541-549, 2018.
- [21] H. Wu, L. Dong, X. Yin, A. Sampaolo, P. Patimisco, W. Ma, S. Jia, "Atmospheric CH₄ measurement near a landfill using an ICL-based QEPAS sensor with VT relaxation self-calibration". *Sensors and Actuators B: Chemical*, 297, 126753, 2019.
- [22] H. F. Özgüzar, G. K. Can, G. Kabay, M. Mutlu, "Quartz tuning fork as a mass sensitive biosensor platform with a bi-layer film modification via plasma polymerization". *MRS Communications*, 9(2), 710-718, 2019.
- [23] X. Yin, H. Wu, L. Dong, B. Li, W. Ma, L. Zhang, F. K. Tittel, "ppb-Level SO₂ Photoacoustic Sensors with a Suppressed Absorption-Desorption Effect by Using a 7.41 μm External-Cavity Quantum Cascade Laser". *ACS sensors*, 5(2), 549-556, 2020.
- [24] G. Kaleli-Can, H. F. Özgüzar, M. Mutlu, "Development of mass sensitive sensor platform based on plasma polymerization technique: Quartz tuning fork as transducer". *Applied Surface Science*, 540, 148360, 2021.
- [25] G. Kaleli-Can, H. F. Özgüzar, M. Mutlu, "Development of QTF-based mass-sensitive immunosensor for phenylketonuria diagnosis". *Applied Physics A*, 128(4), 277, 2022.
- [26] M. Monier, A. M. A. El-Sokkary, "Preparation of molecularly imprinted cross-linked chitosan/glutaraldehyde resin for enantioselective separation of L-glutamic acid". *International journal of biological macromolecules*, 47(2), 207-213, 2010.
- [27] S. Roy, H. C. Kim, L. Zhai, J. Kim, "Preparation and characterization of synthetic melanin-like nanoparticles reinforced chitosan nanocomposite films". *Carbohydrate polymers*, 231, 115729, 2020.
- [28] X. Zhou, T. Jiang, J. Zhang, J. Zhu, X. Wang, Z. Zhu, "A quartz tuning fork-based humidity sensor using nanocrystalline zinc oxide thin film coatings". In *2006 IEEE International Conference on Information Acquisition* (pp. 1152-1157). IEEE, 2006.
- [29] A. Atik, T. Günal, P. A. Bozkurt, S. N. Köse, B. Alp, C. Yandım, G. Kaleli-Can, "Characterization of cisplatin loaded hydrophilic glycol chitosan modified eumelanin nanoparticles for potential controlled-release application". *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 84, 104440, 2023.
- [30] D. Demir, S. Gündoğdu, S. Gundogdu, Ş. Kılıç, T. Kartalhoğlu, E. Baysoy, G. Kaleli Can, "A comparison of different strategies for the modification of quartz tuning forks based mass sensitive sensors using natural melanin nanoparticles". *Akıllı Sistemler ve Uygulamaları Dergisi*, 4(2), 128-132, 2021.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

İki Eksenli Güneş Takip Sistemi İle Sabit Eksenli Fotovoltaik (PV) Sistemlerinin Tasarımı Ve Uzaktan İzlenmesi

 Serkan SAĞLAM ^{a,*},  Sibel AKKAYA OY ^a

^a Deniz Bilimleri Ve Teknolojisi Mühendisliği Bölümü, Deniz Bilimleri Fakültesi, Ordu Üniversitesi, Ordu, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: serkan.saglam@windowslive.com
DOI: 10.29130/dubited.1053817

ÖZ

Bu çalışmada, iki eksenli güneş takip sistemi ile sabit eksenli fotovoltaik sistemlerinin tasarımı ve uzaktan izlenmesi sağlanmıştır. PV sistemler Samsun ili Bafra ilçesinde bulunan Bafra Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi içerisinde bulunan bir konumuna yerleştirilmiştir. Sistemler aynı süre zarfında, aynı konumda ve birbirlerini gölgelemeyecek şekilde yerleştirilmiştir. Fotovoltaik sistemlerde elde edilen enerji akıllı inverterler sayesinde belirli aralıklarla alınarak raporlanmıştır. Üretilen enerji değerleri akıllı invertere bağlanan raspberry pi devre kartı sayesinde internet üzerinden bağlantı kurularak alınmış ve internet sitesinde yayınlanmıştır. Uygulaması gerçekleştirilen sistemlerde elde edilen enerji değeri, bu sistemlerin maddi karşılığı, yatırımı karşılama süresi gibi değerler kıyaslanarak iki eksenli takip sisteminin Karadeniz bölgesi için uygun olup olmadığı araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik sistem, Solar sistem, İki Eksenli Takip sistemi

Design And Remote Monitoring Of Two Axis Solar Tracking System And Fixed Axis Photovoltaic (PV) Systems

ABSTRACT

In this research, design and remote monitoring of fixed axis photovoltaic systems with two axis solar tracking system is provided. PV systems are located in Bafra Vocational and Technical Anatolian High School located in Bafra district of Samsun province and placed in a shading area at certain times of the day. The aim of this is to see to what extent the biaxial tracking system will be efficient in case the fixed system is exposed to shading. The energy obtained in photovoltaic systems is reported by being collected in certain periods thanks to intelligent inverters. The generated energy values were taken previously by remote connection by means of raspberry pi circuit board connected to smart inverter and published on the website. The energy value obtained in the systems implemented, the material equivalent of these systems, the values such as amortization of investment were compared and the suitability of the biaxial tracking system for the Black Sea region was investigated.

Keywords: Fotovoltaic system, Solar tracker system, Dual axis tracker system

I. GİRİŞ

Son yıllarda, dünyanın dört bir yanındaki enerji alanı araştırmacıları, fosil yakıtların kullanımından kaynaklanan sorunlara çözümler aramaktalar. Bu sorunlar arasında fosil yakıt rezervlerinin tükenmesi ve zararlı çevresel gazların salınması bulunmaktadır. Yenilenebilir enerjinin en önemli kaynakları güneş, rüzgar, biyokütle ve jeotermal enerjidir. Günümüzde güneş enerjisi, dünyanın her yerindeki mevcudiyeti nedeniyle en çok ilerleme kaydeden yenilenebilir enerji kaynaklarından başında gelmektedir [1].

Geleneksel enerji kaynaklarının üretim ve dağıtım zorluklarının yanında daha hızlı üretim ve son kullanıcıya ulaştırılma avantajı olan yenilenebilir enerji kaynakları gelecek yıllarda bir kurtarıcı olabileme potansiyeline sahiptir. Bununla birlikte şebekeye bağlı fotovoltaik sistemler şebekede meydana gelen enerji kesintilerinin önüne geçerek doğaya CO₂ salınımını azaltabilir [2]. Dünya da 2000 yılından 2016 yılına kadar güneş enerjisinden elde edilen enerji 8 kat artmıştır [3]. Son yıllarda fotovoltaik teknolojinin kurulum maliyetlerinde önemli düşüşler olmuştur. Bu düşüşte kurulum prosedürlerinin optimizasyonu ve üretim süreçlerindeki gelişmeler etkili olmuştur [4].

Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bilgi İdaresi kuruluşu tarafından yayınlanan yıllık Enerji Görünümü, 2040 yılına kadar dünyanın enerji talebinin 2014 enerji durumuna göre % 50 artmasının beklendiğini belirtmektedir [6].

PV sistemleri ilk olarak kullanılmaya başlandığında enerji üretim değerleri oldukça düşüktü. Çünkü güneş panelleri sabit olarak konumlanmıştı. Günümüzde güneş enerji sistemlerinin verimlerini arttırmak için güneş panellerini güneşe en dik açı ile konumlandırarak elde edilen verimi arttırmak amaçlanmıştır [7]. Serbestlik derecelerine göre üç tür izleyici vardır: Sabit, tek eksenli ve çift eksenli sistemler. Ayrıca kontrol birimlerine bağlı olarak aktif ve pasif sistemlere ayrılırlar.

Güneşin ışınımının enerjisi ve yönü, dünyanın dönüşü ve atmosferik bileşimi nedeniyle sürekli değişir. PV modülleri, sabitlenmiş montajlı olarak yalnızca güneş tarafından yayılan radyasyon enerjisinin bir kısmını elektrik enerjisine dönüştürebilir. Daha fazla enerji üretmek için, PV modülleri güneşe doğru yönelim sağlamalıdır. Geliş açısı ve radyasyon yoğunluğu sabit kaldığında, sonuç olarak enerji sabit kalır. Bu amaçla, bir güneş izleme sistemi kullanmak gereklidir. Bu sadece güneş ışığından verimli bir şekilde yararlanmayı mümkün kılmakla kalmaz, aynı zamanda difüzör radyasyonundan da yararlanmayı mümkün kılar, bu da güneş enerjisi üretiminde % 30-50 artışa neden olur [8].

Güneş takip doğruluğu, aktif izleme sistemi ile iyileştirilebilir. Sistem, güneş panelini güneşin hareketine göre bir dizi kontrol ünitesi tarafından kontrol edilen bir motor veya hidrolik hareketlendiriciden geçirir. Bu sistem, açık ve kapalı döngüler olarak sınıflandırılabilir. Açık döngü, mikroişlemci tabanlı sistem, güneşin hareketini tahmin etmek için matematiksel formüller kullanır ve güneş ışığını algılamak için algılayıcılara ihtiyaç duymaz. Sistem, mevcut durumu (azimut ve irtifa açılarına göre güneşin konumu) ve geri bildirim ihtiyaçları olmadan algoritma setlerini (güneş ışığını algılayan algılayıcılar) gerektirir. Kapalı devre sisteme kıyasla basit ve düşük maliyetli bir yaklaşımdır. Genel olarak, güneşi izlemek için sisteme bir güneş ışınması geometri modeli yerleştirilmiştir. Açık döngü sistemiyle ilgili sorunlar arasında hata düzeltme özelliği vardır ve sistem, sistemdeki harici bozuklukları (kurulum ve çalıştırma sırasında yanlış hizalama) telafi edemeyebilir [9].

Bir diğer önemli özellikleri, kurulumdan sonraki işletme ve bakım maliyetlerinin az olmasıdır. Fotovoltaik panellerin birçok avantajına karşılık, bu sistemlerin ilk kurulum maliyetlerinin yüksek olması özellikle küçük kullanıcıların bu yatırıma uzak durmasının sebeplerindedir. Ayrıca panel verimlerinin ilk kullanımlarda %20-30'ler civarında olması ve geçen yıllar boyunca verimin düşmesi sebebi ile de maliyetlerini amorti edebilme süreleri de oldukça uzundur. Bu sebeple fotovoltaik panellerden etkili bir şekilde faydalanabilmek için kullanım amacına ve kurulacak alana uygun bir sistem seçimi yapmak son derece önemli olmaktadır. Özellikle ülkemizde kurulum maliyetini düşük tutabilmek adına sabit sistemler tercih edilmektedir. Halbuki yatırım miktarını biraz arttırarak takip mekanizmasına sahip sistemler sayesinde elde edilecek verimi fark yaratacak şekilde yukarıya taşımak

mümkündür. Ancak takip sistemi uygulaması yapılır iken tek eksen veya iki eksenli sistemler arasında bulunan maliyet ve verim oranları da dikkatli bir şekilde araştırılmalıdır. Fotovoltaik paneller sabit yerleştirildiği uygulamalarda panellerden elde edilen enerji miktarı, güneşin doğuş ve batış saatlerinde düşük olmaktadır. Bu olumsuzluğun önüne geçebilmek için tek eksenli, çift eksenli, güneş odaklamalı sistemler gibi güneşi izleyebilen sistemler son yıllarda popüler çalışma alanları haline gelmiştir.

Mostefa G. [10] sabit bir fotovoltaik sistem ile çift eksenli takip sistemini sıradan bir aydınlatma ile test ederek sistemler arasındaki verimi incelenmiştir. Işık kaynağının değişik konumlar ile test edilmesi ile birlikte takip sisteminin motorlarının harcadığı enerji dikkate alınmadığı durumda %69' a varan bir enerji üretim farkı olmuştur. Ancak üretim farkı tüm harcamalar dikkate alındığında %32 oranında belirlenmiştir. Taher M. ve ark. [11] yaptıkları çalışmada sabit, tek eksen ve çift eksen sistemlerin enerji üretim değerlerini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada hem kış hem yaz aylarında sonuçlar ayrı ayrı ele alınmıştır. Çalışmanın yapıldığı coğrafi bölgeye göre değişik açılarda konumlandırmanın yapıldığı çalışmada kış aylarında %30 yaz aylarında %44'e varan bir üretim farkı ortaya çıkmıştır. Sebastijan S. [12] ve ark. Slovenya da yaptıkları çalışmada sabit fotovoltaik sistem ile iki eksenli güneş takip sistemlerinin enerji üretim değerlerini karşılaştırmışlardır. İki eksenli takip sistemini dişi sistemler ile konumlandırılan sistemlerde iki eksenli takip sistemi, sabit sisteme göre %27 oranında fazla üretim yaptığını ortaya koymuşlardır.

M Sidek [13] ve ark. Hassas yükselme açlarına sahip iki eksenli takip sistemi ile gerçekleştirdikleri çalışmada 1 yıl boyunca elde ettikleri sonuçları incelemişlerdir. Bu çalışma sonucunda kapalı bir havada iki eksenli takip sistemi %12 oranında verim farkı elde ederken açık günde maksimum %26 oranında enerji farkı elde etmiştir. Emmanuel M.; [14] ve ark. Botswana da birçok solar takip sistemi üzerinde çalışma yapmışlardır. Tek eksenli, doğu-batı eksenli, güney doğu eksenli, iki eksenli takip sistemlerini fiziki anlamda uygulamasını yapmışlardır. Bu çalışma sonucunda en çok verim alınan montaj teknolojisi %33-43 arasında değişen oranlar ile iki eksenli takip sistemi olmuştur. P.M. Rodrigo [15] büyük solar takip sistemleri yaptığı çalışmada panel sistemlerinin birbirlerini gölgeme durumlarını ve yerleşim özelliklerini incelemiştir. Bu araştırma sonucunda yapılan iyileştirmeler ile panel etkinliklerinin %24, kablolu maliyetlerinin %7 oranında azalabileceğini ortaya koymuştur. P.A. Hohne [16] ve ark. şebeke bağlantılı hibrid sistemlerde kullanılmak üzere iki eksenli takip sistemlerini farklı senaryolar da inceleyerek yatırım ve geri dönüş kazanımlarını incelemişlerdir. Bir sağlık kuruluşunda enerji depolama ihtiyaçları da göz önünde bulundurularak yapılan çalışmada iki eksenli takip sistemleri ile birlikte akü sistemlerinin kullanılması sayesinde %32'lik bir enerji artışına imkan vereceği sonucuna ulaşmışlardır. Woradej M. [17] ve ark. Tayland'da iki eksenli takip sisteminin 2 ve 4 kenarına sırası ile yansıtıcı aynalar ekleyerek, solar sisteme olan etkilerini incelemiştir. Çalışma sonunda 2 yansıtıcılı solar sistem %13, 4 yansıtıcılı solar sistemin %16 yansıtıcı olmayan iki eksenli takip sistemine oranla verimli olduğunu bilgisine ulaşmışlardır.

M. Hoffmann [18] ve ark. Brezilya'da gerçekleştirdikleri çalışmada 152 gün boyunca aylık periyotlar halinde iki eksenli solar takip sisteminin verim analizini yapmışlardır. Çalışma süresinin %40'ı kapalı hava şartlarına sahip olmuştur. Yaklaşık 6 ay boyunca yapılan çalışma sonunda kış aylarında %17 yaz aylarında %31'lik verim farkı elde edilmiş olup. Toplam verim ortalaması %23 olarak ortaya çıkmıştır. F.A.Khalil [19] ve arkadaşları İran'da yaptıkları çalışma ile farklı izleme senaryoları ile sabit sistemleri birbirileri ile olan verim ve enerji kayıplarını ortaya koymuşlardır. İncelenen sistemleri arasında iki eksenli izleme sistemi, dikey izleme sistemi, şebeke bağlantılı sistemler bulunmaktadır. Çalışma sonunda %32 oranı ile iki eksenli takip sistemi en çok verim elde sistem olmuştur. Mehmet D. ve ark. [20] hava kurutucu sistemleri plc ve takip sistemi ekleyerek etkinlikte meydana gelen değişimleri incelemişlerdir. İki eksenli takip sistemini hava kurutucu sistem ile birleştirerek plc destekli olan sistem sabit solar sisteme göre %42-52 değerleri arasında fark meydana getirmiştir. Laurie B.[21] ve ark. yüksek albedo değerine sahip ortamda gerçekleştirdikleri çalışmada, iki eksenli güneş takip sisteminin bir bölümüne fotovoltaik panelleri düz bir şekilde, diğer bölümünü panelleri ters bir şekilde yerleştirmişlerdir. Işığı yansıtma değer olarak bilinen albedo değeri karlı bölgelerde maksimum seviyede olduğu için ışığın büyük bir bölümünü geri yansıttığı için olumsuz etki göstermektedir. Laurie B. ve ark. tek yüzlü güneş takip sisteminin normal sisteme oranla %41 daha fazla verim getirisinde bulunacaklarını belirtmişlerdir. Aynı çalışmada sabit tek yüzlü sistemin standart sisteme oranla %14

daha fazla kazanımı olduklarını ifade etmişlerdir. Sidharth M. [22] ve ark. prototip olarak hazırladıkları sistemde bir adet iki eksenli takip sistemi ile bir adet sabit sistemi mukayese etmişlerdir. Takip sistemlerinin harcadıkları enerjiyi minimize etmek için belirli periyotlar da takip adımı gerçekleştiren sistem hazırlamışlardır. Bu çalışma sonucunda iki eksenli takip sistemi sabit sisteme oranla %37 daha fazla çıkış gerilimi elde etmişlerdir.

Iswadi H.[23] ve ark. hareket gücünün servo motorlar ile sağlandığı güneş takip sistemi çalışmasında; sistemlerini sabit eksenli fotovoltaik sistem ile kıyaslamış ve çalışma sonucunda %61,84 oranında kazanç sağlamışlardır. Hussain M. F [24] ve ark. bulunan konumun bulutlanma durumunu dikkate alarak hazırladıkları çalışmada sabit sistem, tek eksenli takip sistemi ve iki eksenli takip sistemini bir arada incelemişlerdir. Bu çalışma sonucunda tek eksenli takip sistemi %32.2, iki eksenli takip sistemi %36.8 oranında verim elde etmiştir. Bulutlanmanın ise %3.44 oranında kayıp oluşturduklarını bildirmişlerdir. Youcef B. [25] ve ark. Cezayir’de yaptıkları çalışmada dişli sistemler ile hareket kabiliyeti kazandırdıkları iki eksenli takip sistemlerini, sabit fotovoltaik sistem ile verim olarak kıyaslamışlardır. Bu çalışma sonucunda iki eksenli takip sistemi %20 oranında daha fazla verim elde ettiği bildirilmiştir. Flores Hernández ve ark. [26] mekanik olarak farklı bir tasarım kullandıkları iki eksenli takip sistemini, sistem dışarısında bulunan ve güneş konumunu belirleyen alıcı sistem ile kontrol etmişlerdir. Meksika’da yaptıkları çalışma sonucunda %32’ye varan enerji kazanımını rapor etmişlerdir. Jie Sun [27] ve ark. sıcak su sağlamak için parabolik sistem araştırması yaptıkları çalışmada, ayna sistemini iki eksenli takip sistemi ile birleştirmişlerdir. Bu çalışma sonrasında %68 ısı kazancı ve toplama verimi ise % 17-18 olarak bildirilmiştir. Hassan F. [28] iki adet güneş takip sistemi tasarlamıştır. Bu sistemlerin bir tanesi sensör içermeyen diğeri ise sensör içeren yapıdadır. Algılayıcı içeren iki eksenli takip sistemi, 4 farklı mevsimde sırasıyla 27.7%, 32.5%, 37.3%, 42.7% sensör içermeyen iki eksenli takip sistemi ise 19.1%, 22.4%,26.1%, 30.2% değerlere ulaşmıştır.

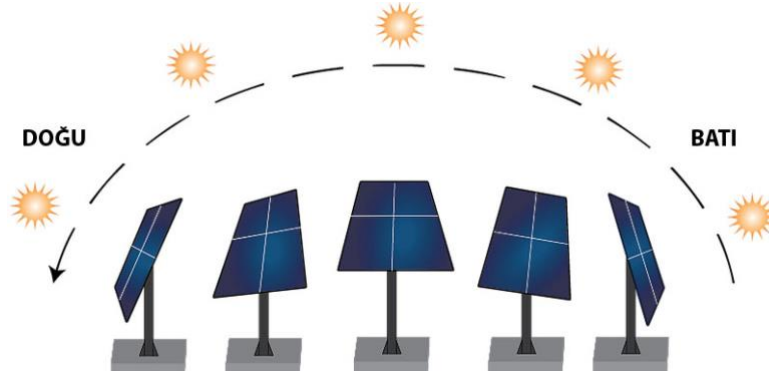
Ahmad I. B. I. [29] ve ark. prototip olarak gerçekleştirdikleri ve dişli sistemler ile çalışan iki eksenli takip sistemi sabit fotovoltaik sisteme oranla %20 fazla verim elde etmiştir. Paweł O. [30] ve ark. soğutma sistemlerinin güneş takip sistemleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu çalışma sonucunda solar panellerinin soğutulması durumunda takip sistemlerinin %1 daha fazla enerji verimi elde edebileceği sonucuna varmışlardır. Hyuna K.[31] ve ark. takip sistemi tasarımında hava durumunun önceden tespit edilmesinin etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmaya göre özellikler bulutlu havalarda takip sisteminin minimum izleme sistemi sayesinde %24.88 oranında net verim elde edebileceğini bildirmişlerdir. Yönetken A. ve ark.[32] yaptıkları çalışmada aynı teknik özelliklere sahip 3 adet güneş paneli üzerine 3 farklı tip algılayıcı yerleştirmiştir. Elde edilen verilere göre güneş panellerinin sabit ve 2 eksenli hareketli konumda toplam üretimleri karşılaştırıldığında hareketli konumun sabit konuma göre; ışık sensörlü sistemde %36,68 oranında, smd sensörlü sistemde %38,42 ve ışığa duyarlı dirençli sistemde %43,58 oranında artış görülmüştür.

Bu çalışmada iki eksenli takip sistemi ile sabit fotovoltaik sistemin enerji verim değerleri karşılaştırılarak birbirlerine olan avantaj ve dezavantajları göz önüne koyulacaktır. Türkiye’de bulunan Karadeniz bölgesinde takip sistemlerinin çok fazla kullanılmaması sebebi ile bu konu üzerinde durulmuş ve detaylı bir çalışma yapılmıştır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Bir güneş izleme sistemi, güneşin konumunu izler ve güneş fotovoltaik modüllerini en iyi güç çıkışını üreten bir açıda tutar. Güneşi verimli bir şekilde izlemek için farklı güneş izleme ilkeleri bulunmaktadır. Bir güneş izleme sistemi tasarlanmanın arkasındaki fikir, fotovoltaik modüllerini maksimum güneş ışığını yakalamak için güneşin hareketini gökyüzünde izleyebilecek bir konuma yerleştirmektir. İzleme sistemi, elektrik enerjisi çıkışını en üst düzeye çıkarmak için en iyi geliş açısını alabilecek bir konuma yerleştirilmelidir. Günlük ortalama güneş ışınımı dünya çapında 4 – 7 kilo-Watt-Saat (KWh / m²) arasında değişmektedir. Bu yüksek miktardaki günlük güneş ışını, su pompalama, telekomünikasyon ve aydınlatma gibi elektrik üretimi için pek çok uygulamada güneş enerjisinin kullanılmasına yol açmıştır.

Güneş ışınımı aylara, günün saatine, hava koşullarına, coğrafi bölgeye ve güneşin gökyüzündeki konumuna göre değişir. Çift eksenli izleme sistemleri, doğu-batı ve kuzey-güney olmak üzere iki eksenle güneşin yörüngesini takip eder. İzleme sistemlerini ve tahrik trenlerini kontrol etmek için, kapalı döngü ve açık döngü kontrol sistemleri kullanılabilir. Kapalı-döngü kontrol sistemleri, konumu belirleyen foto sensörleri kullanır. Açık döngü kontrol sistemleri havanın bulutlu olma durumuna karşılık güneşin konumunu matematiksel bir algorithmadan alır ve güneş panelini konumlandırır. Bulutlu havalarda kapalı döngü sistemler fazla hareket edeceği için aşırı enerji tüketimine sebep olur. Bu sorunu gidermek için hibrit sistemler kullanılır. Türüne bakılmaksızın izleme sistemi, uzun ömür, minimum ile güvenilir çalışma bakım ve dolayısıyla düşük işletme maliyetleri gereklidir.



Şekil 1. Güneş takip sistemi.[33]

Yapılan çalışmada 2 adet solar sistemin birbirilerine olan farklılıkları ortaya koyulmuştur. Sistemlerden ilki 260 watt güneş paneline sahip sabit eksenli güneş enerji sistemidir. Bu sistem için 1 adet 260 watt güç üretebilen polikristal yapıda güneş paneli kullanılmıştır. Paneli teknik özellikleri Tablo 1. de verilmiştir.

Tablo 1. Güneş teknik panel özellikleri.

Maksimum Güç (P_{max})	260Wp
Modül Verimliliği	15,86
Maksimum Güç Gerilimi (V_{mp})	30,4
Maksimum Güç Akımı (I_{mp})	8,56
Açık Devre Gerilimi (V_{oc})	37,3
Kısa Devre Akımı (I_{sc})	9,04
Çalışma Sıcaklık Aralığı	-40~+ 85°C
Maks. Seri Sigorta Akımı	15A

Tablo 2. Güneş paneli mekanik özellikleri.

Hücre Boyutu	156,75 mm x 156,75 mm
Hücre Sayısı	60 (6X10)
Ağırlık	18 kg
Panel Boyutu	1648x995x35mm
Maks. Rüzgar/Kar Yüğü Dayanımı	2400/5400 Pa
Bağlantı Kutusu	IP67

Sabit eksenli güneş enerji sistemi için panel 30° ile montajı yapılan mekanik sisteme sabitlenmiştir. Panel çıkışına 1 adet 24 V. akü ile birlikte 1 adet 24 V. Tommatech marka New 3K model inverter bağlanmıştır. Kullanılan inverter panel üretim değerlerini zamansal olarak saklayabilmesi için akıllı inverter olarak bilinen üründen tercih edilmiştir. Bu sayede yıl boyunca üretilen enerji değerleri kaydedilmiştir. Kurulu montaj hali Şekil 2. ve 3. de verilmiştir.



Şekil 2. Sabit eksenli güneş enerji sistemi.

Çalışmada kullanılan diğer sistem 2 eksenli güneş enerji sistemidir. Bu sistemde Tablo 1. de özellikleri verilen güneş paneli kullanılmıştır. İki eksenli güneş takip sistemi güneşi takip ederken pasif takip sistemi esasına dayanmaktadır. Mekanik sistem üzerinde bulunan 4 adet ışığa bağımlı direnç sayesinde ışık bilgisini almakta ve bu değerleri kıyaslayarak ufuk açısı ve yükseklik konumunda hareketi sağlamaktadır. İki eksenli takip sistemlerinde panel konumlandırmalarının yapılabilmesi için genellikle dişli sistemler kullanılmasına rağmen çalışma yapılan sistemde 2 adet lineer hareketlendirici kullanılmıştır. Sistemde kullanılan lineer hareketlendiricinin teknik özellikleri Tablo 3.de verilmiştir.

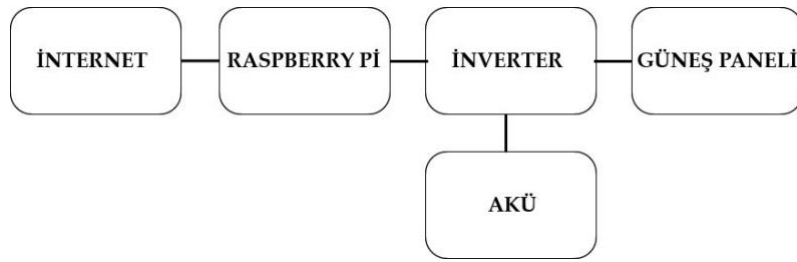
Tablo 3. Lineer aktüatör özellikleri.

Dinamik Yük Kapasitesi (itme) N	6000
Dinamik Yük Kapasitesi (çekme) N	4000
Statik Yük Kapasitesi (itme) N	6000
Statik Yük Kapasitesi (çekme) N	4000
Giriş Voltajı	24
Tam Yükte Hızı	3
Strok Ölçüsü	500
Limit Anahtarı	Var
Aşırı Yük Koruması	Var
IP Sınıfı	IP66
Çalışma Sıcaklığı	+5°C ~ +40°C

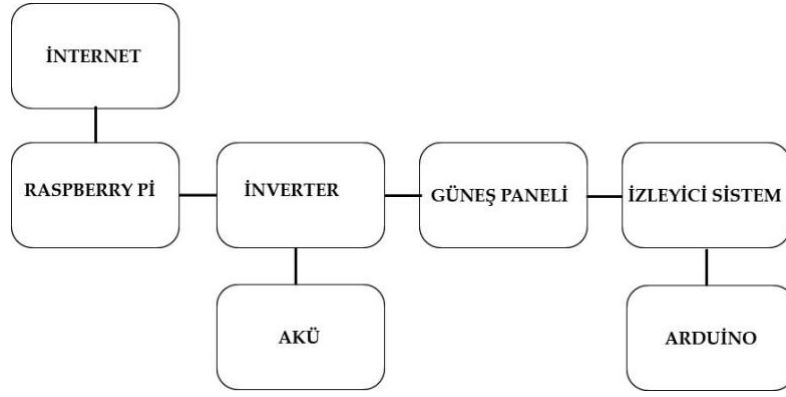


Şekil 3. İki eksenli güneş takip sistemi.

Mekaniksel kurulumları yapılan güneş enerji sistemlerinden üretilen enerji verisini elde edilmesi, sistemde kullanılacak akıllı inverterler aracılığı ile yapılacaktır. Sabit eksenli güneş enerji sisteminde panel çıkışı akıllı invertere bağlanırken, iki eksenli takip sisteminde bu bağlantıya ek olarak ve raspberry pi programlama kartı kullanılacaktır. Güneş konumunu takip için, arduino programlama kartı ile 4 adet LDR sensör kullanılmaktadır. Takip sistemlerinde güneşten enerji elde edilirken, takip mekanizması için ne kadar enerji harcanacağı önem taşımaktadır. LDR'lerin ne kadar zaman ara ile kıyaslama yaptığı ve kıyaslama sonucunda motorların ne kadar süre ile hareket ettiği önemlidir. Çok sık kıyaslama yapılması durumunda sensörlerin çok hassas olmaması durumunda motorlar ileri ve geri hareket yapabilir veya yaptıkları çok küçük hareket elde edilen enerjiye karşılık gelmeyebilir. Bu sorunun önüne geçmek için sensörlerden gelen verileri 15 dk. ara ile kıyaslama yapılmıştır. Bu süre güneşin yer değiştirmesi ve enerji üretimi için optimum süre olduğu yapılan çalışma sonucunda görülmüştür. Takip mekanizmasının gün sonunda başlangıç noktasına gelmesi ve gün battıktan sonra sürekli olarak çalışmasının önüne geçmesi için arduino ile birlikte kullanılan saat modülü entegre edilmiştir. Bu modül sayesinde saat bilgisine bakılarak istenen saatlerin dışında çalışılmasının önüne geçilmiştir. Kullanılan lineer aktüatör içerisinde barındırdığı limit anahtarı sayesinde son kademeye geldikten sonra adım sinyali gelse bile akım çekmediği için herhangi bir enerji tüketimi söz konusu olmamaktadır. Bu sayede yaz ve kış günlerinde farklı saatlerde kararlı havaya karşı sistem yazılımında değişiklik yapmaya gerek duyulmamaktadır. Şekil 6. ve şekil 7. de sabit eksenli ile iki eksenli güneş takip sistemlerine ait blok diyagram görülmektedir.



Şekil 4. Sabit eksenli güneş enerji sistemi.



Şekil 5. Hareketli eksen güneş enerji sistemi.

Sabit eksenli sistem ve iki eksenli takip sisteminde yıl boyunca veri alabilmek için sistem tasarımına yazılım ile müdahale etmek gerekmiştir. Büyük çapta projelerde uzaktan izleme sistemleri kullanılmaktadır. Ancak sistemin yapısı itibari ile uzaktan izleme sistemlerinin maliyetli oluşu sebebiyle daha hesaplı bir çözüm kullanılmıştır. Her iki sistemde kullanılan akıllı inverterler teknik özellikleri sayesinde panellerin ürettiği enerjiyi kayıt altına almaktadır. İnverterlerin çıkışına bağlanan 24 v. aküler sayesinde enerji üretimi bitse dahi inverterler, arduino ve raspberry programlama kartları çalışmaya devam etmektedir. Çalışma süresince olabilecek teknik sorunlarda (bağlantı sorunları, şiddetli hava olayları, vb.) veri kayıtlarını güven altına alabilmek için raspberry programlama kartlarına Windows IOT işletim sistemi kurulmuştur. Akıllı inverterler ile birlikte gelen yazılım Windows işletim sistemine uygun olduğu için IOT cihazlar için üretilen sürüm kullanılmıştır. Güneş enerji sistemlerine bağlanan raspberry pi programlama kartları dahili wifi özelliğine sahip olduğu için inverter yazılımları tarafından verilerin belirli periyotları ile alınması ve indirilen dosyanın gün sonunda e-posta ile gönderilmesini sağlayan bir yazılım tasarlanmıştır.

Mevcut çalışma 1 yıl boyunca 2 tip güneş enerji sisteminin çalışmasından olmuştur. 1 yıl sonunda 2 sistemin de kümülatif enerji değeri üzerinden çıkarımda bulunulacaktır. Kümülatif enerji tüm yoğunluk değerlerinin belirli bir süre boyunca hesaplanmasından oluşur. Toplam enerji üretimi 1 yıl üzerinden hesaplanacaktır. Bu hesaplama yapılırken ana denklem;

$$E_{inc} = \int_{T_{SS}}^{T_{SR}} I_{inc} dt \quad (1)$$

Formülde A güneş panelinin yüzey alanı, T_{SS} ve T_{SR} güneşin doğuş ve batış zamanı, I_{inc} güneş enerji değeridir. Sabit eksenli güneş enerji sistemi için güneş ışıınımı şu şekilde ifade edilir.

$$I_{inc} = I * \cos\delta * \cos\theta \quad (2)$$

Formülde θ güneş ışığı ile panel arasındaki açıdır, δ eğim açısıdır, güneş ışığının geliş açısı günün saatine ve ayrıca mevsime göre değişiklik gösterdiği için formüle göre güneş ışıınımı da değişir. Çift Eksen için δ ve θ her ikisi de sıfırdır. Tek Eksen için δ Mevsimlere göre değişir ancak θ değişmez. Güneş ışıının teorik değeri;

$$I = I_0 * (0.7) AM^{0.678} \quad (3)$$

olarak ifade edilir. Burada $I_0 = 1367 \text{ W / m}^2$ atmosfer dışındaki uzaydaki güneş ışıınımıdır ve $AM = \csc(\alpha)$, yeryüzü üzerindeki güneş ışığının yükselme açısının (α) bir fonksiyonu olan ve irtifa olarak da bilinen hava kütlelidir. Herhangi bir zamanda güneş ışığının geliş açısı aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanabilir.

$$\alpha = \sin^{-1}(\sin\delta\sin\gamma + \cos\delta\cos\gamma\cos\omega) \quad (4)$$

Burada φ enlemdir ve δ eğim açısıdır.

$$\delta = 23.45^0 \sin \left\{ \frac{360}{365} (n + 284) \right\} \quad (5)$$

Burada n = yılın n . günü (yani 1 Ocak $n = 1$ anlamına gelir). ω saat açısıdır ve gün doğuşundan gün batımına kadar gün içinde geçen saat sayısını derece olarak ifade eder ve aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\omega = \omega_s - 15 (t - T_{sr}) \quad (6)$$

t , 24 dilimine göre günün saatidir, ω_s verilen gün doğumu açısıdır.

$$\omega_s = \cos^{-1} (-\tan \varphi \tan \delta) \quad (7)$$

Bulutlanma güneş enerji sistemlerinde çözümü olmayan doğal bir sorundur. Bulutun varlığı, güneş enerji verimliliğini olumsuz yönde etkiler. Bulut, güneşten gelen radyasyonun önemli bir kısmının dünya yüzeyine ulaşmasını engeller. Güneşte güneşlenme, belli bir zaman penceresinde belirli bir yatay yüzey tarafından alınan ve görünüşe göre güneşin yüksekliğine ve bulutun örtüsüne bağlı olan güneşin radyasyon enerjisinin ölçüsüdür. Yapılan çalışma Karadeniz Bölgesinde olduğu ve Karadeniz Bölgesinin bulutlanma etkisi fazla olduğu için, güneşli günlerde ve bulutlu günlerde enerji miktarını yaklaşık olarak hesaplamak gerekir. Tamamen bulutlu bir günde alınan enerji, tamamen güneşli olan bir gündeki enerjinin yaklaşık %20-%30 arasına karşılık gelir. Bununla ilgili matematiksel formül aşağıda verilmiştir:

$$E_{güneş} = \int_{TSR}^{TSS} (I \sin \alpha + 0.1I) dx \quad (8)$$

$$E_{bulut} = \int_{TSR}^{TSS} 0.2 I dx \quad (9)$$

Diğer adım yaklaşık güneşli ve bulutlu gün sayısını bulmaktır.

$$E_{toplam} = x * E_{güneş} + y * E_{bulut} \quad (10)$$

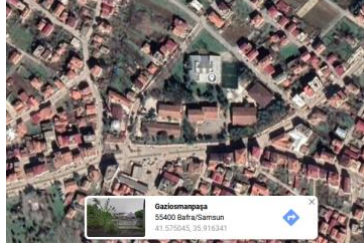
$$x + y = Toplam \text{ istenen aylar} \quad (11)$$

Tüm bu denklemlerden yola çıkarak aşağıdaki formül ile bulutlu ve güneşli günlerden üretilen toplam enerji bulunmaktadır.

$$E_{toplam} = Toplam \text{ Gün} \text{ İstenen Ay} * E_{güneş} \quad (12)$$

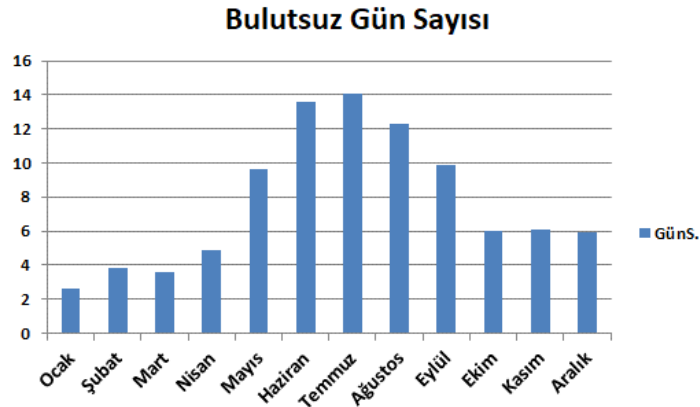
III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma Samsun ili Bafra ilçesi Bafra Meslek ve Teknik Anadolu Lisesi'nde gerçekleştirilmiştir. Çalışma 01.01.2020 – 01.01.2021 tarihleri arasında gerçekleştirilmiştir. Bu tarihler arasında toplamda 14 gün boyunca teknik sorunlar sebebiyle enerji üretimi durmuştur. Ancak iklim özelliklerine göre bir önceki ve sonraki gün verisinin ortalaması alınmıştır.



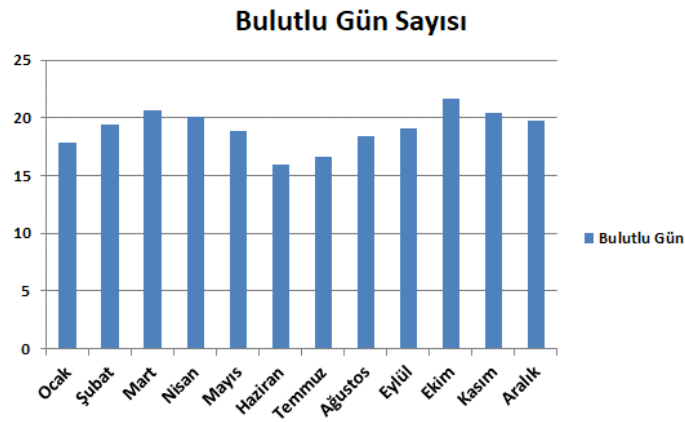
Şekil 6. Çalışma alanı coğrafi özellikleri.

Çalışma süresince güneş enerji sistemlerinin bulunduğu konuma ait iklim olayları grafikler ile gösterilmiştir. Çalışma yapılan yıl boyunca çalışma konumu için toplamda 92 gün bulutsuz olarak tespit edilmiştir. İlgili grafik Şekil 9. da verilmiştir.



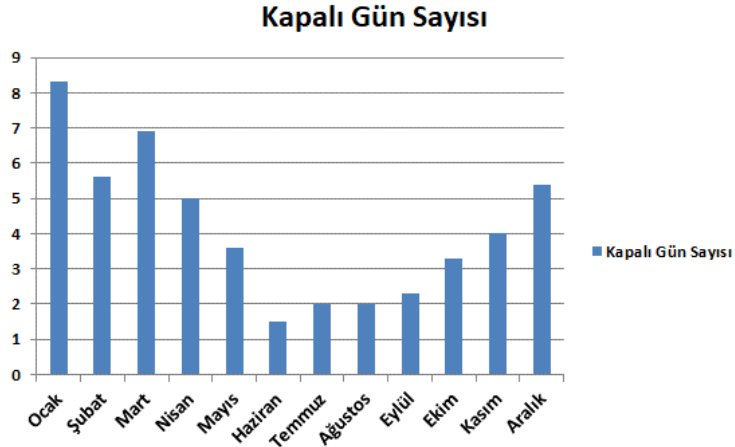
Şekil 7. Bulutsuz gün sayısı.

Çalışma süresi boyunca toplam 228 gün bulutlu olarak kayıt edilmiştir.



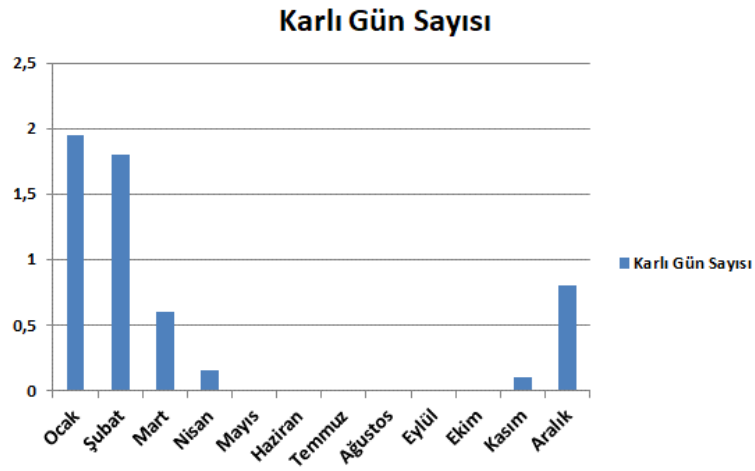
Şekil 8. Bulutlu gün sayısı.

Yapılan çalışma süresince enerji üretiminin en düşük olduğu ve gökyüzünün tamamen kapalı olduğu gün sayısı 44 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 9. Kapalı gün sayısı.

2020-2021 tarihleri arasında çalışma yapılan konumda şiddeti değişken olmak ile birlikte 7 gün kar yağışlı olarak tespit edilmiştir.



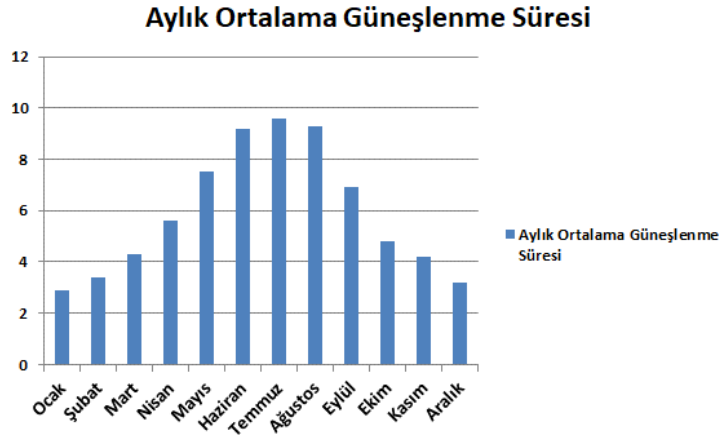
Şekil 10. Kar yağışlı gün sayısı.

Çalışmanın yapıldığı konumda sistemin kurulu olduğu alanda toplamda 8 kar ile kaplı olarak ölçülmüştür. Ancak İkili eksenli takip sistemi mevcut hareketi itibari ile kar ile önemli ölçüde kaplanmamıştır. Ancak sabit eksenli sistem üzerinde daha fazla kar bulunması söz konusu olmuştur.



Şekil 11. Karla örtülü gün sayısı.

Türkiye’de yıllık ortalama güneşlenme süresi 7,2 iken çalışma yapılan konumda yıllık ortalama güneşlenme süresi 5,9 dur.



Şekil 12. Aylık ortalama güneşlenme süresi.

Sıcaklık ortalaması en düşük Ocak ayında 6,1, en yüksek Temmuz ayında 23,6 ve yıllık ortalaması 14,6 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 13. Aylık ortalama sıcaklık süresi.

Çalışmada kurulumları yapılan sabit eksenli ve hareketli eksen güneş enerji sistemleri 1 yıl süresince gölge, rüzgâr gibi hava olaylarından en az etkileneceği konuma montajları yapılmıştır. Panellerden üretilen enerji akıllı inverterler sayesinde saatlik dilimler ile kayıt altına alınmaktadır. Akıllı inverterler sistem enerjisi kesildiğinde kayıt ettikleri verileri saklama özellikleri olmadığı için herhangi bir sebeple enerji üretimi kesintiye uğrasa dahi akü sayesinde bir süre daha çalışmaya devam etmektedir. Sistem verilerinin sağlıklı alınabilmesi için akıllı inverter ile eşleştirilen raspberry pi programlama kartı sayesinde verilerin düzenli periyotlar ile kayıt altına alınması amaçlanmıştır. Akıllı inverter yazılımı sadece Windows işletim sistemi ile çalıştığı için raspberry pi programlama kartına IOT cihazlar için üretilen Windows Iot işletim sistemi kurulmuştur. Akıllı inverter yazılımının Windows Iot işletim sistemine kurulumu ile panel verilerinin kayıt altına alınması sağlanmıştır. Tek eksenli güneş enerji sisteminde en düşük enerji üretimi 13,42 kWh ile ocak ayında en yüksek enerji üretimi 36,25 kWh ile temmuz ayında gerçekleşmiştir. Yıllık toplam enerji üretimi ise 303,93 kWh olarak ölçülmüştür. Sabit eksenli güneş enerji sistemine ait enerji verileri Tablo 4. de verilmiştir.

Tablo 4. Sabit eksenli sistem enerji verileri.

Aylar(2020)	Enerji(kWh)
Ocak	13,47
Şubat	15,86
Mart	23,11
Nisan	28,53
Mayıs	32,45
Haziran	34,36
Temmuz	36,25
Ağustos	35,78
Eylül	29,47
Ekim	20,68
Kasım	17,35
Aralık	16,62

İki eksenli takip sistemine ait veriler Tablo 5. de gösterilmiştir. İki eksenli takip sistemi en düşük enerji üretimini 18,72 kWh ile 2020 yılı ocak ayında en yüksek enerji üretimini 51,27 kWh temmuz ayında gerçekleştirmiştir. 399,51 kWh olarak ölçülmüştür.

Tablo 5. İki eksenli sistem enerji verileri.

Aylar(2020)	Enerji(kWh)
Ocak	18,72
Şubat	20,18
Mart	27,53
Nisan	36,4
Mayıs	42,47
Haziran	48,21
Temmuz	51,27
Ağustos	49,68
Eylül	37,2
Ekim	25,74
Kasım	22,58
Aralık	19,53

Elde edilen verilerin ışığında Tablo 4. ile Tablo 5. kıyaslandığında en yüksek enerji farkının temmuz ayında %41,43 olduğu, en az farkın ise aralık ayında %17,50 olduğu görülmektedir. Anlık bulutlanma

gibi hava olayları sebebiyle aylara bağılı olarak düzenli bir artış veya azalışın olamayacağı sistemin yıllık enerji üretim ortalaması ise 31,4 olarak tespit edilmiştir.

IV. SONUC

Mevcut çalışma Samsun ili Bafra ilçesinde 1 Ocak 2020 ile 31 Aralık 2021 tarihleri arasında yapılmıştır. Çalışmada 1 adet 260 watt güneş paneli sabit eksenli olarak, 1 adet 260 watt güneş paneli ise iki eksenli çalışacak şekilde kurulmuştur. Bu çalışmanın amacı, bir kullanıcının güneş enerji sistemi yatırımı planlarken takip sistemi ile sabit sistem arasındaki maliyet farkını görebilmesi ve yapılan yatırımı geri kazandırma süresi hakkında bilgi vermesidir. Bu sebeple, sistemler yerleşim yerinden uzak ve yüksek bir konuma kurulmak yerine yerleşim yeri içerisinde bulunan bir konuma kurulmuştur. Sistemler bir okul bahçesi içerisine kurulduğu için yakın konumda herhangi bir yüksek yapının gölgelemesine maruz kalmamıştır. Her iki sistemde bir yıllık araştırma sonunda İki eksenli güneş enerji sisteminin tek eksenli güneş enerji sistemine enerji üretim farkı %31,4 olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmada panel başına düşen enerji üretim değerleri ortaya koyulmuştur. İki eksenli takip sisteminin hareket sağlamak amacıyla kullanılan lineer hareketlendiriciler, üretilen enerjiden %8 - %12 arasında enerji kullanımı gerçekleşmiştir. İki eksenli takip sisteminin verilen enerji değerleri kayıplar dışında oluşan net değerlerdir. İki eksenli takip sisteminde araştırma amacıyla 1 adet güneş paneli kullanılmasına karşılık mevcut lineer hareketlendiriciler özellik bakımından doğru bir mekanik sistem ile 4 adet güneş panelini taşıyabilecek yapıdadır. Bu sayede daha fazla akım çekmesine karşılık yatırımın geri dönüş süresini oldukça geri çekebilecektir. Çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilmektedir.

- Ülkemizde yaygın şekilde kullanılan sabit güneş enerji sistemlerine karşılık iki eksenli takip sistemlerinin kullanılmasının avantajlı ve gerekli olduğu görülmüştür.
- Bugüne kadar takip sistemlerine kullanılan dişli sistemlerinde bakım sorunlarına karşılık lineer hareketlendiricilerin çok daha kolay kurulum sahip ve minimum bakıma ihtiyaç olduğu görülmüştür.
- Teknolojinin gelişmesi ile birlikte arduino ve raspberry pi programlama kartları sayesinde karmaşık sürücü sistemlerine ihtiyaç duyulmadan amatör kullanıcıların bile bu gibi sistemlerin kurulumlarını yapabileceği görülmüştür.
- Büyük sistemlerde yüksek fiyatlı uzaktan izleme sistemlerine alternatif olarak yazılım desteği sayesinde akıllı inverterler ile birlikte üretim değerlerinin takip edilebileceği denenmiştir.
- Dengeli bir mekanik sistem ile tek bir takip sisteminde 4 adete kadar güneş panelinin matematiksel olarak kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır. (Çok rüzgâr alan bölgelerde ilave güçlendirmeler ile birlikte daha güçlü hareketlendiriciler gerekebilir)
- Çalışma süresince en çok hareket sağlayan hareketlendirici doğu – batı ekseninde çalışan olmuştur. Kuzey-güney yönünde çalışan hareketlendirici bulutlanma durumunda devreye girmiştir. Kimi zaman ışık yansımaları ile hata üreten algılayıcılardan kaynaklanan bu hareket önemsenmeyecek kadar az olmuştur. Bundan hareketle ülkemizde iki eksenli takip sistemlerinin kullanılmasının avantaj sağlayabileceği sonucu ile birlikte tek eksenli takip sistemlerinin maliyet açısından daha uygun olabileceği sonucu ortaya koyulabilmektedir.
- Tek eksenli takip sistemlerinin çatı tipi sistemlerde zemine yakın ardışık olarak kurulması ile rüzgârdan daha az etkilenmesi sağlanarak güvenlik konusunda avantaj sağlanabilmektedir.

TEŞEKKÜR: Bu çalışma Ordu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir (Proje no: B-1833).

V. KAYNAKLAR

- [1] H. Allamehzadeh, "Solar Energy Overview And Maximizing Power Output Of A Solar Array Using Sun Trackers," *2016 IEEE Conference on Technologies for Sustainability*, pp. 14-19, 2016.
- [2] M. A. V. Rad, A. Tooshekan, P. Rahdan, A. Kasaeian and O. Mahian, "A comprehensive study of techno-economic and environmental features of different solar tracking systems for residential photovoltaic installations," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 129, 2020.
- [3] N. A. Rousan, N. A. M. Isa and M. K. M. Desa, "Advances in solar photovoltaic tracking systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* vol. 82, pp. 2548–2569, 2018.
- [4] D.L. Talavera, E. M.Ceron, J.P. F.Rodríguez and P. J. P.Higuera, "Assessment of cost-competitiveness and profitability of fixed and tracking photovoltaic systems: The case of five specific sites," *Renewable Energy* vol. 134, pp. 902-913, 2019.
- [5] L. Dong, T. Xing, J. Song and A. Yousefi, "Performance analysis of a novel hybrid solar photovoltaic - pumped-hydro and compressed-air storage system in different climatic zones," *Journal of Energy Storage* , vol. 35, 102293, 2021.
- [6] R. Sharma, S. Singh, K. S. Mehra and R. Kumar, "Performance enhancement of solar photovoltaic system using different cooling techniques," *Materials Today*, 2021.
- [7] M. Abdollahpour, M. R. Golzarian, A. Rohani and H. A. Zarchi, "Development of a machine vision dual-axis solar tracking system," *Solar Energy*, vol. 169, pp. 136-143, 2018.
- [8] M. A. Jallal, C. Samira and A. Zeroual, "A novel deep neural network based on randomly occurring distributed delayed PSO algorithm for monitoring the energy produced by four dual-axis solar trackers," *2nd International Conference on Sustainable Materials Processing and Manufacturing*, vol.35, pp. 1118-1196, 2019.
- [9] E. K. Mpodi, Z. Tjiparuro and O. Matsebe, "Review of dual axis solar tracking and development of its functional model," *2nd International Conference on Sustainable Materials Processing and Manufacturing*, vol. 35, pp. 580-588, 2019.
- [10] M. Ghassoul, "A dual solar tracking system based on a light to frequency converter using a microcontroller," *Fuel Communications*, vol. 6, 2021.
- [11] T. Maatallah, S. E. Alimi and S. Nasrallah, "Performance modeling and investigation of fixed, single and dual-axis tracking photovoltaic panel in Monastir city," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15 pp. 4053–4066, 2011.
- [12] S. Seme, G. Srpcic, D. Kavsek, S. Bozicnik, T. Letnik, Zdravko P, Z. Praunseis B. Stumberger and M. Hadziselimovic, "Dual-axis photovoltaic tracking systeme Design and experimental investigation," *Energy*, vol. 139, pp. 1267-1274, 2017.
- [13] M. Sidek, N. Azisa, W.Z.W. Hasana, M.Z.A. Ab Kadir, S. Shafie and M.A.M. Radzi, "Automated positioning dual-axis solar tracking system with precision elevation and azimuth angle control," *Energy*, vol. 124, pp. 160-170, 2017.
- [14] H. Fathabadi, "Novel high accurate sensorless dual-axis solar tracking system controlled by maximum power point tracking unit of photovoltaic systems," *Applied Energy*, vol. 173, pp. 448-459, 2016.
- [15] P.M. Rodrigo, "Balancing the shading impact in utility-scale dual-axis tracking concentrator photovoltaic power plants," *Energy*, vol. 210, 2020.

- [16] P.A. Hohne, K. Kusakana and B.P. Numbi, "Model validation and economic dispatch of a dual axis pv tracking system connected to energy storage with grid connection: A case of a healthcare institution in South Africa," *Journal of Energy Storage*, vol. 32, 2020.
- [17] W. Manosroi, P. Prompattra and P. Kerngburee. "Performance improvement of two-axis solar tracking system by using flat-mirror reflectors," *2020 7th International Conference on Power and Energy Systems Engineering (CPESE 2020)*, vol. 6, pp. 9–14, 2020.
- [18] F. M. Hoffmann, R. F. Molz, J. V. Kothe, E. O. Benitez and L. P. C. Tedesco, "Monthly profile analysis based on a two-axis solar tracker proposal for photovoltaic panels," *Renewable Energy*, vol. 115, pp. 750-759, 2018.
- [19] F. A. Khalil, M. Asif, S. Anwar, S. Haq and F. Illahi, "Solar Tracking Techniques and Implementation in Photovoltaic Power Plants," *A. Physical and Computational Sciences* vol. 54, no. 3, pp. 231-241.
- [20] M. Das and E. K. Akpınar, "Investigation of the effects of solar tracking system on performance of the solar air dryer," *Renewable Energy*, vol. 167, pp. 917-916, 2021.
- [21] L. Burnham, D. Riley, B. Walker and J. M. Pearce, "Performance Of Bifacial Photovoltaic Modules On A Dual-Axis Tracker In A High-Latitude, High-Albedo Environment," *2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2019.
- [22] S. Makhija, A. Khatwani, M. F. Khan, V. Goel and M. M. Roja, "Design & Implementation Of An Automated Dual-Axis Solar Tracker With Data-Logging," *International Conference on Inventive Systems and Control*, 2017.
- [23] H. R. Iswadi Jamarrintan A, Syukri D, Barri A, Nurhalim D A and Budhi A, "The Implementation and Analysis of Dual Axis Sun Tracker System to Increase Energy Gain of Solar Photovoltaic," *2018 2nd International Conference on Electrical Engineering and Informatics, (ICon EEI 2018)*, Batam - Indonesia, 16th-17th October 2018.
- [24] H. M. Fahad, A. Islam, M. Islam, Md. F. Hasan, W. F. Brishty and Md. M. Rahman, "Comparative Analysis of Dual and Single Axis Solar Tracking System Considering Cloud Cover", *2019 International Conference on Energy and Power Engineering*, 2019.
- [25] Y. Bekakra, L. Zellouma and H. Serhoud, "Design and Implementation of a Solar Tracker System with Dual Axis for Photovoltaic Panels in El Oued Region of Algeria", *1st International Conference on Sustainable Renewable Energy Systems and Applications*, 2019.
- [26] D.A. F. Hernández, S. P. Resendiz, N. L. Castillo, A. L. Juárez and I. Chairez, "Mechatronic design and implementation of a two axes sun tracking photovoltaic system driven by a robotic sensor," 2017.
- [27] J. Sun, R. Wang, H. Hon and Q. Liu, "An optimized tracking strategy for small-scale double-axis parabolic trough collector," *Applied Thermal Engineering*, vol. 112, pp. 1408-1420, 2017.
- [28] H. Fathabadi, "Comparative study between two novel sensorless and sensor based dual-axis solar trackers," *Solar Energy*, vol. 138, pp. 67-76, 2016.
- [29] A. I. B. Ibrahim, F. D. B. A. Rahman and M. b. Rohaizat, "Dual Axes Solar Tracker," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 8, pp. 1887-1892, 2018.
- [30] P. Oclon, P. Cisek, E. K. Jagiela, J. Taler, D. Taler, D. Skrzyniowska and M. F. Cisek, "Modeling and experimental validation and thermal performance assessment of a sun-tracked and cooled PVT system under low solar irradiation", *Energy Conversion and Management*, vol. 222, 2020.

[31] H. Kang, T. Hong and M. Lee, “Technical performance analysis of the smart solar photovoltaic blinds based on the solar tracking methods considering the climate factors”, *Energy & Buildings* , vol.190, pp. 34-48, 2019.

[32] A. Yönetken, T. Gürsoy,” Algılayıcı Türlerinin Güneş Takip Sisteminde Etkinliğinin Araştırılması”,*Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 25,112-119,2021.



[33] Anonim. (2020, 24 Mart) Clean Point Energy [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.cleanpointenergy.com/wp-content/uploads/2019/03/sTracker-illustration.png>



Düzce University Journal of Science & Technology

Research Article

Control potency of Trans-cinnamic acid and antifungal metabolites of *Xenorhabdus szentirmaii* against *Alternaria brassicicola*

 Barış GÜLCÜ^{a, *},  Nedim ALTIN^b

^aDepartment of Biology, Faculty of Arts and Sciences, Duzce University, Duzce, Türkiye

^bDepartment of Plant Protection, Faculty of Agriculture, Duzce University, Duzce, Türkiye

* Corresponding author: barisgulcu@duzce.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1233579

ABSTRACT

The, antifungal activities of trans-cinnamic acid (TCA) and cell-free supernatant (CFS) of *X. szentirmaii* were evaluated against *Alternaria brassicicola* that cause Black spot disease. The results showed that TCA was more suppressive than CFS of *X. szentirmaii* in the control of *A. brassicicola*. In petri assays, the highest suppressive effect on spore germination was in TCA treatments compared to CFS of *X. szentirmaii*. Moreover, no germ tube elongation was observed in any of tested concentrations (0.25%, 0.50%, 1%, 2%) of TCA. The highest level of mycelial growth inhibitions (100% and 92%) were exhibited by TCA (2%) and TCA (1%), respectively. The curative and protective activity of TCA on disease severity of *A. brassicicola* were also evaluated on broccoli plants. In the curative activity assays, disease severities were 71.00%, 56.33% and 54.03% for control, TCA (1%) and TCA (2%), respectively. Whereas in the protective activity, TCA (2%) suppressed the disease severity significantly greater than TCA (1%). The disease severity of *A. brassicicola* after TCA application on broccoli plants was 25.21% and 17.37% for TCA (1%) and TCA (2%) respectively. Similar data were obtained in the efficacy of TCA on *A. brassicicola*. In the curative activity assays, TCA (1%) and TCA (2%) exhibited the efficacy with rates of 20.57% and 23.02%, respectively. However, TCA (2%) showed significantly higher efficacy than TCA (1%) in the protective activity. The current study provides that TCA has a great potential to suppress *A. brassicicola* and can be a good alternative to synthetic fungicides.

Keywords: *Alternaria*, *Trans-cinnamic acid*, *Xenorhabdus*

Alternaria brassicicola'ya karşı *Trans-cinnamic Asit* ve *Xenorhabdus szentirmaii*'nin Antifungal Metabolitlerinin Kullanım Potansiyellerinin Araştırılması

ÖZET

Bu çalışmada trans-cinnamik (TCA) ve *Xeorhabdus szentirmaii* bakteri süpernatatının (CFS) kara leke hastalığı etmeni *Alternaria brassicicola*'ya karşı antifungal etkinliği test edilmiştir. Sonuçlara bakıldığında TCA, *X. szentirmaii*'nin süpernatatına göre *A. brassicicola* üzerinde daha etkili olmuştur. Petri deneylerinde *A. brassicicola*'nın sporlarının çimlenmesini en fazla baskılayan deney grubunun TCA olduğu görülmüştür. Ayrıca TCA'nın tüm konsantrasyonlarının (%0.25, %0.50, %1, %2) hiçbirisinde çim borusu gelişimini gözlenmemiştir. *A. brassicicola*'nın misel gelişimini en fazla inhibe eden (%100 ve %92 oranlarında) TCA konsantrasyonları ise sırasıyla yüzde 2 ve yüzde 1'dir. *A. brassicicola*'nın hastalık şiddeti üzerine TCA'nın koruyucu ve tedavi edici etkisi brokoli fideleri kullanılarak test edilmiştir. Tedavi edici denemelerde, hastalık şiddeti kontrolde %71 iken TCA (1%) ve TCA (2%) uygulanan brokoli fidelerinde sırasıyla %56.33 ve %54.03 olarak ölçülmüştür. Ancak koruyucu etki denemelerinde TCA(2%), TCA (1%)'e göre hastalık şiddetini daha etkili bir şekilde baskılamıştır. Brokoli fidelerinde gözlemlenen hastalık şiddeti TCA (2%) ve TCA (1%) için sırasıyla %17.37 ve %25.21 olarak ölçülmüştür. TCA'nın *A. brassicicola*'ya etkinlik denemelerinde ise TCA (1%) ve TCA (2%) arasında tedavi

edicilik bakımından fark görülmemiştir. Yüzde etki değerleri TCA (1%) ve TCA (2%) için sırasıyla %20.57 ve %23.02 olarak hesaplanmıştır. Bununla beraber TCA (2%), TCA (1%)'e göre koruyucu etki bakımından istatistiksel açıdan daha yüksek bir etkinlik sergilemiştir. Bu çalışma TCA'nın *A. brassicicola*'ya mükemmel bir kullanım potansiyeli olduğunu ortaya koymaktadır ve sentetik fungusitlere iyi bir alternatif olabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: *Alternaria*, *Trans-cinnamic acid*, *Xenorhabdus*

I. INTRODUCTION

The causing agent of Black Spot Disease, *Alternaria brassicicola*, is an important plant pathogenic fungus which can affect various plants including spinach [1], radish [2], cauliflower, celery cabbage, broccoli, [2], [3] and Chinese kale [4], [5]. The pathogen attacks plant's leaves and stems causing brown spots on leaves which can be yellow halos at an early stage. [2], [6]. The pathogen can damp off the seedlings [2]. The spores can penetrate to seed coat and colonize, making the infected seeds the main source for spreading the disease [2], [7]. The most preferred control method of this pathogen is to use chemical using fungicide (Iprodione). However, the repeated chemical fungicide applications can negatively affect the consumers, farmers, other non-target organisms, environment and can also cause resistant strains to develop [4], [8].

The bacteria *Photorhabdus* spp. and *Xenorhabdus* spp. have a symbiotic association with entomopathogenic nematodes (EPNs) *Heterorhabditis* and *Steinernema*, respectively [9]. EPNs are lethal insect pathogens that are used to biologically control of insect pests.. In nature, the infective juveniles (IJs) live in soil and carry the bacteria in their intestine. The IJs penetrate the insect hemocoel via mouth, anus or spiracle, or through the cuticle and release the symbiotic bacteria. Subsequently, the bacteria produce and secrete a variety of metabolites, nematodes and bacteria both kill the host within 48-72 h. The metabolites also inhibit the growth of other competitor microorganisms. The nematode and bacterial development are occurred until the food sources deplete. Finally, new generation IJs leave the cadaver in 7-15 days to find a new host [10].

Using biological control options (biofungicides etc.) instead of chemical pesticides is an uprising trend in many parts of the world. Thus, discovery of new biological control agents has become a necessity. In the previous studies, a whole range of antimicrobial or antifungal metabolites have been isolated and identified from *Photorhabdus* and *Xenorhabdus* bacteria [9], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17]. Among these compounds, trans-cinnamic acid (TCA) from *Photorhabdus luminescens* [11] and fabclavine from *Xenorhabdus budapestensis* and *X. szentirmaii* [14] have been reported as potential antimycotic control agents. TCA is also a natural product obtained mostly from cinnamon plants.

The suppressive effect of these compounds against a variety of important plant pathogenic fungi have been shown in different studies [18], [19], [20], [21], [22]. Thus, our objective was to determine the suppressive abilities of trans-cinamic acid and cell-free supernatant (CFS) of *X. szentirmaii* against *Alternaria brassicicola* within in vitro and in vivo conditions.

II. MATERIALS AND METHODS

A. I. Phytopathogen culture of *Alternaria brassicicola*

The isolate of *A. brassicicola* was obtained from infected cauliflower leaves collected from Düzce, Türkiye. The fungi were cultured on potato dextrose agar (PDA) in Petri dishes at 27 °C. Pathogenicity of the isolate was confirmed according to Koch's postulates. The isolate was stored at the Laboratory of Plant Protection, Department of Plant Pathology, Duzce University.

A. 2. Preparation of trans-cinnamic acid solution and cell-free supernatant of *X. szentirmaii*

Trans-cinnamic acid is a natural product obtained mostly from cinnamon plants. The commercial TCA product (Sigma, Germany) was used in this study. To prepare the stock solution, the protocol suggesting by Adlığ and Gülcü [22] was followed. According to protocol, 4.5 g of TCA ($\geq 99\%$ purity) was dissolved in 100 mL ethanol (96%).

The bacteria, *Xenorhabdus szentirmaii* DSMZ 16338, was provided from Dr. Hazir's Lab. from Department of Biology in Adnan Menderes University, Aydın, Türkiye. The stock culture was prepared as described by Hazir et al. [21] and stored at -80°C until required. The obtain cell-free supernatant (CFS) including secondary metabolites, the protocol was followed according to Hazir et al. [21] and Shapiro-Ilan et al. [23]. We filtered the CFS with using 0.22 μm millipore filter (Thermo scientific, NY) and stocked into the 50 ml sterile centrifuge tubes at 4°C . The CFS were stored up to two weeks for the experiments.

A. 3. Efficacy of bacterial secondary metabolites and TCA on spore germination of *A. brassicicola*

The inhibitory effect of CFS and TCA on spore germination were evaluated in petri plates. Different concentrations (v / v) of CFS (0, 5, 10 and 15%) and TCA (0, 0.25, 0.5, 1 and 2) were inserted into PDA. To prepare the concentrations, the protocol from Hazir et al. [21] was followed. A 50 μl conidia suspension (10^5 spores mL^{-1}) was poured onto PDA in the treatments. The first 100 conidia were counted under the microscope (400 \times) to determine percentage spore germination [21]. Additionally, the germ tube elongation of germinated spores were measured using a computer software (cell Sens Standard 1.11).

A. 4. Efficacy of bacterial secondary metabolites and TCA on mycelial growth of *A. brassicicola*

The antifungal activity of CFS and TCA were evaluated in petri assays. To evaluate mycelial growth, the method from Hazir et al. [21] was followed. Different concentrations (v/v) of CFS (5, 10 and 15%) and TCA (0.25, 0.5, 1 and 2) were evaluated in the study. A mycelia plug (5 mm diameter) of *A. brassicicola* was placed on the center of petri arena that containing CFS or TCA. Petri dishes were incubated at 25°C and the diameter of colonies (cm) were measured after five days. There were ten replicates for each treatment. The experiment conducted once.

A. 5. Efficacy of curative and protective activities of TCA against *A. brassicicola*

Based on the data from vegetative growth experiments, TCA (1%) and TCA (2%) were tested for curative and protective activities. Seven-week old broccoli plants were used in the study. The plants were provided from Dikmen Fide Company, Bilecik, Türkiye.

In the protective activity assays, TCA applications were made on broccoli plants firstly. Three milliliter TCA per pot was sprayed on both sides of the leaves. After 24 h, 3 mL of *A. brassicicola* spore suspension (10^6 spores mL⁻¹) were inoculated on the plants.

For curative activity assays, 3 mL spore suspension (10^6 spores mL⁻¹) of *A. brassicicola* were applied on each plant firstly. The plants were incubated for 24 h under moist conditions. Then, TCA were applied on the infected plants. Three milliliter TCA was applied per pot for each concentration. In positive control, the plants were treated with distilled water, while the plants were treated with a spore suspension of the pathogen alone in negative control. Each treatment had twelve replicates and experiment was repeated ones. The plants were placed in a greenhouse in a randomized complete block design. They were incubated at $25 \pm 3^\circ\text{C}$ and watered daily. The disease severity was the pathogen inoculation as a percentage of lesion area over the total leaf surface. The disease severity was classified into six levels: 0 = no lesion area; 1 = lesion area 1–20%; 2 = lesion area 21–40%; 3 = lesion area 41–60%; 4 = lesion area 61–80%; 5 = lesion area > 80% [24]. The data for disease severity was recorded after 5 days.

A. 6. Data analysis

The data was analyzed with IBM SPSS, Statistics 22. Data are shown as the mean \pm SE. The comparisons between groups were evaluated using analysis of variance (ANOVA) with Tukey's post hoc test. The Abbott formula was used to convert the mean of vegetative growth in petri arena to percentage of the mycelial growth inhibition as well as efficacy (%) of CFS and TCA. Then, the comparison was performed with student-t test. Townsend-Heuberger formula was performed to determine disease severity depending on scale values that obtained from pot experiment. Differences at $p < 0.05$ was accepted as statistically significant.

III. RESULTS and DISCUSSION

The TCA was the most suppressive on spore germination of *A. brassicicola*. Additionally, there was a significant difference between germ tube elongation in TCA treatments and *X. szentirmaii* treatments. The percentage spore germination of *A. brassicicola* was the least in the TCA treatments, however fungal spore germination ranged between 95.49 and 98.06 for the control and for all the treatments with *X. szentirmaii* ($F = 1546.904$; $df = 7$; $p < 0.05$). The average germ tube elongation ranged between 73 μm and 138 μm for all treatments with *X. szentirmaii* and control ($F = 287.161$; $df = 7$; $p < 0.05$). Whereas no germ tube development was observed in TCA treatments (Table 1).

Table 1. Effects of *Xenorhabdus szentirmaii* and trans-cinnamic acid on germ tube elongation and spore germination

	Control	Xz (5%)	Xz (10%)	Xz (15%)	TCA (0.25%)	TCA (0.5%)	TCA (1%)	TCA (2%)
Germ tube elongation (μm)	108(c)*	138(d)	113(c)	73(b)	0(a)	0(a)	0(a)	0(a)
The inhibition of spore germination (%)	2.23(b)	4.51(b)	1.94(b)	2.78(b)	99(a)	99(a)	100(a)	100(a)

*Different letters in same rows indicate statistical significance ($p < 0.05$). Xz: *Xenorhabdus szentirmaii*, TCA: Trans-cinnamic acid.

The results indicate that the highest level of mycelial growth inhibition was exhibited by TCA (2%) followed by TCA (1%) (Figure 1). Additionally, there is a significant difference between

TCA (2%) and TCA (1%). The mycelial growth inhibition rates were 99.53% for TCA (2%) and 91.63% for TCA (1%) on *A. brassicicola*. The mycelial growth inhibition for *X. szentirmaii* supernatant treatments and the rest of the TCAs ranged between 13.19% and 51.48% ($F = 127.6664$; $df = 6$; $p < 0.05$).

We evaluated the curative and protective activity of TCA on disease severity of black spot. In the curative activity on disease severity on broccoli plants was 56.33% and 54.03% for TCA (1%) and TCA (2%), respectively. There was no significant difference in the efficacy of curative activity between TCA (1%) and TCA (2%) ($F = 24.1482$; $df = 2$; $p < 0.05$) (Figure 2a). The disease severity of *A. brassicicola* after TCA application on broccoli plants was 25.21% and 17.37% for TCA (1%) and TCA (2%), respectively. The difference between TCA (1%) and TCA (2%) was statistically significant ($F = 33.2863$; $df = 2$; $p < 0.05$) for protective activity on disease severity (Figure 2b).

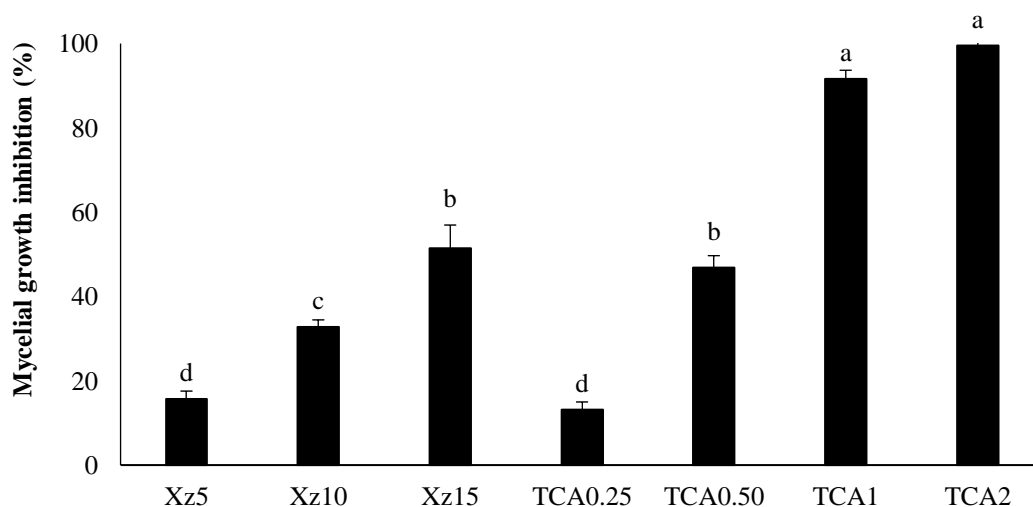


Figure 1. Mycelial growth inhibition (%) of TCA and Xz on *Alternaria brassicicola* on Potato dextrose agar media. Different letters above bars indicate statistical significance ($p < 0.05$). Xz: *Xenorhabdus szentirmaii*, TCA: Trans-cinnamic acid.

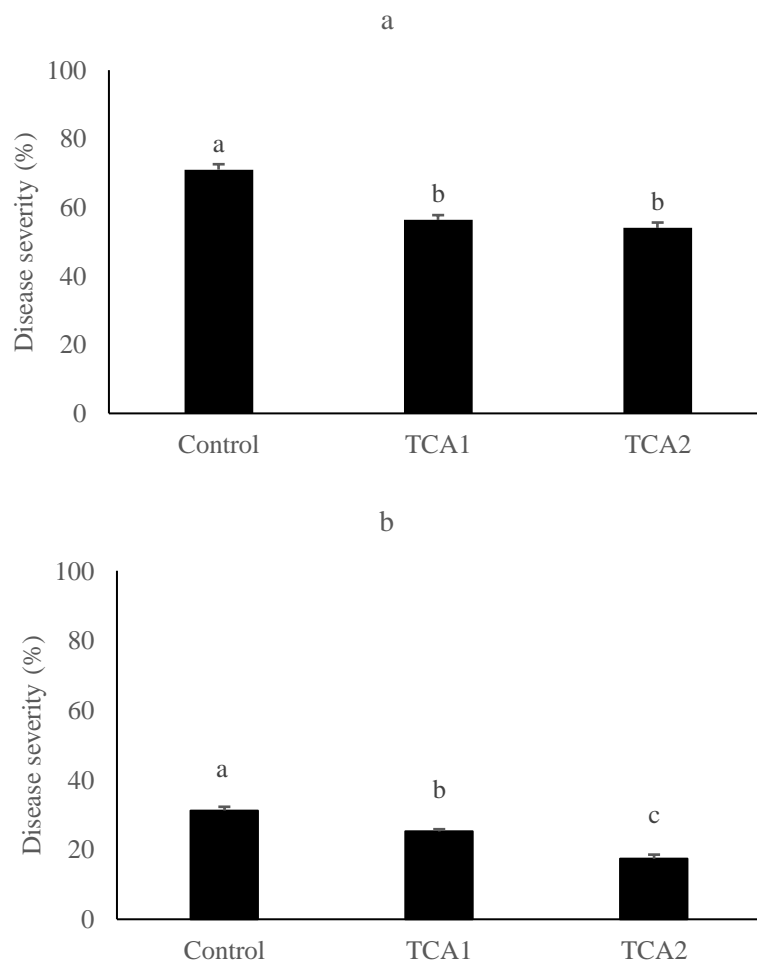


Figure 2. The curative activity (a) and protective activity (b) of trans-cinnamic acid on disease severity of *Alternaria brassicicola*. Different letters above bars indicate statistical significance (Student's t test, $p < 0.05$). TCA: Trans-cinnamic acid.

For the curative activity, TCA (1%) and TCA (2%) exhibited the efficacy with a rate of 20,57% and 23,02% respectively. Additionally, no significant difference was found between TCA (1%) and TCA (2%) ($F=0.5762$; $df=1$; $P=0.4637$) (Figure 3a). The protective activity results indicate that TCA (2%) showed higher efficacy than TCA (1%) and the results were statistically significant (1%), $F= 23.3403$, $df=1$, $p < 0.05$. The rates of efficacy were 43.88 % and 22.63 % for TCA (2%) and TCA (1%) respectively (Figure 3b).

Previously, different microorganism such as antagonistic fungi [24], endophytic *Streptomyces* bacteria [25], [26] or their crude extracts such as marine algae extracts [27], and medicinal plants extracts [4] were tested to control *A. brassicicola*. This study is the first to evaluate the antifungal activity of *X. szentirmaii* CFS and TCA against *A. brassicicola*.

The results of this study showed that TCA displayed a stronger suppression on the germination of spore and vegetative growth of *A. brassicicola* compared to CFS of *X. szentirmaii*. The cinnamic acid is the natural product of *Cinnamomum* plants, moreover it has recently been reported from *Photorhabdus luminescens* by [11]. Its significant antifungal activity has been reported by [11], [21], [22], [30], [31], [32], against various plant pathogenic fungi. [32] explained the mode of action of cinnamic acid on *Sclerotinia sclerotiorum*. They indicated that cinnamic acid inhibited the oxalic acid metabolism of *S. sclerotiorum* which is important for pathogenicity and sclerotia development. [33] mentioned that cutinases, lipases, cell wall-degrading enzymes (CWDEs), and proteases are important for the pathogenicity of *A. brassicicola*. TCA might be inhibiting the mechanism of these genes that related to the pathogenicity of *A. brassicicola*. Whereas, our hypothesis has not to be tested yet.

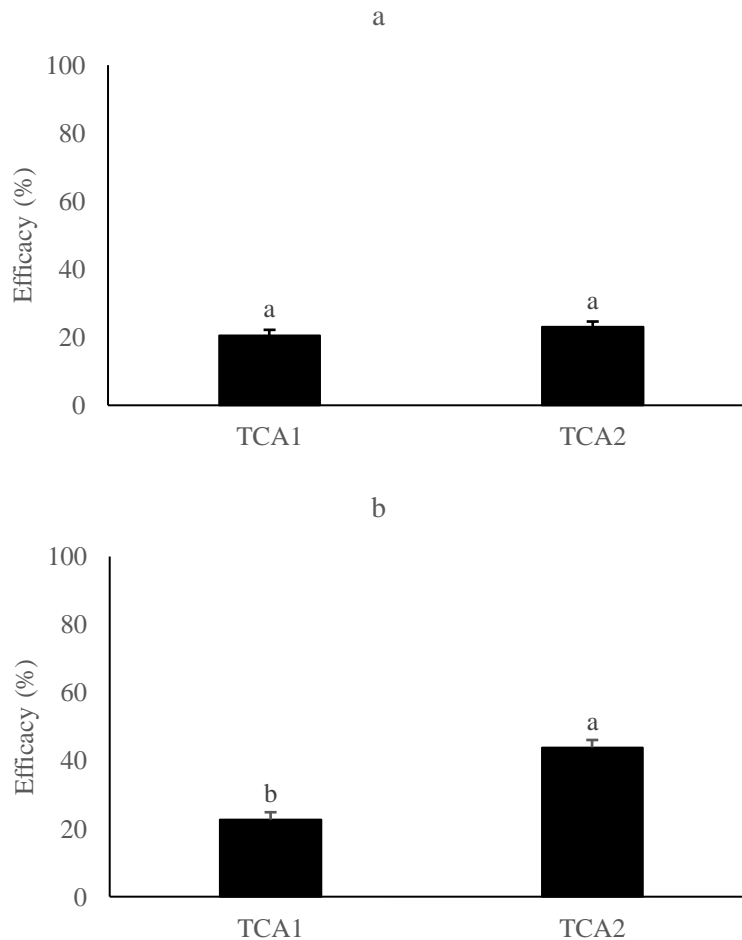


Figure 3. The curative activity (a) and protective activity (b) of trans-cinnamic acid on *Alternaria brassicicola*. Different letters above bars indicate statistical significance (Student's t test, $p < 0.05$)

Another point is that either of the tested concentrations of TCA did not exhibit any phytotoxic effect on the broccoli plants in the protective activity assays. This finding is consistent with the data reported by [21]. They observed no phytotoxicity of TCA on various plants such as eggplant, pepper, tobacco, tomato, peach and pecan.

The CFS of *X. szentirmaii* could not provide a great suppression compared to TCA on *A. brassicicola*. The findings of the current study do not support the previous reports. The strong antifungal activity of CFS of *Xenorhabdus* have been reported on various plant pathogen [18], [19], [20], [21], [23], [34]. In our study, we tested *X. szentirmaii* DSM16338 strain. [35] and [21] showed the high efficacy of *X. szentirmaii* DSM16338 antibiotics. Moreover, [13], [14], [36], [37] have identified the compounds of *X. szentirmaii*. Among these compounds, fabclavines become prominent with their antifungal properties. [21] suggested that the CFS of *X. szentirmaii* may be as effective as TCA, if the metabolites would be more concentrated. This may explain the poor efficacy in our study since we applied the diluted form of CFS. [21] also offered two more probability that may be related with our results; the target pathogen and the manner that w applied.

IV. CONCLUSION

The cinnamic acid has been reported to have various pharmacological actions and inhibition activity against some plant pathogenic fungi in the past decades. The current study provides the first data about

suppressive potential of antifungal metabolites of *X. szentirmaii* against the target pathogen, *A. brassicicola*. These results have exhibited some promising data. Further studies are needed to show the efficacy of TCA in the field conditions. It can be a good option instead of synthetic fungicides and can be used as a biofungicide for black spot disease in the future.

Acknowledgment: We thank to Dr. Salih Tunç Kaya for his valuable technical assistance in the statistical analyses of the study. We also appreciate to Dr. Selçuk Hazır and Dr. Harun Çimen to provide trans-cinnamic acid for the study.

V. REFERENCES

- [1] A. Czajka, A. Czubatka, J. Sobolewski, J. Robak, "First report of *Alternaria* leaf spot caused by *Alternaria alternate* on spinach in Poland," *Plant Disease*, vol. 99 issue 5, pp. 729–729, 2015. <https://doi.org/10.1094/PDIS-10-14-1090-PDN>
- [2] M. Nowicki, M. Nowakowska, A. Niezgodna, E. U. Kozik, "Alternaria black spot of crucifers: symptoms, important of disease, and perspectives of resistance breeding," *Vegetable Crops Research Bulletin*, vol. 76, pp. 5–19, 2012. <https://doi.org/10.2478/v10032-012-0001-6>
- [3] J. Kohl, C. A. M. van Tongeren, B. H. Groenenboom-de Haas, R. A. van Hoof, R. Driessen, L. van der Heijden, "Epidemiology of dark leaf spot caused by *Alternaria brassicicola* and *A. brassicae* in organic seed production of cauliflower," *Plant Pathology*, vol. 59, pp. 358–367, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2009.02216.x>
- [4] T. Dethoup, P. Songkumarn, S. Rueangrit, S. Suesa-ard, C. Kaewkrajay, "Fungicidal activity of Thai medicinal plant extracts against *Alternaria brassicicola* causing black spot of Chinese kale," *European Journal of Plant Pathology*, vol. 152, pp. 157–167, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10658-018-1460-5>
- [5] A. Jantasorn, J. Mongon, T. Ouiphisittraiwat, "In vivo antifungal activity of five plant extracts against Chinese kale leaf spot caused by *Alternaria brassicicola*," *Journal of Biopesticides*, vol. 10, issue 1, pp. 43–49, 2017.
- [6] D. Kumar, N. Maurya, Y. K. Bharti, A. Kumar, K. Kumar, K. Srivastava, G. Chand, C. Kushwaha, S. K. Singh, R. K. Mishra, A. Kumar, "Alternaria blight of oilseed brassicas: a comprehensive review," *African Journal of Microbiology Research*, vol. 8, pp. 2816–2829, 2014. <https://doi.org/10.5897/AJMR2013.6434>
- [7] T. Amein, S. A. Wright, M. Wikstrom, E. Koch, A. Schmitt, D. Stephan, M. Jahn, F. Tinivella, M. L. Gullino, G. Forsberg, S. Werner, J. Wolf, S. P. C. Groot, "Evaluation of non-chemical seed treatment methods for control *Alternaria brassicicola* on cabbage seeds," *Journal of Plant Disease and Protection*, vol. 118, pp. 214–221, 2011. <https://doi.org/10.1007/BF03356406>
- [8] J. P. Zubrod, M. Bundschuh, G. Arts, C. A. Brühl, G. Imfeld, A. Knäbel, S. Payraudeau, J. J. Rasmussen, J. Rohr, A. Scharmüller, K. Smalling, S. Stehle, R. Schulz, R. B. Schäfer, "Fungicides: An Overlooked Pesticide Class?" *Environmental Science & Technology*, vol. 53, issue 7, pp. 3347–3365, 2019. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b04392>
- [9] N. E. Boemare and R. J. Akhurst, "The Genera *Photorhabdus* and *Xenorhabdus*," in *The Prokaryotes*, New York, USA: Springer, 2006, pp. 451–494.

- [10] B. Gulcu, H. Cimen, K. R. Ramalingam, S. Hazir, “Entomopathogenic Nematodes and their Mutualistic Bacteria: Their Ecology and Application as Microbial Control Agents,” *Biopesticide International*, vol. 13 issue 2, pp. 1-31, 2017.
- [11] C. H. Bock, D. I. Shapiro-Ilan, D. Wedge, C. H. Cantrell, “Identification of the antifungal compound, transcinnamic acid, produced by *Photorhabdus luminescens*, a potential biopesticide,” *Journal of Pest Science*, vol. 87, pp. 155–162, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10340-013-0519-5>
- [12] H. B., Bode, “Entomopathogenic bacteria as a source of secondary metabolites,” *Current Opinion in Chemical Biology*, vol. 13, pp. 1–7, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2009.02.037>
- [13] A. O. Brachmann, S. Forst, G. M. Furgani, A. Fodor, H. B. Bode, “Xenofuranones a and B: phenylpyruvate dimers from *Xenorhabdus szentirmaii*,” *Journal of Natural Products*, vol. 69, pp. 1830–1832, 2006. <https://doi.org/10.1021/np060409n>
- [14] S. W. Fuchs, F. Grundmann, M. Kurz, M. Kaiser, H. B. Bode, “Fabclavines: Bioactive Peptide–Polyketide–Polyamino Hybrids from *Xenorhabdus*,” *ChemBioChem*, vol. 15, pp. 512–516, 2014. <https://doi.org/10.1002/cbic.201300802>
- [15] M. Gualtieri, A. Aumelas, J. O. Thaler, “Identification of a new antimicrobial lysine-rich cyclolipopeptide family from *Xenorhabdus nematophila*,” *The Journal of Antibiotics*, vol. 62, pp. 295–302, 2009. <https://doi.org/10.1038/ja.2009.31>
- [16] D. Ji, Y. Yi, G-H Kang, Y-H Choi, P. Kim, N-L Baek, Y. Kim, “Identification of an antibacterial compound, benzylideneacetone, from *Xenorhabdus nematophila* against major plant-pathogenic bacteria,” *FEMS Microbiology Letters*, vol. 239, pp. 241–248, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.femsle.2004.08.041>
- [17] G. Lang, T. Kalvelage, A. Peters, J. Wiese, J. F. Imhoff, “Linear and cyclic peptides from the entomopathogenic bacterium *Xenorhabdus nematophilus*,” *Journal of Natural Products*, vol. 71, pp. 1074–1077, 2008. <https://doi.org/10.1021/np800053n>
- [18] D. I. Shapiro-Ilan, C. C. Reilly, M. W. Hotchkiss, “Suppressive effects of metabolites from *Photorhabdus* and *Xenorhabdus* spp. on phytopathogens of peach and pecan,” *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, vol. 42, pp. 715–728, 2009. <https://doi.org/10.1080/03235400701390539>
- [19] X. L. Fang, Z. Z. Li, Y. H. Wang, X. Zhang, “In vitro and in vivo antimicrobial activity of *Xenorhabdus bovienii* YL002 against *Phytophthora capsici* and *Botrytis cinerea*,” *Journal of Applied Microbiology*, vol. 111 issue 1, pp. 145–154, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2011.05033.x>
- [20] X. Fang, M. Zhang, Q. Tang, Y. Wang, X. Zhang, “Inhibitory effect of *Xenorhabdus nematophila* TB on plant pathogens *Phytophthora capsici* and *Botrytis cinerea* in vitro and in planta,” *Scientific Reports*, vol. 4, pp. 1–7, 2014. <https://doi.org/10.1038/srep04300>
- [21] S. Hazir, D. I. Shapiro-Ilan, C. H. Bock, C. Hazir, L. G. Leite, M. W. Hotchkiss, “Relative potency of culture supernatants of *Xenorhabdus* and *Photorhabdus* spp. on growth of some fungal phytopathogens,” *European Journal of Plant Pathology*, vol. 146, pp. 369–381, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10658-016-0923-9>
- [22] N. Adlığ, B. Gülcü, “Trans-Cinnamik Asit ve *Xenorhabdus szentirmaii* Metabolitlerinin Bitki Patojeni Fungus *Botrytis cinerea* Mücadelesinde Kullanımı,” *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, vol. 7, pp. 2000-2008, 2019. <https://doi.org/10.29130/dubited.588711>

- [23] D. I. Shapiro-Ilan, C. H. Bock, M. W. Hotchkiss, "Suppression of pecan and peach pathogens on different substrates using *Xenorhabdus bovienii* and *Photorhabdus luminescens*," *Biological Control*, vol. 77, pp. 1–6, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2014.05.010>
- [24] A. Komhorn, S. Thongmee, T. Thammakun, T. Oiuphisittraiwat, A. Jantasorn, "In vivo testing of antagonistic fungi against *Alternaria brassicicola* causing Chinese kale black spot disease," *Journal of Plant Disease and Protection*, vol. 128, pp. 183–189, 2021. <https://doi.org/10.1007/s41348-020-00382-2>
- [25] N. Hassan, S. Nakasuji, M. M. Elsharkawy, H. A. Naznin, M. Kubota, H. Ketta, M. Shimizu, "Biocontrol Potential of an Endophytic *Streptomyces* sp. Strain MBCN152-1 against *Alternaria brassicicola* on Cabbage Plug Seedlings," *Microbes and Environment*, vol. 32, issue 2, pp. 133-141, 2017. <https://doi.org/10.1264/jsme2.ME17014>
- [26] R. K. Manhas, T. Kaur, "Biocontrol Potential of *Streptomyces hydrogenans* Strain DH16 toward *Alternaria brassicicola* to Control Damping Off and Black Leaf Spot of *Raphanus sativus*," *Frontiers in Plant Science*, vol. 7, pp. 1869, 2016. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01869>
- [27] H. R. M. Galal, W. M. Salem, F. N. El-Deen, "Biological control of some pathogenic fungi using marine algae extracts," *Research Journal of Microbiology*, vol. 6 issue 8, pp. 645-657, 2011. <https://doi.org/10.3923/jm.2011.645.657>
- [30] S. Shan, H. Ma, Y. Li, C. Huang, X. Gu, Z. Jiang, B. Sun, C. Chen, X. Wei, G. Shen, D. I. Shapiro-Ilan, W. Ruan, "Metabolites from symbiotic bacteria of entomopathogenic nematodes have antimicrobial effects against *Pythium myriotylum*," *European Journal of Plant Pathology*, vol. 158, pp. 35-44, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10658-020-02053-2>
- [31] H. Wang, K. Wen, X. Zhao, X. Wang, A. Li, H. Hong, "The inhibitory activity of endophytic *Bacillus* sp. strain CHM1 against plant pathogenic fungi and its plant growth promoting effect," *Crop Protection*, vol. 28, issue 8, pp. 634–639, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2009.03.017>
- [32] Y. Cho, "How the necrotrophic fungus *Alternaria brassicicola* kills plant cells remains an enigma," *Eukaryotic Cell*, vol. 14, pp. 335–344, 2015. <https://doi.org/10.1128/EC.00226-14>
- [33] E. Boszormenyi, T. Ersek, A. Fodor, A. M. Fodor, L. S. Foldes, M. Hevesi, J. S. Hogan, Z. Katona, M. G. Klein, A. Kormany, S. Pekar, A. Szentirmai, F. Sztaricskai, R. A. J. Taylor, "Isolation and activity of *Xenorhabdus* antimicrobial compounds against the plant pathogens *Erwinia amylovora* and *Phytophthora nicotianae*," *Journal of Applied Microbiology*, vol. 107, pp. 764–759, 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2009.04249.x>
- [34] A. Fodor, A. M. Fodor, S. Forst, J. S. Hogan, M. G. Klein, K. Lengyel, G. Saringer, E. Stackebrandt, R. A. J. Taylor, E. Lehoczky, "Comparative analysis of antibacterial activities of *Xenorhabdus* species on related and nonrelated bacteria in vivo," *Journal of Microbiology and Antimicrobials*, vol. 2, pp. 36–46, 2010.
- [35] S. L. Wenski, D. Kolbert, G. L. C. Grammbitter, H. B. Bode, "Fabclavine biosynthesis in *X. szentirmaii*: shortened derivatives and characterization of the thioester reductase FclG and the condensation domain-like protein FcIL," *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, vol. 46 issue 3-4, pp. 565–572, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10295-018-02124-8>
- [36] S. L. Wenski, H. Cimen, N. Berghaus, S.W. Fuchs, S. Hazir, H. B. Bode, "Fabclavine diversity in *Xenorhabdus* bacteria," *Beilstein Journal of Organic Chemistry*, vol. 16, pp. 956–965, 2019. <https://doi.org/10.3762/bjoc.16.84>



Düzce University Journal of Science & Technology

Research Article

Physiological and Biochemical Effects of Thermo-Priming on Wheat (*Triticum aestivum* L.) under Drought and Heat Stresses

Müge TEKER YILDIZ^{a,*}, Eda GÜNAY^a, Okan ACAR^b

^a Department of Biology, School of Graduate Studies, Çanakkale Onsekiz Mart University, Çanakkale, TURKEY

^b Department of Biology, Faculty of Science, Çanakkale Onsekiz Mart University, Çanakkale, TURKEY

* Corresponding author's e-mail address: firstauthor@duzce.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1213671

ABSTRACT

Seed priming is a physical method for increasing the stress tolerance of crops against stressful environmental conditions. Drought and high temperatures are important environmental factors that limit the growth and grain yield of wheat. The aim of our study is to determine the physiological (germination rate, root and shoot length, specific leaf area (SLA), relative water content (RWC), biomass, total chlorophyll amount (SPAD)), and biochemical (protein amount, hydrogen peroxide (H₂O₂) amount, catalase activity (CAT), ascorbate peroxidase activity (APX), glutathione reductase activity (GR)) changes that occur with thermo-priming in wheat seeds under drought stress (D) and heat stress (H). Our results showed that shoot lengths were drastically reduced with D, H, and HD compared to root lengths. Besides, combined stress protected RWC by 6.8% with 60 min thermo-priming compared to other stress treatments. Chlorophyll content decreased dramatically with D and H, while thermo-priming wasn't limited to that decrease. In addition, SLA was decreased with all stress treatments, while it healed only with 60 min thermo-priming (HDT60) by 12%. H₂O₂ was increased with drought stress, while reduced with all heat stress treatments. Among them, HDT60 was found to be more effective than the others. GR activities were increased with thermo-priming by 14-18%, with D and H by 5%. Additionally, GR activity was increased with 30 min thermo-priming (HDT30) in HD treatment by 5.8%, while only with HD by 3.2%. Consequently, HDT60 seemed to effectively on biochemical parameters in wheat seedlings against drought and heat stresses.

Keywords: Drought stress, Heat stress, Osmotic stress, Thermo-priming, Wheat

Kuraklık ve Isı Stresi altındaki Buğdayda Thermo-Priming'in Fiziolojik ve Biyokimyasal Etkileri

ÖZET

Tohum priming, bitkilerin stresli çevre koşullarına karşı stres toleransını arttırmaya yönelik fiziksel bir yöntemdir. Kuraklık ve yüksek sıcaklıklar, buğdayın büyümesini ve tane verimini sınırlayan önemli çevresel faktörlerdir. Çalışmamızın amacı kuraklık stresi (D) ve sıcaklık stresi (H) altındaki buğday tohumlarında thermo-priming ile meydana gelen fiziolojik (çimlenme oranı, kök ve gövde uzunluğu, spesifik yaprak alanı (SLA), bağıl su içeriği (RWC), biyokütle, toplam klorofil miktarı (SPAD)) ve biyokimyasal (protein miktarı, hidrojen peroksit (H₂O₂) miktarı, katalaz aktivitesi (CAT), askorbat peroksidaz aktivitesi (APX), glutatyon redüktaz aktivitesi (GR)) değişimleri belirlemektir. Sonuçlarımız, gövde uzunluklarının kök uzunluklarına kıyasla D, H ve HD ile çarpıcı şekilde azaldığını gösterdi. Ayrıca kombine stres, diğer stres uygulamalarına kıyasla 60 dakikalık thermo-priming ile RWC %6,8 oranında korunmuştur. Klorofil içeriği, D ve H ile önemli ölçüde azalırken, thermo-priming bu

düşüşle sınırlı kalmadı. Ayrıca SLA tüm stres tedavilerinde azalırken sadece 60 dk termo-priming (HDT60) ile %12 iyileştirdi. H₂O₂ kuraklık stresi ile artarken, tüm ısı stresi uygulamaları ile azalmıştır. Bunlardan HDT60'ın diğerlerinden daha etkili olduğu tespit edildi. GR aktiviteleri termo-priming ile yaklaşık %14-18, D ve H uygulamaları ile %5 artırıldı. Ek olarak, HD uygulamasında 30 dakikalık termo-priming (HDT30) ile GR aktivitesi %5,8 artarken, yalnızca HD ile %3,2 arttı. Sonuç olarak, HDT60'ın buğday fidelerinde kuraklık ve ısı streslerine karşı biyokimyasal parametreler üzerinde etkili olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kuraklık stresi, Isı stresi, Osmotik stres, Termo-priming, Buğday

I. INTRODUCTION

The world population is expected to increase rapidly until 2050. For this reason, it is thought that the existing lands will be insufficient for growing grains in order to meet the increasing food needs in the future. The decrease in agricultural lands as a result of climate change, the increase in biotic and abiotic stress factors, and the ever-intensifying global climate change are among the important obstacles to agriculture and food production [1]. Wheat, an annual herbaceous plant, is used as a basic and strategic nutrient both in Turkey and in the world. Wheat ranks third place in grain production in the world with 762 million tons [2]. Today, wheat production is seriously affected by drought and heat stresses [3]. In the twentieth century, the average temperature was increased by 0.3 °C in the world at last 10 years and it is expected to increase by 1°C in 2025 and more than 3°C in 2100 [4]. These results herald more severe global climate changes in the future.

Abiotic stress factors cause morphological, physiological, biochemical, and molecular changes in plants and reduce their yield by limiting their growth and development [5]. Similarly, drought and heat stresses limit grain production and yield in the world and in Turkey. Moreover, in many parts of the world heat stress can cause wheat, mustard, tomato, etc. It creates negative effects on the growth, metabolism, and productivity of various crops [6]. The state of water deficiency increases due to high temperature, which affects the growth, metabolism, and integrity of the plant. In addition, they increase the production of reactive oxygen species (ROS) produced at normal levels by damaging photosynthetic pigments, membrane lipids, proteins, and nucleic acids in plants [7]. ROS increase causes very serious damage to the cell and can lead to cell death. Therefore, many abiotic stress factors, including drought, also cause oxidative stress in the plant [8]. Oxidative stress, which is characterized by excessive ROS production, occurs during the reduction of oxygen to water during photosynthesis, oxidation of water in mitochondria, and electron transfer in chloroplasts [9]. ROS disrupts the stable structure of many biological molecules such as proteins, DNA, lipids, and carbohydrates. However, plants have (APX, Ascorbate peroxidase; CAT, Catalase; SOD, Superoxide dismutase; GR, Glutathione reductase) and non-enzymatic antioxidants (tocopherols, carotenoids, water-soluble reductants) to protect them from these harmful effects. Thus, they reduce the subcellular damage of ROS [10], [11]. Monitoring the antioxidant system in stress tolerance is suggested as a useful selection criterion to reduce stress-related yield loss, especially in agricultural products [12].

Priming is defined as the treatment that allows the seeds to take up water in an osmotic solution or water until the first stage of germination is completed, but does not allow the emergence of the rootlets [13], [14]. Priming, which is a physiological technique including hydration and drying of seeds to improve metabolic processes before germination, has been reported to increase the germination rate, seedling growth, and yield under biotic and abiotic stresses and can induce plant tolerance [15], [16]. In the thermo-priming technique, the seeds are kept in a dark environment at a high temperature for certain periods. Germination rates are positively affected by low or high-temperature treatments before planting [17], [18]. Thermo-priming treatments both positively affect seed germination and seedling emergence, and also help plant growth and development. In addition, it has been determined that it has positive effects on enzyme activity, plant growth, and metabolism [19]. In this context, priming has been reported to be a promising strategy for plants to cope with abiotic stresses, including high-temperature stress [20]. In wheat, seedling emergence rate [21], seedling shoot and root length, seedling root and shoot dry

weight [22], early flowering and harvesting, and nitrogen use efficiency [23] has also been reported to increase grain and straw yield, harvest index [21] and yield [24] in late sowing.

In this study, we focused on determining the physiological (germination rate, root and shoot length, specific leaf area (SLA), relative water content (RWC), biomass, the total chlorophyll amount (SPAD), hydrogen peroxide (H₂O₂) amount (spectrophotometric and histochemical staining)) and biochemical (protein amount, catalase activity (CAT), ascorbate peroxidase activity (APX), glutathione reductase activity (GR)) analyzes caused by thermo-priming in the drought sensitive wheat variety Ekiz.

II. MATERIAL and METHODS

A. PLANT MATERIALS, SEED STERILIZATION, PRIMING TREATMENT, and GROWTH CONDITION

Triticum aestivum L. is a type of bread wheat from the family *Poaceae*. In this study, wheat seeds of the drought-sensitive Ekiz culture variety were used, and the seeds were obtained from Konya Bahri Dagdas International Agricultural Research Institute. Surface sterilization of seeds was carried out with a 5% sodium hypochlorite solution. For thermo-priming (TP) treatment, the seeds were kept at 38±2°C for 30 min (T30) and 60 min (T60) [25]. At the end of the treatment, the seeds were washed with distilled water and their surfaces were dried at room temperature. The development of the seeds sown in petri dishes in the control and drought stress ((polyethylene glycol, 15% PEG 6000) groups were followed for 7 days in a growth chamber (24±2°C temperature, 16/8h day/night photoperiod) under controlled conditions. Heat stress (H) treatment of all groups (7-day-old seedlings) was carried out by keeping the seedlings in a plant growth chamber at 42°C for 3 hours.

Table 1. The priming treatments groups in stressed seedlings (Control groups (C: Control, D: Drought, T30: Thermo-priming 30 min, T60: Thermo-priming 60 min, DT30: Drought + Thermo-priming 30 min, DT60: Drought + Thermo-priming 60 min), Stress groups (H:Heat stress, HD: Drought and Heat stress, HT30: Thermo-priming 30 min. + Heat stress, HT60: Thermo-priming 60 min. + Heat stress, HDT30: Thermo-priming 30 min. + Drought + Heat stress, HDT60: Thermo-priming 60 min. + Drought + Heat stress).

Control Groups	Stress Groups
Control (C)	Heat stress (H)
Drought stress (D)	Drought and Heat stress (HD)
TP 30-min. (T30)	TP 30-min. + H (HT30)
TP 60-min. (T60)	TP 60-min. + H (HT60)
TP 30-min.+ D (DT30)	TP 30-min. + D and H (HDT30)
TP 60-min.+ D (DT60)	TP 60-min. + D and H (HDT60)

B. METHODS

B. 1. Physiological analyzes

The germination rate was determined after 7 days according to the formula (1) below.

$$\text{Germination rate} = \text{Germination number} \times \frac{100}{15} \quad (1)$$

The green part up to the root was determined as the shoot length (cm) and the root part as the root length (cm) of the wheat seedlings in all groups with the help of a ruler.

Biomass the weight of three seedlings from each group was determined by weighing on the precision scale (g plant^{-1}).

Specific leaf area (SLA) was calculated using the leaf photos of wheat seedlings in the Image J program. After the samples are dried at 70°C for 24 h and recorded their weight. SLA is calculated by the formula (2) [26]:

$$\text{SLA} = \text{Area (cm}^2\text{)} / \text{Dry weight(mg}^{-1}\text{)} \quad (2)$$

The leaves whose wet weight (FW) was determined for the relative water content (RWC) were kept in a plastic container containing pure water for 4 h between filter papers, and their turgor weights (TW) were recorded. After this process, the dry weights (DW) of the leaves were determined after they were dried in an oven at 70°C for 24 h. RWC was calculated by applying these values to the formula (3) [27]:

$$\text{RWC} = (\text{FW} - \text{DW}) / (\text{TW} - \text{DW}) \times 100 \quad (3)$$

Chlorophyll content of the leaf samples was recorded with the aid of a chlorophyllmeter (Minolta, SPAD-502) [28]. Experimental data were obtained from different leaves of the seedlings with 15 replicates..

B. 2. Biochemical analyzes

Total protein content was homogenized leaf tissue with 50 mM NaP buffer (pH 7.8, 1 mM EDTA) and centrifuged for protein analysis. 0.1 g of Coomassie Brilliant Blue G 250 was mixed in a tube with protein reagent containing ethanol (50 mL) and ortho-phosphoric acid (100 mL). The absorbance values determined at 595 nm in the spectrophotometer were used to calculate the total protein content (mg g^{-1}) on the standard graph [29].

Ascorbate peroxidase activity (APX) was measured according to [30]. The reaction mixture contained 0.05 M Na-phosphate buffer (pH 7), 0.5 mM ascorbate, 0.1 mM EDTA, 1.2 mM H_2O_2 , and 0.1 mL enzyme extract in a final assay volume of 1 mL. Ascorbate oxidation was assessed at 290 nm. The concentration of oxidized ascorbate was calculated using extinction coefficient. One unit of APX was defined as 1 mmol mL^{-1} ascorbate oxidized per min.

Glutathione reductase activity (GR) was measured according to [31]. The reaction mixture contained 0.025 mM Na-phosphate buffer (pH 7.8), 0.5 mM GSSG, 0.12 mM NADPH, and 0.1 mL enzyme extract in a final assay volume of 1 mL. NADPH oxidation was determined at 340 nm. The activity was calculated using the extinction coefficient for GSSG. One unit of GR was defined as 1 mmol mL^{-1} GSSG reduced per min.

Catalase activity (CAT) was measured by measuring the initial rate of disappearance of H_2O_2 [32]. The reaction mixture contained 3% H_2O_2 and 0.1 mM EDTA in 0.05 M Na-phosphate buffer (pH 7) and 70 μL enzyme extract in a final assay volume of 1 mL. The decrease in H_2O_2 was measured as a decline in optical density at 240 nm, and the activity was calculated as $\mu\text{mol H}_2\text{O}_2$ consumed per min. Thermo Scientific Genesys Ones UV-Vis spectrophotometer was used during all spectrophotometric analyses in this study.

Hydrogen peroxide amount (H_2O_2), a mixture of plant tissue (0.1 g), 3 ml of H_2SO_4 and cold acetone was homogenized with homogenization buffer and centrifuged. Supernatants were determined at 550-800 nm ($\mu\text{g/ml}$) spectrophotometric with reading buffer containing H_2SO_4 , purified water, ferrous ammonium sulfate, xylenol orange, sorbitol, and ethanol (e-FOX) [33].

For histochemical staining localization of H_2O_2 , leaves were immersed in a solution containing 1 mg/ml 3',3'-diaminobenzidine (DAB) at 25°C for 12 h. The incubated leaves were decolorized by immersion

in boiling ethanol (90%) for 15 min to visualize the reddish-brown spots of H₂O₂. Then stained leaves were photographed against a contrasting background for proper visual [34].

B. 3. Statistical analysis

The results were given as means \pm standard error of five replicates. The compiled data were subject to an ANOVA (ONE-WAY) and the differences between the means were compared by the Tukey test to assess the effect of thermo-priming on physiological and biochemical analysis in *T. aestivum* (cv. Ekiz) during heat and drought stresses. Those comparisons with $P \leq 0.05$ were taken as significantly different. The data were analyzed by using SPSS 22.0 software [35].

III. RESULTS

All drought treatments (D, DTs, HD, HDTs) reduced the shoot length of cv. Ekiz by at least 55-64% and root length by 16-23% compared to the control (C). In contrast, shoot and root lengths were less affected by heat stress (HTs) with thermo-priming (TP) treatments compared to drought stress (Figure 2 (a)). Interestingly, it was determined that there was not statistical difference in root and shoot lengths between DT and HDT treatments. On the other hand, seed germination was determined at the control plant level in all stress treatments except DT60 treatment (Figure 1).

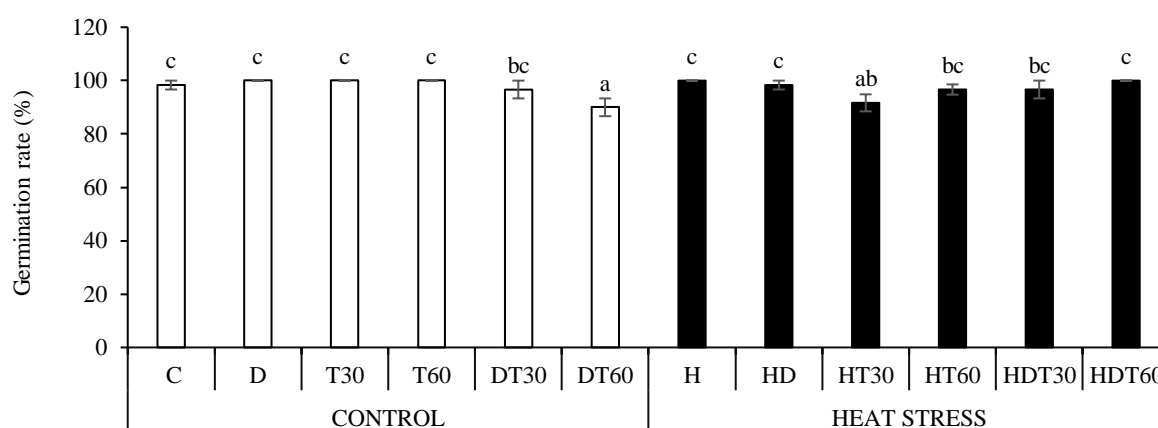
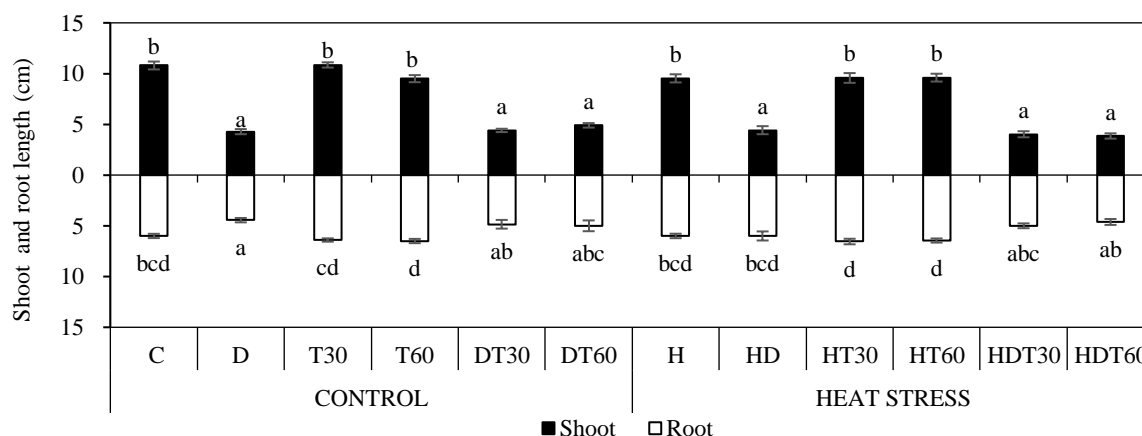
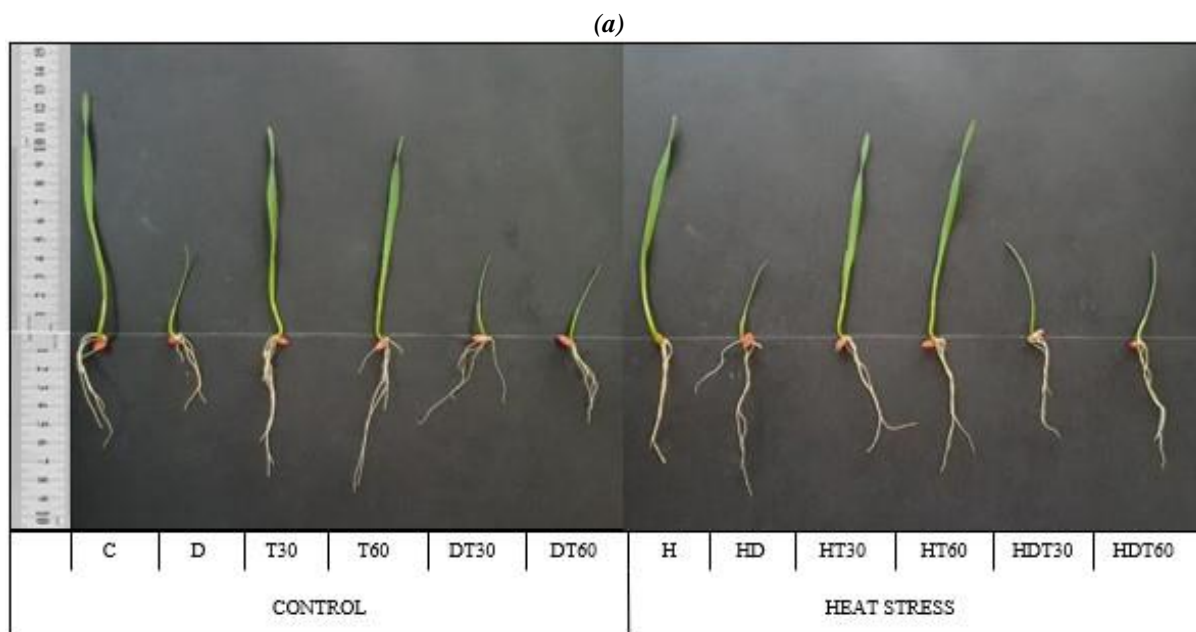


Figure 1. The effects of drought and heat stress of thermo-priming treatments on germination of 7d old wheat seedlings (C: Control, D: Drought, T30: Thermo-priming 30 min, T60: Thermo-priming 60 min, DT30: Drought + Thermo-priming 30 min, DT60: Drought + Thermo-priming 60 min; H: Heat stress (42°C for 3 h), HD: Drought and Heat stress, HT30: Thermo-priming 30 min. + Heat stress, HT60: Thermo-priming 60 min. + Heat stress, HDT30: Thermo-priming 30 min. + Drought + Heat stress, HDT60: Thermo-priming 60 min. + Drought+ Heat stress) (Means values followed by different letters are significantly different at $P < 0.05$).





(b)

Figure 2. The effects of drought and heat stress of thermo-priming treatments on shoot and root length of 7d old wheat seedlings (a). The effects of thermo-priming treatments on seedling growth of wheat (b) (C: Control, D: Drought, T30: Thermo-priming 30 min, T60: Thermo-priming 60 min, DT30: Drought + Thermo-priming 30 min, DT60: Drought + Thermo-priming 60 min; H: Heat stress (42°C for 3 h), HD: Drought and Heat stress, HT30: Thermo-priming 30 min. + Heat stress, HT60: Thermo-priming 60 min. + Heat stress, HDT30: Thermo-priming 30 min. + Drought + Heat stress, HDT60: Thermo-priming 60 min. + Drought + Heat stress) (Means values followed by different letters are significantly different at $P < 0.05$).

Specific leaf area was drastically reduced (55-69%) with all D treatments compared to control. However, it was determined that TP treatment prevented the decrease in SLA only under heat stress (Figure 3). Interestingly, TP treatment was found to reduce SLA by 12% in DT30 and 3% in DT60 compared to D. Combined stress decreased SLA by 68% in HD, 60% in HDT30, and 55% in HDT60 compared to H (Figure 3).

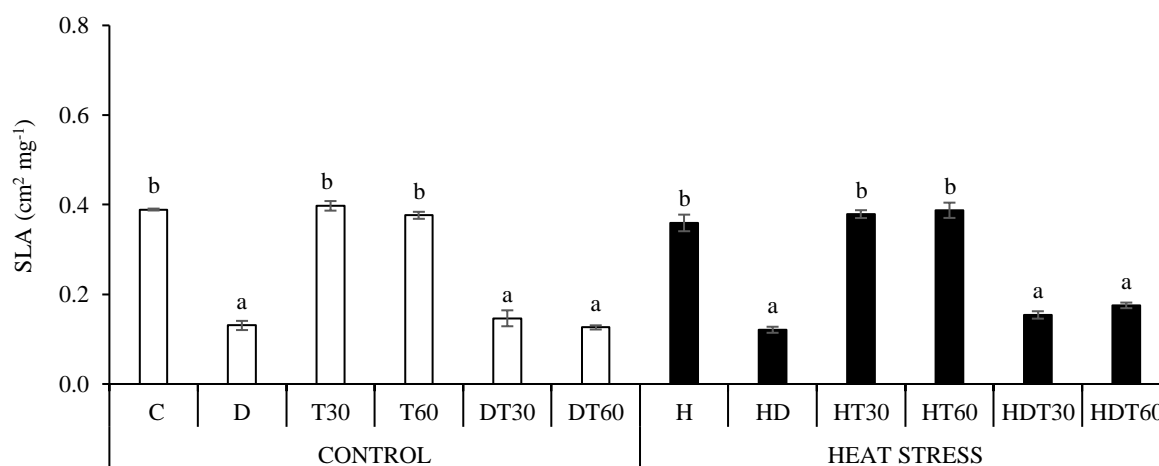


Figure 3. The effects of thermo-priming treatments on specific leaf area (SLA) (cm² mg⁻¹) of 7d old wheat seedlings under drought and heat stress. (C: Control, D: Drought, T30: Thermo-priming 30 min, T60: Thermo-priming 60 min, DT30: Drought + Thermo-priming 30 min, DT60: Drought + Thermo-priming 60 min; H: Heat stress (42°C for 3 h), HD: Drought and Heat stress, HT30: Thermo-priming 30 min. + Heat stress, HT60: Thermo-priming 60 min. + Heat stress, HDT30: Thermo-priming 30 min. + Drought + Heat stress, HDT60: Thermo-priming 60 min. + Drought + Heat stress) (Means values followed by different letters are significantly different at $P < 0.05$).

The relative water content was reduced by 10%, 20% and 30% in D, DT30 and DT60 compared to the control, respectively. On the other hand, RWC increased by 2% with T60 treatment. Heat stress treatment reduced RWC by 2% in HD compared to H. On the contrary, it increased by 1%, 4% and 6% in HT30, HT60 and HDT60, respectively (Figure 4).

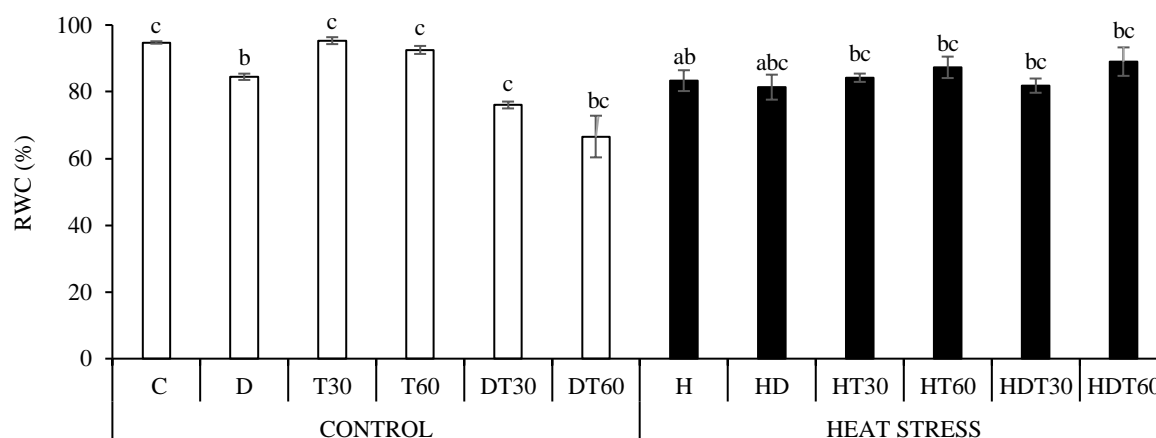


Figure 4. The effects of thermo-priming treatments on the relative water content (RWC) of 7d old wheat seedlings under drought and heat stress. (C: Control, D: Drought, T30: Thermo-priming 30 min, T60: Thermo-priming 60 min, DT30: Drought + Thermo-priming 30 min, DT60: Drought + Thermo-priming 60 min; H: Heat stress (42°C for 3 h), HD: Drought and Heat stress, HT30: Thermo-priming 30 min. + Heat stress, HT60: Thermo-priming 60 min. + Heat stress, HDT30: Thermo-priming 30 min. + Drought + Heat stress, HDT60: Thermo-priming 60 min. + Drought + Heat stress) (Means values followed by different letters are significantly different at $P < 0.05$).

Biomass was reduced by 50% in all D treatments of the trial compared to the control. However, biomass decreased by 8% at most with all treatments except drought stress (Figure 5).

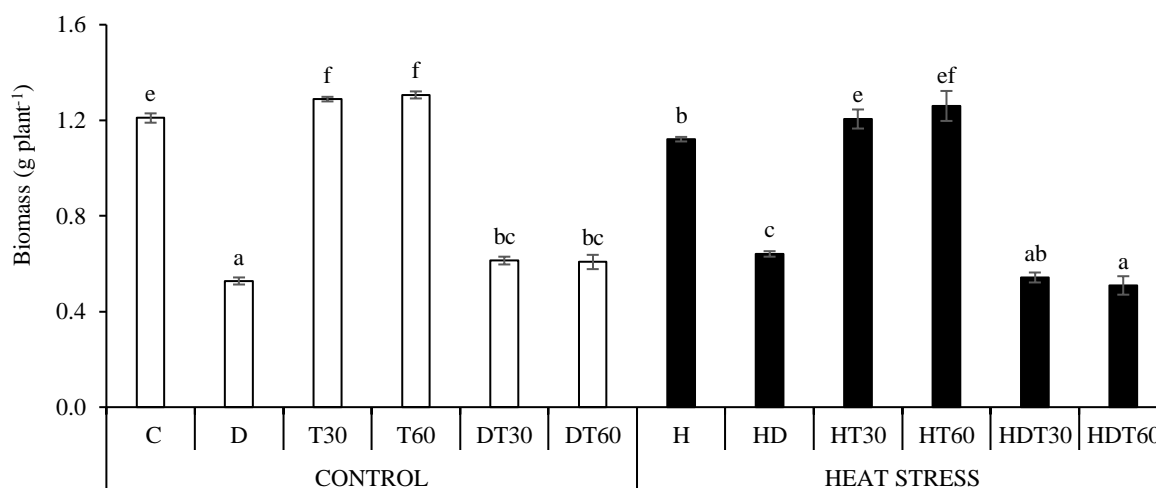


Figure 5. The effects of thermo-priming treatments on biomass in 7d old wheat seedlings under drought and heat stress. (C: Control, D: Drought, T30: Thermo-priming 30 min, T60: Thermo-priming 60 min, DT30: Drought + Thermo-priming 30 min, DT60: Drought + Thermo-priming 60 min; H: Heat stress (42°C for 3 h), HD: Drought and Heat stress, HT30: Thermo-priming 30 min. + Heat stress, HT60: Thermo-priming 60 min. + Heat stress, HDT30: Thermo-priming 30 min. + Drought + Heat stress, HDT60: Thermo-priming 60 min. + Drought + Heat stress) (Means values followed by different letters are significantly different at $P < 0.05$).

While the total chlorophyll content decreased by 37% with D treatment compared to the control, it reduced approximately 2 times with drought damage in wheat seedlings (DT30 and DT60) grown from thermo-priming seeds. On the other hand, total chlorophyll decreased by 59% with heat and drought stress (HD) compared to control, while thermo-priming treatments (HDT30 and HDT60) decreased by

54% and 43%, respectively (Figure 6). Accordingly, it can be said that the decrease in the total amount of chlorophyll in thermo-primed seeds is limited by drought and heat stresses.

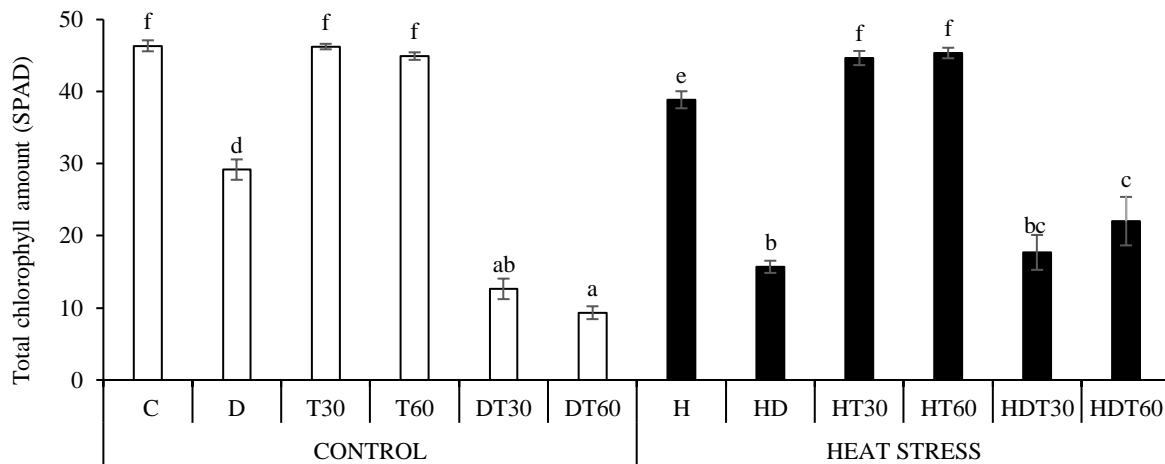


Figure 6. The effects of thermo-priming treatments on total chlorophyll amount (SPAD) in 7d old wheat seedlings under drought and heat stress. (C: Control, D: Drought, T30: Thermo-priming 30 min, T60: Thermo-priming 60 min, DT30: Drought + Thermo-priming 30 min, DT60: Drought + Thermo-priming 60 min; H: Heat stress (42°C for 3 h), HD: Drought and Heat stress, HT30: Thermo-priming 30 min. + Heat stress, HT60: Thermo-priming 60 min. + Heat stress, HDT30: Thermo-priming 30 min. + Drought + Heat stress, HDT60: Thermo-priming 60 min. + Drought + Heat stress) (Means values followed by different letters are significantly different at $P < 0.05$).

The amount of protein increased significantly with all treatments compared to the control. The highest increase was determined as 55% in T60. Similarly, heat stress was found to increase protein content by 43%, 46% and 44%, respectively, with HT60, HDT30 and HDT60 treatments compared to control (C) (Figure 7).

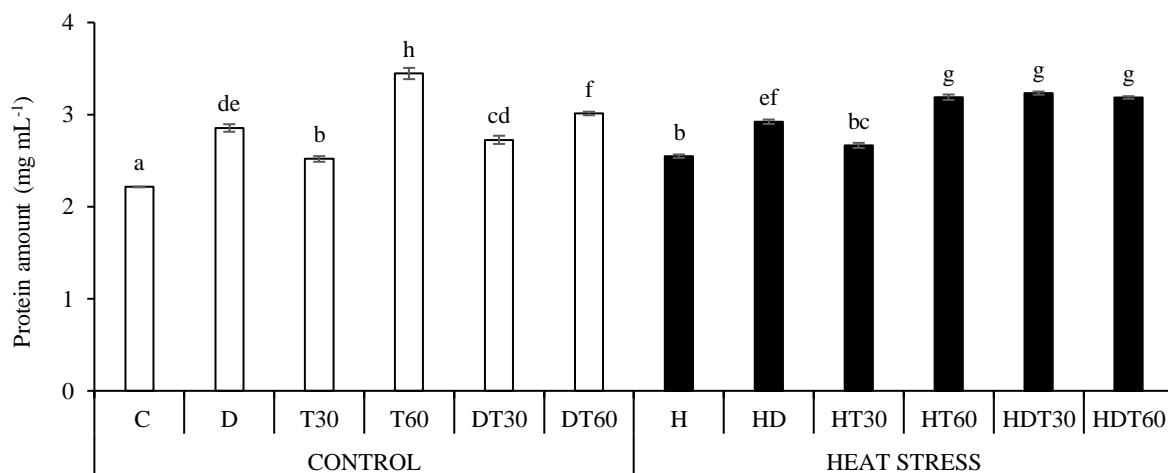


Figure 7. The effects of thermo-priming treatments on protein content in 7d old wheat seedlings under drought and heat stress. (C: Control, D: Drought, T30: Thermo-priming 30 min, T60: Thermo-priming 60 min, DT30: Drought + Thermo-priming 30 min, DT60: Drought + Thermo-priming 60 min; H: Heat stress (42°C for 3 h), HD: Drought and Heat stress, HT30: Thermo-priming 30 min. + Heat stress, HT60: Thermo-priming 60 min. + Heat stress, HDT30: Thermo-priming 30 min. + Drought + Heat stress, HDT60: Thermo-priming 60 min. + Drought + Heat stress) (Means values followed by different letters are significantly different at $P < 0.05$).

Ascorbate peroxidase activity increased 33% with D treatment compared to control, while it decreased significantly in thermo-priming treatments under normal condition. However, thermo-priming + drought treatments (DT30 and DT60) increased APX activities by 1.5 and 2.5 times, respectively, compared to the control (C). Similarly, 30 and 60 min of thermo-priming + heat stress treatments (HDT30 and

HDT60) increased the APX activities 2 and 3 times, respectively, compared to the control (H) under heat stress condition (Figure 8).

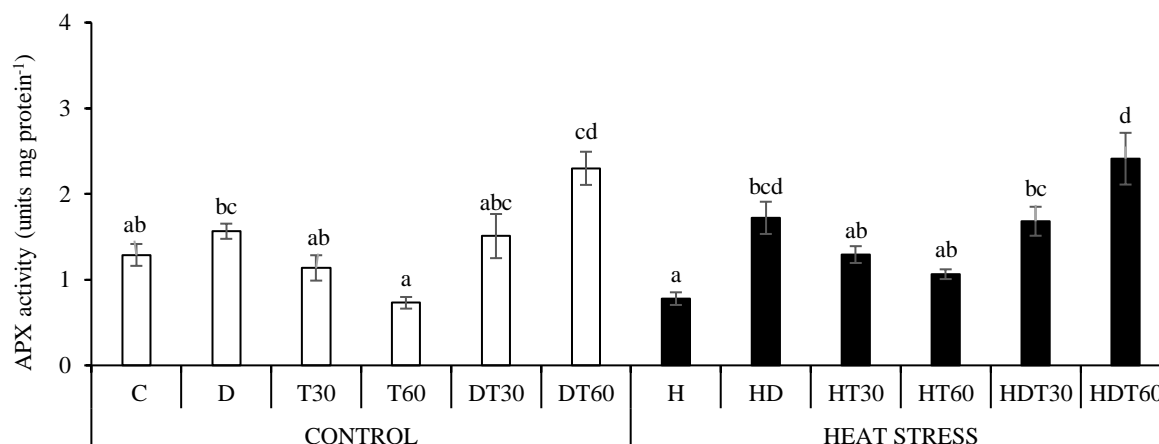


Figure 8. The effects of thermo-priming treatments on APX activity in 7d old wheat seedlings under drought and heat stress. (C: Control, D: Drought, T30: Thermo-priming 30 min, T60: Thermo-priming 60 min, DT30: Drought + Thermo-priming 30 min, DT60: Drought + Thermo-priming 60 min; H: Heat stress (42°C for 3 h), HD: Drought and Heat stress, HT30: Thermo-priming 30 min. + Heat stress, HT60: Thermo-priming 60 min. + Heat stress, HDT30: Thermo-priming 30 min. + Drought + Heat stress, HDT60: Thermo-priming 60 min. + Drought + Heat stress) (Means values followed by different letters are significantly different at $P < 0.05$).

Glutathione reductase activities in thermo-priming treatments (T30 and T60) increased by 14-18%, respectively, compared to the control, while increased by 5% with drought and heat stress. In addition, GR activity increased by 4% in DT30, and by 3.3% in HD. In general, all treatments decreased GR activity under heat stress conditions, except HDT30 (Figure 9).

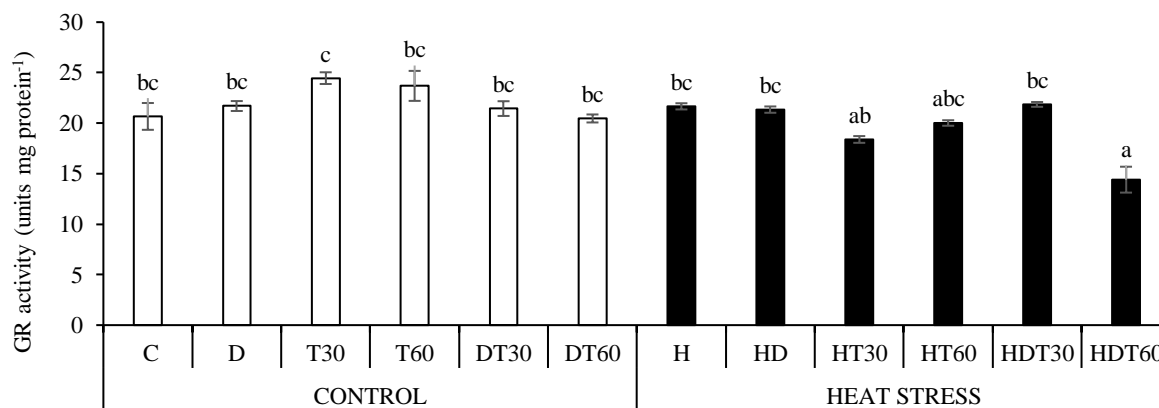


Figure 9. The effects of thermo-priming treatments on GR activity in 7d old wheat seedlings under drought and heat stress. (C: Control, D: Drought, T30: Thermo-priming 30 min, T60: Thermo-priming 60 min, DT30: Drought + Thermo-priming 30 min, DT60: Drought + Thermo-priming 60 min; H: Heat stress (42°C for 3 h), HD: Drought and Heat stress, HT30: Thermo-priming 30 min. + Heat stress, HT60: Thermo-priming 60 min. + Heat stress, HDT30: Thermo-priming 30 min. + Drought + Heat stress, HDT60: Thermo-priming 60 min. + Drought + Heat stress) (Means values followed by different letters are significantly different at $P < 0.05$).

Under normal conditions, CAT activity increased by 12% and 7% with drought stress (D) and T30, respectively, and decreased by 2-3% with T60, DT30 and DT60. However, CAT activity increased by 7% with heat stress (H). CAT activities significantly reduced by 20% in all HD treatments, except for 10% increase in HT60 compared to heat stress (Figure 10).

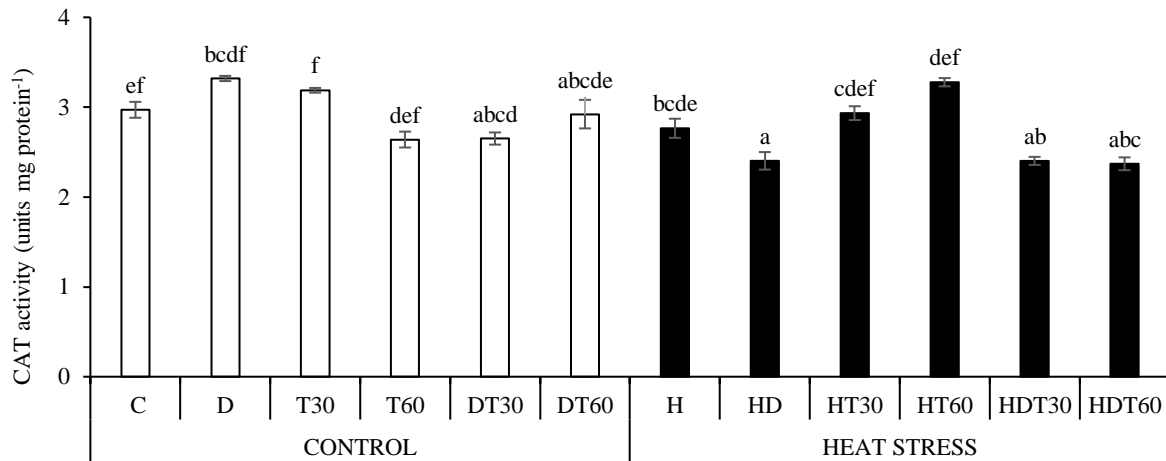


Figure 10. The effects of thermo-priming on CAT activity in 7d old wheat seedlings under drought and heat stress. (C: Control, D: Drought, T30: Thermo-priming 30 min, T60: Thermo-priming 60 min, DT30: Drought + Thermo-priming 30 min, DT60: Drought + Thermo-priming 60 min; H: Heat stress (42°C for 3 h), HD: Drought and Heat stress, HT30: Thermo-priming 30 min. + Heat stress, HT60: Thermo-priming 60 min. + Heat stress, HDT30: Thermo-priming 30 min. + Drought + Heat stress, HDT60: Thermo-priming 60 min. + Drought + Heat stress) (Means values followed by different letters are significantly different at $P < 0.05$).

Hydrogen peroxide content in the tissues was determined by the histochemical staining method used for the direct detection of H_2O_2 in plant leaf tissue (Figure 11 (b)). Accordingly, the H_2O_2 content increased by 5% and 9% with D and DT60, respectively, compared to the control, and decreased by 7% and 3%, respectively, with T30 and DT30. Under heat stress conditions, the H_2O_2 content increased by 4% with HD and decreased by 12% with HDT60 compared to H (Figure 11 (a)).

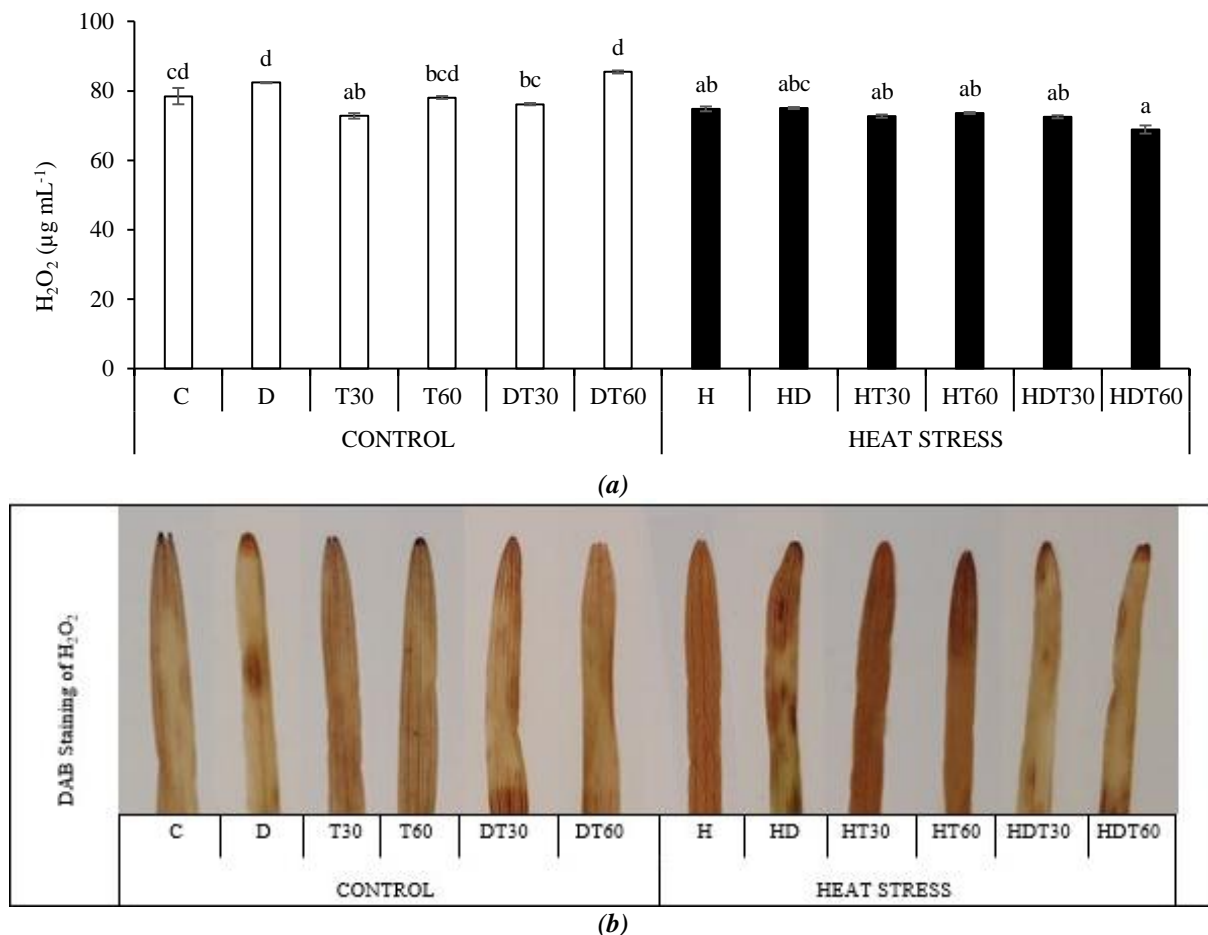


Figure 11. The effects of thermo-priming on hydrogen peroxide content (H_2O_2) ($\mu g ml^{-1}$) (A) and histochemical staining (B) in 7d old wheat seedlings under drought and heat stress. (C: Control, D: Drought, T30: Thermo-priming 30 min, T60: Thermo-priming 60 min, DT30: Drought + Thermo-priming 30 min, DT60: Drought + Thermo-priming 60 min; H: Heat stress ($42^\circ C$ for 3 h), HD: Drought and Heat stress, HT30: Thermo-priming 30 min. + Heat stress, HT60: Thermo-priming 60 min. + Heat stress, HDT30: Thermo-priming 30 min. + Drought + Heat stress, HDT60: Thermo-priming 60 min. + Drought + Heat stress) (Means values followed by different letters are significantly different at $P < 0.05$).

IV. DISCUSSION

Drought is a major abiotic factor limiting plant growth. Therefore, drought stress reduces growth and yield in wheat [36], [37]. Similarly in our study, drought stress decreased root and shoot length, RWC, SLA, biomass and total chlorophyll amount in Ekiz variety. On the other hand, heat stress significantly reduces productivity in wheat during the grain filling [38]. In addition, it was reported that high temperature reduces biomass in winter wheat and photosystem II is damaged due to insufficient antioxidant defense [20]. Heat stress treatment did not change root and shoot lengths, SLA, biomass, germination rate and GR activity of Ekiz variety. However, it decreased the total amount of chlorophyll, RWC, H_2O_2 content, APX activity and CAT activity.

There are reports that priming treatments affect growth parameters positively in wheat [21], [22]. Some studies have shown that thermo-priming treatments promote seed germination and seedling emergence [17], [18]. Our results showed that thermo-priming limited the reduction in root length with drought treatment but did not change the decrease in shoot length. On the other hand, heat treatment did not change root and shoot lengths significantly, while shoot lengths decreased dramatically with drought.

Accordingly, it was determined that the growth in double stress treatment decreased with the effect of drought stress and the thermo-priming treatment did not affect this.

Although the positive effect of priming treatments on seed germination has been [17], [18], our research results showed that all treatments, including thermo-priming, did not have a significant effect for seed germination of Ekiz variety. It has been reported that biomass decreases in wheat seedlings under drought stress [39], while GR24 priming treatment increases biomass [40]. However, it was determined that the decrease of SLA and biomass caused by drought and heat stresses did not affect with thermo-priming treatments. Additionally, the decreases in RWC, total chlorophyll content and the protein amount were increase with thermo-priming effect. Increases in protein content and antioxidant enzyme activities with sodium nitroprusside (SNP) priming treatment in wheat support our research results [41]. Interestingly, APX activities increased significantly, especially with 60 min thermo-priming treatments. However, GR activities were not significantly altered by drought and heat stress. However, it was determined that the CAT activities, which increased with D and decreased with H, decreased in thermo-priming treatment. On the other hands similar thermo-priming study in wheat which prevents damage to grain yield, increases chlorophyll content and antioxidant enzyme activities supports our results [37]. While H₂O₂ content increased with drought stress under normal conditions, it decreased with heat stress. A statistical decrease was determined only in HDT60 under temperature stress conditions and histochemical staining results support it. [20] reported that thermo-tolerance in wheat seedlings exposed to high temperature stress by heat priming in wheat is largely a result of enhanced antioxidant conditions at the intracellular level. In this context, the decrease in H₂O₂ amount in our results can be related to the increased APX activity with the effect of thermo-priming and suggesting that the improvement in growth parameters is related to it.

V. CONCLUSION

When strategically important cereals such as wheat are adversely affected by drought stress, biomass and yield decrease [35]. It is accepted that priming treatments are promising in solving the growth and yield problem that will be caused by increasing global warming in wheat production. In our study, it was determined that short-term thermo-priming treatment improved the biochemical parameters of Ekiz variety. Therefore, there is a need for a detailed investigation of the effect of thermo-priming on growth and development in wheat with longer-term treatments. As a result, it can be said that short-term thermo-priming treatment increases the antioxidant capacity of wheat and reduces the damage of double stress.

VI. REFERENCES

- [1] M.V. Mickelbart, P.M. Hasegawa, and J. Bailey-Serres, "Genetic mechanisms of abiotic stress tolerance that translate to crop yield stability," *Nature Reviews Genetics*, vol. 16, pp. 237–251, 2015.
- [2] FAO, (2019). Statistical database of the United Nations Food and Agriculture Organization. Available online at: <http://faostat.fao.org/site/291/default.aspx>
- [3] H. Turrall, J. Burke, and J. M. Faurès "Climate change, water and food security," Food and agriculture organization of the United nations (FAO), No. 36. Italy, Roma, 2011.
- [4] B. Akın, M. Bayha, R. Özkan, and C. Akıncı, "Investigation of morphological and physiological responses to increased water stress in some durum wheat genotypes (*Triticum durum* L.)," *Harran Journal of Agricultural and Food Sciences*, vol. 25, no. 2, pp. 265-278, 2021.
- [5] İ. Büyük, S.S. Aydın, and S. Aras, "Molecular responses of plants to stress conditions," *Turkish Journal of Hygiene and Experimental Biology*, vol. 69, no. 2, pp. 97-110, 2012.

- [6] Z. Zaimoğlu, “Climate change and Turkish agriculture interaction,” Supporting Joint Efforts in the Field of Climate Change Project, Ankara, 2019.
- [7] S. Demirbaş, and O. Acar, “Superoxide Dismutase and Peroxidase Activities from Antioxidative Enzymes in *Helianthus annuus* L. Roots During *Orobanche cumana* Wallr. Penetration,” *Fresenius Environmental Bulletin*, vol. 17, no. 8a, pp. 1038-1044, 2008.
- [8] I.M. Moller, P.E. Jensen, and A. Hansson, “Oxidative modifications to cellular components in plants,” *Annual Review of Plant Biology*, vol. 58, pp. 459-81, 2007.
- [9] B. Kacar, A.V. Katkat, and Ş. Öztürk, “*Plant Physiology*” Uludag University Empowerment Foundation Publication, No: 198, Vipas Publication No:74, Bursa, 2002.
- [10] K. Asada, “Production and scavenging of reactive oxygen species in chloroplasts and their functions,” *Plant Physiology*, vol. 141, no. 2, pp. 391-396, 2006.
- [11] F. Fazeli, M. Ghorbanli, and V. Niknam, “Effect of drought on biomass, protein content, lipid peroxidation and antioxidant enzymes in two sesame cultivars,” *Biologia Plantarum*, vol. 51, no. 1, pp. 98-103, 2007.
- [12] R. Mittler, S. Vanderauwera, M. Gollery, and F. Van Breusegem, “The reactive oxygen gene network in plants,” *Trends Plant Sci*, vol. 9, pp. 490-498, 2004.
- [13] W. Heydecker, and P. Coolbear, “Seed treatments for improved performance, survey and attempted prognosis,” *Seed Science and Technology*, vol. 5, pp. 353-425, 1977.
- [14] A.A. Khan, “Preplant physiological seed conditioning,” *Horticultural Reviews*, vol. 13, pp. 131-181, 1992.
- [15] M.S. Rhaman, S. Imran, F. Rauf, M. Khatun, C.C. Baskin, Y. Murata, and M. Hasanuzzaman, “Seed priming with phytohormones: An effective approach for the mitigation of abiotic stress,” *Plants*, vol. 10, no. 1, pp. 37, 2021.
- [16] T.J. Bruce, M.C. Matthes, J.A. Napier, and J.A. Pickett, “Stressful “memories” of plants: evidence and possible mechanisms,” *Plant Science*, vol. 173, no. 6, pp. 603-608, 2007.
- [17] S.P. Hardegree, “Optimization of seed priming treatments to increase low-temperature germination rate,” *Journal of Range Management*, no. 49, pp. 87–92, 1996.
- [18] T.G. Min, and B.M. Seo, “Optimum conditions for tobacco seed priming by PEG 6000,” *Korean Journal of Crop Science*, vol. 44, no. 3, pp. 263-266, 1999.
- [19] E. Elkoca, “Priming: pre-sowing seed applications,” *Journal of Atatürk University Faculty of Agriculture*, vol. 38, no. 1, pp. 113-120, 2007.
- [20] X. Wang, J. Cai, F. Liu, T. Dai, W. Cao, B. Wollenweber, and D. Jiang, “Multiple heat priming enhances thermo-tolerance to a later high temperature stress via improving subcellular antioxidant activities in wheat seedlings,” *Plant Physiology and Biochemistry*, vol. 74, pp. 185-192, 2014.
- [21] M. Farooq, S.M.A. Basra, and N. Ahmad, “Improving the performance of transplanted rice by seed priming,” *Plant Growth Regulation*, vol. 51, pp. 129–137, 2007.

- [22] S.M.A. Basra, M. Farooq, R. Tabassam, and N. Ahmad, "Physiological and Biochemical aspects of pre-sowing seed treatments in fine rice (*Oryza sativa* L.)," *Seed Science and Technology*, vol. 33, no. 3, pp. 623–628, 2005.
- [23] D. Harris, "The effects of manure, genotype, seed priming, depth and date of sowing on the emergence and early growth of *Sorghum bicolor* (L.) Moench in semi-arid Botswana," *Soil Tillage Research*, no. 40, pp. 73-88, 1996.
- [24] M.A. Shahzad, W.U. Din, S.T. Sahi, M.M. Khan, and E.M. Ahmad, "Effect of sowing dates and seed treatment on grain yield and quality of wheat," *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, vol. 44, no. 4, pp. 581583, 2007.
- [25] K. Maroufi, H.A. Farahani, and O. Moradi, "Thermo priming influence on seedling production in wheat (*Triticum aestivum* L.)," *Advances in Environmental Biology*, pp. 3664-3668, 2011.
- [26] P.J. Wilson, K.E.N. Thompson, and J.G. Hodgson, "Specific leaf area and leaf dry matter content as alternative predictors of plant strategies," *The New Phytologist*, vol. 143, no. 1, pp. 155-162, 1999.
- [27] R.E. Smart, and G.E. Bingham, "Rapid Estimates of Relative Water Content," *Plant Physiology*, vol. 53, pp. 258-260, 1974.
- [28] F.J. Peryea, and R. Kammereck, "Use of Minolta SPAD-502 chlorophyll meter to quantify the effectiveness of mid-summer trunk injection of iron on chlorotic pear trees," *Journal of plant nutrition*, vol. 20, no. 11, pp. 1457-1463, 1997.
- [29] M.M. Bradford, "A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding," *Analytical Biochemistry*, vol. 2, pp. 248-254, 1976.
- [30] Y. Nakano, and K. Asada, "Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts," *Plant and Cell Physiology*, vol. 22, pp. 867-880, 1981.
- [31] B. Halliwell, and C.H. Foyer, "Presence of glutathione and glutathione reductase in chloroplasts: A proposed role in ascorbic acid metabolism," *Planta*, vol. 133, pp. 21-22, 1976.
- [32] N. Bergmeyer, "Methoden der enzymatischen analyse," *Akademia Verlag*, vol. 1, pp. 636-647, 1970.
- [33] J.M. Cheeseman, "Hydrogen peroxide concentrations in leaves under natural conditions," *Journal of Experimental Botany*, vol. 5, no. 10, pp. 2435-2444, 2006.
- [34] D. Kumar, M.A. Yusuf, P. Singh, M. Sardar, and N.B. Sarin, "Histochemical detection of superoxide and H₂O₂ accumulation in *Brassica juncea* seedlings," *Bio-protocol*, vol. 4, no. 8, pp. e1108-e1108, 2014.
- [35] S. Demirbaş, and O. Acar, "Physiological and biochemical defense reactions of *Arabidopsis thaliana* to *Phelipanche ramosa* infection and salt stress," *Fresenius Environmental Bulletin*, vol. 26, no. 3, pp. 2268-2275, 2017.
- [36] W. Liu, F. Sun, S. Sun, L. Guo, H. Wang, and H. Cui, "Multi-scale assessment of eco-hydrological resilience to drought in China over the last three decades," *Science of the Total Environment*, vol. 672, pp. 201-211, 2019.



- [37] H.A.A. Hussein, S.O. Alshammari, S.K. Kenawy, F.M. Elkady, and A.A. Badawy, "Grain-priming with L-arginine improves the growth performance of wheat (*Triticum aestivum* L.) plants under drought stress," *Plants*, vol. 11, no. 9, pp. 1219, 2022.
- [38] Y. Fan, C. Ma, Z. Huang, M. Abid, S. Jiang, T. Dai, and X. Han, "Heat priming during early reproductive stages enhances thermo-tolerance to post-anthesis heat stress via improving photosynthesis and plant productivity in winter wheat (*Triticum aestivum* L.)," *Frontiers in plant science*, vol. 9, pp. 805, 2018.
- [39] C. Shan, S. Zhang, and X. Ou, "The roles of H₂S and H₂O₂ in regulating AsA GSH cycle in the leaves of wheat seedlings under drought stress," *Protoplasma*, vol. 25, no. 4, pp. 1257-1262, 2018.
- [40] T. Elmas, and O. Acar, "The Effects of Some Seed Priming Treatments on Germination and Seedling Development in Wheat," *International Journal of Scientific and Technological Research*, vol. 7, no. 5, pp. 2422-8702, 2021.
- [41] A. Hameed, T. Farooq, A. Hameed, M. Ibrahim, M.A. Sheikh, and S.M.A. Basra, "Wheat seed germination, antioxidant enzymes and biochemical enhancements by sodium nitroprusside priming," *Agrochimica*, vol. 59, no. 2, pp. 93-107, 2015.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Samsun İli Kanola Üretim Alanlarda Enfeksiyon Oluşturan Virüslerin Belirlenmesi

 Mehmet Ali ŞEVİK^{a,*},  Abdullah BALTAÇI^b

^a Bitki Koruma Bölümü, Ziraat Fakültesi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, TÜRKİYE

^b Bitki Sağlığı Bölümü, Karadeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü, Samsun, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: malis@omu.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.

ÖZ

Brassicaceae familyasına ait bir tür olan kanola (*Brassica napus*), önemli bir yağ bitkisidir. Bafra Ovası ülkemizin önemli kanola üretim alanlarından birisi konumundadır. Samsun ilinde kanola üretim alanlarında virüslerin yaygınlık durumunu belirlemek amacıyla 2021-2022 yılında sürveyler yapılmıştır. Arazide gözlemler sırasında bazı kanola bitkilerinde karakteristik virüs semptomları gözlenmiştir. Yapılan sürveyler sırasında, kanola üretim alanlarından yaprak örnekleri toplanmış ve bu örnekler virüs-spesifik ticari poliklonal antiserumlar kullanılarak Double antibody-Sandwich enzyme-linked immunosorbent assay (DAS-ELISA) yöntemi ile Cauliflower mosaic virus (CaMV), Turnip mosaic virus (TuMV), Cucumber mosaic virus (CMV), Tomato spotted wilt virus (TSWV) için analiz edilmiştir. Serolojik analizler sonucunda kanola örneklerinin %4.83'ünün CaMV, %3.22'sinin TSWV olmak üzere virüsle enfekteli (%8.06) olduğu belirlenirken, analiz edilen kanola örneklerinde CMV ve TuMV enfeksiyonuna rastlanmamıştır.

Anahtar Kelimeler: *Brassicaceae*, kanola, virüs, CaMV, TSWV

Detection of Viruses in Oilseed Rape (Canola) in Samsun Province

ABSTRACT

Oilseed rape, a member of the Brassicaceae, is one of the most important oil plants. Bafra Plain is one of the most important oilseed rape producing areas in Turkey. Surveys were done to determine the distribution of viruses in oilseed rape cultivated areas in Samsun province in 2021 and 2022. According to the results of field surveys, characteristic virus symptoms were observed on some oilseed rape plants. Leaf samples was collected from oilseed rape fields in Bafra Plain- Samsun province and tested for the presence of Cauliflower mosaic virus (CaMV), Turnip mosaic virus (TuMV), Cucumber mosaic virus (CMV), and Tomato spotted wilt virus (TSWV) by DAS-ELISA using commercial polyclonal antiserum. Result of serological tests showed that 8.06% of these samples were infected with CaMV (4.83%), and TSWV (3.22%). However, CMV and TuMV were not determined in canola samples.

Keywords: *Brassicaceae*, canola, virus, CaMV, TSWV

I. GİRİŞ

Kanola (*Brassica napus*), Brassicaceae familyası *Brassica* cinsine içerisinde yer alan, otsu bir bitki türüdür [1]. Bir yağ bitkisi olan kanolanın ekilişi son yıllarda, başta Trakya olmak üzere ülkemiz genelinde uygun iklim koşullarında artış göstermektedir. Kanola tohumlarında %40-50 arasında yağ bulunmaktadır [2]. Kanola ülkemizin bitkisel yağ ihtiyacını karşılaması, organik madde bakımından toprak yapısını iyileştirmesi, küspesinde %38-40 oranında protein bulunması, arıcılıkta erken ilkbaharda bol miktarda nektar sağlaması bakımından dünyada çok fazla ekilen bir yağ bitkisidir [3].

Türkiye’de TÜİK 2022 yılı verilerine göre 411.455 da alanda, 150.000 ton kanola üretilmektedir [4]. Samsun ilinde kanola üretimin büyük çoğunluğu Bafra ve Alaçam ilçelerinde yapılmaktadır Özellikle Bafra Ovası; birçok kültür bitkisinde olduğu gibi kanola üretiminin yapıldığı önemli tarımsal üretim potansiyeline sahip bir bölgedir. Fakat daha önce yapılan birçok araştırmada diğer *Brassica* türlerinde olduğu gibi kanola bitkilerinde bazı viral hastalık etmenlerinin büyük ekonomik kayıplara yol açtığı bildirilmiştir [5].

Kanola bitkisinde yaygın görülebilen bazı virüsler arasında; Cauliflower mosaic virus (CaMV), Turnip mosaic virus (TuMV), Cucumber mosaic virus (CMV), Tomato spotted wilt virus (TSWV) yer almaktadır [5-11].

TuMV, özellikle *Brassica* grubu kültür bitkilerinde ve yabani türlerinde hastalık oluşturabilen en önemli virüslerden biridir [12]. TuMV, afit türleri tarafından kolayca taşınabilmektedir [13]. Ülkemizin birçok bölgesinde farklı illerde lahanagil bitkilerinde TuMV tespit edilmiş ve populasyon yapıları aydınlatılmıştır [14-16].

Yine dünya genelinde lahanagillerde yaygın olan ve üretimde verim kayıplarına neden olabilen diğer bir virüs Cauliflower mosaic caulimovirus (CaMV)’dir [17]. Virüs ilk kez 1937 yılında ABD’de şalgam ve lahanaya bitkisinde tespit edilmiştir. CaMV, 50 nm çapında partiküllere sahiptir [18] ve 25’ den fazla afit türleri ile semi-persistent olarak taşınabilmektedir [17].

Cucumber mosaic cucumovirus (CMV), binden fazla konukçu bitki türünde hastalığa neden olabilen en yaygın ve en önemli virüslerden biridir. CMV, yaklaşık olarak 29-30 nm çapında izometrik şekilli, (+) ssRNA genomuna sahiptir. Bu virüs çok sayıda afit türü ile non-persistent olarak taşınabilmektedir. [19]. CMV’nin lahanaya bitkilerinde enfeksiyon gerçekleştirebildiği değişik bilim insanları tarafından ortaya konmuştur [20-21].

Tomato spotted wilt orthospovirus (TSWV), Tosspoviridae familyası, *Orthospovirus* cinsi içerisinde yer almaktadır [22], [23] ve 80-110 nm çapında küresel partiküllere sahiptir [23]. Dünya’da ve ülkemizde son yıllarda birçok bitkisel üretim alanında salgın hale gelen TSWV, kültür bitkilerinde en fazla ekonomik öneme sahip ilk on virüs arasında bulunmaktadır [25]. Özellikle kültür bitkileri ve süs bitkilerinde TSWV dünyanın farklı bölgelerinde sık sık salgın oluşturabilmekte ve verim kayıplarına yol açabilmektedir. İran’ın farklı kanola üretim bölgelerinde, TSWV enfeksiyonları birçok kez rapor edilmiştir [7], [10], [11], [26].

Ülkemizde kanola bitkilerinde virüs enfeksiyonu Trakya Bölgesi’nde yürütülen çalışmalar ile tespit edilmiştir. Bu çalışmalar ülkemizde kanola virüsleri ile ilgili yapılan ilk araştırmalardır [16]. Ancak Karadeniz Bölgesi’nde Samsun ilinde özellikle birçok lahanagil grubu bitki türlerinin yoğun olduğu ve kanola üretiminin yapıldığı önemli tarımsal potansiyele sahip bir bölgede, kanola hastalıklarına yönelik herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bölge için son derece önemli olan ürünlerde verim kayıplarının nedenlerini belirlemek, ekonomik açıdan son derece önem arz etmektedir.

Son yıllarda Samsun ilinde yetiştiriciliği yoğun olarak yapılan Brassica grubu bitkilerde virüslere ve virüs benzeri etmenlerin simptomlarına çok sık olarak rastlanması ve kanola bitkilerinde yapılmış bir çalışma olmaması sebebiyle bu araştırmanın yapılmasına gerek duyulmuştur. Bu çalışmada, ülkemizde yoğun kanola üretim merkezlerinden birisi konumunda olan Samsun ili Bafra ve Tekkeköy ilçelerinde kanola üretim alanlarında, potansiyel virüslerin bulunma ve yaygınlık oranlarının ve virüslerin kanola bitkilerinde reaksiyonlarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

II. MATERYAL ve METOT

A. ARAZİ SÜRVEYLERİ VE ARAŞTIRMA ÖRNEKLERİNİN TOPLANMASI

Sürvey çalışmaları 2021 ve 2022 yıllarında Samsun ilinde üretimin neredeyse tamamına yakını karşılayan Bafra Ovası ve Tekkeköy ilçesinde gerçekleştirilmiştir. Araştırma materyalini kanola yetiştirilen alanlarda virüs benzeri simptom sergileyen örnekler oluşturmuştur. Örneklerin toplanması bitki gelişimine bağlı olarak, iki farklı dönemde (Ocak ve Nisan) gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Gerçekleştirilen sürveylerde Bafra ve Tekkeköy ilçelerinde kanola üretimi yapılan alanlardaki kanola bitkilerinden yaprak örnekleri alınmış ve etiketlenerek test edilmek üzere laboratuvara getirilmiştir.



Şekil 1. Erken vejetasyon (sol) ve geç (sağ) vejetasyon döneminde sürvey yapılan kanola üretim alanları

B. SEROLOJİK ÇALIŞMALAR

Kanola bitki örneklerinde enfeksiyon oluşturan virüsleri belirlemek amacı ile, özellikle Brassica ürün grubunda yaygın olarak görülebilen muhtemel viral etmenlerin (CaMV, CMV, TSWV, TuMV) antiserumları kullanılarak [5], DAS-ELISA yöntemi ile kanola yaprak örnekleri analiz edilmiştir.

Bu çalışmada 96 kuyucuklu polysterene maddeden yapılmış olan mikroplyetler (TPP) kullanılmıştır. Serolojik yöntem Clark ve Adams [27] ve antiserumun temin edildiği firma (Bioreba) önerileri doğrultusunda uygulanmıştır. Kanola yaprak örnekleri, ekstraksiyon tampon çözeltisi (1/5) içerisinde homojenize edilmiştir. Daha önceden kaplama solüsyonu 1/1000 oranında sulandırılarak hazırlanan antiserum ile kaplanmış mikroplyetlere, yıkama sonrası homojenat 100'er µl olacak şekilde ilave edilmiştir. Bir gece +4 °C' de buzdolabında bekletilmiş olan mikroplyetler, yıkama solüsyonu ile 5 kez yıkanmıştır. Konjugat tampon çözeltisinde 1/1000 oranında sulandırılan virüs-spesifik IgG' den 100 µl, mikroplyetin her bir kuyucuğuna eklenmiştir. Konjugat inkubasyonu 30 °C' de dört saat şeklinde uygulanmıştır. Mikroplyet kuyucukları yıkandıktan sonra substrat (p-nitrofenil fosfat), substrat solüsyonunda sulandırıldıktan sonra 100'er µl ilave edilmiştir. Mikroplyetler substrat inkubasyonu için oda sıcaklığında iki saat inkubasyona bırakılmıştır. ELISA mikroplyet okuyucusunda (Tecan Spectra) 405 nm. dalga boyunda absorban değerlerinin alınmasıyla sonuçlar elde edilmiştir. Negatif kontrollerin ELISA absorban değerlerinden iki katı ve daha fazla değer veren örnekler pozitif olarak kabul edilmiştir [28].

C. BİYOLOJİK ÇALIŞMALAR

Virüs benzeri semptom gösteren ve hastalıklı olduğu düşünülen kanola bitkilerinden alınan örneklerin test edilmesi ve ELISA sonucu pozitif örneklerin inokule edilmesi için Brassica grubu test bitkileri (turp, beyaz baş lahanası, yaprak lahanası, karnabahar, alabaş) kullanılmıştır. Farklı semptom (yaprak kenarlarında kızarıklık, damarlar arası kloroz, şekil bozukluğu vb.) gösteren örnekler gruplara ayrıldıktan sonra her bir gruba ait örnek, iklim odasında yetiştirilen test bitkilerine mekanik olarak taşıma çalışmalarında kullanılmıştır. Ayrıca kanola bitkilerinden izole edilen virüs izolatları test bitkilerine tekrar inokule edilmiş ve bitkilerin gösterdiği reaksiyonlar kaydedilmiştir. Bu amaçla yapraklar steril havan içerisinde 0.01 M fosfat tampon çözeltisi (NaH_2PO_4 , Na_2HPO_4 , pH 7.0) ile 1 gr yaprak/5 ml tampon çözeltisi olacak şekilde homojenize edilmiştir [29]. Karborandum tozu dökülen test bitkilerinin yapraklarına, elde edilen bitki öz suları sürülerek inokulasyon gerçekleştirilmiş ve musluk suyu altında yıkandıktan sonra bitkiler iklim odasına (24 °C) alınmıştır. İnokule edilen bitkilerinin virüslere karşı gösterdiği reaksiyonlar gözlenerek değerlendirilmek üzere kaydedilmiştir. Bitkiler ayrıca inokulasyondan sonra DAS-ELISA [27] yöntemi ile test edilmiş ve reaksiyon/test sonuçları analiz edilmiştir.

III. BULGULAR

A. SÜRVEY SONUÇLARI

Samsun ile kanola üretim alanlarında 2021 ve 2022 yıllarında farklı vejetasyon dönemlerinde sürveyler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen sürveylerde üretim alanlarında muhtemel virüs belirtisi gösteren (yaprak kenarlarında kızarıklık, damarlar arası kloroz, şekil bozukluğu vb.) ve göstermeyen bazı kanola yaprak örnekleri toplanmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. 2021 ve 2022 yılında yapılan sürveyler kapsamında kanola üretim alanlarından toplanan yaprak örnekleri

B. SEROLOJİK ÇALIŞMA SONUÇLARI

Samsun ili Bafra ve Tekkeköy ilçesi kanola yetiştirilen alanlardan toplanan örnekler DAS-ELISA yöntemi ile CaMV, TuMV, CMV ve TSWV için analiz edilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Kanola örneklerin DAS-ELISA yöntemi ile analiz edildiği mikropleyt

Analiz sonucunda kanola yetiştirilen alanlardan toplanan örneklerinin %8.06'sının virüsler ile enfekteli olduğu belirlenmiştir. Samsun ili Bafra ve Tekkeköy ilçelerden toplanan ve analiz edilen kanola yaprak örneklerinde TuMV ve CMV virüslerine rastlanmazken, örneklerin %4.83'ünün CaMV, %3.22'sinin TSWV enfekteli olduğu tespit edilmiştir. Test edilen örneklerde karışık enfeksiyona rastlanmamıştır (Tablo 1).

Tablo 1. Samsun ilinden toplanan ve test edilen kanola örnek sayıları ve tespit edilen virüsler

İlçe	Örnek sayısı	CaMV	CMV	TSWV	TuMV
Bafra	112	2	0	1	0
Tekkeköy	12	4	0	3	0
Toplam	124	6	0	4	0

Samsun ili Bafra ilçesinden alınan kanola yaprak örneklerin %2.67'si virüsle enfekteli bulunurken %1.78 oranında CaMV, %0.89 oranında ise TSWV ile enfekteli olduğu belirlenmiştir.

C. BİYOLOJİK ÇALIŞMA SONUÇLARI

Samsun ili kanola üretim alanlarından toplanan yaprak örneklerinde saptanan virüsler, test bitkilerinin virüslere reaksiyonlarını belirlemek amacı ile kontrollü koşullarda ekimi yapılan test bitkilerine (turp, beyaz baş lahana, yaprak lahana, karnabahar, alabaş) mekaniksel olarak bulaştırılmıştır.

CaMV inokule edilen beyaz baş lahana bitkilerinin yapraklarında klorotik (solda) ve nekrotik (sağda) lokal lezyon belirtileri gözlenmiştir (Şekil 4). Belirti gösteren bitkilerde virüsün varlığı tespit edilmiştir.



Şekil 4. CaMV inokule edilen lahana yapraklarında gözlenen klorotik (solda) ve nekrotik (sağda) lokal lezyonlar

CaMV inokule edilen turp bitkilerinde mozayik ve kabarcıklı mozayik (mottle) belirtileri oluşmuştur (Şekil 5).



Şekil 5. *CaMV* inokule edilen turp bitkilerinde gözlenen mozayik (solda) ve mottle (sağda) belirtileri

Lahana bitkilerine mekanik inokulasyondan sonra kontrollü şartlarda gözlenen fidelerinde ilk iki hafta herhangi bir virüs belirtisi görülmemiştir. Üçüncü haftadan itibaren inokule edilen yapraklarda ve yeni gelişen yapraklarda klorotik lokal lezyon şeklinde belirtiler ortaya çıkmıştır (Şekil 4).

Mekanik inokulasyondan sonra kontrollü şartlarda gözlenen test bitkilerinde (turp, beyaz baş lahana, yaprak lahana, karnabahar, alabaş) iki hafta herhangi bir virüs belirtisi görülmemiştir. Üçüncü haftadan itibaren hafif mozayik şeklinde belirtiler görülmeye başlanmıştır. Haftalar ilerledikçe belirtilerin de şiddeti artarak şiddetli mozayik, kabarcıklı mozayik (mottle) belirtileri ortaya çıkmıştır (Şekil 5).

Virüs ile inokule edilen ve kontrollü şartlar altında 10 hafta takip edilen test bitkilerinde tipik virüs belirtileri ortaya çıkmıştır. Bu örneklerin serolojik olarak (DAS-ELISA) test edilmesi sonucu *CaMV* ile enfekteli (pozitif) olduğu teyit edilmiştir.

IV. TARTIŞMA

Orta Karadeniz Bölgesi'nde yetiştiriciliği yoğun olarak yapılan Brassica grubu bitkilerde virüslere ve virüs benzeri simptomlara çok sık olarak rastlanmaktadır. Bu çalışmada, Samsun ili kanola üretim alanlarında, potansiyel virüslerin bulunma ve yaygınlık durumlarının belirlenmesi amacıyla 2021 ve 2022 yıllarında sürveyler gerçekleştirilmiş ve kanola yaprak örnekleri toplanmıştır. Bazı kanola bitki yapraklarında yaprak kenarlarında kızarıklık, damar arası kloroz, yaprakta kızarma ve şekil bozukluğu belirtileri gözlenmiştir. Bu virüs belirtileri daha önceki çalışmalarda gözlenen belirtiler ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir [16], [28].

Kanola yaprak örnekleri serolojik yöntemler ile analiz edilmiştir. Analiz sonucunda kanola yetiştirilen alanlardan toplanan örneklerinin %8.06'sının enfekteli olduğu belirlenmiştir. Samsun ilinde incelenen kanola yaprak örneklerinde TuMV ve CMV virüslerine rastlanmazken, örneklerin %4.83'ünün *CaMV*, %3.22'sinin TSWV enfekteli olduğu tespit edilmiştir.

Orta Karadeniz Bölgesi'nde bu çalışma kapsamında kanola bitkilerinde ilk kez saptanan *CaMV* ve TSWV daha önce aynı bölgede farklı bitki (beyaz baş lahana, yaprak lahana, turp, tere, domates, biber) türlerinde tespit edilmiştir [30-33].

Kültür bitkilerinde bir virüs hastalığının enfeksiyon oranı ve yaygınlık durumu bitki türü ve çeşidine, vektörünün olup olmadığına, çevre koşullarına, bölgeye ve diğer birçok faktöre bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Ülkemizin en önemli kanola üretim bölgelerinden birisi olan Marmara Bölgesi'nde Edirne, Kırklareli ve Tekirdağ illerinde, 2013-14 yıllarında kanola üretim alanlarında sürveyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma sırasında karakteristik kloroz ve mozaik simptomları gösteren 73 adet kanola yaprak örneği toplanmıştır. Serolojik (DAS-ELISA) analizler sonucunda, 73 örnekten 10 tanesinde Beet western yellows virus (BWYV) tespit edilmiştir. Analizler sonucunda, örneklerde TuMV'ye ise rastlanmamıştır [34].

Çanakkale ili kanola üretim alanlarında 2014 üretim yılı içinde yürütülen bir başka çalışmada, kanola tarlalarına sürvey çalışmaları yapılarak bu bitkiler görsel olarak incelenmiş ve tipik olarak kloroz, mozaik belirtileri gösteren 21 bitkiden örnekler alınmıştır. Alınan örnekler DAS-ELISA ve RT-PCR yöntemleriyle analiz ve test sonucunda 15 örneğin TuMV ile enfekteli olduğu belirlenmiştir [16].

Yine aynı bölgede Çanakkale ve Tekirdağ illeri kanola üretim alanlarındaki bazı virüs hastalıklarının tespiti ve moleküler karakterizasyonu amacı ile yürütülen bir çalışmada, kanola bitkileri görsel olarak incelenmiş, virüs ve virüs-benzeri simptom gösteren bitkilerden örnekler toplanmıştır. Toplanan örnekler DAS-ELISA ile testlenmiştir. Testlemeler sonucunda 16 örnek TuMV ile 3 örnek ise CMV ile enfekteli olarak bulunmuştur. Bir örnekte ise CMV ve TuMV karışık enfeksiyonu tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışma ile kanola üretim alanlarında TuMV ve CMV enfeksiyonu tespit edilerek, moleküler olarak karakterize edilmiştir [35-36].

Dünyanın farklı ülkelerinde kanola bitkileri ile ilgili yapılan çalışmalarda farklı virüslerin kanola bitkilerinde değişik oranlarda enfeksiyon gerçekleştirdiği bildirilmiştir. İran'da 11 ilde kanola lokasyonlarında yapılan sürveylerde örnekler toplanmış ve analiz edilmiştir. Örneklerde CaMV (%40.2), BWYV (%17.8), TuMV (%6.20) ve farklı oranlarda karışık enfeksiyonlar tespit edilmiştir [5].

Bir başka çalışmada İran'ın kuzeyinde yer alan 8 ilde 2011 ve 2012 yılları arasında Brassica grubu bitki türlerinde sürveyler yapılmış ve simptomatik bitkilerin %38'inin TuMV ile enfekteli olduğu saptanmıştır. Aynı çalışmada, şalgam bitkilerinin %61, turp bitkilerinin %55, kanola bitkilerinin ise %38 oranında TuMV ile enfekteli olduğu tespit edilmiştir [8].

Avustralya'da 1998-1999 yılları arasında Coutts ve Jones [37], tarafından yapılan bir sürvey çalışmasında toplanan örnekler BWYV, CaMV ve TuMV için test edilmiştir. İlk yıl toplanan örneğin %5'inde, 2. yıl ise sadece %1'inde TuMV'yi saptamışlardır. Zhao ve ark. [38] Çin'de kanola üretim alanlarında gerçekleştirmiş oldukları sürvey çalışmaları sırasında 86 örnek toplamışlardır. Yapılan analiz sonuçlarına göre örneklerin %43'ünün TuMV ile enfekteli olduğunu saptamışlardır.

İran'ın Fars şehrinde lahanagil üretim alanlarında sürveyler yürütülmüştür. Yapraklarda beneklenme, damar bantlaşması, mozaik, nekrotik lezyonlar, kloroz, gelişme geriliği gibi tipik virüs belirtileri gösteren değişik lahanagil (lahana, karnabahar, brokoli ve şalgam) bitkilerinden yaprak örneği toplanmış ve DAS-ELISA metodu ile analiz edilmiştir. Böylece biyolojik ve serolojik yöntemler ile İran'da karnabahar, lahana, brokoli ve şalgam bitkilerinde CaMV tespit edilmiştir [7]. Birleşik Krallık'da yapılan bir çalışmada ise bazı Brassica türleri üretim alanlarından alınan örneklerin; sırası ile %60'ı CaMV, %43'ü BWYV, %43'ü TuMV, %18'i ise TYMV ile enfekteli bulunmuştur [39].

IV. SONUC

Orta Karadeniz Bölgesi'nde kanola üretiminde özellikle Bafra ilçesi önemli bir paya sahip olup, kanola üretimi önemli bir gelir kaynağı oluşturmaktadır. Ancak üretimi olumsuz etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Ülkemiz için son derece önemli olan kanola bitkilerinde kayıpların nedenlerini belirlemek ve bu kayıpları önleyici tedbirlerin alınması ülkemiz ve bölgemiz ekonomisi açısından oldukça önem arz etmektedir. Bölgede daha önce bu konuda yapılmış herhangi bir araştırmanın olmaması ve diğer Brassica türlerinde virüslerin yaygın olarak belirlenmesi nedeniyle, bu çalışmanın yürütülmesine ihtiyaç doğmuştur.

Yapılan bu araştırma ile Samsun ili kanola yetiştirilen alanlarda, potansiyel virüslerin bulunuş, yayılış durumlarına yönelik bulgular elde edilmiştir. Bitki çeşitlerinin virüslere hassasiyet dereceleri de oldukça önemli olmaktadır. Bu çalışmada, test bitkilerinin elde edilen izolatlara hassasiyet dereceleri belirlenmiştir. Ancak bu çalışmalar kontrollü şartlar altında yürütülmüştür o nedenle arazi koşullarında bu konu ile ilgili daha detaylı çalışmaların yürütülmesine ihtiyaç bulunmaktadır.

TEŞEKKÜR: Bu çalışma, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Proje Yönetim Ofisi (PYO) tarafından (PYO.ZRT.1901.20.005) desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı OMÜ-PYO teşekkür ederiz.

V. KAYNAKLAR

- [1] A. Doğru, “Kolza bitkisine (*Brassica napus* L.) genel bir bakış,” *Uluslararası Anadolu Ziraat Mühendisliği Bilimleri Dergisi*, c. 2 s. 2 ss. 30-36, 2020.
- [2] H. Baydar, "Isparta koşullarında kanola (*Brassica napus* L.) çeşitlerinin verim ve kalite özellikleri,” *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 9, s. 3, ss. 1-6, 2009.
- [3] M. F. Baran, İ. S. Dalmış ve B. Kayışoğlu, “Kanola bitkisinin parçalanmaya yönelik bazı mekanik özelliklerinin belirlenmesi,” *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 2, s. 5, ss. 143-148, 2016.
- [4] TÜİK, [Online] Available: <https://biruni.tuik.gov.tr/bitkiselapp/bitkisel.zul>, 2022.
- [5] S. Nooh, “An Overview of Oilseed Rape (canola) Virus Diseases in Iran,” *International Research Journal of Microbiology*, vol. 3, no. 1 pp. 24-28, 2012.
- [6] S. Farzadfar, A.R. Golnaraghi, R. Pourrahim, *Plant viruses of Iran*. Tehran, Iran: Saman Company Publication, pp. 203, 2003.
- [7] S. Farzadfar, R. Pourrahim, A.R. Golnaraghi, A. Ahounmanesh, “Occurrence of Cauliflower mosaic virus in different cruciferous plants in Iran,” *Plant Pathology*, vol.54 pp. 810, 2005.
- [8] S. Farzadfar, R. Pourrahim, “Characterization of Turnip mosaic virus from the Asian-BR Population in Iran,” *Journal of Phytopathology*, vol. 162, pp. 824–828, 2014.
- [9] T. Ghotbi, N. Shahraeen, S. Winter, “Occurrence of tospoviruses in ornamental and weed species in Markazi and Tehran provinces in Iran,” *Plant Disease*, vol. 89, no. 4, pp. 425-429, 2005.
- [10] N. Shahraeen, S. Farzadfar, D.E. Lesemann, “Incidence of viruses infecting winter oilseed rape (*Brassica napus* ssp. *olifera*) in Iran,” *Journal of Phytopathology*, vol.151, pp. 614-616, 2003.
- [11] A. Z. Tabarestani, M. Shamsbakhsh, N. Safaei, ” Distribution of three important aphid borne canola viruses in Golestan province,” *Iranian journal of Plant Protection Science*, vol. 141 no. 2, pp. 112-118, 2011.
- [12] N. Pitzalis, K. Amari, S. Graindorge, D. Pflieger, L. Donaire, M. Wassenegger, C. Llave M. Heinlein, M. Heinlein, “Turnip mosaic virus in oilseed rape activates networks of sRNA-mediated interactions between viral and host genomes,” *Communications Biology*, vol. 3, no. 1, pp. 1-16, 2020.
- [13] Q. Chesnais, M. Verdier, M. Burckbuchler, V. Brault, M. Pooggin, M. Drucker, “Cauliflower mosaic virus protein P6 - TAV plays a major role in alteration of aphid vector feeding behaviour but not performance on infected *Arabidopsis*,” *Molecular Plant Pathology*, vol. 22, pp. 911–920, 2021.
- [14] S. Korkmaz, S. Onder, Y. Tomitaka, K. Ohshima, “First report of Turnip mosaic virus on Brassicaceae crops in Turkey,” *Plant Pathology*, vol. 56 no. 4, pp. 720-720, 2007.
- [15] S. Korkmaz, Y. Tomitaka, S. Onder, K. Ohshima, “Occurrence and molecular characterization of Turkish isolates of Turnip mosaic virus,” *Plant Pathology*, vol. 57, no .6, pp. 1155-1162, 2008.

- [16] A. Karanfil, S. Korkmaz, "Çanakkale ili kanola (*Brassica napus* L.) üretim alanlarında Şalgam mozaik virüsü (Turnip mosaic virus; TuMV) enfeksiyonunun tanınması ve karakterizasyonu," *Bitki Korum Bülteni*, s. 56, c. 2, ss. 185- 197, 2016.
- [17] R. Yasaka, H. D. Nguyen, S. Y. Ho, S. Duchene, S. Korkmaz, N. Katis, H. Takahashi, A. J. Gibbs, K. Ohshima, "The temporal evolution and global spread of Cauliflower mosaic virus, a plant pararetrovirus," *PloS one*, vol.9, no. 1, 2014.
- [18] R. J. Shephard, "Cauliflower mosaic virus," *AAB Descriptions of Plant Viruses*, no. 243, 1981.
- [19] M.H.V. Van Regenmortel, C.M. Fauquet, D.H.L. Bishop, E.B. Carstens, M.K. Estes, S.M. Lemon, J. Moniloff, M.A. Mayo, D.J. McGeoch, C.R. Pringle, R.B. Wickner, *Virus taxonomy*, Seventh Report of the ICTV, New York: Academic Press, pp. 599-621, 2000.
- [20] A. Moreno, C. De Blas, R. Biurrun, M. Nebreda, I Palacios, M. Duque, A. Fereres, "The incidence and distribution of viruses infecting lettuce, cultivated Brassica and associated natural vegetation in Spain," *Annals Applied Biology*, vol. 144, pp. 339-346, 2004.
- [21] S. Erkan, M. Gümüş, İ.C. Paylan, İ. Duman, M. Ergün, "İzmir ili ve çevresindeki bazı kışlık sebzelerde görülen viral etmenlerin saptanması," *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, c. 50, s. 3, ss. 311-322, 2013.
- [22] J.F. Uhrig, T.R. Soellick, C.J. Minke, C. Philipp, J.W. Kellmann, P.H. Schreier, "Homotypic interaction and multimerization of nucleocapsid protein of Tomato spotted wilt tospovirus: Identification and characterization of two interacting domains," *Proceedings of the National Academy of Science*, vol. 96, no. 1, pp. 55-60, 1999.
- [23] M. Tsompana, J. Abad, M. Purugganan, W. Moyer, "The molecular population genetics of the Tomato spotted wilt virus (TSWV) genome," *Molecular Ecology*, vol. 14 pp. 53-66, 2005.
- [24] S. Adkins, "Tomato spotted wilt virus- positive steps towards negative success," *Molecular Plant Pathology*, vol. 1, no. 3, pp. 151-157, 2000.
- [25] K. B. G. Scholthof, S. Adkins, H. Czosnek, P. Palukaitis, E. Jacquot, T. Hohn, B. Hohn, K. Saunders, T. Candresse, P. Ahlquist, C. Hemenway, G.D. Foster, "Top 10 plant viruses in molecular plant pathology," *Molecular Plant Pathology*, vol. 12, pp. 938-954, 2011.
- [26] S.H. Farzadfar, G. H. Mosahebi, A. Ahounmanesh, H. D. Kouhi, K. Ohshima, R. Pourrahim , A.R. Golnaraghi, "Distribution and some biological and molecular properties of Cauliflower mosaic virus isolates from cauliflower fields in Iran," *Applied Entomology and Phytopathology*, vol. 75 no. 2, pp. 1- 25, 2008.
- [27] M. R. Clark, A. M. Adams, "Characteristics of the microplate method of enzyme- linked immunosorbent assay for the detection of plant viruses," *Journal of General Virology*, vol. 34, no. 3, pp. 475-483, 1977.
- [28] I. Stankovic, K. Zecevic, G. Delibasic, L. Ivanovic, D. Milosevic, M. Marcic, B. Krstic, "Molecular characterization of turnip yellows virus isolates from canola in Serbia," *Acta Agriculturae Serbica*, vol. 27, no. 53, 31–37, 2022.
- [29] H. D. Nguyen, Y. Tomitaka, S.Y.W. Ho, S. Duchene, H.J. Vetten, D. Lesemann, K. Ohshima, "Turnip mosaic potyvirus probably first spread to Eurasian Brassica crops from wild orchids about 1000 years ago," *PLoS One*, vol.8 no. 2, 1-13, 2013.

- [30] M. A. Sevik, "Viruses infecting Brassica crops in the Black Sea Region of Turkey," *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science*, vol. 66, no. 7, pp. 553-557, 2016.
- [31] C. Akcura, M. A. Sevik, "Samsun ili yaprak lahanada üretim alanlarında görülen virüslerin belirlenmesi," *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, c. 26, s. 2, ss. 196-201, 2016.
- [32] M. A. Sevik, "Viruses infecting cool season crops in the northern Turkey," *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, vol. 91, no. 3, 2019.
- [33] M. A. Sevik, "Sebzede üretimini tehdit eden viral hastalık etmeni: Domates lekeli solgunluk virüsü (Tomato spotted wilt virüs-TSWV)," *Iğdır Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 5, s. 2, ss. 17-23, 2015.
- [34] A. Şeker, A. Çıtır, "Trakya Bölgesi'ndeki kanola (*Brassica napus* L.) tarlalarında görülen abiyotik sorunlar ve Beet western yellows virus (BWYV), Turnip mosaic virus (TuMV)'lerinin DAS-ELISA ile saptanması," Yüksek Lisans Tezi Fen Bilimleri Enstitüsü, Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, Türkiye, 2015.
- [35] A. Karanfil, S. Korkmaz, "Çanakkale ve Tekirdağ illeri kanola üretim alanlarında önemli virüs hastalıklarının tanınması ve karakterizasyonu." *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, c. 57, s. 1, ss. 53-62, 2020.
- [36] A. Karanfil, S. Korkmaz, "Detection and molecular characterization of Cucumber mosaic virus (CMV) infection on canola grown in Çanakkale, Turkey. 2nd International Balkan Agriculture Congress. 16-18 May, Tekirdağ, Turkey, 2017.
- [37] B. A. Coutts, R. A. C. Jones, "Viruses infecting canola (*Brassica napus*) in SouthWest Australia: Incidence, distribution, spread and infection reservoir in wild radish (*Raphanus raphanistrum*)," *Australian Journal of Agricultural Research*, vol. 51 no. 7, pp.925-936, 2000.
- [38] L. Zhao, C. Feng, X. Hao, R. Wang, L. Hu, Q. Wang, Y. Wu, "Detection and molecular variability of Turnip mosaic virus (TuMV) in Shaanxi, China," *Journal of Phytopathology*, vol. 162 no.7-8, pp. 519-522, 2013.
- [39] A. F. Raybould, L. C. Maskell, M. L. Edwards, J. I. Cooper, A. J. Gray, "The prevalence and spatial distribution of viruses in natural populations of *Brassica oleracea*" *New Phytologist*, vol. 141, pp. 265-275, 1999.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Yüksek Fırın Cürufu, Kalsine Kaolin ve Diatomit İkameli Çimentoların Yapısal Özelliklerinin Eğilme Dayanımına Etkisi

 Ayperi TANIK^a,  Yılmaz KOÇAK^{b,*}

^a İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

^b İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: yilmazkocak@duzce.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1257545

ÖZ

Çimento ve beton teknolojisinde tercih edilen yüksek fırın cürufu (YFC), kalsine kaolin ve diatomit gibi mineral katkıların kullanımı her geçen gün artmaktadır. Bu malzemelerin yapısal özelliklerine bağlı olarak, betonun dayanım ve dayanıklılığında olumlu değişikliklerin meydana geldiği belirtilmektedir. Bu bağlamda mineral katkıların fiziksel ve kimyasal özelliklerinin yanı sıra, mineralojik, moleküler, termal ve mikro yapı gibi özelliklerinin belirlenmesinin de faydalı olabileceği düşünülmektedir. Bu amaçla ilk aşamada Portland çimento (PÇ), YFC, kalsine kaolin ve diatomitin fiziksel, kimyasal, mineralojik, moleküler, termal ve mikro yapı gibi yapısal özellikleri belirlenmiştir. İkinci aşamada YFC, kalsine kaolin ve diatomit, PÇ yerine ağırlıkça %10 oranlarında ikame edilerek, biri referans olmak üzere toplam 4 tip çimento elde edilmiştir. Son aşamada ise bu çimentolarla üretilen harç numunelerinin 2, 7, 28 ve 90. günlerde eğilme dayanım değerleri belirlenmiştir. Sonuç olarak harç numunelerinin eğilme dayanım değerlerinin, hidrasyon sürelerine ve mineral katkıların yapısal özelliklerine bağlı olarak farklılık gösterdiği belirtilebilir. Ayrıca YFC ikameli çimento harcının 90. günde neredeyse referans çimentonun eğilme dayanım değerine sahip olduğu ve diğer puzolanik malzemelere göre eğilme dayanımı açısından nispeten daha olumlu katkı sağladığı ifade edilebilir.

Anahtar Kelimeler: Portland çimento; yüksek fırın cürufu; kalsine kaolin; diatomit; yapısal özellikler; eğilme dayanımı

Effect of Structural Properties of Blast Furnace Slag, Calcined Kaolin and Diatomite Substituted Cements on Flexural Strength

ABSTRACT

The use of mineral additives such as blast furnace slag (BFS), calcined kaolin and diatomite, which are preferred in cement and concrete technology, is increasing day by day. It is stated that positive changes occur in the strength and durability of concrete depending on the structural properties of these materials. In this context, besides the physical and chemical properties of mineral additives, it is thought that it may be useful to determine the properties such as mineralogical, molecular, thermal and microstructure. For this purpose, in the first stage, structural properties such as physical, chemical, mineralogical, molecular, thermal and microstructure of Portland cement (PC), BFS, calcined kaolin and diatomite were determined. In the second stage, a total of 4 types of cement, one of which is a reference, were obtained by substituting BFS, calcined kaolin and diatomite at 10% by weight instead

of PC. At the last stage, the flexural strength values of the mortar samples produced with these cements were determined at the 2-day, 7-day, 28-day and 90-day. As a result, it can be stated that the flexural strength values of the mortar samples differ depending on the hydration times and the structural properties of the mineral admixtures. Furthermore, it can be stated that the cement mortar with BFS additives has values close to the flexural strength of the reference cement at 90-day, and provides a relatively more positive contribution in terms of flexural strength compared to other pozzolanic materials.

Keywords: *Portland cement; blast furnace slag; calcined kaolin; diatomite; structural features; flexural strength*

I. GİRİŞ

Portland çimentosu (PÇ) ile birlikte katkı ya da ikame malzemesi olarak yüksek fırın cürufu (YFC) [1], [2], kalsine kaolin [3], [4] ve diatomit [5], [6] gibi mineral katkıların kullanımı, çimento ve beton teknolojisinde her geçen gün daha da yaygınlaşmaktadır.

Katı bir atık malzeme olan YFC, demir-çelik tesislerinin yüksek fırınlarında 1450-1650 °C aralığındaki sıcaklıklarda demir üretimi sonucunda ortaya çıkan ergimiş haldeki bir yan üründür. Yüksek fırından çıkan ergimiş cüruf, su verme işlemi ile oldukça hızlı bir şekilde soğutulmakta ve amorf yapıda bir katı eriyik halde elde edilmektedir [7]. YFC'nin kimyasal bileşimi başlıca CaO, SiO₂, Al₂O₃ ve MgO'dan oluşmaktadır. Gizli hidrolik aktivite veya puzolanik özellik gösteren amorf yapıdaki YFC ince olarak öğütüldüğünde, PÇ için mükemmel bir katkı veya ikame malzemesidir. Çimento ile birlikte kullanılabilmesi için de hidrolik modüllerden biri olan (CaO+MgO)/SiO₂ oranının 1'den büyük olması tercih edilmektedir [7]-[9].

Kaolin; feldspat ve kil minerallerinin doğal olarak ayrıştırılmasıyla oluşan beyaz renkte kilsli bir malzemedir. Kaolinin hammaddesi, sulu bir alumina silikat olan kaolinitir ve mineralojik olarak Al₂Si₂O₅(OH)₄ bileşiminden oluşmaktadır [10]-[12]. Birçok farklı çalışmada kaolinin en uygun ısıl işlem sıcaklığı ve süresi ile ilgili farklı tespitler söz konusudur. Bu çalışmalara göre kaoline uygulanan farklı sıcaklıklardaki ısıl işlemlerle (kalsinasyon) kaolinin kimyasal ve mineralojik yapısı geliştirilerek kalitesi artırılabilir. Kaolin ısıl işleme tabi tutulduğunda, 200°C'de yüzeysel higroskopik su bünyeden uzaklaşmaktadır. 450-850°C arasında kimyasal olarak bağlı su bırakılarak kaolinin mineralojik yapısında değişim oluşmakta ve belirli derecede düzenli bir malzeme olan metakaoline dönüşmektedir. Metakaolinde, Si-O ağı büyük ölçüde sağlam kalmakta ve Al-O ağı kendini yeniden düzenlemektedir. Kaolinit kristal haldeyken, metakaolin oldukça düzensiz bir yapıya ve mineral katkı olarak iyi özelliklere sahiptir [11]-[16]. Metakaoline dönüşen kaolinde yaklaşık 950 °C'de amorf alumina (Al₂O₃), kristalin alumine dönüşmekte ve kalsine kaolin meydana gelmektedir. Isıl işleme devam edilirse 1000 °C civarlarında alumina ve silika (SiO₂), amorf müllit (3AlO₃.2SiO₂) ile tiridimit (SiO₂) şekline geçmektedir [12]. Modern çimento ve beton için ısıl işleme tabi tutulan kaolinin (metakaolin ya da kalsine kaolin) puzolanik bir katkı maddesi olarak kullanılması son yıllarda oldukça popüler hale gelmiştir.

Diatomit, fosilleşmiş alglerin kabukları veya iskeletleri ile diatom adı verilen mikroskobik parçacıkların birikmesiyle oluşan, ince ve amorf silika parçacıkları içeren tortul bir kayaç olarak ifade edilmektedir [17]. Diatomit, doğada 15 bine yakın çeşide sahiptir ve genellikle yuvarlak tepsi veya uzun balık şeklindedir. Diatomit beyaz, açık bej ve gri arası renkleri olan bir çökeldir. Diatomitin kavkı iriliği 2-200 mikron, kuru özgül ağırlığı 0,15-0,40 g/cm³, opal sertliği 4,5-6,0 aralığında değerlere sahiptir. Ayrıca, kayacın sertliği 1,5'den fazla olmayıp, bünyesinde %70-90 aralığında SiO₂ bulundurmaktadır [18]-[20]. Diatomit; çok yüksek gözenekli bir mikro yapı (%80-90 gözenek), düşük yoğunluk, yüksek yüzey alanı, büyük adsorpsiyon kapasitesi, düşük termal iletkenlik ve yüksek erime sıcaklığı ile karakterize edilen çevre dostu bir malzeme olarak bilinmektedir [21].

Çalışmada kullanılan bu puzolanik malzemeler; çimento üretimindeki enerji maliyetinde tasarruf, CO₂ emisyonunun azaltılması sayesinde ekolojik dengenin sağlanması ve çevrenin korunması ile bazı teknik avantajları (korozyon direncini artırmak, hidrasyon ısını düşürmek, sülfat saldırılarına karşı direnci artırmak, dayanım ve dayanıklılığı artırmak gibi) nedeniyle mümkün olduğunca çimentoda ya da betonda ikame veya katkı maddesi olarak kullanılmaktadır [22]-[35]. Bu malzemeler kullanılarak farklı beton ve harç numuneleri üretilmekte ve bu numunelerin dayanım ve dayanıklılıklarının yapısal özelliklerine bağlı olarak değiştiği ifade edilmektedir. Dolayısı ile meydana gelen reaksiyonların sebeplerinin daha iyi anlaşılabilmesi açısından standart çimento ve beton deneylerinin yanında malzemelerin yapısal özelliklerin belirlenebileceği tekniklerle detaylı olarak incelenmesinin birçok açıdan faydalı olabileceği düşünülmektedir. Bu nedenle yapılan bu çalışmada ilk aşama; PÇ, YFC, kalsine kaolin ve diatomitin bu analiz yöntemleri de kullanılarak fiziksel, kimyasal, mineralojik, moleküler, termal ve mikro yapı gibi yapısal özelliklerin belirlenmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir. İkinci aşama; bu malzemelerin PÇ yerine ağırlıkça %10 oranlarında mineral katkı ikamesiyle biri referans olmak üzere toplam 4 tip çimentonun elde edilmesinden oluşmuştur. Son aşama ise bu çimentolarla üretilen harç numunelerinin eğilme dayanımları belirlenmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

II. MALZEME VE YÖNTEM

A. MALZEME

Çalışmada bağlayıcı malzeme olarak Eskişehir ÇİMSA çimento fabrikasında üretilen CEM I 42,5 R tipi PÇ kullanılmıştır. Katkılı çimentoları üretmek için Bolu Çimento Fabrikasından temin edilen YFC, Fibro Beton AŞ'den sağlanan kalsine kaolin ve EP mineral markaya sahip diatomit kullanılmıştır. Çimento harç numuneleri hazırlanırken TS EN 196-1'e [36] uygun standart kum ve Eskişehir ili şehir şebeke suyundan yararlanılmıştır.

B. YÖNTEM

Çalışmada kullanılan hammaddelerin yapısal özelliklerinin belirlenmesi için yapılan analizler, cihazlar ve ilgili standartları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Analizler ve kullanılan cihazlar.

Deney adı	Cihaz adı ve modeli	İlgili standard
Elek analizi	Hosokawa-Alpine (Air Jet Sieve 200 LSN)	TS EN 196-6 [37]
Özgül yüzey tayini	Toni Teknik (7202)	TS EN 196-6 [37]
Özgül ağırlık	Quanta Chrome (MVP-1)	-
Kimyasal analiz (XRF)	ARL (9900)	TS EN 196-2 [38]
Moleküler yapı analizi (FT-IR)	Shimadzu (IRPrestige 21)	-
Mineralojik analiz (XRD)	Malvern PANalytical (EMPYREAN)	-
Simultane termal analiz	SETARAM (labSys evo)	-
Mikro yapı analiz (SEM/EDS)	FEI (Quanta FEG 250)	-
Eğilme dayanımı	Toni Teknik	TS EN 196-1 [36]

Bu analizlerin her biri, hammaddelerden uygun miktarda örnekler alınarak gerçekleştirilmiştir. X-Ray diffraction (XRD) analizleri, Cu K α ($\lambda=1.54 \text{ \AA}$) ışınması, 5-70° açı aralığı, 1°/dakika çekim hızı tercih edilerek; Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) analizleri, ATR cihazı ile 400-4000 cm⁻¹ dalga sayısı aralığında yapılmıştır. Simultane (eş zamanlı) termal analizleri (Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC), termal gravimetri (TG)), 10 °C/dk ısıtma süresi ile 40-1000 °C sıcaklık aralığında kuru hava koşullarında gerçekleştirilmiştir. DSC/TGA analizlerinde PÇ, YFC, kalsine kaolin ve

diatomit için sırasıyla 48,7, 48,0, 48,1 ve 16,7 mg'lık numuneler kullanılmıştır. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile elde edilen mikro yapı görüntüleri, 1000 ve 10000 büyütme altında 100 ve 10 μm ölçeklendirilmesi ile tespit edilmiştir. Ayrıca bu görüntüler üzerindeki belirlenen noktalarda, Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) analizleri gerçekleştirilmiştir.

Çimento harç numunelerinin hazırlanmasında biri referans (CEM I 42,5 R) diğerleri %10 oranında YFC, kalsine kaolin ve diatomit ikameli olmak üzere toplam 4 tip çimento kullanılmış ve bu çimentolar için verilen kodlar ve karışım miktarları Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Harç numunelerinin kodları ve miktarları.

Kod	Çimento miktarı, g	YFC miktarı, g	Kalsine kaolin miktarı, g	Diatomit miktarı, g	Su miktarı, g	Su/çimento	Standart kum miktarı, g
R	450	0	0	0	225	0,50	1350
10YFC	405	45	0	0	225	0,50	
10KK	405	0	45	0	225	0,50	
10D	405	0	0	45	239	0,53	

TS EN 196-1'deki gereklere göre hazırlanan çimento harç karışımları, 40x40x160 mm boyutlarında üç gözlü kalıplara dökülmüştür [36]. Daha sonra kalıplar %90 nem oranındaki kür dolabında 24 saat bekletilmiştir. Bir gün sonra kalıpları sökülen numuneler, $20\pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklığındaki su havuzunda 2, 7, 28 ve 90. hidrasyon günlerine kadar bekletilmiştir. Her bir süre sonunda numuneler havuzlardan alınarak kurulanmış, 50 ± 10 N/s kuvvet uygulanmış ve numune ortadan kırılıncaya dek kuvvet artırımı devam etmiştir. Her bir hidrasyon günü için üç örneğin ortalaması alınarak elde edilen veriler eğilme dayanımı olarak kaydedilmiştir.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmada kullanılan hammaddelerin yapısal özelliklerini belirlemek için fiziksel, kimyasal, XRD, FT-IR, DSC/TGA ve SEM/EDS gibi analizler yapılmıştır. Ayrıca çimento harçlarının eğilme dayanımları tespit edilmiştir. Analiz ve deneylerden elde edilen sonuçlar, ilgili başlıklarda ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

A. FİZİKSEL ANALİZLER

Çalışmada kullanılan hammaddelerin fiziksel özelliklerini tespit etmek için Blaine (özgül yüzey alanı), özgül ağırlık ve elek analizi gibi analizlerden elde edilen değerler Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Hammaddelerin fiziksel özellikleri.

Hammaddeler	Blaine (cm^2/g)	Özgül ağırlık (g/cm^3)	Boyut aralığı (elek üstü) (%)	
			>45 (μm)	>90 (μm)
PÇ	3858	3,12	4,4	0
YFC	4692	2,92	0,2	0
Kalsine kaolin	10254	2,94	1,2	0
Diatomit	9170	2,01	0,2	0

Tablo 2’den elde edilen verilere göre üç puzolanın da PÇ ile kıyaslandığında daha küçük tane yapısına ve daha büyük yüzey alanına (Blaine) sahip olduğu belirlenmiştir. Özgül ağırlık değerleri ise PÇ’nin 3,12 g/cm³, YFC’nin 2,92 g/cm³ kalsine kaolinin 2,94 g/cm³ ve diatomitin ise 2,01 g/cm³’dür. Bu verilere göre her üç puzolanik malzemenin de PÇ’ye ikame edilmesi sonucunda elde edilen katkılı çimentoların, daha düşük özgül ağırlık değerlerine sahip olacağı söylenebilir (Tablo 3).

B. KİMYASAL ANALİZLER

Hammaddelerin kimyasal sembolleri ve kompozisyonları Tablo 4’te verilmiştir.

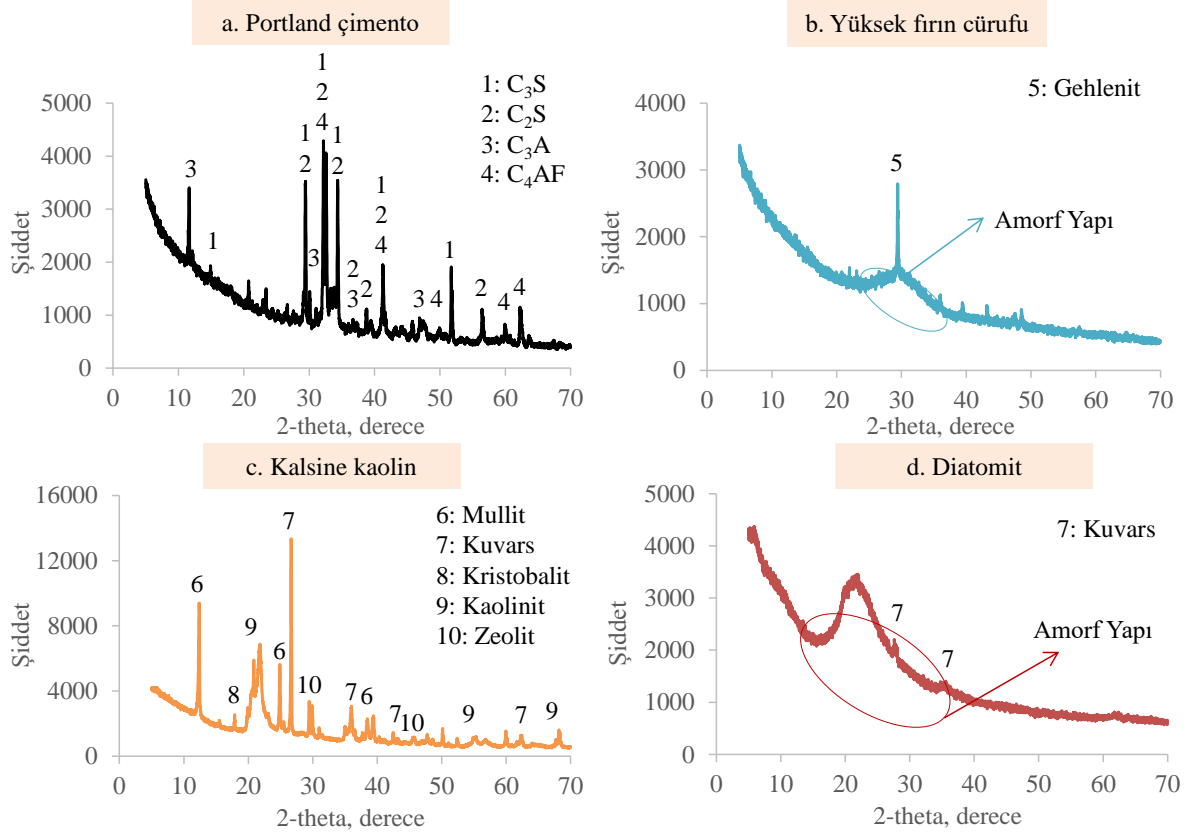
Tablo 4. Hammaddelerin sembolleri ve kompozisyonları.

Kimyasal sembolü	Kimyasal kompozisyon	PÇ	YFC	Kalsine kaolin	Diatomit
S	SiO ₂	19,48	39,36	65,77	84,76
A	Al ₂ O ₃	4,96	13,13	17,21	2,34
F	Fe ₂ O ₃	3,27	0,76	0,36	0,97
C	CaO	62,03	31,24	2,91	1,18
M	MgO	1,55	7,53	0,48	0,49
- S	SO ₃	3,20	1,69	0,6	0,017
N	Na ₂ O	0,31	0,02	0,27	0,44
K	K ₂ O	0,71	0,76	0,6	0,18
	S+A+F	-	-	83,34	88,07
	(C+M)/S	-	0,99	-	-
	Cl ⁻	0,0180	0,041	0,048	0,36
	Kızdırma kaybı	2,59	0,10	9,38	9,97
	Çözünmeyen Kalıntı	0,27	-	-	-
	Serbest CaO	1,14	0,73	1,02	0,87

Tablo 4’teki verilere göre; PÇ’nin SiO₂ ve CaO ana bileşenlerinden oluştuğu, ayrıca kimyasal özelliklerinin (kızdırma kaybı, Cl⁻, SO₃, MgO) TS EN 197-1’de verilen sınır değerler içerisinde olduğu belirlenmiştir [39]. YFC ağırlıklı olarak SiO₂, CaO ve Al₂O₃ ana bileşenlerinden oluşmaktadır. Ağırlıkça SiO₂/Al₂O₃ (S/A) oranı 3,0’dır. Ayrıca YFC için hidrolik özelliklerinin tespitindeki önemli parametrelerden (C+M)/S değerinin 0,99 ile tercihen 1 olarak değerlendirilen sınır değere çok yakın olduğu, diğer bir parametre olan (C+M+A)/S değerinin 1,32, ile 1’den büyük olması, YFC’nin istenen hidrolik modül değerine sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca YFC’nin de PÇ de olduğu gibi kimyasal yapısındaki kızdırma kaybı, Cl⁻, SO₃, MgO gibi değerlerin, BS 6699 standardında belirtilen sınırlar içerisinde olduğu görülmektedir. Bu nedenle de hem dayanım hem de dayanıklılık açısından değerlendirildiğinde olumsuz bir etkisinin olmayacağı ifade edilebilir (Tablo 4) [40]. Kalsine kaolinin kimyasal bileşenlerine göre SiO₂ ve Al₂O₃ değerlerinin yüksek, CaO, Fe₂O₃, MgO ve SO₃ değerlerinin ise düşük olduğunu söylenebilir. Diatomitin ana bileşeninin ise %84,76 gibi yüksek değerde SiO₂ içerdiği görülmektedir. Kalsine kaolinin K₂O değerinin, Na₂O değeriyle kıyaslandığında daha fazla olması, K⁺ iyonlarının nispeten daha zengin olduğu; diatomitin ise Na₂O değerinin, K₂O değerine göre daha fazla olması ise Na⁺ iyonlarınca nispeten daha zengin olduğu şeklinde ifade edilebilir. Ayrıca kimyasal bileşime göre S+A+F’nin kalsine kaolin için %83,34, diatomit için ise %88,07 olması doğal puzolanlar için belirtilen sınır değerlerinin (>%70) oldukça üzerinde olduğu ve puzolanik açıdan istenilen özelliklerde olduklarını göstermektedir (Tablo 4) [41].

C. MİNEROLOJİK ANALİZLER

Hammaddelerin minerolojik yapıları XRD analizleriyle belirlenmiş ve elde edilen veriler Şekil 1’de gösterilmiştir.

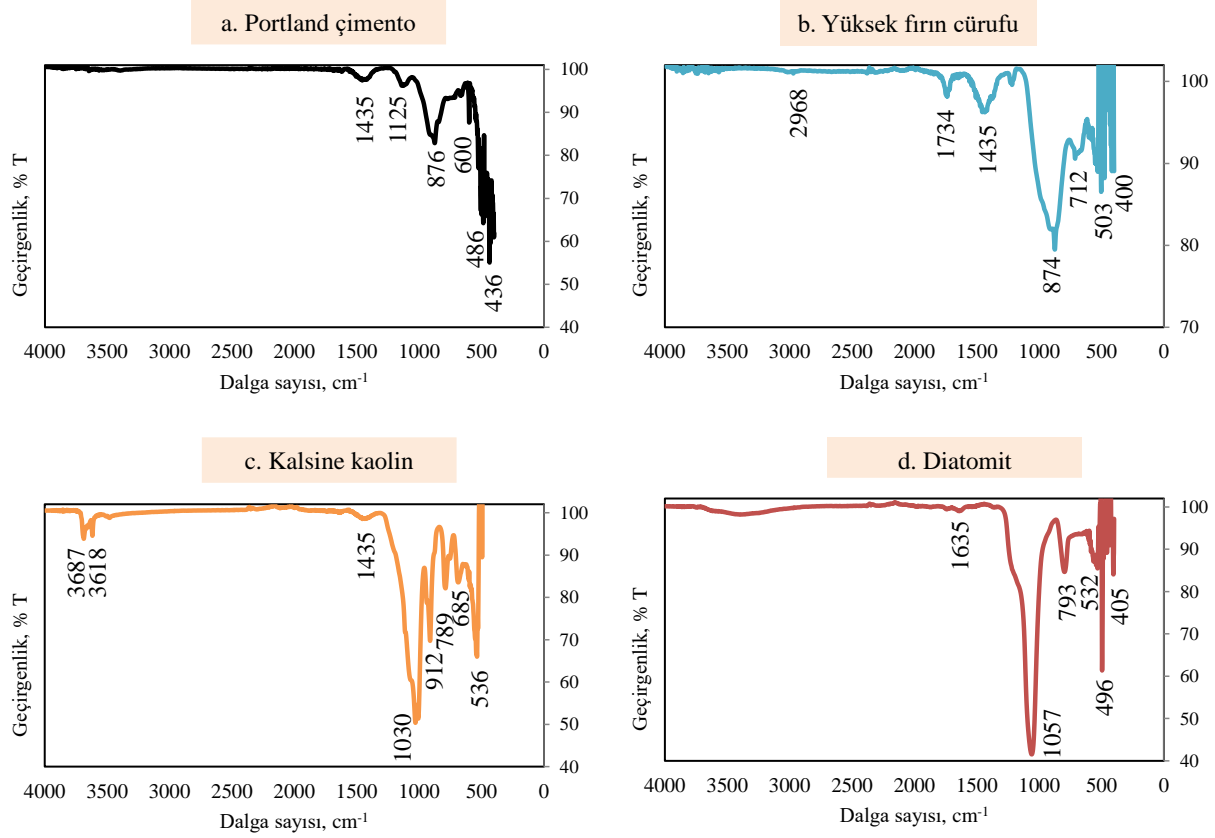


Şekil 1. Hammaddelerin XRD analizleri.

PÇ'nin XRD analizinde ana bileşenler; C_3S ($3CaOSiO_3$), C_2S ($2CaOSiO_3$), C_3A ($3CaO \cdot Al_2O_3$) ve C_4AF ($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3Fe_2O_3$) olarak görülmektedir. Ayrıca görülen XRD desenlerinin, tipik bir PÇ'de olması gerektiği gibi kristallenmiş bir yapıda olduğu ifade edilebilir (Şekil 1a) [42], [43]. YFC, Gehlenite'in ($Ca_2Al(AlSiO_7)$) güçlü kırılma pikinden oluşmaktadır. Bunun yanın sıra YFC'nin camsı fazı, 2θ 'nın yaklaşık 20-40 derece aralığında maksimum duruma gelmiş ve SiO_2 , CaO ve Al_2O_3 den oluşan yoğun bir amorf yapı şeklinde kendini göstermiştir (Şekil 1b) [40], [44]-[46]. Dolayısı ile camsı faz, YFC'nin hidrolik özelliklerinin belirlenmesindeki en önemli parametrelerden biri olarak düşünülmesi nedeniyle, camsı faz miktarı ve dayanım arasında kabaca da olsa doğrusal bir ilişkinin olabileceği söylenebilir [42]. Kalsine kaolinin XRD analizine göre; kaolinit ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$), zeolit ($(M^+, M+2)O \cdot Al_2O_3 \cdot 9SiO_2 \cdot nH_2O$) ve kristobalit (SiO_2) fazlarının küçük kırılma pikleri ile kuvars (SiO_2) ve müllitin ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) güçlü kırılma piklerinden oluştuğu görülmektedir (Şekil 1c). [47]. Diatomitin XRD analizinde ise $2\theta=16-34^\circ$ aralığındaki geniş yansıma amorf kuvarsin (camsı form) ve $2\theta= 27.61^\circ$ ve 36.15° deki tepe noktalarındaki pikler ise kuvarsin (SiO_2) varlığını göstermektedir (Şekil 1d) [48]-[50].

D. MOLEKÜLER YAPI ANALİZİ

Hammaddelerin moleküllerin yapısındaki bağların tanımlanması için FT-IR analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen bağ yapıları Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. PÇ ve YFC'nin FT-IR analizleri.

Gerçekleştirilen FT-IR analizine göre PÇ, 436, 486, 600, 876, 1125 ve 1435 cm^{-1} dalga sayılarında piklere sahiptir (Şekil 2-a). 436, 486 ve 600 cm^{-1} dalga sayılarındaki Si-O ile birlikte bulunan Al-O bağları ve 876 cm^{-1} dalga sayısında Si-O bağları, titreşim piki şeklinde izlenmektedir. PÇ'de 1125 cm^{-1} dalga sayısındaki pik S-O (alçıya ait) bağlarına, 1435 cm^{-1} dalga sayısında görülen pikler ise C-O bağlarına atfedilmektedir. 3400-3600 cm^{-1} dalga sayıları aralığındaki çok küçük olarak görüntülenen pikler, su moleküllerinin varlığını göstermektedir (Şekil 2-a) [44], [51], [52].

YFC'nin 400, 503, 712, 874, 1217, 1435, 1734 ve 2968 cm^{-1} dalga sayılarındaki piklerden oluştuğu izlenmektedir (Şekil 2-b). 400 ve 503 cm^{-1} dalga sayılarındaki pikler Si-O bağlarına, 712 cm^{-1} dalga sayısındaki titreşim piki ise Si-O ile birlikte bulunan Al-O bağlarına atfedilmektedir. 874 cm^{-1} 'deki pik, YFC'nin AlO_4 gruplarının asimetrik gerilme titreşimine atfedilmektedir. 1435 cm^{-1} dalga sayısında titreşim piki CO_3^{2-} molekülünün C-O asimetrik gerilme titreşimine atfedilen bu pikin, atmosfere maruz kalan cürufun karbonatlaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. 1734 cm^{-1} dalga sayısındaki pik, cüruftaki su moleküllerinin O-H bağına atfedilmektedir. 2968 cm^{-1} dalga sayısındaki küçük pik, YFC bünyesinde yer alan kalsitteki karbon harmoniklerine bağlanmaktadır (Şekil 2-b) [44], [53], [54]. Su moleküllerinin yer aldığı 3400-3600 cm^{-1} dalga sayıları aralığında YFC'nin yine PÇ gibi belirgin bir pik vermediği izlenmektedir.

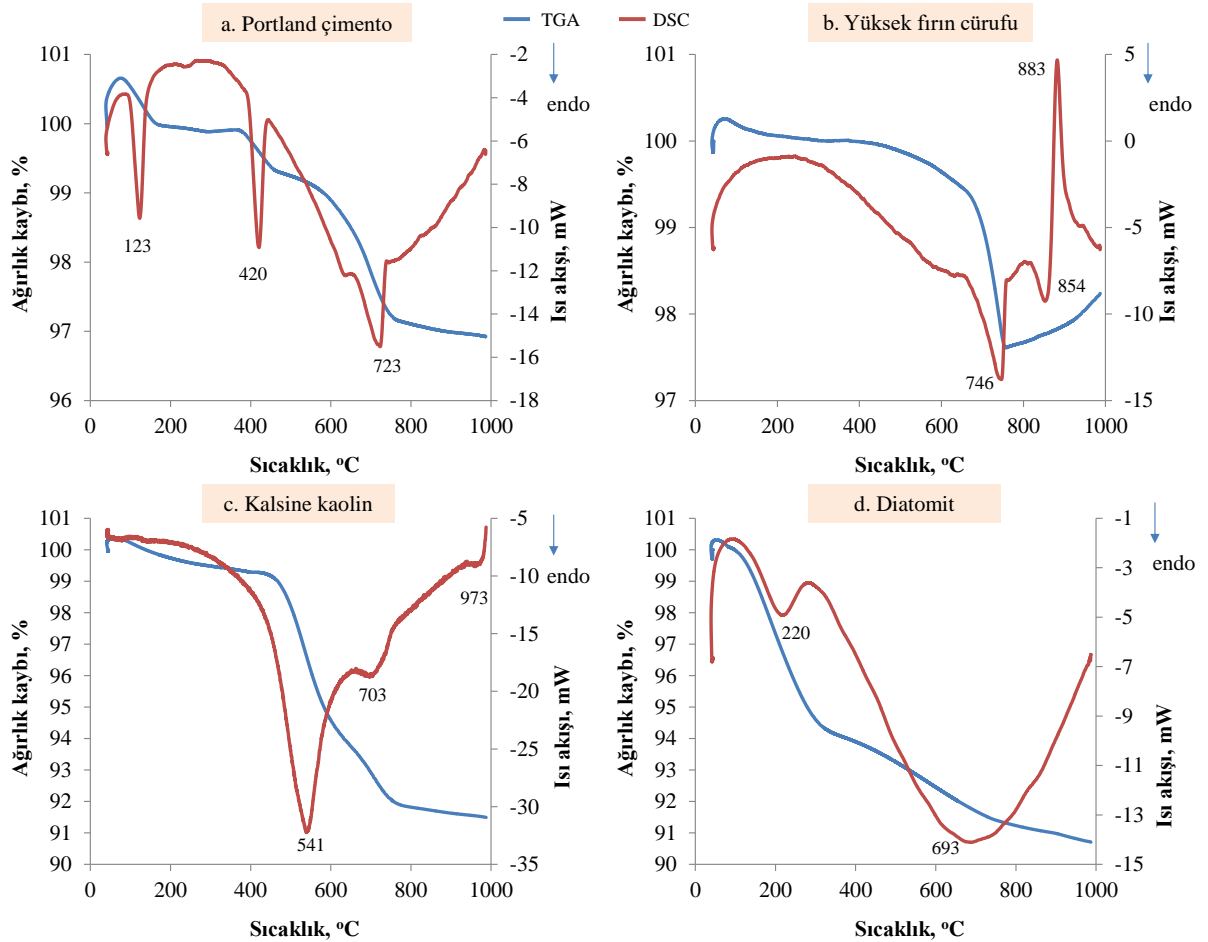
Kalsine kaolinin FT-IR analizine göre 536, 685, 789, 912, 1030, 1435, 3618 ve 3687 cm^{-1} dalga sayılarında titreşim piklerine sahip olduğu izlenmektedir (Şekil 2-c). 3618 cm^{-1} dalga sayısındaki pik kaolinin iç hidroksil grubuna aittir ve 3687 cm^{-1} dalga sayısındaki pik ise iç yüzey hidroksil gruplarının $\nu(\text{O-H})$ gerilme titreşimlerine ait olarak değerlendirilmiştir. 1030 ve 685 cm^{-1} dalga sayılarındaki pikler Si-O gerilme titreşimleri şeklinde izlenmektedir. 789 cm^{-1} 'de bulunan pik ise Al-O gerilimle titreşimlerine karşılık gelmektedir. 912 cm^{-1} dalga sayısındaki pik Al-OH eğilme titreşimleri şeklinde ortaya çıkarken; 536 cm^{-1} dalga sayısındaki pik ise Al-O-Si eğilme titreşimleri şeklinde görülmektedir.

Kalsitin varlığı $\sim 1435 \text{ cm}^{-1}$ dalga sayısındaki bir omuz bölgesi (karbonatın asimetrik gerilmesi) ile doğrulanmaktadır [16], [55].

Şekil 2d'den de görüldüğü gibi 3400 cm^{-1} civarındaki geniş alan ve 1635 cm^{-1} 'deki zayıf eğilme titreşim bandı diatomitteki suyun O-H grubuna bağlanabilir. 1057 cm^{-1} 'deki yoğun bant, Si-O-Si grubunun gerilme titreşimini gösterir. 793 cm^{-1} 'deki bant, SiO-H grubunun titreşimine aittir. 496 ve 532 cm^{-1} 'deki zirveler, Si-O bağlarıyla ilişkilidir (Şekil 1b). FT-IR analizi sonucunda belirlenen bu karakteristik pikler diatomitin başlıca SiO_2 'den oluştuğunu göstermektedir [50], [56]-[58].

E. TERMAL ANALİZLER

DSC; referans ve örnek maddenin kontrollü olarak aynı sıcaklık programının uygulanması sırasında, referans ve örnek madde arasındaki birim zamandaki enerji girdi farkının, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ölçüldüğü bir teknik olarak tanımlanmaktadır. TGA ise örnek maddenin kontrollü olarak ısı işleme tabi tutulması sırasında kütlelerine ya da başlangıçtaki değerine göre değişiminin, sıcaklığın ya da zamanın fonksiyonu olarak ölçüldüğü bir teknik olarak ifade edilmektedir [59]. Bu analiz teknikleriyle örneklerin kristal faz formasyonları, nem miktarı, kütle kaybı, oksidasyon, dehidratasyon gibi ısı etkisindeki davranışları belirlenebilmektedir [60]. Hammaddeler için eş zamanlı olarak tek bir numune üzerine uygulanmış DSC/TGA analizleri ile elde edilen veriler Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Hammaddelerin DSC-TGA Analizleri.

PÇ'nin eş zamanlı yapılan DSC-TGA analizlerine göre $75-179 \text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığındaki $123 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'deki endotermik pik, çimento bünyesindeki nemden ve çimento üretiminde priz düzenleyici olarak kullanılan alçıtaşının ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) bünyesindeki kristal suyunu kaybetmesinden kaynaklanmakta olup, bu aralıktaki ağırlık kaybının %0,69 olduğu belirlenmiştir. $365-421 \text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığındaki $420 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'deki endotermik pik, C_4AF ürünü

olan Fe₂O₃ solüsyonunun oluşumundan kaynaklanmakta olup, bu aralıktaki ağırlık kaybı %0,61 olarak meydana gelmiştir. 554-781 °C aralığındaki 723 °C'deki endotermik pik, kalsiyum karbonatın (CaCO₃) dekarbonasyonuna karşılık gelmektedir ve bu bölgedeki ağırlık kaybı %1,98 olarak tespit edilmiştir [61], [62]. PÇ'deki toplam ağırlık kaybı ise %3,7 olarak meydana gelmiştir (Şekil 3a).

YFC'nin DSC-TGA analizine göre 653 °C'ye kadar ağırlık kaybı %0,81 olarak meydana gelmiştir. 653-762 °C sıcaklık aralığında ise %1,83 oranında kütle kaybı meydana gelmiş olup, DSC eğrisine göre 746 °C'de endotermik tepe noktası camsı geçiş sıcaklığına atfedilmektedir. YFC'nin TGA eğrisinden görüleceği gibi kimyasal reaksiyon sonucunda 762 °C'den sonra ağırlığında nispeten bir artış meydana gelmiştir. 883°C'de exotermik tepe noktası ise kristallenme sıcaklığını göstermektedir [63]. YFC'nin nemden kaynaklı ağırlık kaybı %0,2, depolanma sırasındaki atmosferdeki havayla reaksiyonu sonucundaki karbonat fazlarının ağırlık kaybı ise %1,2 olarak tespit edilmiştir. YFC'nin toplam ağırlık kaybı ise %1,76 olarak belirlenmiştir.

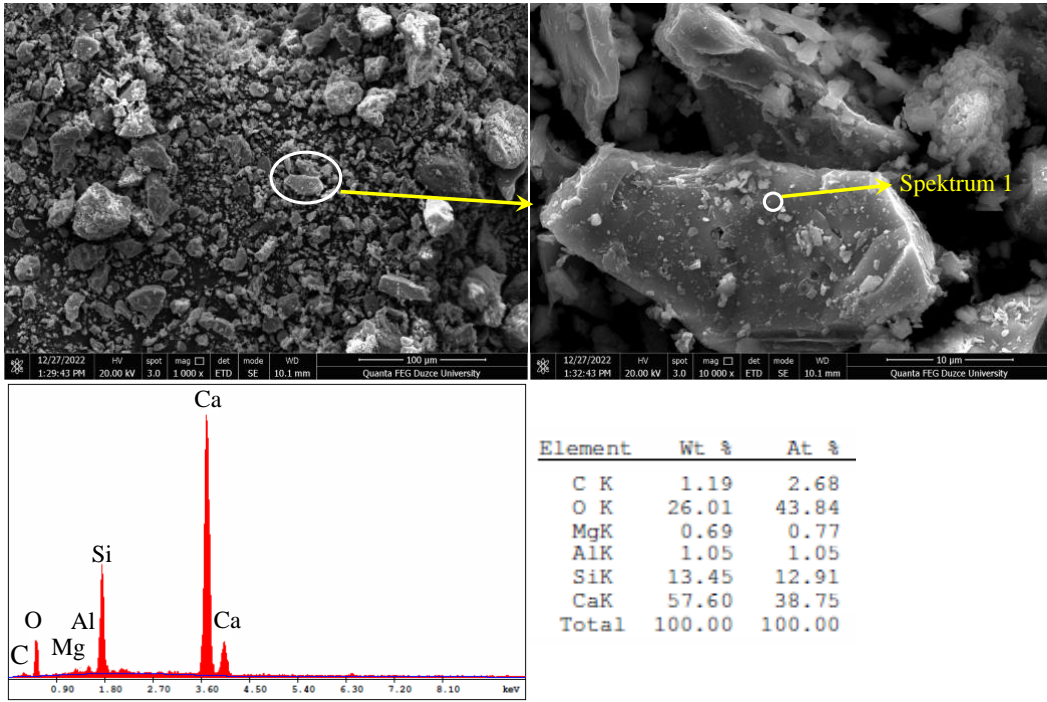
Kalsine kaolinin DSC/TGA eğrilerine göre bünyesindeki nemden kaynaklı su kaybına rastlanmamıştır. Kristal yapı içerisindeki kimyasal bağ ile bağlı suyun 412-634 °C sıcaklık aralığında %5,29 oranında kütle kaybının gerçekleşmesi, kristal suyun ve hidroksil gruplarının ayrılmasından kaynaklanmaktadır. 541 °C'de görülen endotermik pik, yüksek reaktiviteye sahip olan metakaolinin oluşumunu göstermektedir. 634-777 °C sıcaklık aralığında %2,12 oranında, 777-998 °C sıcaklık aralığında ise %0,39 oranında kütle kaybı meydana gelmiştir. 973 °C'de görülen pik ise metakaolin yapısının bozulduğu ve AlO₃ ve SiO₂ fazlarının oluştuğu bölge olarak değerlendirilmektedir [16]. Kalsine kaolinin 40-1000 °C sıcaklık aralığında toplam ağırlık kaybı % 8,51 olarak gerçekleşmiştir (Şekil 3c).

DSC/TGA eğrileri incelendiğinde, farklı sıcaklık aralıklarındaki ağırlık kayıpları açısından malzemelerin yapısında bulunan fiziksel ve kimyasal bağla bağlı olan suyun dehidratasyonunun en çok görüldüğü malzeme diatomit olmuştur. 340 °C'ye kadar boşlukta fiziksel olarak adsorbe edilmiş yüzeydeki su kaybı ile organik maddelerin yanması sonucu meydana gelen ağırlık kaybı olarak değerlendirilmekte olup bu aralıktaki ağırlık kaybının %5,9 değerinde olduğu belirlenmiştir. 340-756 °C aralığındaki ağırlık kaybı ise %2,81 olarak meydana gelmiştir. Bu aralıktaki ağırlık kaybının metal katyonları ile koordineli yapısal suyun ve diatomitte meydana gelen karbonat minerallerinin ayrışmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [64]. Diatomitin 40-1000 °C sıcaklık aralığında toplam ağırlık kaybı %9,55 olarak gerçekleşmiştir (Şekil 3d).

F. Taramalı elektron mikroskop analizi

Hammaddelerin mikro yapılarını belirlemek için yapılan SEM/EDS analizlerinden elde edilen görüntüler Şekil 4-7 aralığında verilmiştir.

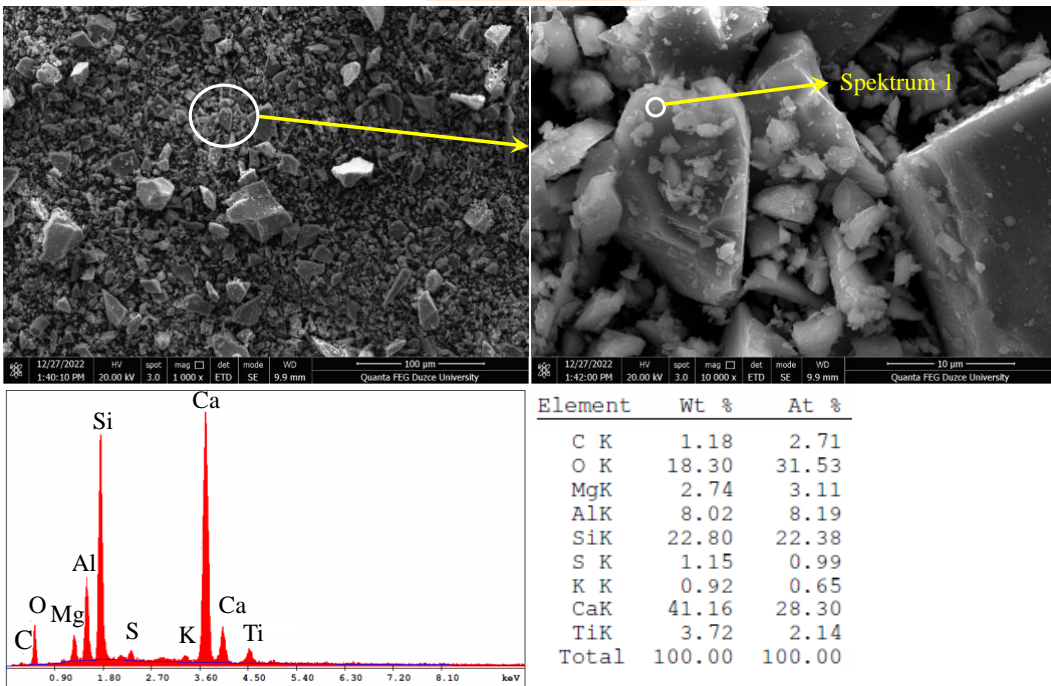
Portland çimento



Şekil 4. PÇ'nin SEM/EDS Analizi.

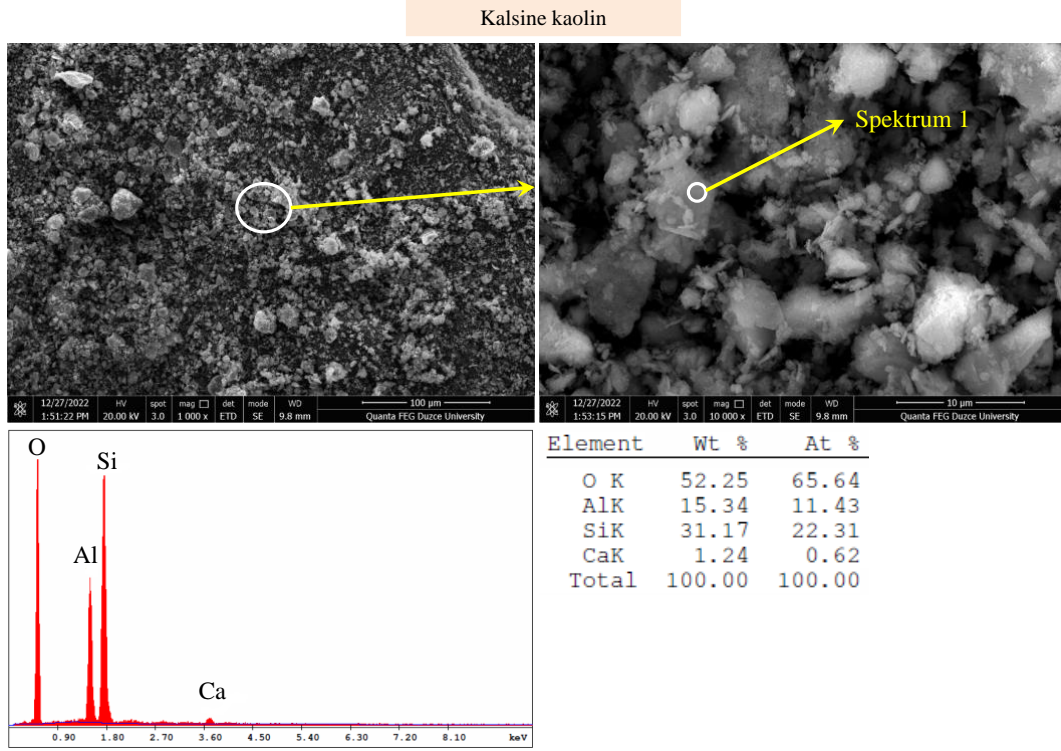
PÇ'nin SEM analizi sonucunda elde edilen görüntüsüne göre farklı boyut ve şekillerde düzensiz bir yapıya sahip olduğu görülmektedir (Şekil 4a). X-ışını spektrometresinde (EDS) numunenin ana bileşiminin Ca, Si ve O için karakteristik pikler verdiği (Şekil 4b), dolayısı ile PÇ'nin kimyasal analizinden tespit edildiği gibi ana bileşenin CaO ve SiO₂ olarak doğrulanmış olduğu görülmektedir (Tablo 4).

Yüksek fırın cürufu



Şekil 5. YFC'nin SEM/EDS Analizi.

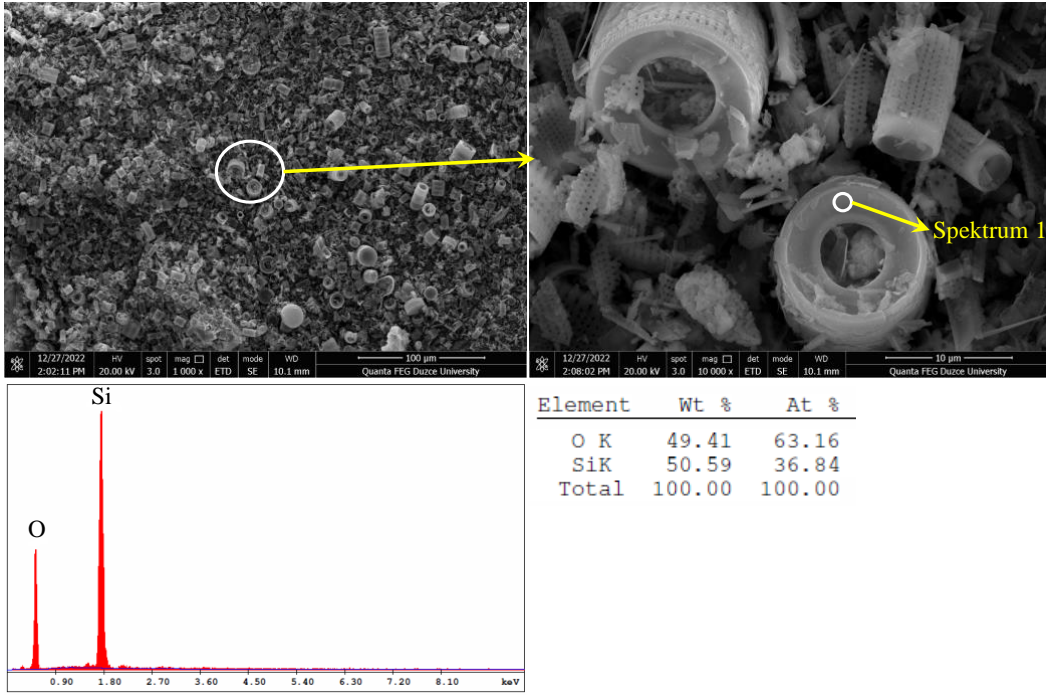
Şekil 5'e göre YFC tane şekillerinin küresel olmadığı ve esas olarak sürekli bir ağ yapısında olan camsı fazlardan oluştuğu görülmektedir (Şekil 5a) [65]. X-ışını spektrometresinde (EDS) numunenin ana bileşiminin Ca, Si, Al ve O için karakteristik pikler verdiği (Şekil 5b), dolayısı ile YFC'nin kimyasal analizden tespit edildiği gibi ana bileşeninin CaO, SiO₂ ve Al₂O₃ olarak doğrulanmış olduğu görülmektedir (Tablo 4).



Şekil 6. Kalsine kaolin'in SEM/EDS Analizi.

Kalsine kaolinin sem görüntüsünde katmanlar arası boşlukları bulunan, rastgele boyutlarda altıgen trombosit yapılarına sahip pul pul plakalar halinde bir tane yapısı izlenmektedir (Şekil 6a) [47], [66], [67]. X-ışını spektrometresinde (EDS) numunenin ana bileşiminin Si, Al ve O için karakteristik pikler verdiği (Şekil 6b), dolayısı ile Kalsine kaolin'in kimyasal analizden tespit edildiği gibi ana bileşeninin SiO₂ ve Al₂O₃ olarak doğrulanmış olduğu görülmektedir (Tablo 4).

Diatomit

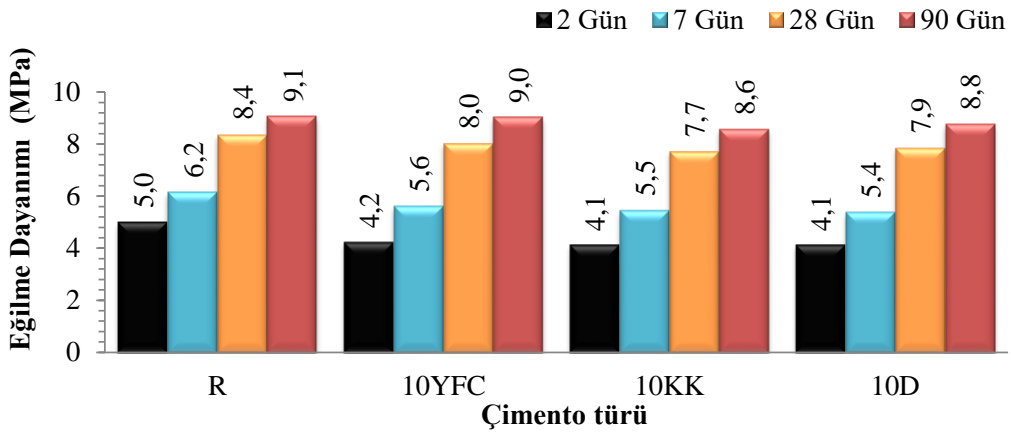


Şekil 7. Diatomit'in SEM/EDS Analizi.

Diatomit, mikroorganizmaları örten inorganik bir kabuk olarak oluşmaktadır. Şekil 7'ye göre diatomitin yaklaşık 5 µm çapında içi boş tüpler, halkalar, plakalar, nispeten düzenli bir gözenek sistemine sahip çeşitli şekillerde parçalar ve parçacıklar içerdiği görülmektedir. Ayrıca bu görüntülerden hasarsız kabuklar ve bu kabukların granülleri de izlenmektedir. Diatomitler tüm parçacıklar için ortak olan yaklaşık 0,5 µm çapında birçok merkezli radyal simetriye sahip küçük açıklıklı mikro/nano-gözeneklere sahip bir bal peteği yapısı ile karakterize edilmektedir (Şekil 7a) [64], [68], [69]. X-ışını spektrometresinde (EDS) numunenin bileşiminin Si ve O için karakteristik pikler verdiği (Şekil 7b), dolayısı ile diatomitin ana bileşeninin kimyasal analizden tespit edildiği gibi SiO₂ olarak doğrulanmış olduğu görülmektedir (Tablo 4).

G. EĞİLME DAYANIMLARI

PÇ ve YFC, kalsine kaolin ile diatomit ikameli çimento harçlarının 2, 7, 28 ve 90. günlerde belirlenen eğilme dayanım sonuçları Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Harçların eğilme dayanımları.

Harç numunelerinin eğilme dayanımları; hidrasyon süresine, hammaddelerin fiziksel, kimyasal, mineralojik, moleküler, termal ve mikro yapı gibi yapısal özelliklerine bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre 2. günde en yüksek eğilme dayanımın 5,0 MPa ile R kodlu harç numunesinde, en düşük eğilme dayanımının ise 4,1 MPa ile 10KK ve 10D kodlu harç numunelerinde olduğu belirlenmiştir. Referans harç numuneleri ile karşılaştırıldığında, 10YFC, 10KK ve 10D kodlu örneklerin eğilme dayanımları sırasıyla %15,3, %17,3 ve %17,3 olarak azalmıştır. 7. günde en yüksek eğilme dayanımın 6,2 MPa ile R kodlu harç numunesinde, en düşük eğilme dayanımı 5,4 MPa ile 10D kodlu harç numunesinde olmuştur. Bunun yanı sıra 10YFC, 10KK ve 10D kodlu örneklerin eğilme dayanımları referans harç numunesine göre sırasıyla %8,6, %11,4 ve %12,4 olarak azalmıştır. 28. günde en yüksek eğilme dayanımı 8,4 MPa ile R kodlu harç numunesinde, en düşük eğilme dayanımı ise 7,7 MPa ile 10KK kodlu harç numunesinde gerçekleşmiştir. Ayrıca 10YFC, 10KK ve 10D kodlu örneklerin eğilme dayanımları referans harç numunesine göre sırasıyla %4,0, %7,6 ve %6,0 olarak azalmıştır. 90. günde ise en yüksek eğilme dayanımın 9,1 MPa ile R kodlu harç numunesinde, en düşük eğilme dayanımı 8,6 MPa ile 10KK kodlu harç numunesinde tespit edilmiştir. Bununla birlikte 10YFC, 10KK ve 10D kodlu örneklerin eğilme dayanımları referans harç numunesine göre sırasıyla %0,4, %5,5 ve %3,3 olarak gerçekleşmiştir. Elde edilen veriler dikkate alındığında hidrasyon süresi arttıkça kullanılan tüm mineral katkıların puzolanik özellikleri nedeniyle olumlu özellik gösterdiği söylenebilir. Özellikle YFC'nin 90. günde neredeyse referans çimentonun eğilme dayanım değerine sahip olduğu ve diğer puzolanik malzemelere göre eğilme dayanımı açısından nispeten daha olumlu katkı sağladığı söylenebilir. Bu durumun, yarı-kararlı camı malzeme yapısına sahip YFC'nin ince tane yapısı nedeniyle, Portland çimentosunun hidrasyonuyla ortaya çıkan Ca(OH)_2 'yi kullanmak suretiyle ilave kalsiyum silikat hidratlar meydana getirmesi nedeniyle gerçekleştiği düşünülmektedir. Çünkü camı faz miktarının, YFC'nin hidrolik özelliklerini belirleyici en önemli unsurlardan birisi olduğu ve camı faz miktarıyla dayanım arasında, kabaca da olsa doğrusal bir ilişki olduğu ifade edilmektedir [40].

IV. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma için kullanılan analizler ve yapılan eğilme dayanımı deneyinden elde edilen bulgulara göre;

- Elek analizi verilerine göre; YFC, kalsine kaolin ve diatomitin PÇ'ye göre daha küçük tane yapısına, daha büyük yüzey alanına (Blaine) ve daha düşük özgül ağırlık değerlerine sahip oldukları;
- Kimyasal analiz verilerine göre S+A+F değerinin kalsine kaolin (%83,34) ve diatomit (%88,07) için ise doğal puzolanlar için belirtilen sınır değerleri olan >%70 oranını sağladığı belirlenmiştir. YFC için hidrolik özelliklerinin tespitindeki önemli parametrelerden (C+M)/S oranı 0,99, (C+M+A)/S oranı ise 1,32 ile minimum 1 olan sınır değeriyle uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Dolayısı ile bu sonuçlara göre üç malzemenin de puzolanik olarak istenilen özelliklerde oldukları;
- Minerolojik özelliklerini tespit etmek için yapılan XRD analizlerine göre; PÇ'nin C_3S , C_2S , C_3A ve C_4AF anabileşenlerinin kırılma piklerinden oluştuğu, YFC ve diatomitin yoğun amorf yapıda olduğu, kalsine kaolinin ise kaolinit, zeolit ve kristobalit fazlarının küçük kırılma pikleri ile kuvars ve müllitin güçlü kırılma piklerinden oluştuğu;
- FT-IR analizlerine göre tüm malzemenin moleküler yapılarının literatüre uygun olarak elde edildiği;
- Termal analiz verilerine göre toplam ağırlık kayıplarının PÇ'de %3,7, YFC'nin %1,76, kalsine kaolinin %8,51, diatomitin %9,55 olarak elde edildiği; DSC/TGA eğrilerine göre farklı sıcaklık aralıklarındaki ağırlık kayıpları açısından malzemelerin yapılarındaki fiziksel ve kimyasal bağla bağlı olan suyun dehidrasyonunun en çok görüldüğü malzemenin diatomit olduğu;
- SEM analizi sonucunda elde edilen görüntülere göre; PÇ'nin farklı boyut ve şekillerde düzensiz bir yapıya sahip olduğu; YFC tane şekillerinin esas olarak sürekli bir ağ yapısında olan camı fazlardan oluştuğu; kalsine kaolinin katmanlar arası boşlukları bulunan pul pul plakalar halinde

bir tane yapısına sahip olduğu; diatomitin ise içi boş tüpler, halkalar, plakalar, nispeten düzenli bir gözenek sistemine sahip çeşitli şekillerde parçalar ve parçacıklar içerdiği;

- Referans çimento harçlarının (R) eğilme dayanımlarının; 2 günde 5,0 MPa, 7 günde 6,2 MPa, 28 günde 8,4 MPa ve 90 günde 9,1 MPa olarak elde edildiği;
- PC'ye %10 oranında YFC ikame edildiğinde elde edilen harcın eğilme dayanımlarının; 2 günde 4,2 MPa, 7 günde 5,6 MPa, 28 günde 8,0 MPa ve 90 günde 9,0 MPa olarak elde edildiği;
- PC'ye %10 oranında kalsine kaolin ikame edildiğinde elde edilen harcın eğilme dayanımlarının; 2 günde 4,1 MPa, 7 günde 5,5 MPa, 28 günde 7,7 MPa ve 90 günde 8,6 MPa olarak elde edildiği;
- PC'ye %10 oranında diatomit ikame edildiğinde elde edilen harcın eğilme dayanımlarının; 2 günde 4,1 MPa, 7 günde 5,4 MPa, 28 günde 7,9 MPa ve 90 günde 8,8 MPa olarak elde edildiği;
- Eğilme dayanımı sonuçlarına göre; hidrasyon süresi arttıkça tüm mineral katkıların puzolanik özellikleri nedeniyle olumlu özellik gösterdiği, özellikle YFC'nin 90 günde neredeyse referans çimentonun eğilme dayanım değerine sahip olduğu ve diğer puzolanik malzemelere göre eğilme dayanımı açısından nispeten daha olumlu katkı sağladığı belirlenmiştir.

Sonuç olarak harç numunelerinin eğilme dayanımlarının; hidrasyon süresine, hammaddelerin fiziksel, kimyasal, mineralojik, moleküler, termal ve mikro yapı gibi yapısal özelliklerine bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir. Dolayısı ile meydana gelen reaksiyonların sebeplerinin daha iyi anlaşılabilmesi açısından standart çimento deneylerinin yanında malzemelerin yapısal özelliklerin belirlenebileceği DSC/TGA, XRD, FT-IR, SEM/EDS gibi tekniklerle bir bütün olarak incelenmesinin faydalı olabileceği düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR: Yazarlar, standart çimento deneylerinin yapılmasında desteklerini esirgemeyen Eskişehir Çimento Fabrikası laboratuvar çalışanları ve idarecilerine içtenlikle teşekkür ederler.

V. KAYNAKLAR

- [1] K. Fang, D. Wang, J. Zhao and M. Zhang “Utilization of ladle furnace slag as cement partial replacement: Influences on the hydration and hardening properties of cement,” Construction and Building Materials, vol. 299, no. 124265, 2021.
- [2] B. Chen, L. Pang, Z. Zhou, Q. Chang, and P. Fu, “Study on the hydration properties of a ternary cementitious material system containing activated gold tailings and granulated blast furnace slag,” Journal of Building Engineering, vol. 63, no. 105574, 2023.
- [3] E. Gödek, K. T. Felekoğlu, M. Keskinates, and B. Felekoğlu, “Development of flaw tolerant fiber reinforced cementitious composites with calcined kaolin,” Applied Clay Science, vol. 146, pp.423-431, 2017.
- [4] M. Karatas, A. Benli, and F. Arslan, “The effects of kaolin and calcined kaolin on the durability and mechanical properties of self-compacting mortars subjected to high temperatures,” Construction and Building Materials, vol. 265, no. 120300, 2020.
- [5] O. Alsawi, B. X. Li, S. Liu Yue, and W. Zhi Wen, “Efficacy of sodium alginate, xanthan gum, and diatomite admixtures in improving the strength and shrinkage behaviour of EPS lightweight concrete,” European Journal of Environmental and Civil Engineering, pp.1-14, 2022. (Early Access)

- [6] Z. Lv, A. Jiang, and J. Jin, "Influence of ultrafine diatomite on cracking behavior of concrete: An acoustic emission analysis," *Construction and Building Materials*, vol. 308, no. 124993, 2021.
- [7] J. Liu, Q. Yu, Z. Zuo, F. Yang, W. Duan, and Q. Qin, "Blast furnace slag obtained from dry granulation method as a component in slag cement," *Construction and Building Materials*, vol. 131, pp.381-387, 2017.
- [8] M. Tokyay ve K. Erdoğdu, "Cüruflar ve cüruflu çimentolar," TÇMB/AR-GE/Y97.2, Ankara, 1997.
- [9] H. Yalçın ve M. Gürü, *Çimento ve Beton*, Ankara, Türkiye: Palme Yayıncılık, 2006, böl. 3, ss. 38.
- [10] F. Arslan, "Kaolin kullanımının kendiliğinden yerleşen harçların dayanım ve dayanıklılık özelliklerine etkisi," Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 2019.
- [11] N. Shafiq, M. F. Nuruddin, S. U. Khan, and T. Ayub, "Calcined kaolin as cement replacing material and its use in high strength concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 81, pp.313-323, 2015.
- [12] Z. Yılmaz, "Hidrotermal yöntemlerle kaolin'in dekompozisyonu," Yüksek Lisans Tezi, Kimya, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir Türkiye, 2004.
- [13] G. Kakali, T. H. Perraki, S. Tsivilis, and E. Badogiannis, "Thermal treatment of kaolin: the effect of mineralogy on the pozzolanic activity," *Applied clay science*, vol. 20, no. 1-2, pp.73-80, 2001.
- [14] A. Shvarzman, K. Kovler, G. S. Grader, and G. E. Shter, "The effect of dehydroxylation/amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite," *Cement and concrete research*, vol. 33, no. 3, pp.405-416, 2003.
- [15] E. Badogiannis, G. Kakali, and S. Tsivilis, "Metakaolin as supplementary cementitious material: optimization of kaolin to metakaolin conversion," *Journal of thermal analysis and calorimetry*, vol. 81, no. 2, pp.457-462, 2005.
- [16] Ç. Salam, "Fiziksel ve kimyasal işlemlerin kaolin'in yapısına etkileri" Yüksek lisans tezi, Kimya Ana Bilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, 2004.
- [17] Z. Ahmadi, J. Esmaili, J. Kasaei, and R. Hajjalioghli, "Properties of sustainable cement mortars containing high volume of raw diatomite," *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 16, pp.47-53, 2018.
- [18] H.Y. Aruntaş, "Diatomitlerin çimentolu sistemlerde puzolanik malzeme olarak kullanılabilirliği," Doktora Tezi, Mimarlık, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 1996.
- [19] A. Uygun, *Diatomit Jeolojisi, ve yararlanma olanakları. Bilimsel Madencilik Dergisi*, c. 15, s. 5, ss. 31-38, 1976.

- [20] Çalışkan M. “Doğal Diatomit (Çaldıran-Van) Üzerine Basic Blue Ve Neutral Red Boyar Maddelerinin Adsorpsiyon ve Denge Çalışması,” Yüksek Lisans Tezi, Kimya, Ordu Üniversitesi, Ordu, Türkiye, 2018.
- [21] S. Benayache, S. Alleg, A. Mebrek, and J. J. Suñol, “Thermal and microstructural properties of paraffin/diatomite composite,” *Vacuum*, vol. 157, pp.136-144, 2018.
- [22] E. Worrell, N. Martin and L. Price, “Potentials for energy efficiency improvement in the US cement industry,” *Energy*, vol. 25, no. 12, pp.1189-1214, 2000.
- [23] A. Hasanbeigi, L. Price and E. Lin, “Emerging energy-efficiency and CO2 emission-reduction technologies for cement and concrete production: A technical review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 8, pp. 6220-6238, 2012.
- [24] S. R. Salla, R. B. Uppara, A. K. Kannazia, B. Kondraivendhan, and C. D. Modhera, “An experimental and environmental impact assessment of slag-based mineral admixture for sustainable development,” *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 8, no. 29, 2023.
- [25] C. Zhu, H. Tan, C. Du, J. Wang, X. Deng, Z. Zheng, and X. He, “Enhancement of ultra-fine slag on compressive strength of solid waste-based cementitious materials: Towards low carbon emissions,” *Journal of Building Engineering*, vol. 63, no. 105475, 2023.
- [26] M. M. López, Y. Pineda and O. Gutiérrez, “Evaluation of durability and mechanical properties of the cement mortar added with slag blast furnace,” *Procedia Materials Science*, vol. 9, pp. 367-376, 2015.
- [27] J. Zhu, Q. Zhong, G. Chen and D. Li, “Effect of particlesize of blast furnace slag on properties of portland cement,” *Procedia Engineering*, vol. 27, pp. 231-236, 2012.
- [28] D. N. Richardson, “Strength and Durability Characteristics of a 70% Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) Concrete Mix,” *Organizational Results Research Report*, Missouri Department of Transportation (MoDOT), 2006.
- [29] K. Mermerdaş, M. Gesoğlu, E. Güneyisi, and T. Özturan, “Strength development of concretes incorporated with metakaolin and different types of calcined kaolins,” *Construction and Building Materials*, vol. 37, pp.766-774, 2012.
- [30] S. Tongbo, W. Bin, Z. Lijun, and C. Zhifeng, *Meta-Kaolin for high performance concrete*. In *Calcined Clays for Sustainable Concrete: Proceedings of the 1st International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete* (pp. 467-477). Springer Netherlands, 2015.
- [31] D. D. Vu, P. Stroeven, and V. B. Bui, “Strength and durability aspects of calcined kaolin-blended Portland cement mortar and concrete,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 23, no. 6, pp.471-478, 2001.
- [32] O. Keleştemur and B. Demirel, “Effect of metakaolin on the corrosion resistance of structural lightweight concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 81, pp. 172-178, 2015.

- [33] H. Sun, W. Cheng, H. Xu, Z. Cai, M. Yin, and F. Shi, "Influence of CO₂ Curing on the Alkali-Activated Compound Mineral Admixtures' Corrosion Resistance to NaCl Dry-Wet Alternations," *Coatings*, vol. 13, no. 67, 2023.
- [34] H. Y. Aruntaş, E. Yildiz, and G. Kaplan, "The engineering performance of eco-friendly concretes containing diatomite fly ash and ground granulated blast furnace slag," *Acta Polytechnica*, vol. 62, no.5, pp. 505-521, 2022.
- [35] Y. Kocak, and M. Savas, "Effect of the PC, diatomite and zeolite on the performance of concrete composites," *Computers and Concrete*, vol. 17, no. 6, 815-829, 2016.
- [36] Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini, Türk Standartlar Enstitüsü, TS EN 196-1, 2016.
- [37] Çimento deney yöntemleri - Bölüm 6: İncelik tayini, Türk Standartlar Enstitüsü TS EN 196-6, 2020.
- [38] Çimento deney yöntemleri - Bölüm 2: Çimentonun kimyasal analizi, Türk Standartlar Enstitüsü TS EN 196-2, 2013.
- [39] Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartlar Enstitüsü TS EN 197-1, 2012.
- [40] M., Tokyay ve K. Erdoğan, "Cürüfler ve cürüflü çimentolar, Araştırmaların Gözden Geçirilmesi ve Durum Değerlendirmesi Raporu," TÇMB/AR-GE/Y 97.2, ANKARA, 2011.
- [41] Doğal puzolan (tras)-Çimento ve betonda kullanılan-Tarifler, gerekler ve uygunluk kriterleri, Türk Standartlar Enstitüsü TS 25, 2015.
- [42] Y. C. Choi and B. Park, "Enhanced autogenous healing of ground granulated blast furnace slag blended cements and mortars," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 4, pp. 3443-3452, 2019.
- [43] X. Huang, M. Jiang, X. Zhao and C. Tang, "Mechanical properties and hydration mechanisms of high-strength fluorogypsum-blast furnace slag-based hydraulic cementitious binder," *Construction and Building Materials*, vol. 127, pp. 137-143, 2016.
- [44] Y. İ. Şahin, and Y. Koçak, "Yüksek Fırın Cürufu İkameli Çimentoların Yapısal ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 10, s. 2, ss. 802-814, 2022.
- [45] H. N. Yoon, J. Seo, S. Kim, H. K. Lee and S. Park, "Hydration of calcium sulfoaluminate cement blended with blast-furnace slag," *Construction and Building Materials*, vol. 268, no. 121214, 2021.
- [46] M. Yanık, "Farklı incelikte öğütülmüş obsidyen katkılı çimentoların puzolanik özelliklerinin tayini," Yüksek lisans tezi, İnşaat Mühendisliği, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Rize, Türkiye, 2019.
- [47] B. Sarde, Y. Patil, B. Dholakiya, and V. Pawar, "Effect of calcined kaolin clay on mechanical and durability properties of pet waste-based polymer mortar composites," *Construction and Building Materials*, vol. 318, no. 126027, 2022.

- [48] G. Yao, J. Lei, X. Zhang, Z. Sun, S. Zheng, and S. Komarneni, "Mechanism of zeolite X crystallization from diatomite," *Materials Research Bulletin*, vol. 107, pp. 132-138, 2018.
- [49] B. Figarska-Warchoł, G. Stańczak, M. Rembiś, and T. Toboła, "Diatomaceous rocks of the Jawornik deposit (the Polish Outer Carpathians): petrophysical and petrographical evaluation," *Geology, Geophysics and Environment*, vol. 41, no. 4, pp. 311-331, 2015.
- [50] Y. Kocak, and İ. Pınarcı, "Effects of hydration mechanism on mechanical properties of diatomite-cement composites," *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, pp. 1-15, 2022. (Early Access)
- [51] F. Puertas, A. Fernandez-Jimenez and M.T. Blanco-Varela, "Pore solution in alkali-activated slag cement pastes. relation to the composition and structure of calcium silicate hydrate," *Cement And Concrete Research*, vol. 34, no.1, pp. 139-148, 2004.
- [52] M. J. Varas, M. A. De Buergo and R. Fort, "Natural cement as the precursor of portland cement: Methodology for its identification," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 11, pp. 2055-2065, 2005.
- [53] F. I. Adeniyi and M.B. Ogundiran, "Synthesis of geopolymer binders and mortars from Ijero-Ekiti calcined clay, blast furnace slag and river sand," *Earthline Journal of Chemical Sciences*, vol. 4, no. 1, pp. 15-34, 2020.
- [54] A. R. Sakulich, S. Miller and M.W. Barsoum, "Chemical and microstructural characterization of 20-month-old alkali-activated slag cements," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 93, no. 6, pp. 1741-1748, 2010.
- [55] Y. Huang, D. E. N. G. Jie, W. A. N. G. Weiqing, F. E. N. G. Qiming, and X. U. Zhonghui, "Preliminary investigation of pozzolanic properties of calcined waste kaolin," *Materials Science*, vol. 24, no. 2, pp. 177-184, 2018.
- [56] J. A. C. Costa, A. E. Martinelli, R. M. do Nascimento, and A. M. Mendes, "Microstructural design and thermal characterization of composite diatomite-vermiculite paraffin-based form-stable PCM for cementitious mortars," *Construction and Building Materials*, vol. 232, no. 117167, 2020.
- [57] T. Qian, J. Li, X. Min, Y. Deng, W. Guan, and L. Ning, "Diatomite: A promising natural candidate as carrier material for low, middle and high temperature phase change material." *Energy Conversion and Management*, vol. 98, pp. 34-45, 2015.
- [58] A. Sarı, G. Hekimoğlu, V. V. Tyagi, and R. K. Sharma, "Evaluation of pumice for development of low-cost and energy-efficient composite phase change materials and lab-scale thermoregulation performances of its cementitious plasters," *Energy*, vol. 207, no. 118242, 2020.
- [59] H. Oğuz. (2023, 30 Ocak). TERMAL ANALİZLER (TA). Erişim: http://huseyinoguz.net/mysite/TERMALANALİZLERv3_17-02-07.pdf
- [60] S. Kurugöl, "Puzolanik Aktivite Tespit Yöntemleri: Fiziksel Metotlar," *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi*, c. 38, s. 1, ss. 21-39, 2017.

- [61] R. Gabrovšek, T. Vuk, and V. Kaučič, "Evaluation of the hydration of Portland cement containing various carbonates by means of thermal analysis," *Acta Chim. Slov*, vol. 53, no. 2, pp. 159-165, 2006.
- [62] W. E. A. Z. Sha, E. A. O'Neill, and Z. Guo, "Differential scanning calorimetry study of ordinary Portland cement," *Cement and Concrete research*, vol. 29, no. 9, pp. 1487-1489, 1999.
- [63] C. Fredericci, E. D. Zanotto, and E. C. Ziemath, "Crystallization mechanism and properties of a blast furnace slag glass," *Journal of non-crystalline solids*, vol. 273, no. 1-3, pp. 64-75, 2000.
- [64] S. C. Ma, Z. G. Wang, J. L. Zhang, D. H. Sun, and G. X. Liu, "Detection analysis of surface hydroxyl active sites and simulation calculation of the surface dissociation constants of aqueous diatomite suspensions," *Applied Surface Science*, vol. 327, pp. 453-461, 2015.
- [65] R. Siddique, and M. I. Khan, *Supplementary cementing materials*, Springer Science and Business Media, e-ISBN 978-3-642-17866-5. 2011, pp. 123-124.
- [66] A. Dixit, H. Du, and S. Dai Pang, "Marine clay in ultra-high performance concrete for filler substitution," *Construction and Building Materials*, vol. 263, no. 120250 2020.
- [67] N. M. Ahmed, "Comparative study on the role of kaolin, calcined kaolin and chemically treated kaolin in alkyd-based paints for protection of steel," *Pigment and Resin Technology*, vol. 42, no. 1, pp. 3-14, 2013.
- [68] E. V. Evdokimova, P. A. Matskan, and G. V. Mamontov, MIL-100 (Fe)/Diatomite Composite with Hierarchical Porous Structure for Sorption of Volatile Organic Compounds. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, vol. 96, no. 1, pp. 171-178, 2022.
- [69] Q. Sun, H. Li, B. Niu, X. Hu, C. Xu, and S. Zheng, "Nano-TiO₂ immobilized on diatomite: characterization and photocatalytic reactivity for Cu²⁺ removal from aqueous solution," *Procedia engineering*, vol. 102, pp. 1935-1943, 2015.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

17 Kasım 2021 Merkez (Düzce) Depremi (Mw5.0) ve Artçı Şoklarının (Mw4.3 ve Mw3.9) Moment Tensör Çözümleri ve Ana Şok Coulomb Gerilme Analizi

 Nihan HOŞKAN^{a,*}

^a Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İstanbul-Cerrahpaşa Üniversitesi, İstanbul, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: nihan@iuc.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1112340

Öz

Bu çalışmada 17 Kasım 2021 tarihinde yerel saat ile (YS) 15.40'da meydana gelen Mw5.0 büyüklüğündeki Merkez (Düzce) depremi ile Mw4.3 (YS 15.57) ve Mw3.9 (YS 21.35) büyüklüklerindeki iki artçı şokun kaynak mekanizma çözümleri moment tensör ters çözüm (MT) yöntemiyle bulunmuştur. Ana şokun KD-GB uzanımlı doğrultu atımlı kırık üzerinde meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen ana şok moment tensör çözümü, deprem veri merkezlerinden elde edilen fay çözümleri ile karşılaştırılmış ve bulunan sonucun uyumlu olduğu görülmüştür. Mw4.3 büyüklüğündeki artçı şokun kaynak mekanizmasının doğrultu atım bileşeni olan ters faylanma mekanizmasına, Mw3.9 büyüklüğündeki artçı şokun ise KD-GB uzanımlı doğrultu atımlı faylanma mekanizmasına sahip olduğu görülmüştür. Ana şokun neden olduğu Coulomb gerilme değişimi hesaplanmış ve K-G, KB-GD ve KD-GB yönlerinde kesitler alınarak yaklaşık 15 km derinlikteki gerilmenin değişimi incelenmiştir. Buna göre, Merkez (Düzce) depreminin ana şok ve artçı şoklarının bölgedeki KD-GB yönündeki gerilmeyi azalttığı, buna karşın K-G ve BKB-DGD yönündeki yakın faylar üzerine maksimum 1 bar gerilme yüklediği tespit edilmiştir. Gerilmenin arttığına işaret edilen bölgede 23 Kasım 2022 Gölyaka (Düzce) depremi (Mw5.9) meydana gelmiştir. Bu durum, çalışmadaki sonuçların doğruluğunu kanıtlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Düzce Depremleri, Coulomb Gerilme Analizi, Moment Tensör Çözümü

Moment Tensor Solutions of November 17, 2021 Central (Duzce) Earthquake (Mw5.0) and its Aftershocks (Mw4.3 and Mw3.9) and Coulomb Stress Analysis of the Mainshock

ABSTRACT

In this study, the source mechanism solutions of the November 17, 2021 Central (Düzce) earthquake occurred at 15.40 local time (LT) with magnitude Mw5.0 and its aftershocks occurred with magnitudes Mw4.3 (LT 15.57) and Mw3.9 (LT 21.35) were found by using the moment tensor inversion (MT) method. It was determined that the mainshock occurred on the NE-SW oriented strike-slip fracture. The mainshock source parameter solution obtained in this study was compared with the fault solution obtained from earthquake data centers and it was seen that the result was compatible. It was observed that the source mechanism of the Mw4.3 aftershock was reverse faulting with a strike-slip component, and the Mw3.9 aftershock has a NE-SW oriented strike-slip faulting mechanism. The Coulomb stress variation caused by the mainshock was calculated and the variation of the stress at a depth of 15 km was examined by taking cross-sections in N-S, NW-SE and NE-SW directions. Accordingly, it was determined that the mainshock and its aftershocks reduced the stress in the NE-SW direction, but loaded maximum of 1 bar on the nearby faults in the N-S and WNW-ESE directions. 23 November 2022 Gölyaka (Düzce) earthquake (Mw5.9) occurred in the region where the stress was indicated to increase. This proves the accuracy of the results in the study.

Keywords: Duzce Earthquakes, Coulomb Stress Analysis, Moment Tensor Solution

I. GİRİŞ

Arabistan ve Afrika Levhalarının Avrasya Levhasına göre göreceli olarak kuzeye doğru hareketi, Anadolu Levhasının sağ yanal doğrultu atımlı Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) ve sol yanal doğrultu atımlı Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) boyunca yaklaşık 24 mm/yıl hızla saatin tersi yönünde batıya doğru kaçmasına neden olur [1-10] (Şekil 1).

KAFZ, doğuda DAFZ ile kesiştiği Karlıova üçlü birleşim noktasından başlar. Zon, orta kısım civarında dış bükey bir yay yaparak batıda Saros Körfezi'nin batısına kadar uzanır [11]. KAFZ yaklaşık 1200 km uzunluğunda olup, sismik olarak dünyanın en aktif sağ yanal atımlı fay zonlarından biridir. [10, 11, 13, 15]. KAFZ, 1939 Erzincan Depremi'nden itibaren doğudan batıya doğru göç eden depremler ($M > 7$) ile kırılmıştır [11-12] (Şekil 1). 17 Ağustos 1999 İzmit depremi ($M_w 7.4$), İzmit Körfezi ile Gölyaka (Düzce) arasında yaklaşık 150 km uzunluğundaki Hersek, Karamürsel-Gölcük, İzmit-Sapanca Gölü, Sapanca-Akyazı ve Karadere segmentlerinin kırılmasına neden olmuştur [13-17]. 17 Ağustos 1999 İzmit depreminden yaklaşık 3 ay sonra, KAFZ üzerinde bulunan Düzce havzasının güneyinde 12 Kasım 1999 Düzce depremi ($M_w 7.2$) meydana gelmiştir. Deprem, Bolu'nun batısında; Kaynaşlı'nın doğusu ile Gölyaka arasında 41 km uzunluğunda yüzey kırığı oluşturmuştur [18]. İki büyük deprem sonrası Düzce ve Hendek faylarına büyük bir gerilme enerjisinin aktarıldığı ve bu faylar üzerinde deprem riskinin arttığı ileri sürülmüştür [19-20].



Şekil 1. Türkiye'nin sismotektonik haritası. KAFZ boyunca $M > 7$ olan depremler. Kırmızı kare çalışma alanını; büyük oklar levhaların hareket yönünü göstermektedir (Faylar, Emre vd. 2013'den [21] değiştirilerek alınmıştır).

17 Kasım 2021 tarihinde YS ile 15.40'da Düzce Merkez'de; KAFZ üzerinde oluşan 1999 İzmit ve Düzce deprem kırıkları ile Çilimli Fayı arasında kalan alanda $M_w 5.0$ büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiştir (Şekil 2). Deprem, Düzce ili ve ilçeleri ile çevre illerde hissedilmiştir. Deprem sonrası hazırlanan tahmini şiddet haritasında, depremin merkezinde şiddet değerinin VI olduğu belirtilmiştir [22]. 1999 İzmit ve Düzce depremlerinin postsismik gerilme değişimlerinin [23-24], depremlerin meydana geldiği zamandan itibaren etkisini azaltarak 17 Kasım 2021 Merkez (Düzce) depremi ($M_w 5.0$) kırılma düzlemi üzerine 5 barlık gerilme yüklediği tespit edilmiştir [25]. 17 Kasım 2021 Merkez (Düzce) depremi ($M_w 5.0$) sonrası aynı gün 15.57'de $M_w 4.3$ ve 21.35'te $M_w 3.9$ büyüklüklerinde iki artçı şok meydana gelmiştir.

Deprem kaynak parametrelerinin belirlenmesi, levha tektoniğinin, deprem süreçlerinin ve kabuksal gerilme dağılımlarının anlaşılması açısından önemlidir. Kaynak mekanizmasının belirlenmesinde iki

ana yaklaşım vardır: Bunlardan biri, sismogramlardaki cisim dalgası sinyallerinin ilk hareket polaritesinin ve/veya genliğinin kullanımı (örn; [26]), ikincisi ise dalga formu ters çözümü ile bölgesel veya daha büyük ölçekteki deprem kaynak parametrelerinin belirlenmesidir. Dalga formu ters çözümüne yönelik çeşitli yaklaşımlar, gözlemsel veriler ile yer kabuğu hız modelini kullanarak üretilmiş sentetik dalga formları arasındaki karşılaştırmaya dayanır (örn; [27-34]).

Sismik yerdeğiştirmenin neden olduğu statik Coulomb gerilme dağılımının depremi oluşturan fayın civarında bulunan diğer faylar üzerindeki kırılma gerilmesine olan etkisi, yoğun bir şekilde incelenmektedir [35-41]. Öncü depremler, ana şok, artçı depremler ve bölgede oluşan diğer depremler arasındaki etkileşimin varlığına dair çalışmalarda, ilk önceleri kayma gerilmesinin etkin olduğu ortaya atılmış [42], daha sonraları ise Coulomb kırılma kriterlerinin yer kabuğundaki kırıkları daha iyi bir şekilde açıklayabileceği ileri sürülmüştür [36, 43]. Coulomb gerilme dağılımı araştırmaları, meydana gelmiş depremin neden olduğu statik gerilme değişimlerinin aynı fay veya komşu faylar boyunca meydana gelecek depremlerin oluş zamanını etkileyebileceğinden, gelecekteki sismik tehlikenin ve deprem olasılıklarının yorumlanmasında etkili şekilde kullanılmıştır [44-48].

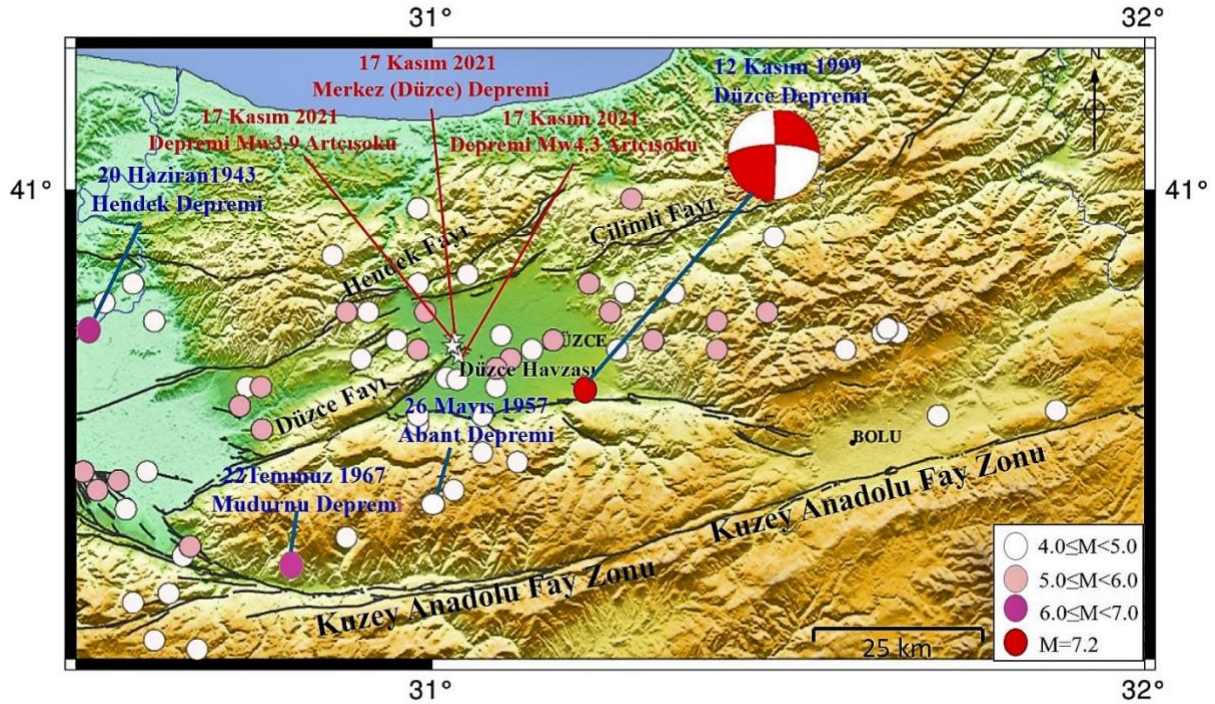
Bu çalışmanın amacı, 17 Kasım 2021 tarihinde (YS 15.40) 1999 İzmit ve Düzce deprem kırıkları ile Çilimli Fayı arasında kalan alanda meydana gelen depremin (Mw5.0) ve bu deprem sonrası meydana gelen iki artçı şokun kaynak mekanizmalarını hesaplayarak bölgesel tektonizmayı incelemek ve Merkez (Düzce) depreminin bölgedeki gerilme alanına etkisini tespit etmektir.

II. BÖLGENİN SİSMOTEKTONİK ÖZELLİKLERİ

Sismik olarak dünyanın en aktif fay zonlarından biri olan KAFZ boyunca yer değiştirme, ana faydan Anadolu Levhasının içerisine doğru uzanarak ayrılan birçok yan kolun görünür ötelenmeleri nedeniyle doğudan batıya azalmaktadır [3-4, 49-64]. Yapılan araştırmalar sonucunda zonun doğusunda 85 ± 5 km, batısında ise yaklaşık 25 ± 5 km arasında toplam atım hesaplanmıştır [49, 63-65]. KAFZ üzerinde doğuda 1939 Erzincan Depremi (Ms7.9) ile başlayan ve batıya doğru ilerleyen $M>7$ olan depremlerin son halkası 17 Ağustos 1999 İzmit depremi (Mw7.4) ve bu depremden yaklaşık üç ay sonra meydana gelen 12 Kasım 1999 Düzce (Mw7.2) depremidir (Şekil 1). Yapılan çalışmalar, bu depremler sonrası Düzce Havzası ve civarındaki faylara gerilme yüklendiğini ortaya koymuştur [19-20, 23-24]

17 Kasım 2021 Merkez (Düzce) depremi (Mw5.0), Düzce Havzası'nda meydana gelmiştir (Şekil 2). Düzce Havzası, Kuzey Anadolu Fay Zonu'na bağlı olarak meydana geldiği ileri sürülen genç çöküntü bir havzadır [66]. Düzce Havzası'ndaki faylar, Düzce, Hendek ve Çilimli faylarıdır (Şekil 2) [19]. Yaklaşık 70 km uzunluğundaki Düzce fayı, D-B uzantılı sağ yönlü doğrultu atımlı aktif faydır (Şekil 2) [67-68]. 12 Kasım 1999 Düzce depremi (Mw7.1), Düzce Fayı üzerinde meydana gelmiş, 41 km'lik bir yüzey kırığı oluşturmuştur [18]. Düzce Havzası'nın batısında KD-GB uzanımlı sağ yönlü doğrultu atımlı olan Hendek Fayı, yaklaşık 50 km uzunluğundadır [19] (Şekil 2). Düzce Havzası'nın kuzeyinde bulunan ve yaklaşık olarak 13 km uzunluğunda olan Çilimli Fayı ise aktif fay olarak değerlendirilmiştir [19] (Şekil 2).

17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi (Mw7.4), yaklaşık 110 km uzunluğunda yüzey kırığı oluşturmuş ve maksimum 5 m yer değiştirmeye neden olmuştur [13, 15]. Bu kırığın doğuya doğru uzantısı 12 Kasım 1999 Düzce depremi (Mw7.2) olarak değerlendirilmiştir. 1957 Abant (Ms7.1) [69] ve 1967 Mudurnu (Ms6.8) [70] depremleri çalışma alanının güneyinde, 1943 Adapazarı (Ms6.6) [69] depremi ise çalışma alanının batısında meydana gelmiştir (Şekil 2). Hendek Fayı üzerinde 1943 Hendek depreminden başka son yüzyılda yıkıcı bir deprem olmamıştır [11, 71-72]. Düzce Fayı üzerinde tarihte meydana gelen en son ve yıkıcı deprem ise 25 Mayıs 1719 yılında meydana gelmiştir [72].



Şekil 2. 1990-2021 yılları arasında meydana gelmiş $M \geq 4.0$ olan depremler ile bu çalışmada kullanılan 17 Kasım 2021 Merkez (Düzce) depremi ($M_w 5.0$) ve iki artçı şokun ($M_w 4.3$, $Y_S 15.57$; $M_w 3.9$, $Y_S 21.35$) dış merkezleri ve bölgedeki faylar (Faylar, Emre vd., 2013' den [21] değiştirilmiştir) (12 Kasım 1999 Düzce depreminin ($M_w 7.2$) kaynak mekanizma çözümü USGS'ten [73] alınmıştır.)

III. YÖNTEM

Bu çalışmada, Merkez (Düzce) depremi ($M_w 5.0$) ve artçı şoklarının kaynak parametrelerini hesaplamak için Herrmann (2013) [74] tarafından geliştirilen bölgesel moment tensor ters çözüm yöntemi (MT) uygulanmıştır.

MT yöntemi, gözlemsel sismogramların, sismik kaynak veya sismik kaynak yayılımının yönlerini hesaba katan bir dizi doğrusal filtrenin çıktısı olduğu temeline dayanır [75]. Buna göre, gözlenen sismogram $u(t)$;

$$u(t) = s(t) * g(t) * i(t) \quad (1)$$

şeklinde yazılır. Burada $s(t)$: sismik kaynaktan gelen sinyal, $g(t)$: yer transfer fonksiyonu, $i(t)$ ise sismometrenin yanıtıdır. * konvolüsyonu temsil eder. (1) eşitliği geliştirilerek

$$u_n(x, t) = s(t) * i(t) \sum_{i=1}^5 (m_i \cdot G_{in}(t)) \quad (2)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $m_1 = M_{11}$, $m_2 = M_{22}$, $m_3 = M_{12}$, $m_4 = M_{13}$, $m_5 = M_{23}$ ve u_n : düşey (Z), teğetsel (T) veya ışımsal (R) yer değiştirir. Bu durumda yer transfer fonksiyonunun yerine sismik moment tensörü m_i ve buna karşılık gelen Green fonksiyonların çarpımının toplamı alınır [76-75]. Belirli bir mesafede keyfi bir moment tensörü için sentetik dalga formu üretmek için beş temel Green fonksiyonunun hesaplanması gerekir [75]. Kaynak zaman fonksiyonunun, kaynak derinliğinin, alet yanıtı olan $i(t)$ 'nin bilindiğini varsayırsa, $s(t)$ ve $i(t)$ doğrudan Green fonksiyonları ile evrişerek

$$u = G m \quad (3)$$

şeklinde yazılır. Burada G : konvolüsyon sonrası Green fonksiyonu içeren matrix, u : gözlemsel sismogramı içeren vektör, m ise moment tensör vektörüdür.

Bu çalışmada, Merkez (Düzce) depremi ($M_w5.0$) ve artçı şoklarının kaynak parametreleri Herrmann (2013) [74] tarafından geliştirilen MT yöntemi grid arama tekniği ile bulunmaktadır [74]. Grid arama tekniğinde, deprem doğrultu ve kayma açısı ile karakterize edilen en uygun dislokasyonu elde etme amaçlanır. Bunun için veri seti olarak filtrelenmiş zemin hız bilgisi kullanılır. Kaynak derinliğinin tespiti için, 10° lik artışlarla tüm doğrultu, eğim ve atım açısı değerleri üzerinde arama gerçekleştirilir, ardından en uygun olarak görülen yaklaşık 20° lik bir bölgede 5° lik daha detaylı arama yapılır. Her bir sinyal, dış merkez uzaklığına bağlı olarak ağırlıklandırılır. Grid arama algoritması, dalga şeklini daha uyumlu hale getirmek için çalışır. Bu nedenle her istasyon doğrultusunda Green fonksiyonlarının sismogramlarla uyumsuzluğunu en aza indirir. Uyumsuzluğun en aza indirgenebilmesi için zaman kayması uygular. Bu durumda en uyumlu sentetik ve gözlemsel veriler hizalanır.

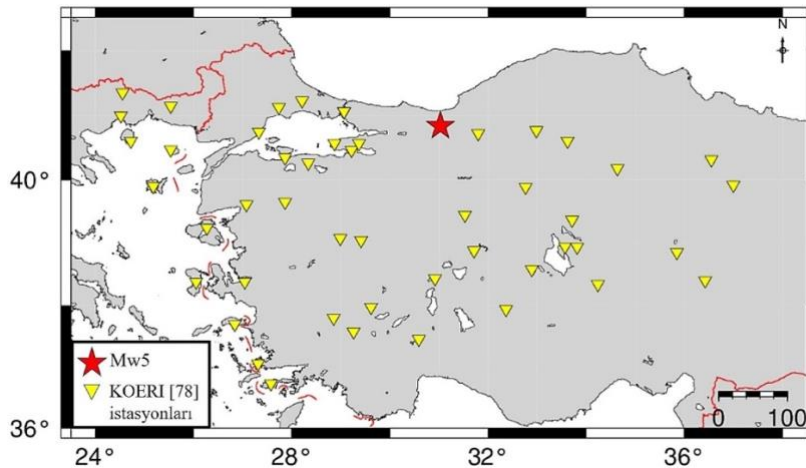
Kaynak parametrelerinin hesaplanmasından sonra bu çalışmada Merkez (Düzce) depreminin bölgedeki gerilme değişimine etkisi [77] araştırılmıştır. Coulomb gerilme değişiminde [77] statik yer değiştirmeler, faylarda meydana gelen gerilme ve deformasyonları hesaplamak için kullanılır. Kayma geriliminin artması veya azalması; kaynak fayın konumu, geometrisi, eğimi ve atımı da dahil olmak üzere alıcı fayın konumu ve geometrisine bağlıdır [77]. Faylarda meydana gelen yer değiştirmeler, gerilmeler ve deformasyon, herhangi bir yüzeyde veya herhangi bir derinliğe göre hesaplanabilir. Elde edilen olan Coulomb statik gerilme değişimi, artçı şok ve fay haritaları ile uyumlu olmalıdır [48]. Bütün hesaplamalar, üniform izotrop ortamlar ile yarı sonsuz yüzey düşünülerek yapılabilmektedir. Coulomb gerilme değişimi,

$$\Delta\sigma_f = \Delta\tau - \mu'\Delta\sigma_n \quad (4)$$

formülü ile hesaplanır. Burada $\Delta\tau$; hedeflenen fay düzlemindeki kesme gerilmesindeki değişim, $\Delta\sigma_n$ hedef fay düzlemine dik yöndeki normal gerilmedeki değişim, μ' ise etkin sürtünme katsayısıdır. Laboratuvar deneylerinden μ' sürtünme katsayısının 0 ile 0.8 arasında değiştiği bilinmektedir [77].

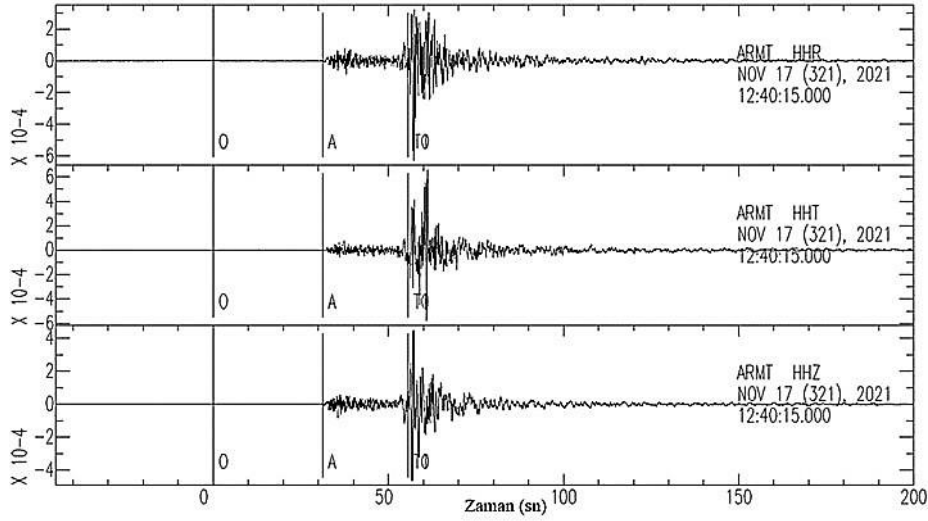
IV. VERİLER ve BULGULAR

Merkez (Düzce)'de meydana gelen deprem ($M_w5.0$) ve bu depremin iki artçı şokunun ($M_w4.3$ ve $M_w3.9$) odak mekanizma çözümleri, Herrmann (2013) [74] tarafından geliştirilen MT yöntemi ile hesaplanmıştır. Çözüm için, 400 km yarıçaplı alandaki Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü [78] tarafından sağlanan yüksek kazançlı (HH) sismometreler ile kaydedilen üç bileşenli dalga formu verileri kullanılmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Merkez (Düzce) depremi (M_w5) dalga formu ters çözümü için kullanılan istasyonlar.

KOERI [78] tarafından sağlanan yüksek-kazanç (HH) ve geniş-bant (BH) üç bileşenli deprem kayıtlarına alet düzeltmesi yapılmış, rotasyona tabii tutularak, R (radial=ışınsal) ve T (transverse=teğetsel) bileşenleri elde edilmiştir. Burada Z bileşeni ise düşey bileşendir. Şekil 4'te buna ilişkin KOERI-ARMT örneği verilmiştir.



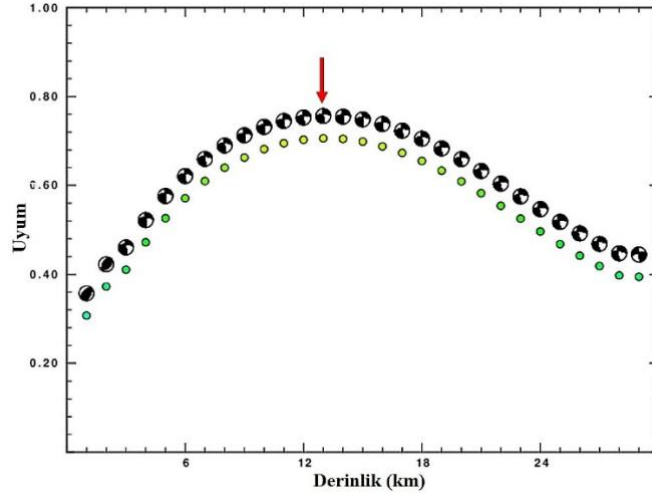
Şekil 4. Bölgesel moment tensor ters çözümü için kullanılan KOERI-ARMT istasyonu dalga formu verisi R-T-Z bileşeni (0'daki düşey çizgi depremin başlangıç zamanını, A'daki düşey çizgi P dalgasının; T0'daki ise S dalgasının varış zamanlarını gösterir).

Yüzey dalgalarına daha iyi odaklanabilmek için verilerin örnekleme aralığı 0.025 sn'ye çıkarılmıştır. Verilerin kalite kontrolü yapılarak gürültülü sinyaller ayıklanmış ve kalan sinyaller ters çözüm işlemine tabii tutulmuştur.

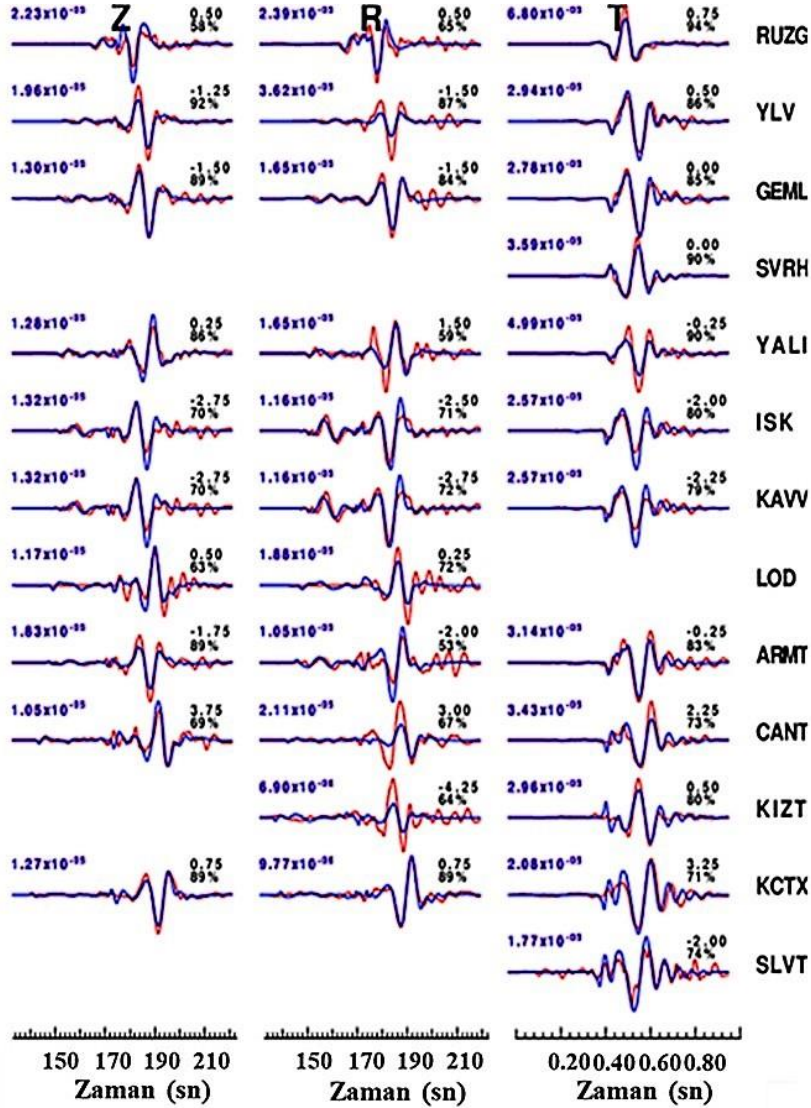
Herrmann (2013) [74] tarafından geliştirilen MT yönteminde, çalışılan depremlerin büyüklüklerinin $M_w \leq 5.0$ olması nedeniyle 0.02–0.10 Hz frekans bandında band geçişli filtre kullanılmıştır [74]. Sentetik Green fonksiyonları elde edebilmek için 1-Boyutlu hız modeli kullanılmıştır [79] (Tablo 1). Sentetik Green fonksiyonlar, hız modeli, kaynak lokasyonu ve alıcı pozisyonuna bağlı olarak 1 ila 29 km arasındaki derinliklerde (1 km'lik artışlarla) hesaplanmıştır. Her bir kaynak derinliği ile ilişkili en uyumlu mekanizma, kaynak derinliğinin fonksiyonu olarak grid arama (ters çözüm) yöntemiyle [74] hesaplanmıştır. Merkez (Düzce) depremi ($M_w 5$) için en iyi uyumun 13 km derinlikte olduğu görülmüştür (Şekil 5). En iyi çözüm için tahmin edilen ve filtrelenmiş gözlemlenen dalga formları Şekil 6'da verilmiş ve 13 km derinlikteki doğrultu, eğim ve atım değerleri grid arama yöntemindeki en iyi çözüm olarak kabul edilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan Hız Modeli [79].

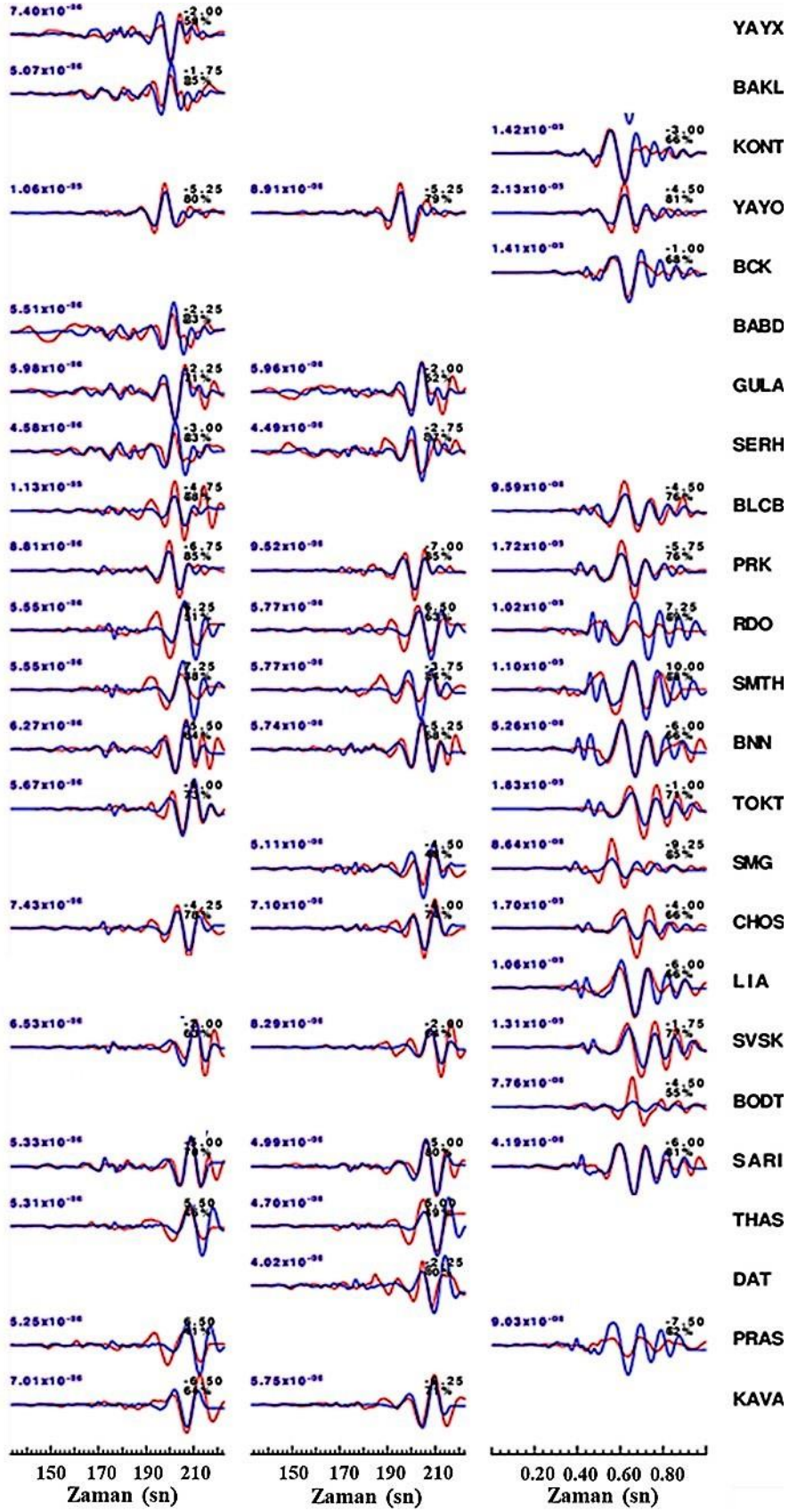
V_p (m/sn)	V_s (m/sn)	Derinlik (km)
3.55	1.99	0.0
3.57	2.01	0.5
3.70	2.08	1.0
5.35	3.01	2.0
5.67	3.19	3.0
5.90	3.31	5.0
6.02	3.38	7.0
6.07	3.41	10
6.10	3.43	14
6.18	3.47	18
6.67	3.75	30
8.00	4.49	50



Şekil 5. 17 Kasım 2021 Merkez (Düzce) depremi ($M_w 5.0$) dalgı formu mekanizmaları için derinlik-uyum grafiği (Kırmızı ok, en iyi uyumu veren derinliği göstermektedir).



Şekil 6. (Devamı arka sayfada)



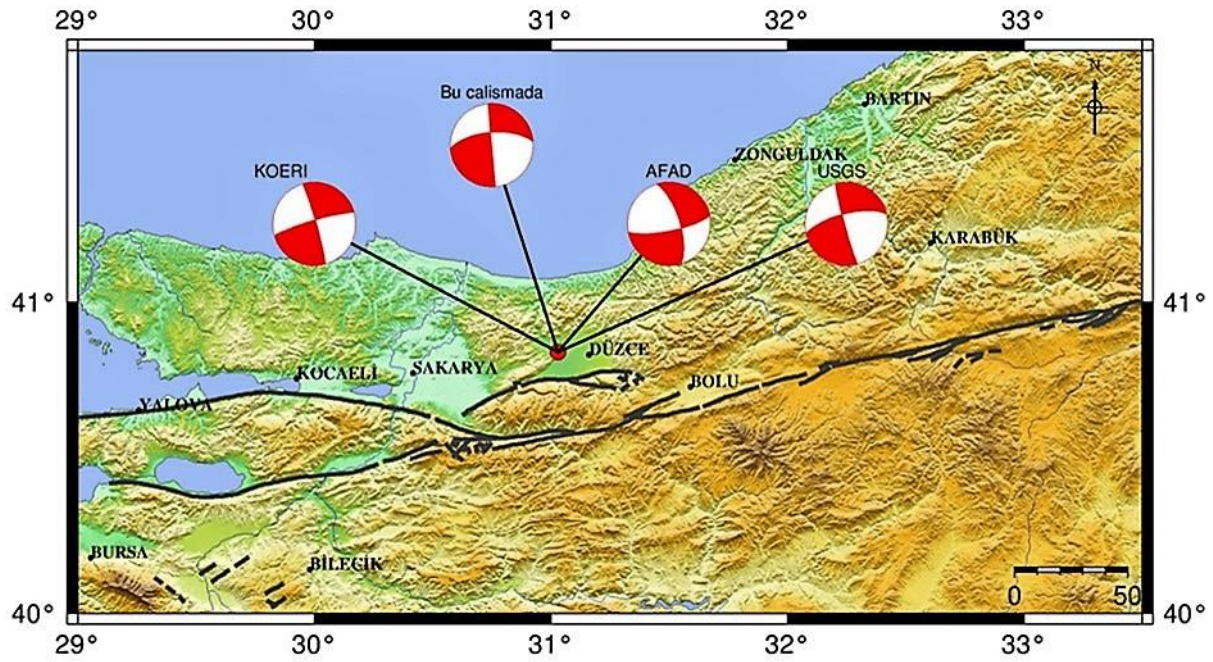
Şekil 6. Merkez (Düzce) depremi ($M_w 5.0$) için seçilen derinlikteki (13 km) dalga formu karşılaştırmaları (Kırmızı: gözlemlenmiş; mavi: hesaplanmış dalga formu; soldaki sayılar, pik genlikleri; sağ üstteki sayılar, gözlemlenen ve tahmin edilen izler arasındaki maksimum korelasyon için gereken zaman kaymasını; sağ alttaki sayılar, uyumu karakterize eden varyans azaltma yüzdesini gösterir. Sağdaki harfler ise istasyon isimleridir).

Merkez (Düzce) depreminin (Mw5.0) bu çalışma kapsamında elde edilen moment büyüklüğü, moment ve kaynak parametreleri, diğer deprem veri merkezleri tarafından yapılmış çözümler karşılaştırılmıştır (Tablo 2, Şekil 7).

Tablo 2. Merkez (Düzce) depremi için bu çalışmada ve diğer veri merkezleri tarafından hesaplanan ve I. ve II. düğüm düzlemleri doğrultu, eğim ve atım, Mw ve moment değerleri (Der.:Derinlik, D:Doğrultu, E:Eğim, A:Atım; 1 ve 2: I. ve II. Düğüm Düzlemlerini temsil eder).

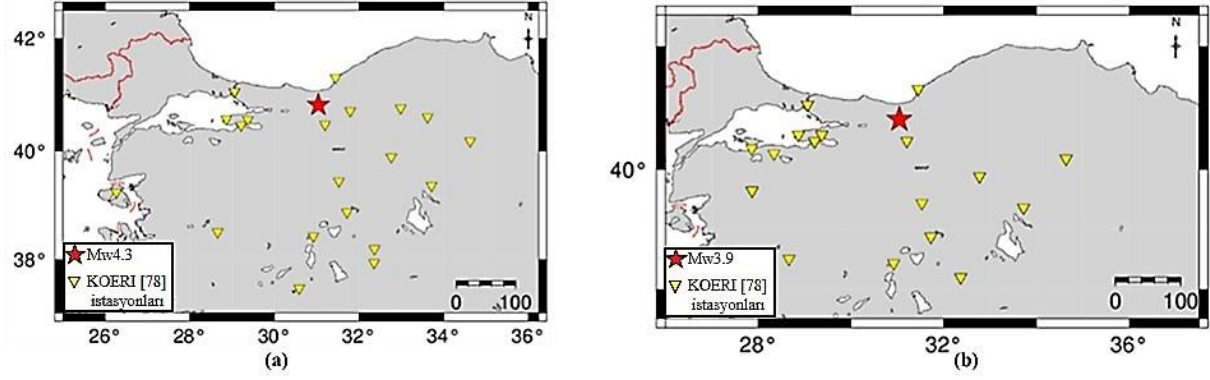
MT Çözümleri	Enlem	Boylam	Mw	Der.	D1	E1	A1	D2	E2	A2	Moment
	(°)	(°)		(km)							($\times 10^{23}$ N-m)
<i>Bu çalışmada</i>	40.8413	31.0310	4.80	13.00	265	65	-180	175	90	-25	1.680
<i>KOERI¹</i>	40.8363	31.0225	4.90	18.00	253	82	176	344	86	7	3.150
<i>AFAD²</i>	40.8440	31.0316	5.00	18.29	343	69	-15	82	78	-163	4.308
<i>USGS³</i>	40.8640	30.9950	4.80	11.00	256	70	-176	164	86	-20	2.301

(¹Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü; ²Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı; ³Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumu).



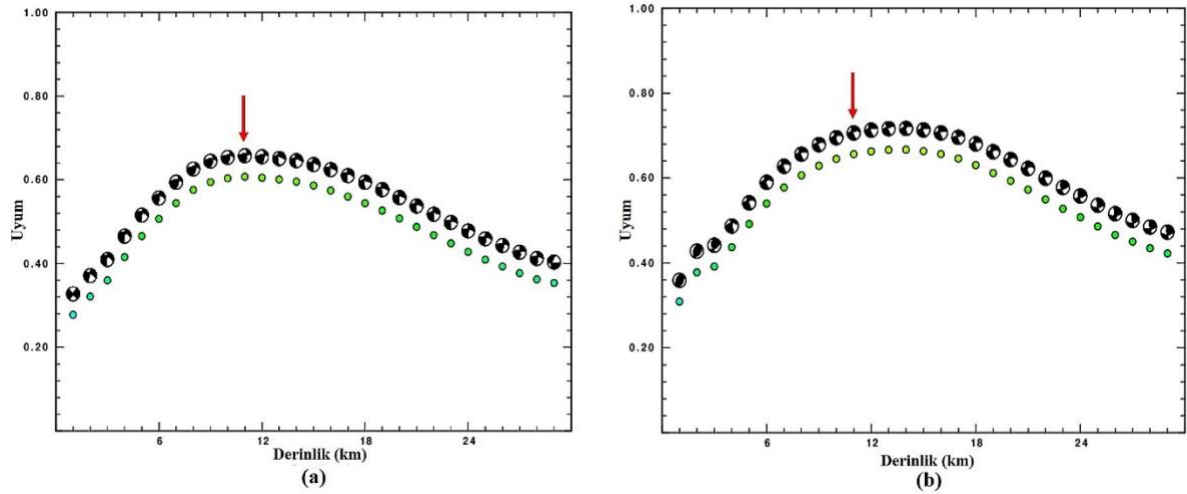
Şekil 7. Merkez (Düzce) depremi (Mw5.0) için bu çalışmada elde edilen ve diğer deprem veri merkezleri tarafından elde edilmiş odak mekanizması çözümleri.

Merkez (Düzce) depremi sonrasında YS ile 15.57'de Mw4.3 ve YS ile 21.35'te Mw3.9 büyüklüklerinde iki artçı şok meydana gelmiştir. Bu çalışmada, MT yöntemi ile [74] bu iki artçı şokun da odak mekanizma çözümleri yapılmıştır. Çalışmada, 300 km yarıçaplı alandaki KOERI istasyonlarından sağlanan veriler kullanılmıştır (Şekil 8).

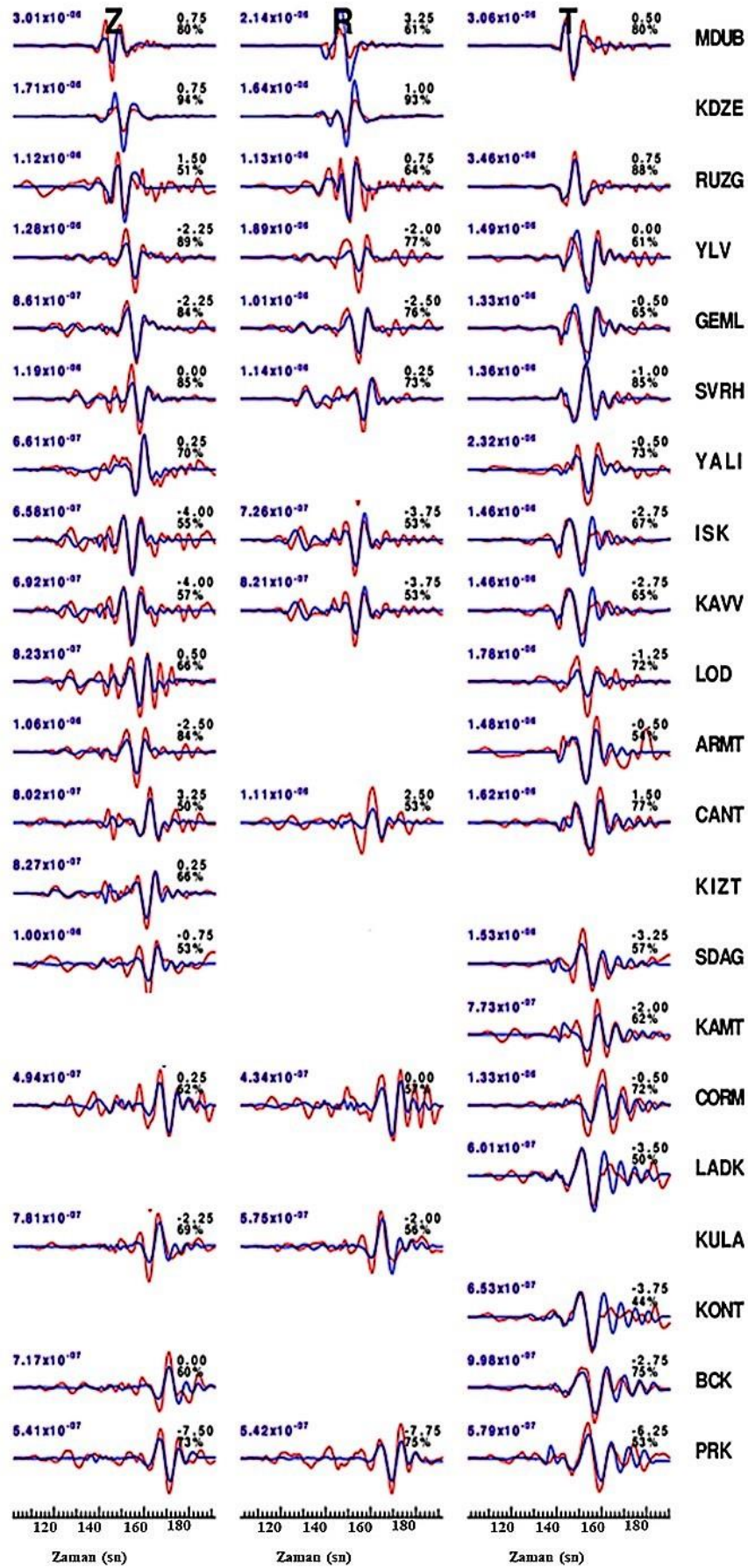


Şekil 8. Merkez (Düzce) depremi (a) Mw4.3 (b) Mw3.9 artçı şok dalga formu ters çözümü için kullanılan istasyonlar

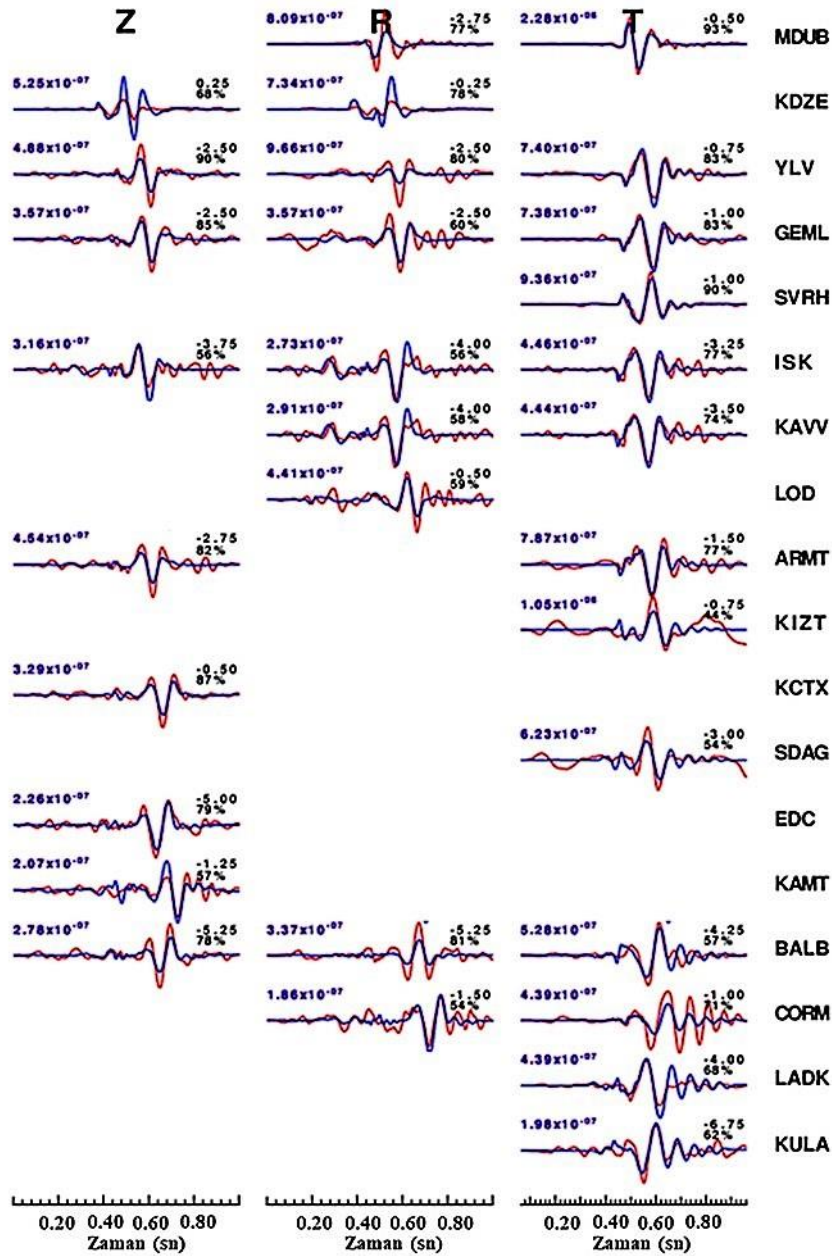
Ana şokta yapılan adımlar izlenerek, her iki artçı şok için 11 km derinlikteki kaynak parametreleri en iyi çözüm olarak bulunmuştur. Derinlik-uyum grafikleri Şekil 9'da, en iyi çözüm için tahmin edilen ve filtrelenmiş gözlemlenen dalga formları, Şekil 10'da verilmiştir. Merkez (Düzce) depremi ve iki artçı şok için en iyi uyum gösteren derinlikteki doğrultu, eğim ve atım değerleri Tablo 3 ve Şekil 11 (a)'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Merkez (Düzce) depreminin (a) Mw4.3 ve (b) Mw3.9 artçı şokları moment tensör ters çözüm Derinlik-Uyum grafiği (Kırmızı ok, en iyi uyumu veren derinliği göstermektedir).



(a)



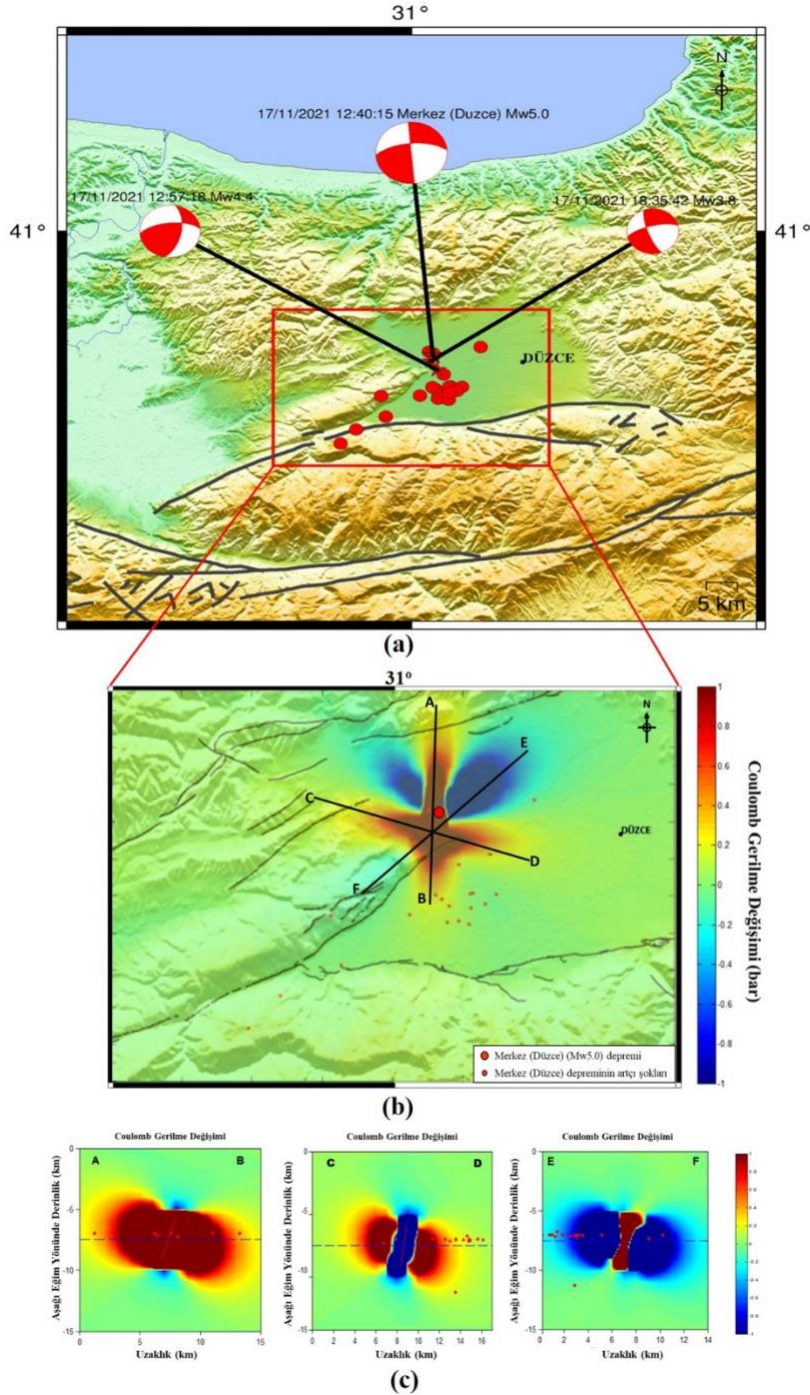
(b)

Şekil 10. Merkez (Düzce) depreminin (a) Mw4.3 ve (b) Mw3.9 artçı şokları için seçilen derinlikteki (11 km) dalga formu karşılaştırmaları (Kırmızı: gözlemsel; mavi: hesaplanmış dalga formunu; soldaki sayılar, pik genlikleri; sağ üstteki sayılar, gözlemlenen ve tahmin edilen izler arasındaki maksimum korelasyon için gereken zaman kaymasını; sağ alttaki sayılar, uyumu karakterize eden varyans azaltma yüzdesini ifade eder. Sağdaki harfler ise istasyon isimleridir).

Tablo 3. 17 Kasım 2021 Merkez (Düzce) depremi ve artçı şokları için bu çalışmada hesaplanan I. ve II. düğüm düzlemleri doğrultu, eğim ve kayma değerleri, Mw ve momentleri (Der.:Derinlik, D:Doğrultu, E:Eğim, A:Atım; 1 ve 2: I. ve II. Düğüm Düzlemlerini temsil eder).

Tarih (yıl/ay/gün)	Zaman (s:dk:sn)	Enlem (o)	Boylam (o)	Mw	Der. (km)	D1	E1	A1	D2	E2	A2	Moment ($\times 10^{21}$ dyne-cm)
17/11/2021	15:40:15	40.8413	31.0310	4.8	13	265	65	-180	175	90	-25	16.80
17/11/2021	15:57:18	40.8228	31.0375	3.9	5.4	264	64	146	10	60	30	08.61
17/11/2021	21:35:42	40.8338	31.0282	3.7	2.6	255	71	-164	160	75	-20	04.62

Merkez (Düzce) depreminin bölgedeki gerilme rejimini nasıl etkilediğini araştırmak için; Coulomb 3.3 paket programı [77] kullanılmıştır. Coulomb gerilme değişimi için μ' değeri 0.4 olarak kabul edilmiştir [80-81]. Coulomb gerilme değişim haritası Şekil 11 (b)'de verilmiştir. Coulomb gerilme değişim haritasında AB, CD ve EF yönlerinde 30 km derinlikteki gerilme değişimlerini incelemek için kesitler alınmıştır (Şekil 11 (b)). Alınan derinlik kesitlerinde yapılan incelemede, yaklaşık 15 km'den sonra gerilmede herhangi bir değişim gözlemlenmediğinden kesitler 15 km ile sınırlandırılmıştır (Şekil 11 (c)).



Şekil 11 (a) Merkez (Düzce) depremi (Mw5.0) ile Mw4.3 ve Mw3.9 artçı şokları için elde edilmiş odak mekanizması çözümleri (kırmızı daireler Merkez (Düzce) depremi (Mw5.0) ve artçı şoklarının dış merkezlerini gösterir). (b) Bölgedeki Coulomb gerilme değişimi ve alınan profiller (A-B, C-D, E-F) (c) Coulomb gerilme değişimi haritasındaki profillerden elde edilen kesitler ((i)-AB (ii)-CD, (iii)-EF profillerinin aşağı eğim yönünde derinlik-uzaklık gerilme değişim kesitleri) (Kırmızı renk gerilme artışı, mavi renk gerilme azalmasını göstermektedir).

V. TARTIŞMA ve SONUÇLAR

Bu çalışmada 17 Kasım Merkez (Düzce) depremi ile iki artçı şokun kaynak mekanizma çözümleri Herrmann (2013) tarafından geliştirilen moment tensör ters çözüm yöntemiyle (MT) [74] bulunmuştur. Buna göre, Merkez (Düzce) depremi sentetik ve gözlemsel dalga formu verileri arasındaki en iyi uyumu 13 km derinlikte vermiştir. Birinci düğüm düzleminin doğrultu, eğim ve atımı sırasıyla 265, 65 ve -180 derece; moment büyüklüğü 4.8, momenti 16.80×10^{21} dyne-cm olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada elde edilen kaynak parametreleri, diğer deprem veri merkezlerinden elde edilen fay çözümleri ile karşılaştırılmış, diğer deprem veri merkezleri tarafından elde edilen sonuçlar ile bu çalışmada elde edilen çözümlerin uyumlu olduğu görülmüştür (Tablo 2, Şekil 7). Bu çalışmada bulunan moment ve moment büyüklüğü değerleri ise USGS tarafından elde edilmiş değerler ile uyumludur (Tablo 2). KOERI ve AFAD moment büyüklük değerleri 0.1-0.2 kadar farklılık göstermektedir. Bu farklılığın, bu çalışmada daha fazla istasyon (48 istasyon) kullanılmasından dolayı (AFAD, 11 istasyon [79]; KOERI, 25 istasyon [22]) olduğu düşünülmektedir. Ana şokun, KD-GB uzanımlı doğrultu atımlı fay üzerinde meydana geldiği düşünülmektedir. Ayrıca, Merkez (Düzce) depremi (Mw5) fay çözümünün, 12 Kasım 1999 Düzce depremi ile benzer kaynak mekanizmasına sahip olduğu görülmüştür (Şekil 1).

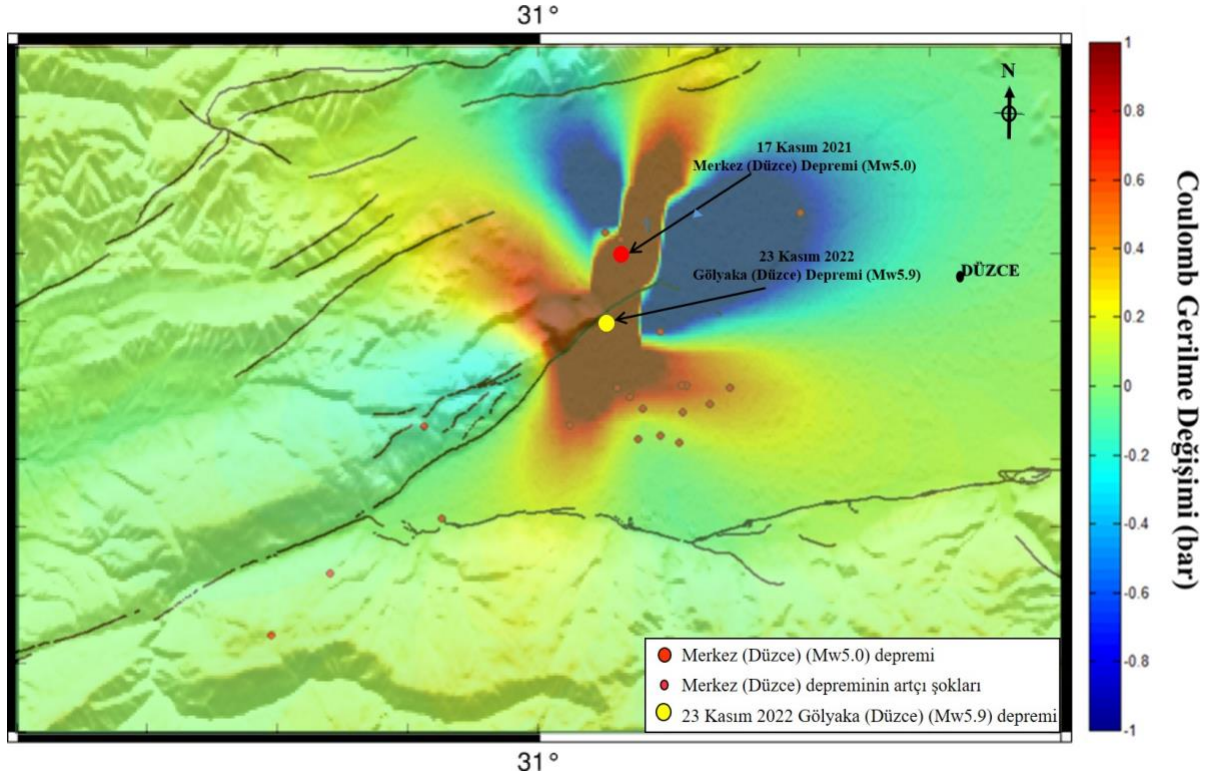
Merkez (Düzce) depreminin YS ile 17.57'de meydana gelen Mw4.3 büyüklüğündeki artçı şokunun moment tensör çözümünün 11 km derinlikte verdiği en uyumlu çözümde, birinci düğüm düzleminin doğrultu, eğim ve atımı 264, 64 ve 146 derece olarak bulunmuştur. Bu artçı şokun moment büyüklüğü 3.9, momenti ise 8.61×10^{21} dyne-cm olarak hesaplanmıştır (Tablo 3, Şekil 11(a)). Kaynak mekanizmasının doğrultu atım bileşeni olan ters faylanma olduğu bulunmuştur.

YS ile 21.35'te meydana gelen Mw3.9 büyüklüğündeki ikinci artçı şok için moment tensör çözümü 11 km derinlikte en uyumlu sonucu vermiştir. Buna göre, birinci düğüm düzlemi doğrultu, eğim ve atım değerleri 255, 71 ve 164 derece olarak bulunmuş, moment büyüklüğü 3.7, momenti 4.62×10^{21} dyne-cm olarak hesaplanmıştır (Tablo 3, Şekil 11(a)). Bu artçı şokun da faylanma mekanizmasının KD-GB uzanımlı doğrultu atımlı olduğu görülmüştür.

Coulomb 3.3 paket programı kullanılarak [77] Merkez (Düzce) depreminin bölgedeki gerilme rejimine etkisi tespit edilmiştir. Buna göre, Merkez (Düzce) depreminin (Mw5), meydana geldiği alanda K-G ve BKB-DGD yönünde baskın gerilme alanları oluşturduğu görülmüştür. Ayrıca, Coulomb gerilme haritasında yaklaşık K-G, KB-GD ve KD-GB yönlerinde 30 km derinlik için profiller alınmış (Şekil 11(b)), derinlik-gerilme değişim kesitleri elde edilmiştir (Şekil 11(c)). Gerilmenin yaklaşık 15 km derinliğe kadar etkili olduğu, 15 km'den sonra gerilmede değişim olmadığı tespit edilmiştir.

Çalışma alanındaki deprem etkinliği incelenmiş, Merkez (Düzce) depreminin meydana geldiği alanda 1999 yılından beri $M \geq 4.0$ olan depremin meydana gelmediği tespit edilmiştir (Şekil 2). Merkez (Düzce) depreminin, meydana geldiği bölgede tektonik gerilmeyi KD-GB yönünde azalttığı; K-G ve BKB-DGD yönünde yakın faylara ise 0.5-1.0 bar arasında gerilme yüklediği bulunmuştur. Dolayısıyla sismik tehlike, gerilmenin yükseldiği yönlerdeki yakın faylar üzerinde artmıştır.

23 Kasım 2022 tarihinde YS ile 04.08'de Gölyaka (Düzce) depremi (Mw5.9), bu çalışmada gerilmenin arttığına işaret edilen bölgede meydana gelmiştir (Şekil 12). Ayrıca derinlik kesitleri alınırken 30 km derinlik için inceleme yapılmış, derinlikte 15 km'den sonra değişim gözlenmemiş, özellikle 5 ile 10 km'ler arasındaki derinlikte gerilmenin yüksek olduğu görülmüştür (Şekil 11(c), (i)-(ii)). 23 Kasım 2022 Gölyaka (Düzce) depremi (Mw5.9) 6.81 km derinlikte meydana gelmiştir [83].



Şekil 12. Çalışma alanındaki Coulomb gerilme değişimi (Kırmızı renk gerilme artışı; mavi renk gerilme azalmasını işaret etmektedir).

TEŞEKKÜR: Bu makalenin gelişmesinde görüşleri ile katkıda bulunan hakemlere ve Dr. Recep ÇAKIR'a teşekkür ederim.

VI. KAYNAKLAR

- [1] D.P. McKenzie, "Active tectonics of the Mediterranean region", *Geophysical Journal Royal Astronomical Society*, 30, 109-185, 1972.
- [2] Ö. Alptekin, "Focal Mechanisms of Earthquakes in Western Turkey and Their Tectonic Implications" Ph.D. thesis, New Mexico Institute of Mining and Teach., Socorro, New Mexico, USA, 1973.
- [3] , A.M.C. Şengör, "The North Anatolian Transform Fault: its age, offset and tectonic significance", *Journal of Geol. Soc. London*, 136:269–82, 1979.
- [4] A.M.C. Şengör, N. Görür, F. Şaroğlu, "Strike slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study. In Strike-slip Deformation, Basin Formation, and Sedimentation", *Soc. Econ. Paleontol. Miner. Spec. Publ. 37* (in honor of J.C. Crowell), ed. KT Biddle, N Christie-Blick, pp. 227–64, 1985.
- [5] R.E. Reilinger, S.C. McClusky, M.B. Oral, R.W. King, M.N. Toksöz, "Global Positioning System measurements of present-day crustal movements in the Arabia-Africa- Eurasia plate collision zone", *J. Geophys. Res.*, 102:9983–99, 1997.
- [6] S. McClusky, S. Balassanian, A. Barka, C. Demir, S. Ergintav, I. Georgiev, O. Gurkan, M. Hamburger, K. Hurst, H. Kahle, K. Kastens, G. Kekelidze, R. King, V. Kotzev, O. Lenk, S. Mahmoud,

A. Mishin, M. Nadariya, A. Ouzounis, D. Paradissis, Y. Peter, M. Prilepin, R. Reilinger, I. Sanli, H. Seeger, H., A. Tealeb, M.N. Toksöz, G. Veis, “GPS constraints on plate kinematics and dynamics in the Eastern Mediterranean and Caucasus”, *J. Geophys. Res.*, 105, 5695-5719, 2000.

[7] L. Gülen, A. Pınar, D. Kalafat, N. Özel, G. Horasan, M. Yılmaz, A.M. Işıkara, “Surface Fault Breaks, Aftershock Distribution, and Rupture Process of the August 17, 1999 Izmit, Turkey Earthquake”, *Bulletin of the Society of America*, 92, 230-244, 2002.

[8] A. Allen, J. Jackson, R. Walker, “Late Cenozoic reorganization of the Arabia-Eurasia collision and the comparison of short-term and long-term deformation rates”, *Tectonics*, 23, TC2008, doi:10.1029/2003TC001530, 2004.

[9] R. Reilinger, S. McClusky, P. Vernant, S. Lawrence, S. Ergintav, R. Çakmak, M. Nadariya, “GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B5), 2006.

[10] H. Yalçın, L. Gülen, Z. Çağnan, D. Kalafat, “Kıbrıs ve Yakın Çevresinin Depremselliği”, 65. Jeoloji Kurultayı, Bildiri Özetleri Kitabı, s 4-5. Ankara, 2012.

[11] A. Barka, “Slip distribution along the North Anatolian Fault associated with large earthquakes of the period 1939 to 1967”, *Bull. Seis. Soc. Amer.*, 86, 1238-1254, 1996.

[12] A. Barka, and K. Kadinsky-Cade, “Strikeslip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity”, *Tectonics*, 7, 663-684, 1988.

[13] A. Barka, H.S. Akyüz, E. Altunel, G. Sunal, Z. Çakır, “The surface rupture and slip distribution of the 17 August 1999 İzmit earthquake (M 7.4), North Anatolian Fault”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92:43–60, 2002.

[14] R.M. Langridge, H.D. Stenner, T.E. Fumal, S.A. Christofferson, T.K. Rockwell, R.D Hartleb, J. Bachhuber, & A.A. Barka, “Geometry, slip distribution, and kinematics of surface rupture on the Sakarya Fault segment during the 17 August 1999 İzmit, Turkey, earthquake”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92, 107–125, 2002.

[15] R.D. Hartleb, J.F. Dolan, H.S. Akyüz, T. E. Dawson, A.Z. Tucker, B. Yerli, T.K. Rockwell, E. Toraman, E., Z. Çakır, Z., A. Dikbaş, A., and E. Altunel, “Surface rupture and slip distribution along the Karadere segment of the 12 November 1999 Düzce, Turkey, earthquakes”, *Bulletin of Seismological Society of America*, 92, 67-78, 2002.

[16] W.R. Lettis, J. Bachhuber, R.C. Witter, C. Brankman, E. Randolph, A.A. Barka, W.D. Page, A. Kaya, “Influence of releasing step-overs on surface fault rupture and fault segmentation: examples from the 17 August 1999 İzmit earthquake on the North Anatolian fault, Turkey,” *Bulletin of Seismological Society of America*, 92, 19–42, 2002.

[17] E. Herece, E. Akay, “Atlas of North Anatolian Fault (NAF). Ankara, Turkey: General Directorate of Mineral Research and Exploration”, *Special Publication Series-2*, 61: 13, 2003.

[18] R. Bürgmann, M.E. Ayhan, E.J. Fielding, T.J. Wright, S. McClusky, B. Aktuğ, C. Demir, O. Lenk, A. Türkezer, “Deformation during the 12 November 1999 Düzce, Turkey, earthquake, from GPS and InSAR data” *Bulletin of Seismological Society of America*, 92, 161–171, 2002.

[19] Ö. Emre, T.Y. Duman, Y. Awata, T. Yoshioka, A. Doğan, “17 Ağustos 1999 Doğu Marmara depremi yüzey kırığı: Eş zamanlı üçlü faylanma örneği” *ATAG-3, Bildiri Özleri Kitabı*, s. 4, 1999.

- [20] T. Komut, Y. Ikeda, “17/08/1999 Kocaeli depremi yüzey kırığının arazi incelemesi”. ATAG-3, Bildiri Özleri Kitabı, sayfa 11, Sivas, 1999.
- [21] Ö. Emre, T.Y. Duman, S. Özalp, H. Elmacı, Ş. Olgun, F. Şaroğlu, “1/1.250.000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası”, *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Özel Yayınlar Serisi*, Ankara, Türkiye, 2013.
- [22] B.Ü. Kandilli Rasathanesi ve DAE. Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi, 17 Kasım 2021 Yayakbaşı-Düzce Depremi, Basın Bülteni, 2021.
- [23] F.F. Pollitz, “Postseismic relaxation theory on the spherical earth”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82, 422–453, 1992.
- [24] F.F. Pollitz, “Gravitational viscoelastic postseismic relaxation on a layered spherical Earth”, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B8), 17921-17941, 1997.
- [25] M. Utkucu, F. Uzunca, E. Doğan, Sakarya Üniversitesi Afet Yönetim Uygulama ve Araştırma Merkezi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 17 Kasım 2021 Yayakbaşı (Düzce) Depremi Ön Değerlendirme Raporu, Rapor No: 2021-1, Kasım 2021.
- [26] J. L. Hardebeck, and P. M. Shearer, “Using S/P amplitude ratios to constrain the focal mechanisms of small earthquakes”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93, 2434-2444, 2003.
- [27] H. Kanamori, and J. W. Given, “Use of long-period surface waves for rapid determination of earthquake source parameters: 2. Preliminary determination of source mechanisms of large earthquakes ($M_s > 6.5$) in 1980”, *Physics Earth Planetary Interiors*, 30, 260-268, 1982.
- [28] A. M. Dziewonski, and J. H. Woodhouse, “An experiment in systematic study of global seismicity: centroid-moment tensor solutions for 201 moderate and large earthquakes of 1981”, *Journal of Geophysical Research*, 88, 3247-3271, 1983.
- [29] A. M., Dziewonski, A. Friedman, D. Giardini, and J. H. Woodhouse, “Global seismicity of 1982: centroid-moment tensor solutions for 308 earthquakes”, *Physics Earth Planetary Interiors*, 33, 76- 90, 1983.
- [30] A. M. Dziewonski, J. E. Franzen, and J. H. Woodhouse, “Centroid-moment tensor solutions for July-September 1983”, *Physics Earth Planetary Interiors*, 34, 1-8, 1984.
- [31] D. Giardini, “Systematic analysis of deep seismicity: 200 centroid-moment tensor solutions for earthquakes between 1977 and 1980”, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 77, 883-914, 1984.
- [32] G. Ekström, and A. M. Dziewonski, “Centroid moment tensor solutions for 35 earthquakes in Western North America (1977-1983)”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75, 23-39, 1985.
- [33] A. M. Dziewonski, G. Ekström, J. E. Franzen, and J. H. Woodhouse, “Global seismicity of 1979: centroid-moment tensor solutions for 524 earthquakes”, *Physics Earth Planetary Interiors*, 48, 18-46, 1987.
- [34] G. Ekström, A. M. Dziewonski, and J. H. Woodhouse, “Centroid-moment tensor solutions for the 51 IASPEI selected earthquakes, 1980-1984”, *Physics Earth Planetary Interiors*, 47, 62- 66, 1987.
- [35] R.S. Stein, A.A. Barka A.A., and J.H. Dieterich, “Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering”, *Geophysical Journal International*, 128, 594-604, 1997.

- [36] G. C. P. King, R. S. Stein, and J. Lin, “Static stress changes and the triggering of earthquakes”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84, 935–953, 1994.
- [37] G. C. P. King, A. Hubert-Ferrari, S. S. Nalbant, B. Meyer, R. Armijo, and D. Bowman, “Coulomb stress interactions and the 17 August 1999, Izmit, Turkey earthquake”, *Comptes Rendus de l’Académie des Sciences*, 333, 557–570, 2001.
- [38] A. Hubert, G.C.P. King, A. Armijo, B. Meyer and D. Papanastassiou, “Fault re-activation, stress interaction and rupture propagation of the 1981 Corinth earthquake sequence”, *Earth Planetary Science Letter*, 142, 573-585, 1996.
- [39] S. S. Nalbant, A. Hubert, and G. C. P. King, “Stress coupling between earthquakes in northwest Turkey and the north Aegean Sea”, *Journal of Geophysical Research*, 103, 24,469–24,486, 1998.
- [40] A. Hubert-Ferrari, A.A. Barka, E. Jacques, S.S. Nalbant, B. Meyer, R. Armijo, P. Topponnier, and G.C.P. King, “Seismic hazard in the Marmara Sea region following the 17 August 1999 İzmit earthquake”, *Nature*, 404, 269-273, 2000.
- [41] G.C.P. King and M. Cocco, “Fault interaction by elastic stress changes: new clues from earthquake sequences”, *Advances in Geophysics*, 44, 1–38, 2000.
- [42] I S. Das and C. Scholz, “Theory of Time-Dependent Rupture in the Earth”, *Journal of Geophysical Research*, 86, 6039-6051, 1981.
- [43] R. Stein, and M. Liwoski, “The 1979 Homestead Valley earthquake sequence, California: control of aftershocks and postseismic deformation”, *Journal of Geophysical Research*, 88, 6477-6490, 1983.
- [44] R.S. Stein, “The role of stress transfer in earthquake occurrence”, *Nature*, Vol. 402, 605–609, 1999.
- [45] M. Utkucu, A. Pınar, Ö. Alptekin, “Uzak alan P dalga Şekillerinin Sonlu Fay Ters Çözümünden 22 Mayıs 1971 Bingöl Depremi Kırılma Sürecinin İncelenmesi”, *Yerbilimleri*, 28, 65-79, 2003.
- [46] S. Toda, R. Stein, “Toggling of Seismicity by the 1997 Kagoshima Earthquake Couplet: A Demonstration of Time-Dependent Stress Transfer”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, No. B12, 2567, 2003.
- [47] T. Parsons, “Recalculated probability of $M \geq 7$ earthquakes beneath the Sea of Marmara, Turkey”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 109, B05304, 2004.
- [48] S. Toda, R.S. Stein, K.R. Dinger, and S.B. Bozkurt, “Forecasting the Evolution of Seismicity in Southern California: Animations Built on Earthquake Stress Transfer”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 110, B05S16, 2005.
- [49] İ. Seymen, “Kelkit Vadisi Kesiminde Kuzey Anadolu Fay Zonunun Tektonik Özelliği: Dr. Eng.”, *İstanbul Tek. Univ., Maden Fak.*, XIX+192 pp.+2 foldout maps, 1975.
- [50] Y. Tatar, “Kuzey Anadolu Fay Zonu’nun Erzincan-Refahiye arasındaki bölümü üzerinde tektonik incelemeler”, *Yerbilimleri Dergisi*, 5(3/4), 201-236, 1978.
- [51] A.A. Barka, “Seismo-tectonic aspects of the North Anatolian fault zone”, Ph.D. thesis, University of Bristol, England, 335 pp, 1981.
- [52] A.A. Barka, “The North Anatolian Fault zone”, *Annales Tectonicae*, 6:164–95, 1992.
- [53] A.A. Barka, P.L. Hancock, “Neotectonic deformation patterns in the convex-northwards arc of the North Anatolian fault zone”. *Geological Society, London*, Special Publications, 17(1), 763- 774, 1984.

- [54] F. Şaroğlu, “Doğu Anadolu’nun Neotektonik Dönemde Jeolojik ve Yapısal Evrimi”, Ph.D thesis. İstanbul Univ., Fen Bilim. Enst., İstanbul. 240 pp.+7 foldouts, 1985.
- [55] F. Şaroğlu, “Age and offset of the North Anatolian Fault”, *METU J. Appl. Sci.* 21:65-79, 1988.
- [56] A. Koçyiğit, “Basic geological characteristics and total offset of the North Anatolian Fault zone in Suşehri area, NE Turkey”. *METU Pure and Applied Sciences*, 22, 43-68, 1988.
- [57] A. Koçyiğit, “Suşehri Basin: An Active Faultwedge Basin on the North Anatolian Fault Zone, Turkey”, *Tectonophysics*, 167, 11–29, 1989.
- [58] A. Koçyiğit, “Tectonic setting of the Gölova basin: total offset of the North Anatolian Fault Zone, E. Pontide, Turkey”. *Ann. Tectonicae*, 4, 155-170, 1990.
- [59] V. Toprak, “Neotectonic characteristics of the North Anatolian Fault Zone between Koyulhisar and Suşehri (NE Turkey)” *METU J. Pure Ap. Sci.*, 21:155-66, 1988.
- [60] C. Yalıtırak, “Ganos Fay Sistemi’nin tektonik tarihi”. *Türk. Petrol Jeol. Derneği, Bül.* 8:137–56, 1996.
- [61] J.D.A. Piper, O. Tatar, H. Gürsoy, “Deformational behaviour of continental lithosphere deduced from block rotations across the North Anatolian Fault Zone in Turkey.” *Earth Planet. Sci. Lett.* 150:191–203, 1997.
- [62] O. Tüysüz, E. Yiğitbaş, T. Genç, U. Tari, “Batı Karadeniz Bölgesinin Tektonik Birliklerinin Ayırıcı ve 1: 500.000 Ölçekli Jeoloji Haritasının Hazırlanması [Tectonic Units of Western Black Sea Region and Their Geological Mapping at 1: 500.000 Scale]”, TÜBİTAK Project Report YDABÇAG-17, 1998.
- [63] R. Armijo, B. Meyer, A. Hubert-Ferrari, A.A. Barka, “Westward propagation of North Anatolian Fault into the Northern Aegean: timing and kinematics”. *Geology*, 27:267–70, 1999.
- [64] A.A. Barka, H.S. Akyüz, H.A. Cohen, F. Watchorn, “Tectonic evolution of the Niksar and Taşova-Erbaa pull-apart basins, North Anatolian Fault Zone: their significance for the motion of the Anatolian Block”. *Tectonophysics*, 322:243–64, 2000.
- [65] R. Westaway, “Present-day kinematics of the Middle East and eastern Mediterranean”. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B6), 12071-12090, 1994.
- [66] Y. Tatar, “Düzce İl Gelişme Planı. Çevre ve Mekansal Gelişme Sektörü Raporu, Düzce”, 103 s, 2003.
- [67] F. Şaroğlu, Ö. Emre, A. Boray, “Türkiye’nin Diri Fayları ve Depremsellikleri” MTA Genel Müdürlüğü, Rapor No: 8174, Ankara, 394s (yayımlanmamış), 1987.
- [68] F. Şaroğlu, Ö. Emre, İ. Kuşçu, Türkiye Diri Fay Haritası. MTA Genel Müdürlüğü, Ankara, 1992.
- [69] E. Alsan, L. Tezuçan, and M. Bath, “An earthquake catalogue for Turkey for the interval 1913-1970”, Kandilli Observatory Seismological Department Çengelköy-İstanbul, Turkey and Seismological Institute Box, 517, S-751 20 Uppsala, Sweden. 1975.
- [70] E. Ayhan, E. Alsan, N. Sancaklı, S.B. Üçer, “Türkiye ve Dolayları Deprem Kataloğu 1881- 1980”, Boğaziçi Üniversitesi Yayınları, 1980.
- [71] N.N. Ambraseys, C.F. Finkel, “Long-term seismicity of İstanbul and of the Marmara Sea region”. *Terra Nova* 3, 527–539, 1991.




- [72] N.N. Ambraseys, C.F. Finkel, “The seismicity of Turkey and Adjacent Areas, a Historical Review”, 1500- 1800, Eren yayıncılık, İstanbul, 1995.
- [73] United States Geological Survey web page, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> Erişim Tarihi: 22.11.2021.
- [74] R.B. Herrmann, “Computer programs in seismology: An evolving tool for instruction and research”, *Seismological Research. Letters.*, 84, 1081-1088, doi:10.1785/0220110096, 2013.
- [75] T. Lay, T. C. Wallace, *Modern Global Seismology*, Academic Press, San Diego, 521pp, 1995
- [76] C.A. Langston, “Source inversion of seismic waveforms: the Koyna, India, earthquakes of September 13, 1967”. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71:1-24, 1981.
- [77] S. Toda, R.S. Stein, V. Sevilgen, and J. Lin, Coulomb 3.3 Graphic-rich deformation and stress-change software for earthquake, tectonic, and volcano research and teaching—user guide: U.S. Geological Survey Open-File Report 2011-1060, 63 p., available at <http://pubs.usgs.gov/of/2011/1060/>, 2011.
- [78] Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/earthquake-catalog/>
- [79] İzmit Rapor AFAD Deprem Dairesi Başkanlığı. [Çevrimiçi]. Erişim Adresi: <https://deprem.afad.gov.tr/depremdetay?eventID=246572>. Erişim Tarihi: 22.11.2021.
- [80] Y. Li, L. Huang, R. Ding, S. Yang, L. Liu, S. Zhang and H. Liu, “Coulomb stress changes associated with the M7.3 Maduo earthquake and implications for seismic hazards”, *Natural Hazards Research 1*, 95-101, 2021.
- [81] Z. Çakır, A.A. Barka, S. Akyüz, “Coulomb gerilme etkileşimleri ve 1999 Marmara depremleri”, *itiüdergisi/d mühendislik*, Cilt:2, Sayı:4, 99-111, 2003.
- [82] 17 Kasım 2021 Merkez (Düzce) Mw5.0 Depremine İlişkin Ön Değerlendirme Raporu, AFAD İzmir rapor AFAD Deprem Dairesi Başkanlığı. <https://deprem.afad.gov.tr/event-detail/10003>, Erişim tarihi: 18 Kasım 2021.
- [83] 23 Kasım 2022 Gölyaka (Düzce) Mw5.9 Depremine İlişkin Ön Değerlendirme Raporu, AFAD Deprem Dairesi Başkanlığı. <https://deprem.afad.gov.tr/event-detail/401390>, Erişim tarihi: 23 Kasım 2023.
- [84] AFAD, T.C. İçişleri Bakanlığı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, <https://deprem.afad.gov.tr/event-catalog>



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Karşıt Akışlı Ranque– Hilsch Vorteks Tüpünün Makine Öğrenmesi Metotları ile Performans Analizi

 Murat KORKMAZ^{a,*},  Ayhan DOĞAN^a,  Volkan KIRMACI^b

^aBaşkent OSB Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, TÜRKİYE
Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık-Tasarım Fakültesi, Bartın Üniversitesi, Bartın, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: mkorkmaz@hacettepe.edu.tr

DOI: <https://doi.org/10.29130/dubited.1267774>

ÖZ

Bu çalışmada, basınçlı oksijen gazı kullanarak aynı anda hem soğutma hem de ısıtma yapabilen ve kontrol vanası dışında hareketli parçası bulunmayan basit borudan meydana gelen Karşıt Akışlı Ranque-Hilsch Vorteks Tüp (KARHVT) kullanılmıştır. KARHVT'nün tasarımında boru 7 mm iç çapında ve 100 mm gövde uzunluğunda imal edilmiştir. Aynı zamanda, nozul olarak pirinç, çelik, alüminyum ve polyamid malzemelerden üretilen 2, 3, 4, 5 ve 6 orfisler kullanılmıştır. Yapılan deneylerde sıcak akışkan tarafında bulunan kontrol vanası tam açık konumda bırakılmış olup, giriş basıncı ilk 150 kPa olarak ayarlanmıştır. Daha sonra 50 kPa aralıklarla 700 kPa kadar veriler alınmıştır. KARHVT'de çıkan soğuk akışın sıcaklığı ($T_{soğ}$) ve çıkan sıcak akış sıcaklığı (T_{sic}) ile arasındaki fark (ΔT) cinsinden bulunarak sistemin performans optimizasyonu yapılmıştır. Sistemin performansının optimizasyonunu, makine öğrenimi metotlarından Lineer Regresyon (LR), Regresyon Ağaçları (RA), Ağaç Toplulukları (AT) ve Destek Vektör Makineleri (DVM) yöntemleri kullanılarak literatürdeki eksikliğin tamamlanması amaçlanmıştır. Çalışmada makine öğrenimi metotlarının her birinin analizi için, tüm verinin %80'i eğitim verisi, tüm verinin %20'si ise test verisi olarak kullanılmıştır. Analizler sonucunda en iyi tahmin sonucu R^2 değeri makine öğrenme metotlarından 0,97 ile DVM ile elde edilmiştir. Ayrıca çalışmanın sonunda eğitilen modeller sonunda gerçekleşen tahmin sonuçları ile gerçek deney sonuçları karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Vorteks Tüp, Makine Öğrenme, Lineer Regresyon, Regresyon Ağaçları, Ağaç Toplulukları, Destek Vektör Makineleri

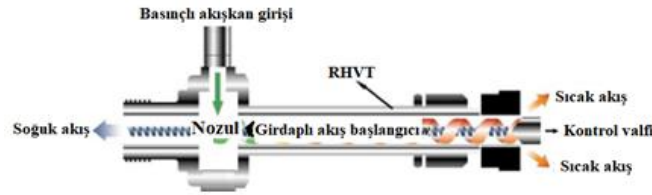
Performance Analysis of Counterflow Ranque– Hilsch Vortex Tube by Machine Learning Methods

ABSTRACT

In this study, the Counter-Flow Ranque-Hilsch Vortex Tube (KARHVT) consists of a simple pipe with no moving parts other than the control valve, which can cool and heat at the same time using pressurized oxygen gas, was used. In KARHVT's design, the pipe is manufactured with an inner diameter of 7 mm and a body length of 100 mm. At the same time, 2, 3, 4, 5 and 6 orchids made of brass, steel, aluminium and polyamide materials were used as nozzles. In the experiments, the control valve on the hot fluid side was left fully open, and the inlet pressure was set as the first 150 kPa. Then, data up to 700 kPa were taken at 50 kPa intervals. The system's performance was optimized by finding the difference (ΔT) between the temperature of the cold flow (T_c) leaving the KARHVT and the temperature of the leaving hot flow (T_h). The optimization of the system's performance is aimed at filling the gap in the literature by using the machine learning methods Linear Regression (LR), Regression Trees (RT), Tree Ensembles (RE) and Support Vector Machines (SVM). For the analysis of each of the machine learning methods in the study, 80% of all data was used as training data and 20% of all data was used as test data. As a result of the analysis, the best estimation results R^2 value was obtained with SVM with 0.97 from machine learning methods. In addition, the estimation results realized at the end of the models trained at the end of the study were compared with the actual experimental results.

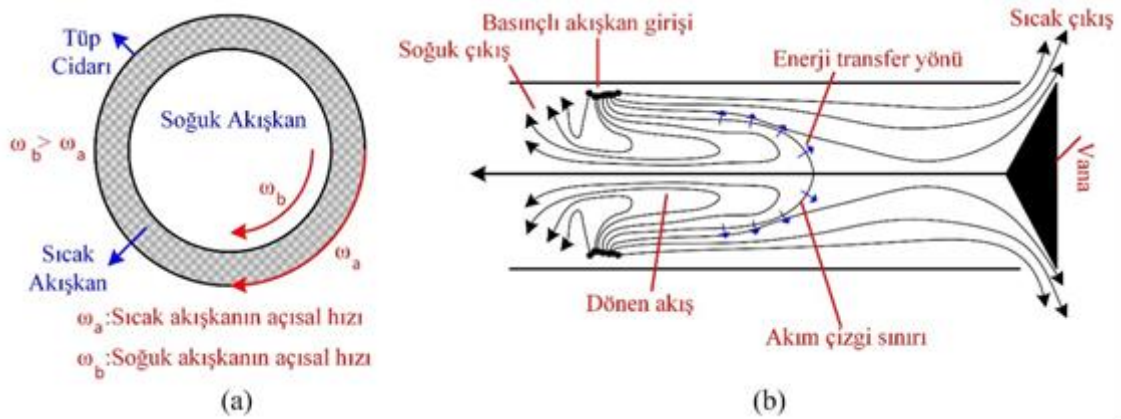
I. GİRİŞ

1931 yılında vorteks tüpler Ranque tarafından icat edilmiş olup, daha sonra Hilsch tarafından 1947 yılında geliştirilmiştir. Vorteks tüplerini icat eden ve geliştiren kişilerin adlarından dolayı Ranque-Hilsch Vorteks Tüp (RHVT) olarak isimlendirirler [1]. Kontrol valfi dışında hiçbir hareketli parçası bulunmayan RHVT'ler, ısıtma ve soğutma işlemini aynı anda gerçekleştirildikleri için günümüzde birçok soğutma ve ısıtma işlemlerinde kullanılabilmektedirler [2]. Ağırlıklarının hafif, boyutlarının küçük oluşu, çevresel açıdan zararlı olmaması, kimyasal güç ile bakım gerektirmemeleri ve hızlı bir şekilde rejime ulaşması RHVT'lerin kullanım avantajları arasındadır [3]. Çalışmada da kullanılan KARHVT Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. KARHVT.

KARHVT'ünün giriş kısmında bulunan nozul ile kullanılan basınçlı akışkan, teğet olarak giriş yapar. Nozul basınçlı akışkanın basıncını azaltıp, hızını artırır. Hızı artan akış merkezkaç kuvvetinden dolayı tüp cidarına yönünde genişlemeye başlar. Genişleme sonucunda, cidardaki akışkan ile tüp merkezindeki akışkan arasında basınç farkı oluşmaktadır. Daha sonra oluşan basınç farkı nedeni ile akış radyal yönde merkeze doğru genişlemeye başlamaktadır. KARHVT'de merkezdeki akışın açılma hızı tüp cidarındaki akışın açılma hızından yüksek olmasının nedeni, açılma momentumunun korunumu ilkesine dayanmaktadır. Bundan dolayı merkezdeki akışkan yüksek hıza sahip olduğunda merkezdeki akışkan KARHVT yüzeyindeki akışkana mekanik enerji transferi yapmaktadır (Şekil 2). Mekanik enerjisi transferi sayesinde merkezdeki akışkan soğuk akışı, tüp cidarındaki akış sıcak akışı meydana getirir ve Şekil 1'de gösterildiği gibi KARHVT'de nozulların bulunduğu kısımdan soğuk akış, kontrol vanasının bulunduğu kısımdan ise sıcak akış olarak sistemi terk eder [4].



Şekil 2. (a) KARHVT içindeki soğuk ve sıcak akış hareketi (b) KARHVT içindeki akış.

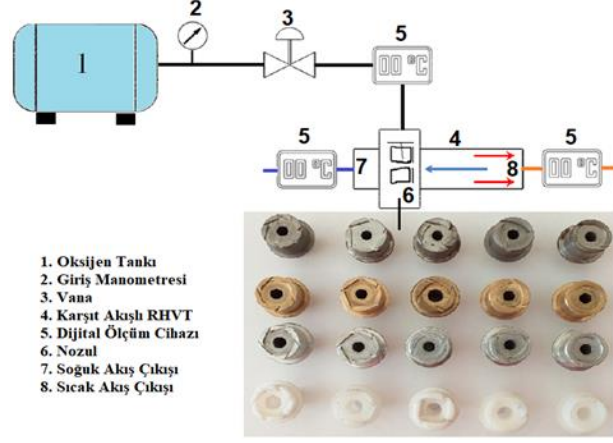
Vorteks tüpleri ile ilgili farklı alanlarda literatürde çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda, Gutak, deneylerde akışkan olarak doğal gaz kullanarak, endüstriyel vorteks tüpünün termal performansını araştırmışlardır [5]. Bej and Sinhamahapatra, yaptıkları deneysel çalışmada ikinci vorteks tüpünün çalışmasını başlatmak için ilk vorteks tüpünden çıkan sıcak havayı kullanarak k-ε türbülans yöntemini

uygulayarak ekserji kapasitesi analizi yapmışlardır [6]. Dutta et al, Vorteks tüplerinde sıcak ve soğuk akışkanın ayırma sürecinin bazı üç boyutlu simülasyonlarını birkaç yeni yolla yapmışlardır. Aynı zamanda NIST' e (Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü) göre gerçek ve mükemmel gaz modellerini ilk kez karşılaştırmalı biçimde kullanmışlardır [7]. Aynı zamanda Yapay sinir ağları, Taguchi ve Kural tabanlı Mamdani-Tipi Bulanık yöntemler (kod tabanlı yöntemler olarak), geometrik faktörlere (L/D ve soğuk kütle oranı, valf açısı, sıvı tipi ve meme) dayalı VT performansını tahmin etmek için uygulamalar yapılmıştır. Berber v.d, farklı soğuk fraksiyonlar için RHVT'nin ikinci aşamasında ekserji analizine odaklanan standart k-ε türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirilen bir dizi sayısal simülasyonun sonuçlarını araştırmışlardır [8]. Pouraria ve Zangoee, vortex tüp kullanmanın etkisini incelemek ve optimum ayrılma açısını bulmak için sayısal bir araştırma yapmışlardır. Tüp içindeki enerji ayırma etkisi için, standart k-ε modelini kullanılarak tüp içinde ısı ve iş transferini araştırmışlardır. Araştırmalarının sonucunda girdap tüp açısındaki bir artışın vorteks tüpünün soğutma performansında bir artışa neden olduğunu bulmuşlardır. Çalışmalarında kritik bir sapma açısı değerinden fazla artış olduğunda soğutma performansının düşebileceğini vurgulamışlardır [9]. Han et al, farklı tipte giriş gazlarının (R32, R728, R134a, R744, R161, R22, O₂, N₂, CO₂, NO₂ ve hava) bir vorteks tüpü üzerinde ısıtma ve soğutma performansının etkilerini incelemişlerdir [10]. Sadi and Gord, (RHVT) performansını artırmak için, yeni bir Anular Vortex Tube (AVT) olarak adlandırılan deneysel tasarımı test ederek, benzer bir tasarım RHVT ile karşılaştırmışlardır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda AVT'nin RHVT'ye kıyasla daha yüksek termal ayırma performansına sahip olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca optimum soğuk kütle fraksiyonu için AVT, RHVT'ye kıyasla soğutma verimliliğini yaklaşık %24 artırdığına ulaşmışlardır [11]. Khait et al, RHVT girdaplı sıkıştırılabilir akışın üç boyutlu bir sayısal modelini araştırmışlardır. Araştırmanın sonucunda, RHVT'lerde ampirik katsayıların kalibrasyonundan sonra önerilen enerji korunumu denkleminde dayalı yeni sayısal modelin uygulanabilirliğinin gösterilmesini amaçlamışlardır [12]. Eiamsa-ard, RHVT'nde enerji, sıcaklık ayırma olayını ve soğutma verimliliği özellikleri deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda, salyangoz girişli RHVT'nün aynı soğuk kütle fraksiyonu ve besleme giriş basıncı altında, nozül sayısındaki artışın, geleneksel teğetsel giriş nozüllü RHVT'nün performansından daha fazla soğuk hava sıcaklığı düşüşü ve soğutma verimliliği sağladığını ortaya koymuşlardır. Ayrıca besleme basıncının, girdap yoğunluğunun artmasına ve dolayısıyla tüpte enerji ayrılmasına yol açtığını vurgulamışlardır [13].

Bu çalışmada, KARHVT'ünde iki, üç, dört, beş ve altı orfisli pirinç, alüminyum, çelik ve polyamid malzemeden üretilmiş nozullar kullanılarak deneyler yapılmıştır. Deneyler 150 ile 700 kPa giriş basıncında 50 kPa basınç aralıklarıyla oksijen gazı kullanılarak her bir farklı malzemeden yapılan nozullar için tekrarlanmıştır. Deneyler sonunda KARHVT'de çıkan T_{sck} ile T_{sgk} arasındaki fark alınarak sıcaklık farkı ΔT hesaplanmıştır. KARHVT' de ΔT performansının analizleri makine öğrenimi metotlarından LR, RA ve AT kullanılarak yapılmıştır. Analizlerde makine öğrenme metotlarında tüm verinin %80'ni eğitim verisi, tüm verinin %20'si de test verisi olarak kullanılmıştır. Ortaya sonuçları determinasyon katsayısı R^2 ortalaması, alınarak KARHVT'nin performansları karşılaştırılmıştır.

II. MATERİYAL VE METOT

Çalışmada, iç çapı 0.7 cm, gövde uzunluğu 10 cm olan KARHVT ve deneylerde kullanılan iki, üç, dört, beş ve altı orfisli pirinç, çelik, alüminyum ve polyamid malzemeler Şekil 3 de verilmiştir. KARHVT çıkan sıcak ve soğuk akış sıcaklığını ± 1 °C hassasiyette ölçmek için dijital termometreler kullanılmıştır. KARHVT deneylerde başlangıç basıncını 150 kPa ayarlanması için akışkan girişine vana bağlanmıştır. KARHVT'nün sıcak ve soğuk akış çıkışında bağlı dijital termometrelerden okunan sıcaklık değerleri sabit olana kadar basınç değeri olan 150 kPa oksijen gazı gönderilerek tüm çıktı sonuçları kayıt altına alınmıştır. Deneylerde ortam sıcaklığı 21°C ayarlanmış olup, farklı malzemelerden imal edilen tüm nozullar için diğer basınç aralıklarında da 150 kPa basınçta yapılan işlemler tekrarlanmıştır. Aynı zamanda deneylerin her biri üçer kez tekrarlanarak ortalamaları alınmış ve deney sonuçlarının doğruluğu belirlenerek analizlerde kullanılmıştır.



Şekil 3. Deneysel çalışmada kullanılan KARHVT ve nozullar.

RHVT'ne giren giriş akışkanının ne kadarının vorteks tüpünün çıkışında oluşan soğuk akışa dönüştüğünü gösteren soğuk kütle oranı (μ_c) eşitlik 1'de verilmiştir.

$$\mu_c = \frac{\text{soğuk akışın kütleli debisi}}{\text{giriş akışının kütle debisi}} \quad (1)$$

RHVT'lerde, eşitlik 4 de gösterildiği gibi RHVT'nin performansı, soğuk akış sıcaklık farkı ($\Delta T_{soğ}$) ve sıcak akış sıcaklık farkı (ΔT_{sic}) eşitlik 2-3 de gösterilen denklemler çıkarılarak hesaplanmaktadır [1],[14]. Çalışmada kullanılan giriş ve çıkış parametreleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

$$\Delta T_{soğ} = T_{gir} - T_{soğ} \quad (2)$$

$$\Delta T_{sic} = T_{sic} - T_{gir} \quad (3)$$

$$\Delta T = T_{sic} - T_{soğ} \quad (4)$$

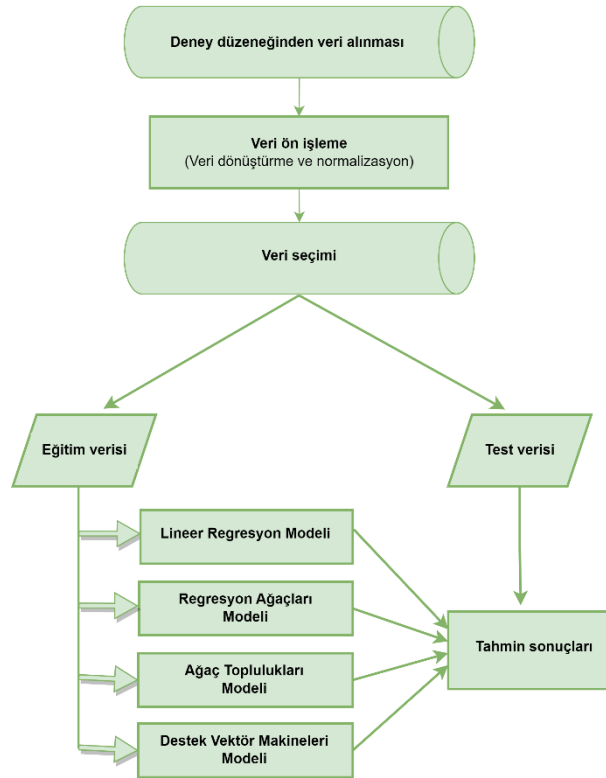
Tablo 1. RHVT'de kullanılan giriş ve çıkış parametreleri

Giriş parametreleri					Çıkış parametreleri
Akışkan	Malzeme	Nozul sayısı	Giriş Basıncı (kPa)	Isı iletim katsayısı (W/mK)	Sıcaklık farkı (K)
Oxygen (1)	Alüminyum (1)	2,3,4,5,6	150 – 700 kPa	226	ΔT
	Çelik (2)	2,3,4,5,6	150 – 700 kPa	23.43	
	Polyamid (3)	2,3,4,5,6	150 – 700 kPa	0.257	
	Pirinç (4)	2,3,4,5,6	150 – 700 kPa	117	

A. MAKİNE ÖĞRENME METOTLARI

Problem çözerken konuyla ilgili verileri eğitim, test ve doğrulama için kullanarak, makine öğrenme metotları ile çözüme ulaşmak amacıyla tahminler yapılmaktadır. Makine öğrenme metotları farklı sayıda verileri kendi içerisinde kullanarak eğitim modelleri oluşturmaktadırlar. Daha sonra modelleri en iyi şekilde optimize edebilmek ve uygun algoritmaları kullanarak olası en iyi tahminleri yapabilmek amacıyla büyük miktarda veriye ihtiyaç duymaktadırlar [15]. Makine öğreniminde birbirinden farklı çok sayıda algoritma mevcuttur. Bu algoritmalarından bazıları; destek vektör makineleri, lineer regresyon, ağaç toplulukları, karar ağaçları, gauss süreç regresyonu, yapay sinir ağları ve rastgele orman'dır. Makine öğrenimi metotları genellikle tahmin, sınıflandırma ve kümeleme gibi farklı amaçlar için değerlendirilebilir [16].

Bu çalışmada hazırlanan deney düzeneğinden elde edilen sonuçlarla RHVT'nin ΔT değerleri makine öğrenimi yöntemleriyle tahmin edilmiştir. Şekil 4'te bu çalışma için kullanılan makine öğrenimi işlemlerine ait akış şeması verilmiştir. Önce deney düzeneği oluşturulmuş ve veriler alınmıştır. Elde edilen verilerde olabilecek hatalar kontrol edilir ve giderilir. Hatadan arındırılan veriler kullanıma uygun hale getirilir. Bu işlem gerçekleştirilirken gerekli görülen bazı veriler, makine öğrenimi matematik modellerine uygun hale getirebilmek amacıyla sayılara dönüştürülür. Bu verilerde standartlaştırma işlemi gerçekleştirilir. Verilerle ilgili bu işlemlerden sonra veri eğitim ve test verisi olarak iki gruba ayrılır. Çalışmamızda tüm verilerin %80'ni eğitim, %20'si de test alınarak, LR, RA, AT ve DVM makine öğrenimi metotları kullanılarak eğitimler yapılmıştır. Eğitimlerden elde edilen modellerle testler gerçekleştirilmiş ve tahminler yapılmıştır.



Şekil 4. Makine öğrenimi işlem akış şeması

A. 1. LİNEER REGRESYON

LR metodu genellikle analizler sonucu elde edilen bağımlı bir değişkenin neden-sonuç ilişkisini bir ya da birden fazla bağımsız değişken arasında bulmaya çalışan bir makine öğrenme modelidir. Bu model, bağımsız değişken veya değişkenlerin, bağımlı değişken ile bir fonksiyon kullanarak ilişkilendirir [17]. LR yönteminde bağımsız değişken bir yada birden çok olabilir. Bağımsız değişken birden çok olduğunda işlem çoklu lineer regresyon (ÇLR) adını alır [18].

A. 2. REGRESYON AĞAÇLARI

Regresyon ağaçları (RA), bağımsız ve bağımlı değişkenlerin arasındaki ilişkiyi ortaya koymaya çalışır. Bunun için topluluğun üyeleri homojen alt sınıflara ayrılır. RA, parametrik bir yöntem değildir. Yöntemde ilk olarak kök düğüm, ardından da dallara ayırma işlemleri gerçekleştirilir. RA metodunda ayırma işlemi düğümdeki bireylerle ilgili belirlenmiş olan bağımsız değişkenler aynı değere ulaştığında durdurulmaktadır. Bu yöntemde, benzer bireyler aynı ağaç düğümünde toplanır.

RA yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen tahminlerin ait olduğu özniteliklere ait değerler sürekli gerçek sayılardan oluşur. Tahmin değerlerine ait kare ortalama hata en aza indirgenecek şekilde ağacın büyütülmesi ve dallarına ayrılması sağlanır. Yapraklardaki tahminler düğümde hesaplanan ağırlıklı ortalamalara bağlıdır [19].

RA'da üç ayırma kuralı kullanılır. Bunlar; Least Absolute Deviaton (LAD), Least Squares (LS), Clark&Pregibon (CP). Asıl amaç, olabildiğince homojen düğümler oluşturmaktır [20].

Bu yöntemde, bağımsız değişkenler aralıklarla ayırıldığından kesiklidir. Bu nedenle istenen aralıklardaki tahmin sonuçları benzer çıkabilir.

A. 3. AĞAÇ TOPLULUKLARI

Ağaç toplulukları (AT), bir çok ağaca ait bilgileri aşamalı olarak toplayarak büyütür. Her ağaç kendinden önceki ağaçlardan aldığı bilgilerle büyür. İşleyiş, önce bir regresyon ağacı ile başlar ve daha önce üretilen model artıkları üzerinde yeni regresyon ağaçlarıyla güncellenir. Model, sonuç değişkeni yerine modelin kalıntılarına ağaç yerleştirerek ilerler. Yeni ağaç, artıkları güncellemek amacıyla fonksiyona eklenir. Her ağaç, yetmişmiş ağaçlara büyük oranda bağlıdır[21].

Topluluk sınıflandırıcı sistemi olarak AT modeli kullanılabilir. Makine öğreniminde yaygın olarak araştırılan ve kullanılan yaklaşımlardan biri çoklu sınıflandırıcılardır. Literatürde yapılan çalışmaların çoğunda, tek bir kararsız sınıflandırıcı yapılan çalışmaların, birçok kararsız sınıflandırıcının tek bir toplu sınıflandırıcıda birleştirilmesinin göre performansının azaldığı anlaşılmaktadır [21],[22],[23],[24]. Kararsız sınıflandırıcılara örnek olarak, karar ağaçları ve sinir ağı verilebilir [25]. Özellikle eğitim setindeki küçük bir bozulma bile kararsız sınıflandırıcıların tahmin yeteneğini olumsuz şekilde etkileyebilir. Bundan dolayı karar ağaçları ve sinir ağı topluluklarının çeşitli stratejilere sahip olmasından dolayı benzer çalışmalar için önerilmektedir [21],[27]. Makine öğrenme metodları içerisinde rastgele orman bu tür topluluklara gösterilebilecek güzel bir yöntemdir [28]. Karar ağaçları sınıflandırma ve regresyon görevlerinde yüksek performans meydana getiren, torbalama ve rastgele alt uzay yöntemleri kullanılarak oluşan bir komitedir [29].

AT'nda, gradyan artırma ve rastgele orman gibi çeşitli topluluk yöntemlerini, sınıflandırma performansını iyileştirmek için daha sık kullanılmaktadır. Karar ağaçları, çok daha az parametreye ihtiyaç duymasının nedeni sinir ağı tabanlı sınıflandırıcılar ile karşılaştırıldığında eğitim ve sınıflandırmada çok daha hızlı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu yöntem paralelleştirilebilmesi ve gürültüyü etiketlemesi nedeniyle kullanılan güçlü bir yöntemdir [30].

A.4. DESTEK VEKTÖR MAKİNELERİ

Destek vektör makineleri (DVM), ilk defa 1990'lı yıllarda ortaya çıkmıştır [31]. DVM algoritması, veri hakkında bütünlük dağılım fonksiyonuna gereksinimi olmadığından dağılımdan bağımsız çalışabilir [32]. Burada amaç, sınıfların ayrıştırılabilmesi için en uygun ayırma hiperdüzleminin tespit edilebilmesidir. Birbirinden farklı olan sınıflar için destek vektörleri arasındaki uzaklığın en büyük olması sağlanmaya çalışılır [33]. DVM, verileri gruplara ayıran n-boyutlu bir hiperdüzlemi en uygun şekilde oluşturur. Bu yöntem yapay sinir ağlarındaki çeşitli yöntemleri beraber kullanabilirler [34],[35]. DVM, iyi bir genelleme yeteneğine sahiptir ve bu sayede ses ve yüz tanıma, sınıflandırma gibi bir çok alanda kullanılabilir [36].

Bu yöntem önceleri doğrusal verilerin sınıflandırılması için kullanılmışsa da bugün doğrusal olmayan ve çok sınıflı veriler üzerinde de kullanılmaktadır [37]. En iyi hiperdüzleme ait eşitlikler 5 ve 6'da verilmektedir.

$$w \cdot x_i + b \geq +1, y = +1 \quad (5)$$

$$w \cdot x_i + b \leq -1, y = -1 \quad (6)$$

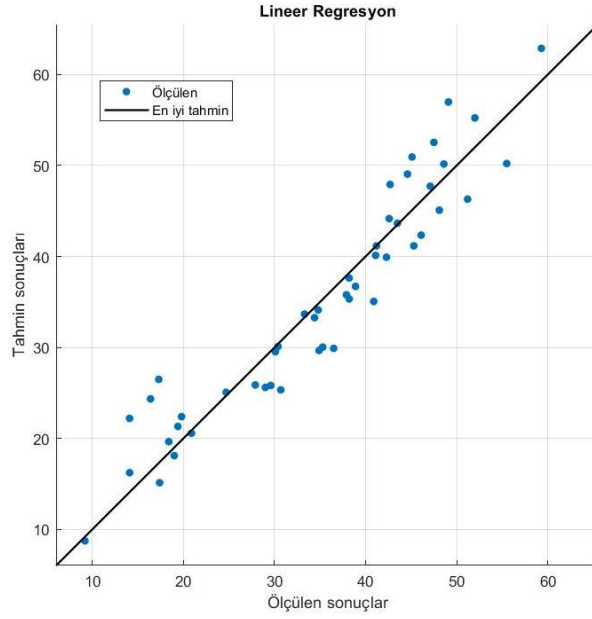
Burada $x \in R^N$ N-boyutlu uzayı, $y \in \{-1, +1\}$ sınıf etiketlerini, w ağırlık vektörünü, b eğilim değerini göstermektedir [38].

Bazen veriler doğrusal ayrılamayabilir. Böyle durumlarda verilerin hatalı sınıflandırılmaması amacıyla düzenleme parametresi ve yapay değişken kullanılır. Bu şekilde en iyi durumu bulmak için problemin çözümü gerçekleştirilmeye çalışılır [37].

Çalışmada KARHVT'ünde giriş ve çıkışlar arasındaki ilişkinin ortaya konulabilmesi için LR, RA, AT ve DVM makine öğrenimi tüm verinin %80'i eğitim, %20'si ise test amacıyla kullanılmıştır.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

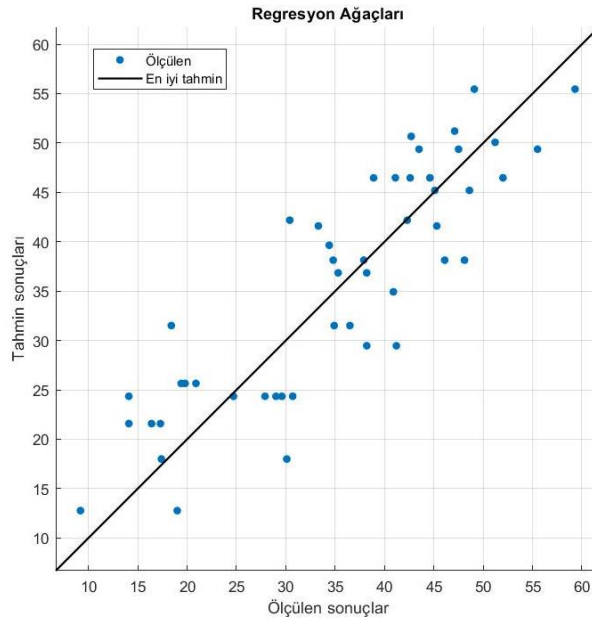
RHVT ile gerçekleştirilen deney sonuçları kullanılarak makine öğrenimi için eğitim ve testler yapılmıştır. Çalışma sonunda LR, RA, AT ve DVM metodlarıyla gerçekleştirilen testlerin sonuç grafikleri Şekil 5, Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir. Aynı zamanda test tahmin sonuçlarından elde edilen doğruluk/uyumluluk değerleri Tablo 2' de gösterilmiştir.



Şekil 5. Makine Öğrenimi Metodu “LR” Tahmin Sonuçları Grafiği (ΔT)

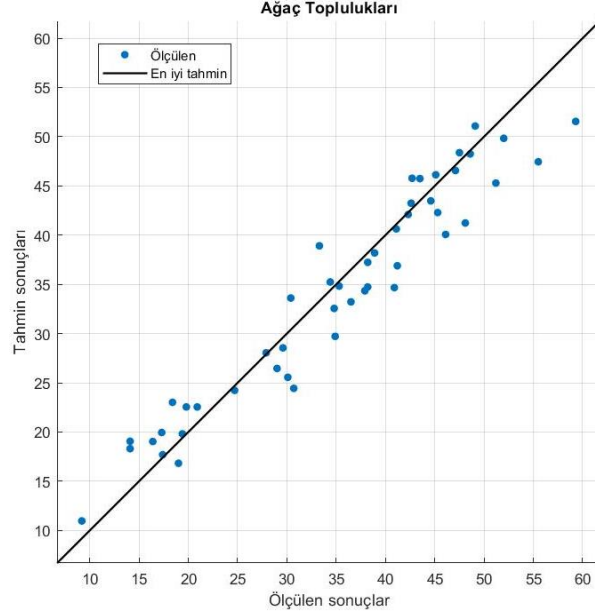
Ayrıca makine öğrenme yöntemleri içerisinde Lineer regresyon yönteminden elde edilen sonuçları Şekil 5’de incelediğimizde ölçülen gerçek deney verileri ile tahmin edilen sonuçların en iyi tahmin eğrisi üzerinde birbirlerine yaklaşık değerler verdiği görülmektedir. Lineer regresyon yöntemi ile yapılan KARHVT’nün sıcaklık farkını R^2 değerinin %90, RMSE değerinin 3,94, MSE değerinin 15,49 ve MAE değerinin ise 3,11 olduğu görülmektedir.

Makine öğrenme yöntemleriyle yapılan tüm sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde Şekil 6’da RA yöntemindeki başarı diğer metotlarla karşılaştırıldığında R^2 değeri %75 olarak bulunmuştur. Regresyon ağaçları yöntemi yapılan deneysel çalışma verileri ile kullanılabilir ölçekte sonuçlar üretmiştir.



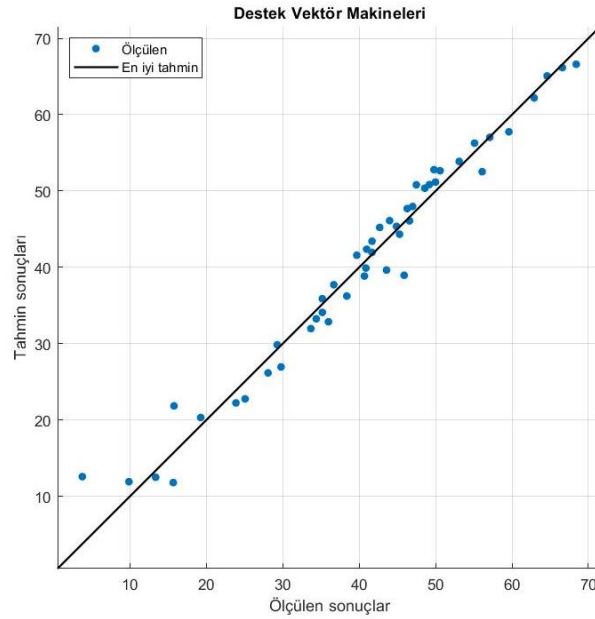
Şekil 6. Makine Öğrenimi Metodu “RA” Tahmin Sonuçları Grafiği (ΔT)

Ağaç toplulukları metodu ile yapılan analiz sonuçları incelendiğinde hem deney sonuçlarının hem de tahmin sonuçlarının en iyi tahmin eğrisi üzerinde olduğu Şekil 7’ de görülmektedir. Bununla birlikte ağaç toplulukları metodunun KARHVT’nün sıcaklık farkını R^2 değeri ise %92 olarak bulunmuştur.



Şekil 7. Makine Öğrenimi Metodu “AT” Tahmin Sonuçları Grafiği (AT)

Çalışmada kullanılan makine öğrenimi metodlarından en yüksek doğruluk değerleri performans metrikleri (R^2 , RMSE, MSE, MAE) incelenerek bulunmuştur. Buna göre en iyi metod Şekil 8’de görüldüğü gibi DVM metodudur. Metodların ürettiği tahmin sonuçlarına ait metriklerdeki farklılıklar, kullanılan metodlarından algoritmasından, veri sayısından ve metodların uygulandığı alandan kaynaklanabileceği düşünülmektedir.



Şekil 8. Makine Öğrenimi Metodu “DVM” Tahmin Sonuçları Grafiği (AT)

Tablo 2. Makine Öğrenimi Performans Ölçüm Metrikleri

	LR	RA	AT	DVM
Determinasyon Katsayısı (R^2)	0,90	0,75	0,92	0,97
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)	3,94	6,20	3,57	2,59
Ortalama Kare Hata (MSE)	15,49	38,48	12,76	6,2
Ortalama Mutlak Hata (MAE)	3,11	5,27	2,82	1,97

IV. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmada, makine öğrenme yöntemlerinden üç farklı yöntem kullanılarak karşıt akışlı RHVT'ünden alınan sonuçlar ile eğitimler yapılmıştır. Eğitimler sonucunda RHVT'nün sıcaklık farkının (ΔT) R^2 değerleri sırasıyla, Lineer Regresyon yönteminde 0,90, Regresyon Ağaçları yönteminde 0,75, Ağaç Toplulukları yönteminde 0,92 ve Destek Vektör Makineleri yönteminde 0,97 bulunmuştur. Modellemelerde test sonuçlarının gerçek deney sonuçlarına yakın değerler verdiğinin göstergesi elde edilen R^2 değerleridir. Aynı zamanda eğitim modellerinin RMSE değerleri kıyaslandığında en iyi ΔT değerini DVM yöntemi ile ulaşıldığı görülmektedir. Ayrıca RA yöntemi ile elde edilen RMSE değerlerinin diğer iki yöntem ile kıyaslandığında daha düşük tahmin sonuçları verdiği Tablo 1.'de anlaşılmaktadır.

Bu sonuçlar değerlendirildiğinde;

Kullanılan makine öğrenme yöntemleri içerisinde en iyi sonucu DVM yönteminin verdiği anlaşılmaktadır. Bu deney şartlarına uygun verilerle çalışıldığında, makine öğrenme yöntemleri içerisinde DVM yöntemi ile kullanıldığında daha doğru sıcaklık farkı (ΔT) değerlerine ulaşılabileceği görülmektedir. Aynı zamanda regresyon ağaçları yönteminin R^2 değerinin doğruluğunun kabul edilebilir fakat diğer iki yöntemin R^2 değerinden düşük olduğu bulunmuştur. Makine öğrenme yöntemi hem RHVT sistemlerinin hem de diğer deneysel sistemlerin kurulmasında maliyet ve zaman kaybının en aza indirilmesini sağlaması amacıyla kullanılabilir. Makine öğrenme yöntemlerinin karşıt akışlı RHVT' lerinde performans analizlerini önceden görebilmek için rahatlıkla kullanılabileceği anlaşılmaktadır.

V. KAYNAKLAR

- [1] M. Korkmaz, A. Dogan, and V. Kırmacı, "Performance Analysis of Counterflow Ranque – Hilsch Vortex Tube with Linear Regression, Support Vector Machines and Gaussian Process Regression Method," *Gazi J. Eng. Sci.*, vol. 8, no. 2, pp. 361–370, 2022, doi: doi:10.30855/gmbd.0705015.
- [2] Kırmacı, V, Kaya, H and Cebeci, i, "An experimental and exergy analysis of a thermal performance of a counter flow ranque–hilsch vortex tube with different nozzle materials," *Int. J. Refrig.*, vol. 85, no. 2018, pp. 240–254, 2018.
- [3] H. Kaya, O. Uluer, E. Kocaoğlu, and V. Kırmacı, "Experimental analysis of cooling and heating performance of serial and parallel connected counterflow Ranque–Hilsch vortex tube systems using carbon dioxide as a working fluid," *Int. J. Refrig.*, vol. 106, pp. 297–307, 2019, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2019.07.004.

- [4] W. Fröhlingsdorf and H. Unger, "Numerical investigations of the compressible flow and the energy separation in the Ranque-Hilsch vortex tube," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 42, no. 3, pp. 415–422, 1998, doi: 10.1016/S0017-9310(98)00191-4.
- [5] A. D. Gutak, "Experimental investigation and industrial application of Ranque-Hilsch vortex tube," *Int. J. Refrig.*, vol. 49, no. 0, pp. 93–98, 2015, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2014.09.021.
- [6] N. Bej and K. P. Sinhamahapatra, "Exergy analysis of a hot cascade type Ranque-Hilsch vortex tube using turbulence model," *Energy Econ.*, vol. 45, no. 1947, pp. 13–24, 2014, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2014.05.020.
- [7] T. Dutta, K. P. Sinhamahapatra, and S. S. Bandyopadhyay, "Numerical investigation of gas species and energy separation in the Ranque-Hilsch vortex tube using real gas model," *Int. J. Refrig.*, vol. 34, no. 8, pp. 2118–2128, 2011, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2011.06.004.
- [8] A. Berber, K. Dincer, Y. Yilmaz, and D. N. Ozen, "Rule-based Mamdani-type fuzzy modeling of heating and cooling performances of counterflow Ranque-Hilsch vortex tubes with different geometric construction for steel," *Energy*, vol. 51, pp. 297–304, 2013, doi: 10.1016/j.energy.2013.01.005.
- [9] H. Pouraria and M. R. Zangoee, "Numerical investigation of vortex tube refrigerator with a divergent hot tube," *Energy Procedia*, vol. 14, no. 2011, pp. 1554–1559, 2012, doi: 10.1016/j.egypro.2011.12.1132.
- [10] X. Han *et al.*, "The influence of working gas characteristics on energy separation of vortex tube," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 61, no. 2, pp. 171–177, 2013, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.07.027.
- [11] M. Sadi and M. Farzaneh-Gord, "Introduction of Annular Vortex Tube and experimental comparison with Ranque-Hilsch Vortex Tube," *Int. J. Refrig.*, vol. 46, pp. 142–151, 2014, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2014.07.004.
- [12] A. V. Khait, A. S. Noskov, A. V. Lovtsov, and V. N. Alekhin, "Semi-empirical turbulence model for numerical simulation of swirled compressible flows observed in Ranque-Hilsch vortex tube," *Int. J. Refrig.*, vol. 48, pp. 132–141, 2014, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2014.09.006.
- [13] S. Eiamsa-ard, "Experimental investigation of energy separation in a counterflow Ranque-Hilsch vortex tube with multiple inlet snail entries," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 37, no. 6, pp. 637–643, 2010, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.02.007.
- [14] V. Kırmacı, "Paralel bağlı karşıt akışlı ranque-hilsch vorteks tüp sisteminde farklı çalışma akışkanı ve nozul malzemesi kullanımının performans etkisinin deneysel incelenmesi," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknol. Derg.*, vol. 8, no. 1, pp. 1204–1215, 2020.
- [15] J. Wei *et al.*, "Machine learning in materials science," *InfoMat*, vol. 1, no. 3, pp. 338–358, 2019.
- [16] T. E. Kalaycı, "Kimlik hırsızı web sitelerinin sınıflandırılması için makine öğrenmesi yöntemlerinin karşılaştırılması," *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg.*, vol. 24, no. 5, pp. 870–878, 2018.
- [17] Q.-H. Luu, M. F. Lau, S. P. H. Ng, and T. Y. Chen, "Testing multiple linear regression systems with metamorphic testing," *J. Syst. Softw.*, vol. 182, p. 111062, 2021.
- [18] S. Rong and Z. Bao-Wen, "The research of regression model in machine learning field," in *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 176, p. 1033.
- [19] L. Rokach and O. Z. Maimon, *Data mining with decision trees: theory and applications*, vol. 81. World scientific, 2014.
- [20] G. Temel Orekici, "Sınıflama ve regresyon ağaçları," Mersin Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Mersin, 2004.
- [21] F. Schiltz, C. Masci, T. Agastiti, and D. Horn, "Using regression tree ensembles to model interaction effects: a graphical approach," *Appl. Econ.*, vol. 50, no. 58, pp. 6341–6354, 2018.
- [22] D. Opitz and R. Maclin, "Popular ensemble methods: An empirical study," *J. Artif. Intell. Res.*, vol. 11, pp. 169–198, 1999.
- [23] T. G. Dietterich, "Ensemble methods in machine learning," in *International workshop on multiple classifier systems*, 2000, pp. 1–15.
- [24] G. Valentini and F. Masulli, "Ensembles of learning machines," in *Italian workshop on neural nets*, 2002, pp. 3–20.
- [25] L. Rokach, "Ensemble-based classifiers," *Artif. Intell. Rev.*, vol. 33, no. 1, pp. 1–39, 2010, doi:

- 10.1007/s10462-009-9124-7.
- [26] L. Breiman, "Bias, variance, and arcing classifiers," Tech. Rep. 460, Statistics Department, University of California, Berkeley ..., 1996.
- [27] Z.-H. Zhou, J. Wu, and W. Tang, "Ensembling neural networks: Many could be better than all," *Artif. Intell.*, vol. 137, no. 1, pp. 239–263, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0004-3702\(02\)00190-X](https://doi.org/10.1016/S0004-3702(02)00190-X).
- [28] L. Breiman, "Random forests," *Mach. Learn.*, vol. 45, no. 1, pp. 5–32, 2001.
- [29] R. Katuwal, P. N. Suganthan, and L. Zhang, "An ensemble of decision trees with random vector functional link networks for multi-class classification," *Appl. Soft Comput.*, vol. 70, pp. 1146–1153, 2018.
- [30] M. Shoaran, B. A. Haghi, M. Taghavi, M. Farivar, and A. Emami-Neyestanak, "Energy-efficient classification for resource-constrained biomedical applications," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Circuits Syst.*, vol. 8, no. 4, pp. 693–707, 2018.
- [31] V. Vapnik, "The nature of statistical learning theory," *NY Springer-Verlag*, 1995.
- [32] K. P. Soman, R. Loganathan, and V. Ajay, *Machine learning with SVM and other kernel methods*. PHI Learning Pvt. Ltd., 2009.
- [33] S. Ayhan and Ş. Erdoğmuş, "Destek vektör makineleriyle sınıflandırma problemlerinin çözümü için çekirdek fonksiyonu seçimi," *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilim. Derg.*, vol. 9, no. 1, pp. 175–201, 2014.
- [34] S. Tolun, "Destek vektör makineleri: Banka başarısızlığının tahmini üzerine bir uygulama," İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, 2008.
- [35] S. Haykin, "Neural Networks, a comprehensive foundation, Prentice-Hall Inc," *Up. Saddle River, New Jersey*, vol. 7458, pp. 161–175, 1999.
- [36] N. Cristianini and J. Shawe-Taylor, *An introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods*. Cambridge university press, 2000.
- [37] T. Kavzoğlu and İ. Çölkesen, "Destek vektör makineleri ile uydu görüntülerinin sınıflandırılmasında kernel fonksiyonlarının etkilerinin incelenmesi," *Harit. Derg.*, vol. 144, no. 7, pp. 73–82, 2010.
- [38] S. Huang, N. Cai, P. P. Pacheco, S. Narrandes, Y. Wang, and W. Xu, "Applications of support vector machine (SVM) learning in cancer genomics," *Cancer Genomics Proteomics*, vol. 15, no. 1, pp. 41–51, 2018.



Düzce University Journal of Science & Technology

Research Article

Confidence Interval Approach to Weather Forecasting with Horizon-Based Genetic Programming

 Ömer MİNTEMUR

Department of Software Engineering, Ankara Yıldırım Beyazıt University, Ankara, Türkiye
Corresponding author's e-mail address: omermintemur@aybu.edu.tr

DOI: <https://doi.org/10.29130/dubited.1188691>

ABSTRACT

Being able to forecast events has always been important for humans. Humans performed forecasting by observing the movements of material and non-material objects in ancient times. However, with technological developments and the increasing availability of data in recent years, forecasting has been done by computers, especially by machine learning methods. One of the areas where these methods are used frequently is numerical weather forecasting. In this type of forecast, short term, medium term and long term numerical weather forecasts are made using historical information. However, predictions are inherently error-prone, and should be indicated within which error ranges the predictions fall. In this study, numerical weather forecasting was done by combining Genetic Programming and the Inductive Conformal Prediction method. The effects of 10 and 20 days of historical data on short (1 day), medium (3 days) and long term (5 days) weather forecasts were examined. The results suggested that Genetic Programming has a good potential to be used in this area. However, when Genetic Programming was combined with the Inductive Conformal Prediction method, it was shown that forecasts gave meaningful results only in the short term; forecasts that were made for the medium and the long term did not produce meaningful results.

Keywords: Artificial Intelligence, Confidence Interval, Prediction, Genetic Programming

Ufuk Amaçlı Genetik Programlama ile Hava Durumu Tahminine Güven Aralıklı Yaklaşım

ÖZ

Olayları önceden tahmin edebilmek insanlar için her zaman önemli olmuştur. Eski zamanlarda insanlar tahminlerini maddesel ve maddesel olmayan cisimlerin hareketlerine göre yapmışlardır. Ancak, son yıllardaki teknolojik gelişmeler ve veri miktarındaki artış sayesinde tahmin çalışmaları bilgisayarlar tarafından, özellikle de makine öğrenmesi metotları tarafından yapılmaktadır. Bu metotların kullanıldığı en önemli alanlardan bir tanesi de sayısal hava durumu tahminidir. Bu tahmin çeşidinde, tarihsel veriler kullanılarak kısa, orta ve uzun vadeli tahminler yapılmaktadır. Ancak, tahminler doğası gereği hataya açık olaylardır ve ortaya çıkan hatanın hangi aralıkta olduğu belirtilmelidir. Bu çalışmada sayısal hava durumu tahmini Genetik Programlama ve Tümevarımsal Güven Aralığı metodu birleştirilerek yapılmıştır. 10 ve 20 günlük tarihsel verinin kısa (1 gün), orta (3 gün) ve uzun (5 gün) vadede yapılan tahminlere olan etkisi incelenmiştir. Sonuçlar Genetik Programlamanın bu alanda kullanılabileceğini göstermektedir. Ancak, Genetik Programlama Tümevarımsal Güven Aralığı

metodu ile kullanılıncaya, yapılan tahminlerin sadece kısa vadede anlamlı sonuçlar ürettiği görülmüştür. Orta ve uzun vadeli yapılan tahminlerin anlamlı sonuçlar üretmediği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Yapay Zeka, Güven Aralığı, Tahmin, Genetik Programlama

I. INTRODUCTION

Humans have a strong tendency to see a cosmos in nature. This tendency has encouraged humans to seek a cause-and-effect relationship in nature. As a result, forecasting mechanisms in humans have emerged. In ancient times, due to the absence of necessary technology, people made predictions by observing the behaviors of material and non-material objects, such as planets, waves, and winds. However, nowadays, humans have transferred their forecasting ability to technology. Forecasts which had been made by humans in the non-technological era have been replaced by computers thanks to development in technology and the huge amount of data that are available today. Today, forecasts are generally made by algorithms that have been developed in the area called Artificial Intelligence (AI). These algorithms try to find relations between variables in which humans may not see clearly or do not have a mathematical function to describe the relation completely. AI algorithms use historical data of a particular phenomenon to model the forecasting mechanism, with the assumption that the data contains enough information which enable AI model to make future predictions.

Forecasting methods in AI realm can be divided into two subcategories according to mechanisms of the algorithms employ. Methods such as ARIMA [1] and Prophet [2] are specialized methods used only in forecasting. Another subarea of this field consists of Deep Learning (DL) methods, such as Long Short Time Memory (LSTM) [3], Artificial Neural Networks (ANN)[4], and Machine Learning (ML) algorithms such as Support Vector Machines (SVM)[5], K-Nearest Neighbors (KNN)[6]. While DL and ML methods are more commonly used for classification, image recognition, and image generation problems, these techniques can also be applied to forecasting by manipulating them. These methods have been shown to be effective through their ability to be readily adapted and their extensive application in forecasting domains, including electricity load forecasting [7,8], stock market prediction [9], and storm forecasting [10].

Inevitably, the power of these mentioned methods has been used in one of the hardest problems in forecasting; that is, numerical weather prediction from historical data. It is known that the weather itself is a chaotic system and making numerical weather prediction is a challenging problem [11,12]. However, both DL and ML methods have been used in numerical weather forecasting. A detailed comparison of ML and DL methods can be found in [13] where the authors thoroughly analyzed the performance of these methods in forecasting the weather using the NCDC data set. Another study that suggests a DL method specifically showed that a small error rate can be achieved when predicting wind speed in the weather [14]. Since long term weather forecasting is likely prone to errors, short term forecasting is the best option for the task at hand, and such a study can be found in [15] where the authors proposed a model that improved forecast accuracy up to 3 days in advance. The weather forecasting studies involve not only temperature forecasting, but also involve forecasting the general results of weather behavior such as tsunamis, typhoons, etc. Such a study can be found in [16] where the authors proposed a DL mechanism to predict the intensity of the typhoons in advance.

However, both the DL and ML methods have several drawbacks. A major drawback of these algorithms is their parameters are determined through trial and error. As a result, each combination of parameters may yield different results. In other words, finding the parameters that give the best accuracy is an exhausting process. Besides, both DL and many of the ML methods are black-box algorithms, which means that they are not easily interpreted by humans.

The problem of these black-box approaches can be solved with Genetic Programming (GP) [17]. Due to its simplicity and power, it is also used in forecasting problems [18,19]. GP is also utilized for

weather-related problems. A recent study using GP's power predicted rainfall prediction [20]. The results indicated by the authors suggested that GP outperformed most of the fundamental ML algorithms. Another study that employed GP for water level forecasting can be found in [21].

These algorithms have proven their strengths in the forecast area by achieving high accuracies. However, especially the weather forecasting has an inevitable consequence, which is the error produced by the constructed model. It occurs especially when forecasting distant horizons [22]. This error is a numerical quantity, and it does give only bare information about the developed model. However, supporting this error quantity with a confidence interval is important in the forecasting studies. Given that weather dynamics are influenced by various independent attributes (pressure, humidity, etc.), even a slight change in one of these attributes can significantly impact the forecasting model. Thus, providing a confidence level for the model when making numerical weather predictions enhances our understanding of the model's performance.

However, forecasting methods combined with confidence interval (CI) in the literature are scarce and should be used more often. Another issue in this area is the lack of an experimental study that extensively analyzes the effect of historical data on different forecast horizons.

With these progresses and shortcomings in the literature in mind, the major problems of numerical weather predictions can be summarized as follows:

- Models that are understandable by humans are needed,
- CI-based weather forecasting should be a standard approach,
- Effects of historical data on weather forecasting should be analyzed.

In this study, GP combined with Inductive Conformal Prediction (ICP), was analyzed. Also, the effects of historical data on different forecast horizons were shown experimentally. In the present work, 10 and 20 days were used as historical information. Forecast horizons were selected as 1 day, 3 days, and 5 days. Different GP models were constructed for each horizon. Moreover, the generated models by GP were tested monthly to see their genuine performances. Dataset used in the experiments was chosen as Jena Weather Dataset which has historical weather data from 2004 to 2020 [23].

The rest of the paper is organized as follows: Section II describes the dataset, GP, ICP, and design of the experiments. Section III presents the results of the experiments. Inferences and comments about the experimental results are also given in Section III. Finally, the conclusion and possible future works are given in Section IV.

II. MATERIAL AND METHOD

In this section, the dataset used in the experiments is explored, decent information about GP and ICP are given to reader and finally the experiment schema is explained.

A. DATASET

The dataset used in the experiments is an open-source Jena dataset that possesses information such as temperature, CO₂ level, pressure, etc. that was collected from the city of Jena in Germany. Sensors collected distinctive attributes of the weather at 10-minutes intervals in that region.

The aim of the paper is to forecast the daily temperature at different horizons. Thus, by taking 24-hour averages of each day, the overall dataset was converted into a format as if the data acquisition interval was utilized at daily. Since numerical weather prediction is the experimental aim of this study, the dependent variable that GP models try to forecast by minimizing the error was selected as T(degC). Other attributes in the dataset were given to GP models as independent variables. (see [23] for more information on the dataset).

Month-based distribution of $T(\text{degC})$ is given in Figure 1. An examination of Figure 1 indicates that there is a predictable pattern in the data for each month, due to the fact that the data were collected from a relatively small region. Another feature of the dataset is that the maximum and the minimum values of each month oscillate between certain intervals, which means that the dataset does not have extreme outliers. One more observation can be made about the stationary status of the dataset. Month-based observations reveal that each month's weather behavior repeats itself through the years. Thus, it can be concluded that the dataset is stationary, so manipulation of the dataset for stationarity and seasonality is not needed. The next section briefly explains GP and ICP to readers so that they have decent information about them.

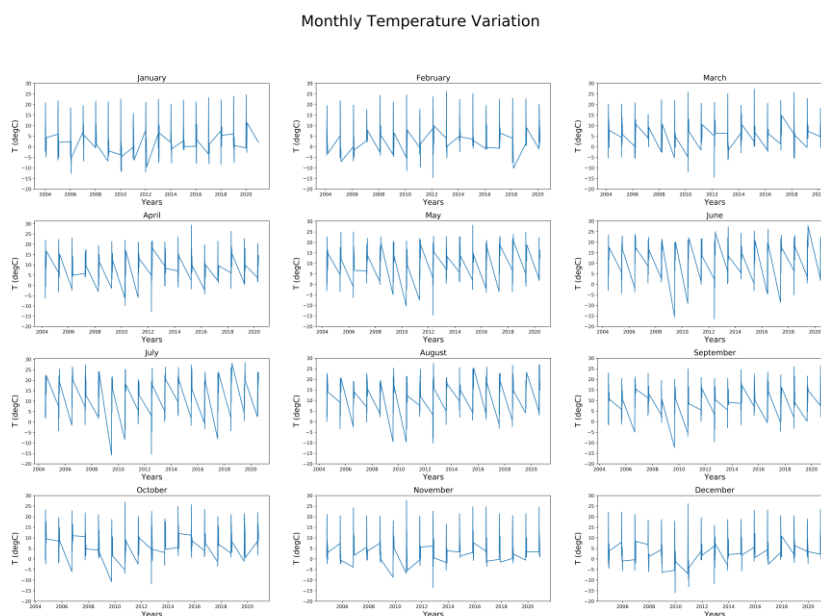


Figure 1. Monthly temperature variation

B. GENETIC PROGRAMMING

The Genetic Programming (GP) scheme is inspired by Charles Darwin's evolution theory. The theory indicates that the best suitable organism in nature has the highest chance of living and breeding. GP takes this idea and uses it to solve complex problems. The main concept in GP is to establish a mathematical relationship between inputs and outputs using basic mathematical functions such as addition, subtraction, and multiplication, or user-defined functions. GP begins its operations by constructing trees (called population); each tree is called an individual, and it is a possible solution to the problem. Each tree in GP has two essential components: a combination of functions selected from the function set, and a terminal set that corresponds to the attributes in the dataset. For the second step, each solution is evaluated by a fitness function that measures the error between the output that is generated by the individual and the actual output. After each solution is evaluated, the solutions generated by each individual are sorted in an ascending order (from the smallest error to the biggest error). Then, the best candidates for solutions are transferred to the next generation. To create diversity in the solutions, a crossover mechanism that combines different parts of two trees to originate a new tree and a mutation mechanism that randomly changes a function or a variable in a tree are applied. A general working mechanism of GP is shown in Figure 2.

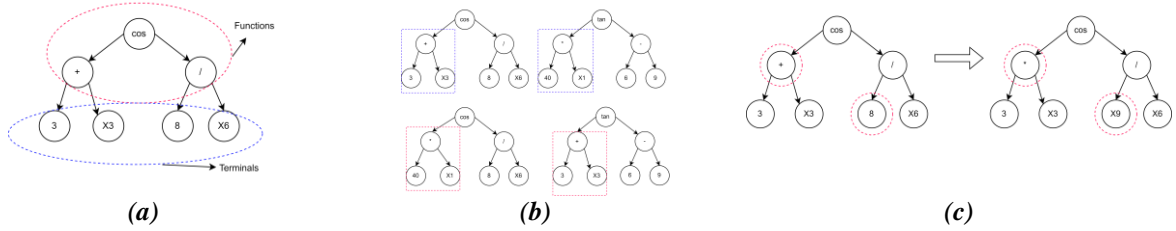


Figure 2. General Working Mechanism of Genetic Programming; (a) A constructed tree by GP; (b) Crossover between two trees; (c) A mutation occurred in a tree

Figure 2 (a) shows a possible solution generated by GP. X_n (X_3 and X_6) corresponds to attributes in the dataset. Figure 2 (b) graphically depicts the crossover mechanism between two trees, where random sub-branches of each tree are exchanged. Finally, Figure 2 (c) presents the mutation step of GP, where random changes occur in any node. The changes are made based on whether it is a function node or a terminal node.

This study uses GP since it does not require any human intervention in contrast to DL or ML methods. Another important advantage of GP is that it has a modifiable structure in terms of functions. Adding new functions is relatively easy and these functions may have a positive effect on the performance of the generated models. Finally, models that are constructed by GP are easily understandable by humans since they will be simple mathematical functions.

The next section briefly explains the ICP that was selected as the CI method in this paper.

C. INDUCTIVE CONFORMAL PREDICTION

The Inductive Conformal Prediction (ICP) is a model-free method to ensure confidence and coverage [24]. Generally, in either DL models or regression models in ML, the output is a single continuous number. However, the range of outcomes should be specified for a particular input when making a prediction using a model. Since ICP is easy to use with any algorithm in AI, it was selected in this study.

Successfully applying ICP to a forecasting model requires dividing the dataset into three distinct subsets: the train set, test set, and validation set. The overall algorithm for ICP is given below:

1. Divide the dataset into three subsets. $D_{all} = D_{train} + D_{test} + D_{val}$
2. Train D_{train} with the model M using (x_i, y_i) set and obtain the loss L , where $L = F(x_i, y_i)$ and $x_i, y_i \in D_{train}$
3. Compute L_i for each (x_i, y_i) where $(x_i, y_i) \in D_{test}$
4. Calculate quantile q using L_i from the Step 3 and $\frac{[(n_{test}+1)(1-\alpha)]}{n_{test}}$ where n_{test} is the number of points in D_{test} and α is the error rate between (0,1).
5. Finally, calculate the confidence interval of the model using $[M(x_i) - q, M(x_i) + q]$ where $(x_i, y_i) \in D_{val}$.

α is selected as 0.1 in the experiments, which means that we wanted the generated modes to be sure of %90 in their predictions. However, due to the stochastic nature of generated models, this percentage may not be satisfied all the time.

D. EXPERIMENTAL DESIGN

Forecasting datasets are generally constructed in a time series format, and for algorithms such as ARIMAX and Prophet, forecasting datasets can be used without modification. However, for ML algorithms including GP, the modification of the dataset is a must. For any ML algorithm, it is essential that every input in the dataset has a corresponding output. Modification of the dataset to align with this requirement is necessary. The graphical interpretation of this idea is given in Figure 3.



Figure 3. An example of a time series conversion step

In Figure 3, a one-step lagged (referred to as day(s) in this paper) supervised version of a hypothetical time series is given. Following this fashion, the Jena dataset was modified so that it contains 10 days of historical data. The same approach was applied again to construct 20 days of historical data. The historical data was utilized to make predictions regarding the weather for 1, 3, and 5 days in advance.

Another crucial aspect of conducting an ML experiment is to divide the dataset into train, test, and validation subsets. Therefore, the overall dataset was divided as %80 training set, %10 test set and %10 validation set. In this study, the validation set were used to generate prediction confidence interval and coverage, as mentioned in Section II. The division scheme is presented in Figure 4.

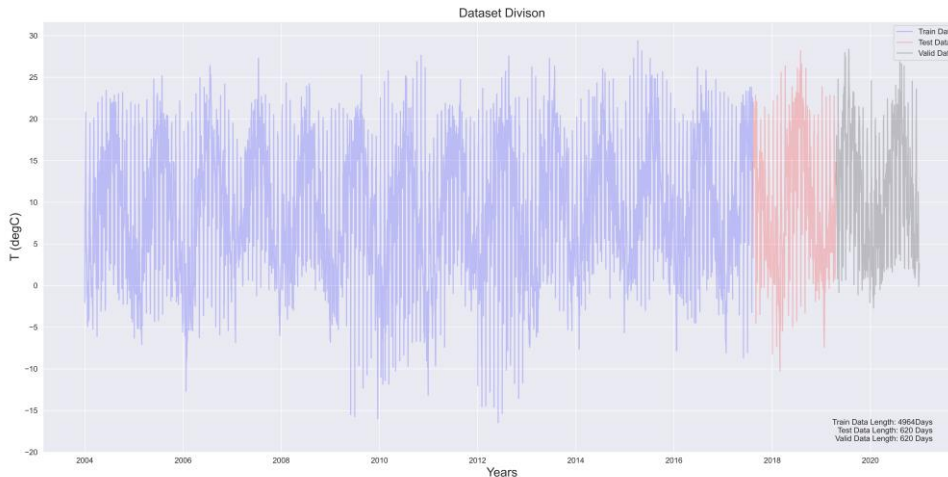


Figure 4. Dataset division

4964 days of the dataset were reserved for training, which corresponds to 13.6 years of data. The remaining data was divided equally into test and validation sets, with each set consisting of the same number of days. One of the main distinctions of the experiment is that the models that were generated using the train set were tested and validated monthly. The test set and validation set were divided into 12 months and the models were evaluated for each month separately. Each month has a different characteristic as can be seen in Figure 1. Therefore, conducting monthly evaluations of the models could yield a more comprehensive assessment of their performance.

For GP part, the experiments were carried out for 100 generations, each having 5000 individuals. In each generation, 20 individuals with the highest performance were selected for the next generation. The crossover rate and the mutation rate were %80 and %0.05 respectively. The general settings of the experiments for GP are given in Table 1 and the general schema of the experiments is shown in Figure 5.

Table 1. Parameters for GP

Parameters	Value(s)
Non-Terminals [25]	+,*,/,sqrt,max,log,abs,inv,max,min
Terminals	Features in [23]
Generations	100
Population Size	5000
# of Individuals for Next Generation	20
Crossover Probability- Mutation Probability	%80- %0.05

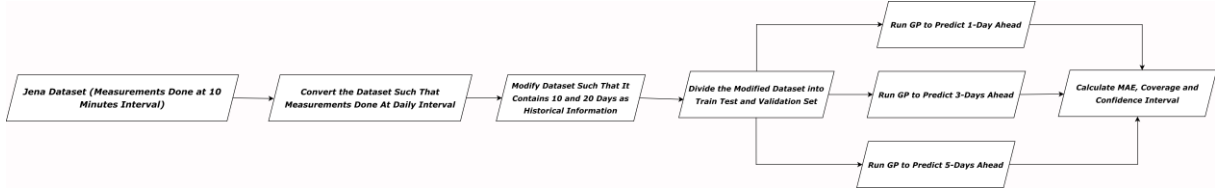


Figure 5. Overall experiment schema

Finally, Mean Absolute Error (MAE) was utilized as a loss function to indicate the error rate of the generated models. The MAE function is given in (1).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (1)$$

where n is the total number of data points, y_i is true continuous value and \hat{y}_i is the forecasted value by the model. All data were normalized before the experiments. Python (version 3.8) programming language was used for the experiments. The next section presents the experimental results and discusses their possible interpretations.

III. RESULTS

The results of the Mean Absolute Error (MAE) computed using 10 and 20 days of historical information for different horizons, are presented in a side-by-side manner in Figure 6 for ease of comparison. It shows MAE results for 100 generations when different amount of past information was used. It also depicts the behavior of the generated models as the forecast horizon advances.

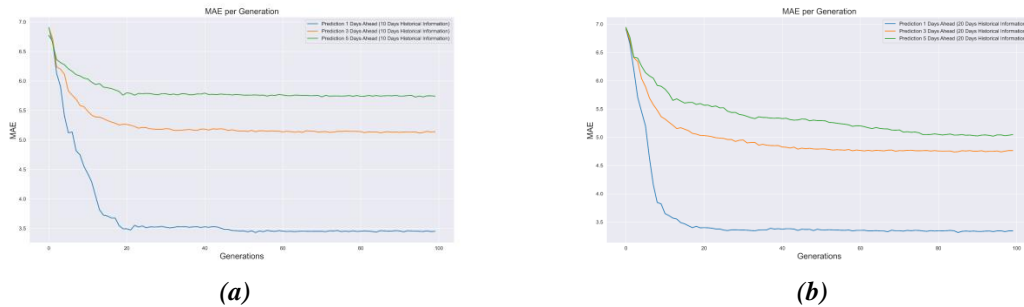


Figure 6. Train Performance on GP Programs for Different Historical Information and Forecast Horizons; (a) MAE Results for different forecast horizons using 10 days as information in Training; (b) MAE Results for different forecast horizons using 20 days as information in Training (Best Viewed Online)

The results showed that the model created by GP to forecast 1 day in advance had a lower error rate compared to the models developed by GP to forecast 3 and 5 days in advance. This statement is valid for both 10 and 20 days of data when they were used as historical information. The MAE was 3.45 when 10 days of historical information were used to forecast 1 day in advance. However, this error

rate seemed to increase as the forecast horizon progressed. MAEs for forecasting 3 and 5 days in advance were 5.13 and 5.74, respectively when 10 days of historical information were used.

An important insight that can be derived from the experiment is that there was a substantial discrepancy between forecasting 1 day in advance and 3 days in advance. However, this discrepancy did not arise between forecasting 3 days in advance and 5 days in advance. It can be interpreted that there was not much difference in forecasting between forecasting 3 days and 5 days in advance. The same things could be said for 20 days of information when it was used as past information. MAEs for forecasting 1 day, 3 days and 5 days in advance were 3.43, 4.76, 5.04 respectively. These results suggested that there were no significant changes in MAEs when the amount of information changed. These mentioned results are given in Table 2.

Table 2. Training Performance of Models Generated by GP (MAE Results)

Historical Information Forecast Horizon	10 Days of Information	20 Days of Information
1 Day Ahead	3.45	3.43
3 Days Ahead	5.13	4.76
5 Days Ahead	5.74	5.04

As mentioned before, the models generated by GP were tested monthly. The test and validation set were divided monthly, and the models were tested on each month separately. The test set performance of the models generated by GP is given in Table 3. The generated models are given in Table 4.

Table 3. Test Set Performance of Models Generated by GP

	1 Day Ahead Forecast		3 Days Ahead Forecast		5 Days Ahead Forecast	
	MAE		MAE		MAE	
	10 Days of Information	20 Days of Information	10 Days of Information	20 Days of Information	10 Days of Information	20 Days of Information
January	3.28	3.24	5.96	5.15	7.25	5.13
February	2.93	3.47	6.34	5.31	7.79	5.70
March	3.51	3.44	5.84	5.21	6.35	4.89
April	3.51	3.18	4.91	5.16	5.30	6.52
May	3.95	3.59	5.77	5.59	6.42	6.13
June	4.13	3.62	4.93	4.38	5.00	3.71
July	3.85	3.86	6.70	5.72	7.32	5.42
August	3.25	3.18	5.51	4.91	5.53	5.14
September	3.82	3.44	4.50	4.40	4.41	4.43
October	3.80	3.12	3.61	4.03	4.12	4.49
November	2.82	2.78	4.70	4.03	6.17	4.60
December	2.59	2.66	5.32	4.32	6.08	4.10

Although the training set MAE results of the methods gave the general performance, when the month-based approach was used for the test, it was observed that the performance of the models was inconsistent and varied. Table 3 reveals that more information from the past did not necessarily improve the forecasting results. The experiments indicated that forecasting 1 day in advance using 10 and 20 days as information resulted in lower MAE compared to other forecast horizons.

Table 4. Generated Models by the GP

	1 Day Horizon (X_n indicates an attribute in the dataset)
10 Days as Information	$\text{add}(\text{add}(X_{182}, X_{183}), \text{add}(\text{sqrt}(\max(\log(X_{187}), \text{div}(X_{198}, X_{51}))), \text{add}(\text{add}(X_{182}, \text{add}(X_{182}, X_{183})), \text{sqrt}(\text{inv}(X_{191}))))))$
20 Days as	$\text{add}(\text{add}(\text{add}(\text{sub}(\text{add}(\text{add}(\text{inv}(\text{sqrt}(X_{251}))), X_{381}), X_{383}), \log(X_{191})), \text{add}(X_{381}, X_{397})), \text{add}(X_{381},$

Information	$X_{397}), X_{381})$
3 Days Horizon (X_n indicates an attribute in the dataset)	
10 Days as Information	$\text{add}(\text{sub}(\text{sqrt}(\text{inv}(X_{71})), \text{log}(\text{min}(X_{171}, X_{181}))), \text{add}(X_{41}, \text{add}(\text{add}(X_{198}, \text{abs}(X_{105})), \text{add}(\text{max}(X_{118}, X_{197}), X_{62}))))$
20 Days as Information	$\text{add}(\text{add}(\text{add}(\text{add}(\text{inv}(0.273)), \text{inv}(\text{sqrt}(X_{251}))), \text{add}(X_{381}, \text{min}(X_{241}, X_{37}))), \text{add}(\text{max}(X_{297}, X_{397}), \text{add}(\text{min}(X_{289}, X_{18}), X_{397}))), \text{add}(X_{381}, \text{min}(X_{261}, X_{18}))), \text{mul}(X_{281}, X_{82}))$
5 Days Horizon (X_n indicates an attribute in the dataset)	
10 Days as Information	$\text{add}(X_{197}, \text{sub}(\text{add}(X_{81}, \text{add}(X_2, \text{sqrt}(\text{inv}(X_{131}))))), \text{sub}(\text{sub}(\text{log}(X_{31}), X_{125}), X_{101})))$
20 Days as Information	$\text{add}(\text{add}(\text{add}(\text{add}(\text{add}(X_{56}, \text{add}(\text{sqrt}(\text{inv}(0.273))), \text{inv}(0.273))), X_{283}), \text{add}(\text{add}(\text{add}(\text{add}(\text{inv}(0.273)), \text{mul}(X_{37}, X_{302})), \text{mul}(\text{max}(X_{25}, X_{117}), X_{345}))), \text{mul}(X_{61}, X_{261})), \text{add}(X_{397}, X_{77}))), X_{18}), \text{min}(X_{138}, X_{302}))$

However, calculating MAE alone for the test set does not give the overall performance of the methods generated by GP. Confidence and coverage area, that are lower and upper error limits of the models should be indicated. For that purpose, the test set and validation set were used together to calculate the confidence level and coverage area of the models. Table 5 shows these metrics and presents a more vivid picture on the performance of the models. In other words, it shows the overall performance of the models. The lowest bound (L) and the upper bound (U) show the lowest and highest values that the generated models may fluctuate.

Finally, coverage (C) gives the probability of the forecast that will result in between L and U. For example, the prediction results for November differed greatly as the forecasting horizon advances. As the forecasting horizon for November increased, the difference between the lower and upper bounds grew, causing the predictions to resemble random guesses. Similar deductions could be made for all months and forecasting horizons. Although coverage rates were high, the gap between L and U was also very high. Only models for forecasting 1 day in advance produced meaningful predictions.

Table 5. Test and Validation Set Performance with Error Limits and Coverage

	1 Day Ahead Forecast		3 Days Ahead Forecast		5 Days Ahead Forecast	
	MAE with Lower (L) and Upper (U) Limit and Coverage (C)					
	10 Days of Information	20 Days of Information	10 Days of Information	20 Days of Information	10 Days of Information	20 Days of Information
January	$L=-1.49$ $MAE=3.28$ $U=13.55$ $C = \%87$	$L=0.30$ $MAE=3.24$ $U=13.74$ $C = \%87$	$L=-4.47$ $MAE=5.96$ $U=18.86$ $C = \%93$	$L=-6.80$ $MAE=5.15$ $U=17.74$ $C = \%93$	$L=-6.95$ $MAE=7.25$ $U=22.82$ $C = \%93$	$L=-8.18$ $MAE=5.13$ $U=18.15$ $C = \%93$
February	$L=-1.65$ $MAE=2.93$ $U=14.55$ $C = \%86$	$L=-0.64$ $MAE=3.47$ $U=15.77$ $C = \%89$	$L=-5.76$ $MAE=6.34$ $U=19.88$ $C = \%93$	$L=-5.14$ $MAE=5.31$ $U=17.20$ $C = \%93$	$L=-8.10$ $MAE=7.79$ $U=23.25$ $C = \%96$	$L=-7.60$ $MAE=5.70$ $U=19.53$ $C = \%93$
March	$L=-1.43$ $MAE=3.51$ $U=14.73$ $C = \%96$	$L=-0.59$ $MAE=3.44$ $U=15.77$ $C = \%93$	$L=-4.19$ $MAE=5.84$ $U=20.58$ $C = \%96$	$L=-3.45$ $MAE=5.21$ $U=17.57$ $C = \%93$	$L=-7.76$ $MAE=6.35$ $U=24.20$ $C = \%96$	$L=-4.79$ $MAE=4.89$ $U=17.83$ $C = \%93$
April	$L=1.81$ $MAE=3.51$ $U=19.22$ $C = \%100$	$L=2.67$ $MAE=3.18$ $U=19.02$ $C = \%100$	$L=-1.89$ $MAE=4.91$ $U=23.37$ $C = \%97$	$L=-2.52$ $MAE=5.16$ $U=23.52$ $C = \%100$	$L=-3.28$ $MAE=5.30$ $U=23.68$ $C = \%95$	$L=-3.55$ $MAE=6.52$ $U=24.30$ $C = \%100$
May	$L=3.25$ $MAE=3.95$ $U=21.12$ $C = \%96$	$L=3.62$ $MAE=3.59$ $U=21.43$ $C = \%95$	$L=2.62$ $MAE=5.77$ $U=21.57$ $C = \%83$	$L=1.13$ $MAE=5.59$ $U=22.70$ $C = \%90$	$L=-1.35$ $MAE=6.42$ $U=24.54$ $C = \%98$	$L=-0.04$ $MAE=6.13$ $U=23.70$ $C = \%96$
June	$L=6.25$ $MAE=4.13$ $U=25.86$ $C = \%93$	$L=7.30$ $MAE=3.62$ $U=24.81$ $C = \%91$	$L=3.17$ $MAE=4.93$ $U=25.14$ $C = \%85$	$L=2.17$ $MAE=4.38$ $U=27.71$ $C = \%93$	$L=2.32$ $MAE=5.00$ $U=25.33$ $C = \%88$	$L=5.55$ $MAE=3.71$ $U=24.22$ $C = \%81$
July	$L=6.81$ $MAE=3.85$ $U=24.54$ $C = \%88$	$L=7.55$ $MAE=3.86$ $U=24.39$ $C = \%88$	$L=1.03$ $MAE=6.70$ $U=28.54$ $C = \%93$	$L=2.34$ $MAE=5.72$ $U=28.35$ $C = \%98$	$L=0.55$ $MAE=7.32$ $U=28.62$ $C = \%93$	$L=3.41$ $MAE=5.42$ $U=28.34$ $C = \%95$
August	$L=8.34$ $MAE=3.25$ $U=21.07$ $C = \%82$	$L=8.93$ $MAE=3.18$ $U=21.22$ $C = \%85$	$L=0.34$ $MAE=5.51$ $U=27.91$ $C = \%95$	$L=-0.17$ $MAE=4.91$ $U=28.95$ $C = \%100$	$L=3.02$ $MAE=5.53$ $U=25.61$ $C = \%93$	$L=3.37$ $MAE=5.14$ $U=27.02$ $C = \%98$

<i>September</i>	<i>L=1.73</i>	<i>L=4.42</i>	<i>L=3.15</i>	<i>L=4.35</i>	<i>L=2.26</i>	<i>L=1.88</i>
	<i>MAE =3.82</i>	<i>MAE =3.44</i>	<i>MAE =4.50</i>	<i>MAE =4.40</i>	<i>MAE =4.41</i>	<i>MAE =4.43</i>
	<i>U=21.80</i>	<i>U=21.25</i>	<i>U=21.70</i>	<i>U=20.83</i>	<i>U=23.39</i>	<i>U=23.01</i>
	<i>C = %82</i>	<i>C = %93</i>	<i>C = %88</i>	<i>C = %86</i>	<i>C = %95</i>	<i>C = %95</i>
<i>October</i>	<i>L=0.82</i>	<i>L=3.77</i>	<i>L=1.22</i>	<i>L=-0.45</i>	<i>L=1.15</i>	<i>L=0.59</i>
	<i>MAE =3.80</i>	<i>MAE =3.12</i>	<i>MAE =3.61</i>	<i>MAE =4.03</i>	<i>MAE =4.12</i>	<i>MAE =4.49</i>
	<i>U=17.55</i>	<i>U=16.70</i>	<i>U=18.05</i>	<i>U=18.68</i>	<i>U=19.29</i>	<i>U=18.12</i>
	<i>C = %95</i>	<i>C = %93</i>	<i>C = %90</i>	<i>C = %95</i>	<i>C = %88</i>	<i>C = %80</i>
<i>November</i>	<i>L=0.26</i>	<i>L=0.04</i>	<i>L=-2.79</i>	<i>L=-3.65</i>	<i>L=-3.26</i>	<i>L=-4.04</i>
	<i>MAE =2.82</i>	<i>MAE =2.78</i>	<i>MAE =4.70</i>	<i>MAE =4.03</i>	<i>MAE =6.17</i>	<i>MAE =4.60</i>
	<i>U=12.10</i>	<i>U=13.78</i>	<i>U=16.70</i>	<i>U=15.51</i>	<i>U=19.91</i>	<i>U=16.46</i>
	<i>C = %83</i>	<i>C = %90</i>	<i>C = %93</i>	<i>C = %90</i>	<i>C = %96</i>	<i>C = %91</i>
<i>December</i>	<i>L=-0.98</i>	<i>L=0.58</i>	<i>L=-5.07</i>	<i>L=-4.76</i>	<i>L=-5.45</i>	<i>L=-5.50</i>
	<i>MAE =2.59</i>	<i>MAE =2.66</i>	<i>MAE =5.32</i>	<i>MAE =4.32</i>	<i>MAE =6.08</i>	<i>MAE =4.10</i>
	<i>U=13.26</i>	<i>U=13.20</i>	<i>U=18.42</i>	<i>U=16.39</i>	<i>U=21.34</i>	<i>U=17.26</i>
	<i>C = %95</i>	<i>C = %85</i>	<i>C = %96</i>	<i>C = %93</i>	<i>C = %96</i>	<i>C = %89</i>

One important argument which can be deduced from the experiments is that, for numerical weather predictions, increasing the volume of past information does not affect the results positively. Another argument that can be exposed from the experiments is that GP has the potential for usage in this area, although modification of built-in functions or adding new functions may be necessary. Moreover, it has been shown that the performance of the models can be seen more vividly when ICP is used.

IV. DISCUSSION AND CONCLUSION

Forecasting is a challenging problem in the area of AI, and it is an ongoing research subject for this field. It is mainly based on past observations of the attributes in the dataset, which can be called independent variables, and it is assumed that they represent enough information to predict the dependent variable. Using these assumptions, DL and ML methods which are a subset of AI are utilized. One of the important fields of forecasting is numerical weather prediction. Weather systems are complex systems and difficult to forecast numerically. But the power of ML algorithms may be utilized in this purpose to help researchers at least. However, one important issue for ML algorithms is that they are black box algorithms that are not easily interpretable by humans.

In addition to the interpretability issue of ML in forecasting, forecasting alone is not enough since it is fundamentally prone to errors. For that reason, the confidence and coverage rate of the predictions should be provided with the forecasting models.

In this study, the GP was proposed for interpretability and ICP was proposed for a confidence interval. They were combined to forecast weather temperatures at various horizons using different amount of historical data. Unlike the classical approaches, the testing and validation phases of the experiments were conducted monthly using the Jena dataset. First, the dataset was modified and made suitable for GP, since it works in the format of input-output sequences. Effects of different amount of information, namely 10 and 20 days, were investigated at different horizons, namely 1 day, 3 days and 5 days.

The experimental results showed that even forecasting 1 day in advance was prone to error and increasing the volume of data did not decrease the error. Usage of the ICP approach revealed that the gap between the lower and upper limits of the predictions became so large that the predictions became almost random when forecasting 3 days and 5 days in advance.

We can list some of the possible ideas that could enhance the work presented in this paper. First, the optimal number of past days that maximize information could be investigated. Additionally, the attributes that have the greatest impact on reflecting weather conditions could be examined. This work may be enhanced in the ways mentioned above, which could serve as future work.

V. REFERENCES

- [1] Y. Ning, H. Kazemi, and P. Tahmasebi, "A comparative machine learning study for time series oil production forecasting: ARIMA, LSTM, and Prophet," *Computers & Geosciences*, vol. 164, p. 105126, 2022.
- [2] S. J. Taylor and B. Letham, "Forecasting at Scale," *The American Statistician*, vol. 72, no. 1, pp. 37–45, 2018.
- [3] W. Kong, Z. Y. Dong, Y. Jia, D. J. Hill, Y. Xu, and Y. Zhang, "Short-term residential load forecasting based on LSTM recurrent neural network," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 1, pp. 841–851, 2017.
- [4] X. Xiao, H. Mo, Y. Zhang, and G. Shan, "Meta-ANN—A dynamic artificial neural network refined by meta-learning for Short-Term Load Forecasting," *Energy*, vol. 246, p. 123418, 2022.
- [5] S. R. Ghaffari-Razin, A. R. Moradi, and N. Hooshangi, "Modeling and forecasting of ionosphere TEC using least squares SVM in central Europe," *Advances in Space Research*, vol. 70, no. 7, pp. 2035–2046, 2022.
- [6] F. Li and G. Jin, "Research on power energy load forecasting method based on KNN," *International Journal of Ambient Energy*, vol. 43, no. 1, pp. 946–951, 2022.
- [7] M. Lehna, F. Scheller, and H. Herwartz, "Forecasting day-ahead electricity prices: A comparison of time series and neural network models taking external regressors into account," *Energy Economics*, vol. 106, p. 105742, 2022.
- [8] A. Brusaferrri, M. Matteucci, P. Portolani, and A. Vitali, "Bayesian deep learning based method for probabilistic forecast of day-ahead electricity prices," *Applied Energy*, vol. 250, pp. 1158–1175, 2019.
- [9] X. Gong, W. Zhang, W. Xu, and Z. Li, "Uncertainty index and stock volatility prediction: evidence from international markets," *Financial Innovation*, vol. 8, no. 1, pp. 1–44, 2022.
- [10] F. Baart, M. van Ormondt, J. van T. de Vries, and M. van Koningsveld, "Morphological impact of a storm can be predicted three days ahead," *Computers & Geosciences*, vol. 90, pp. 17–23, 2016.
- [11] R. Buizza, "Chaos and weather prediction January 2000," European Centre for Medium-Range Weather Meteorological Training Course Lecture Series ECMWF, 2002.
- [12] H. R. Biswas, M. M. Hasan, and S. K. Bala, "Chaos theory and its applications in our real life," *Barishal University Journal Part*, vol. 1, no. 5, pp. 123–140, 2018.
- [13] I. Gad and D. Hosahalli, "A comparative study of prediction and classification models on NCDC weather data," *International Journal of Computers and Applications*, vol. 44, no. 5, pp. 414–425, 2022.
- [14] H. Yang, J. Yan, Y. Liu, and Z. Song, "Statistical downscaling of numerical weather prediction based on convolutional neural networks," *Global Energy Interconnection*, vol. 5, no. 2, pp. 217–225, 2022.

- [15] J. Frnda, M. Durica, J. Rozhon, M. Vojtekova, J. Nedoma, and R. Martinek, "ECMWF short-term prediction accuracy improvement by deep learning," *Scientific Reports*, vol. 12, no. 1, pp. 1–11, 2022.
- [16] G. Xu, K. Lin, X. Li, and Y. Ye, "SAF-Net: A spatio-temporal deep learning method for typhoon intensity prediction," *Pattern Recognition Letters*, vol. 155, pp. 121–127, 2022.
- [17] E. K. Burke, G. Kendall (Eds.), "Search methodologies: introductory tutorials in optimization and decision support techniques". *Springer*, 2014.
- [18] O. Claveria, E. Monte, and S. Torra, "A Genetic Programming Approach for Economic Forecasting with Survey Expectations," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 13, p. 6661, 2022.
- [19] E. Christodoulaki, M. Kampouridis, and P. Kanellopoulos, "Technical and sentiment analysis in financial forecasting with genetic programming," *2022 IEEE Symposium on Computational Intelligence for Financial Engineering and Economics (CIFER)*, 2022, pp. 1–8.
- [20] S. Cramer, M. Kampouridis, and A. A. Freitas, "Decomposition genetic programming: An extensive evaluation on rainfall prediction in the context of weather derivatives," *Applied Soft Computing*, vol. 70, pp. 208–224, 2018.
- [21] M. Sadat-Noori, W. Glamore, and D. Khojasteh, "Groundwater level prediction using genetic programming: the importance of precipitation data and weather station location on model accuracy," *Environmental Earth Sciences*, vol. 79, no. 1, pp. 1–10, 2020.
- [22] J. B. Elsner and A. A. Tsonis, "Nonlinear prediction, chaos, and noise," *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 73, no. 1, pp. 49–60, 1992.
- [23] B.Mnassri. (2021, April 06) "Weather Station Beutenberg Dataset." [Online]. Available: <https://www.kaggle.com/datasets/mnassrib/jena-weather-dataset>.
- [24] H. Papadopoulos, "Inductive Conformal Prediction: Theory and Application to Neural Networks", *Tools in Artificial Intelligence*. London, United Kingdom: IntechOpen, 2008.
- [25] Trevor Stephens (2016) "API reference – Symbolic Regressor" [Online]. Available: <https://gplearn.readthedocs.io/en/stable/reference.html#reference>



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Kırşehir il sınırları içerisinde Rüzgâr Enerjisi Santrali (RES) kurulumu için uygun sahaların mekânsal olarak belirlenmesi

Mehmet Seren KORKMAZ ^{a*}, Nur ÖZTÜRK ^a, Soner HARNUBOĞLU ^b

^a Meteoroloji Mühendisliği Bölümü, Özdemir Bayraktar Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Samsun Üniversitesi, Samsun, TÜRKİYE

^b ÜÇYEL ENERJİ Mühendislik ve Danışmanlık Hizmetleri San. Tic. Ltd. Şti., Ankara, Türkiye

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: mehmetkorkmaz@samsun.edu.tr

DOI: <https://doi.org/10.29130/dubited.1181883>

ÖZ

Bu çalışmada; Kırşehir il sınırları içerisinde rüzgâr enerjisi santrali (RES) kurulumu için uygun sahaların mekânsal olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, uygun sahaların tespit edilebilmesi için 15 kriter belirlenmiştir. Bu kriterler; rüzgâr hızı, güç yoğunluğu, yükseklik, eğim, pürüzlülük, arazi kullanımı, litoloji, enerji nakil hatlarına uzaklık, trafo merkezlerine uzaklık, yollara uzaklık, korunan alanlara uzaklık, kuş göç yolları, yerleşim alanlarına uzaklık, fay hatlarına uzaklık ve akarsulara uzaklıktır. Belirlenen kriterlerin değerlendirilebilmesi için gerekli coğrafi veriler, ilgili kuruluşlardan temin edilmiştir. Bu kriterlerin birbirlerine göre önem derecelerini belirleyebilmek için Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) yönteminden yararlanılmıştır. Kriterlerin önem dereceleri belirlenirken literatür taramasından faydalanılmıştır. Her kriter için çalışma sahasını kapsayacak mekânsal katmanlar oluşturulmuştur. Hesaplanan önem derecelerine göre 15 katman, ağırlıklı çakıştırma yapılarak uygunluk sınıflarına göre Kırşehir ili için RES uygunluk haritası oluşturulmuştur. Son olarak Kırşehir il sınırları içerisinde kurulu olan bir adet RES'in (GEYCEK RES) de kurulum için "çok uygun" sınıftaki sahada olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kırşehir, Rüzgâr Enerjisi, CBS, Analitik Hiyerarşi Süreci, Mekânsal Analiz

Spatial determination of suitable installation sites of Wind Power Plants (WPPs) within the provincial borders of Kırşehir

ABSTRACT

It is aimed to determine the suitable sites for the installation of a Wind Power Plant (WPP) within the provincial borders of Kırşehir spatially in this study. For this goal, 15 criteria have been chosen in order to determine suitable sites. Criteria for determining suitable sites can be sorted as wind speed, power density, elevation, slope, roughness, land use, lithology, distance to power transmission lines, distance to transform centers, distance to roads, distance to protected areas, bird migration routes, distance to settlement areas, distance to fault lines and distance to rivers. The necessary geographical data for the evaluation of the determined criteria were obtained from the relevant institutions. The Analytical Hierarchy Process (AHP) method is used to determine the importance levels of the criteria relative to each other. While calculating the weight values of the criteria, a literature review is made and these researches have been considered. The layers has been created for each criterion. WPP suitability map for Kırşehir province is created by making 15 layers, weighted overlays according to the calculated importance levels. Finally, it has been determined that one WPP (GEYCEK WPP) established within the provincial borders of Kırşehir is also in 'very suitable' areas of the study.

Keywords: Kırşehir, Wind Power, GIS, Analytical Hierarchy Process, Spatial Analysis

I. GİRİŞ

Yenilenebilir enerji, sürdürülebilir kalkınmanın önemli bir unsurudur [1]. 1850’li yıllarda başlayan sanayi devriminden itibaren artan enerji ihtiyacını karşılamada en başta fosil yakıt kullanımı gelmektedir [2]. Artan nüfus, küresel ısınmaya bağlı iklim değişikliği ve fosil yakıtların geri dönüşsüz olarak azalıyor olması, insanlığı tükenmeyen enerji kaynakları arayışına yönlendirmiş ve yenilenebilir enerji kullanımını neredeyse zorunlu hâle getirmiştir [3].

Rüzgâr, güneş, su, dalga, gelgit, biyokütle ve jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının, artan enerji ihtiyacını karşılaması ve yine yenilenebilir enerji kaynaklarının veriminin artırılması için yenilikçi teknolojiler geliştirmek üzere çalışmalar sürmektedir [3]. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında rüzgâr enerjisi; ticari kârlılık ve teknolojik gelişmişlik bakımından en yaygın kullanılan enerji çeşididir [4]. Sürdürülebilir bir enerji kaynağı olan rüzgâr enerjisi, karbon salınımı yapmamasından dolayı hava kirliliğine sebep olmamaktadır [5].

Rüzgâr Enerji Santrali (RES) kurulmadan önceki fizibilite çalışmaları çok önemlidir. Türbin yerlerinin belirlenmesi için uygun saha seçiminde Coğrafi Bilgi Sistemlerinin (CBS) kullanımı, zaman tasarrufu ve ekonomik fayda sağlamaktadır [6]. Hataların bilgisayar tarafından düzeltilmesi, verilerin düzenli şekilde saklanması, verilere kolay bir şekilde ulaşılması ve çözümlenip kolaylıkla yorumlanabilmesi, CBS’nin RES kurulumu için uygun saha seçimindeki kullanım avantajlarından [7]. Bununla beraber, farklı kaynaklardan elde edilen verilerin değerlendirilmesinde ve uygun “adayın” seçilmesi probleminde en çok başvurulan yöntemler, Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleridir [8]. ÇKKV yöntemlerinden en yaygın kullanılan Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) yöntemi; kriterlere ait elde edilen verileri hem kendi içerisinde hem de kriterlerin kendi aralarında hiyerarşik bir şekilde ağırlıklandırılması esasına dayanır. Bu şekilde çok sayıda kriterin ağırlıklarına dayalı olarak çözüm elde etmek amaçlanmaktadır [8].

Yapılan çalışmalara bakıldığında; Özşahin ve Kaymaz, Hatay ilinde RES kurulumuna uygun sahaları belirlemek amacıyla 15 kriter belirlemişlerdir. Bu kriterler sırasıyla; rüzgâr hız dağılımı, güç yoğunluğu, kapasite faktörü dağılımı, pürüzlülük, enerji nakil hatlarına uzaklık, trafo merkezlerine uzaklık, litoloji, fay hatlarına uzaklık, yer şekilleri, eğim, bakı, akarsulara uzaklık, arazi kullanımı ve yollara uzaklıktır. Araştırmacılar, ÇKKV yöntemlerinden AHS ile kriterlerin etki sınıfına göre etki değerleri belirlenmiş ve kriterler ağırlıklandırılmıştır. Ağırlıklandırılan kriterler mekânsal olarak CBS ortamına aktarılmış ve Hatay ili için RES kurulumu uygunluk haritası oluşturulmuştur [9].

Sedici; çalışmasını İzmir ili sınırlarında yer alan Karaburun Yarımadası için yapmıştır. Çalışmada 8 kriter belirlenmiştir. Bunlar; rüzgâr potansiyeli, koruma alanlarına uzaklık, yerleşim yerine uzaklık, orman, eğim, yükseklik, yollara uzaklık ve tarım alanıdır. Belirlenen kriterler AHS yöntemi ile ağırlıklandırılmış ve CBS ortamına aktarılmıştır. Bunun sonucunda ağırlıklı çakıştırma (weighted overlay) ile Karaburun Yarımadası için RES kurulumu uygun saha haritası çıkarılmıştır [6].

Can ve Yücel; Çanakkale ilinde RES projeleri için AHS kullanılarak uygun sahaların belirlenmesini hedeflemiştir. Bu hedef doğrultusunda 6 kriter belirlenmiş olup kriterler ikili karşılaştırma matrisi ile karşılaştırılmış ve ağırlık değerleri hesaplanmıştır. Sonrasında Çanakkale ili için RES uygunluk haritası CBS ortamında mekânsal olarak üretilmiştir. Ormanlık alanlar dahil edildiğinde ildeki kullanılabilir alanların %88’inin rüzgâr türbini kurulumuna uygun olduğu görülmüştür [10].

Arca ve Çıtıroğlu; Karabük ilinin Yenice ilçesi için uygun RES yapım yeri seçimi analizi yapmıştır. Bunun için ÇKKV yöntemlerinden AHS’yi kullanmışlardır. Çalışmada 10 kriter belirlenmiş olup kriterler ikili karşılaştırma yöntemleriyle ağırlıklandırılmıştır. Daha sonra çalışma sahası olan Yenice için RES uygunluk haritası elde edilmiştir [11].

Artun; çalışmasını Osmaniye ili için yapmıştır. 6 kriter belirlemiş, belirlenen kriterleri ÇKKV yöntemlerinden AHS ile ağırlıklandırmış ve üretilen RES uygunluk haritasına göre Osmaniye ilinin %14.30’unun RES kurulumu için uygun olduğunu belirlemiştir [12].

Aydiner; ÇKKV yöntemlerinden AHS'yi Ege Denizi'nde rüzgâr ve dalga enerjisi sistemlerinin yer seçimi için kullanmıştır. Yer seçim kriterleri olarak; rüzgâr hızı, belirgin dalga yüksekliği, deniz derinliği, deniz tabanı çökel tipleri, kıyıya uzaklık, limanlara uzaklık ve trafo merkezlerine uzaklık seçilmiştir. Kriterlere ait mekânsal veriler ilgili kuruluşlardan alınmış, kriterlerin ağırlıklarına göre dalga ve rüzgâr enerjisi için mekânsal uygunluk haritası oluşturulmuştur [13].

Urfalı ve Eymen; Kayseri ilinde RES için uygun arazilerin belirlenebilmesinde ÇKKV yöntemlerinden AHS'yi kullanmıştır. RES kurulumu için 12 kriter belirlenmiştir. Kriterlerden rüzgâr hızı, %23 ağırlık oranı ile hiyerarşik olarak en önemli kriter olmuş, ardından %17 ile rüzgâr kapasitesi ve %14 ile yükseklik kriterleri takip etmiştir. Belirlenen 12 kriter, kendi içerisinde 6 alt kritere ayrılmış olup her bir alt kriterin değer aralıkları hesaplanmıştır. Üretilen mekânsal veriler kullanılarak CBS ortamında Kayseri ili için RES kurulumuna uygun sahaları gösteren uygunluk haritası elde edilmiştir. Çalışmaya göre, Kayseri ilinde rüzgar enerjisi kurulumu için en uygun ilçeler Yahyalı ve Pınarbaşı ilçeleridir. Elde edilen uygunluk haritası, Rüzgar Enerji Potansiyeli Atlası (REPA) ile karşılaştırılınca sonuçların birbirine yakın olduğu görülmüştür [14].

Ekiz ve ark.; Kocaeli ili için RES mekânsal analizlerinde CBS'yi kullanmışlardır. Çalışmada 13 kriter belirlenmiş, kriterler kendi içlerinde 6 alt sınıfa ayrılmıştır. Kriterlerin önem dereceleri 2 şekilde analiz edilmiştir. İlk olarak kriterler ÇKKV yöntemlerinden AHS ile ağırlıklandırılmış ve *ArcGIS for Desktop* analiz edilmiştir. Diğer analiz şeklinde ise 13 kriter eşit ağırlıklandırılmış ve yine CBS araçları kullanılarak CBS ortamında analiz edilmiş ve Kocaeli için mekânsal uygunluk haritası oluşturulmuştur [15].

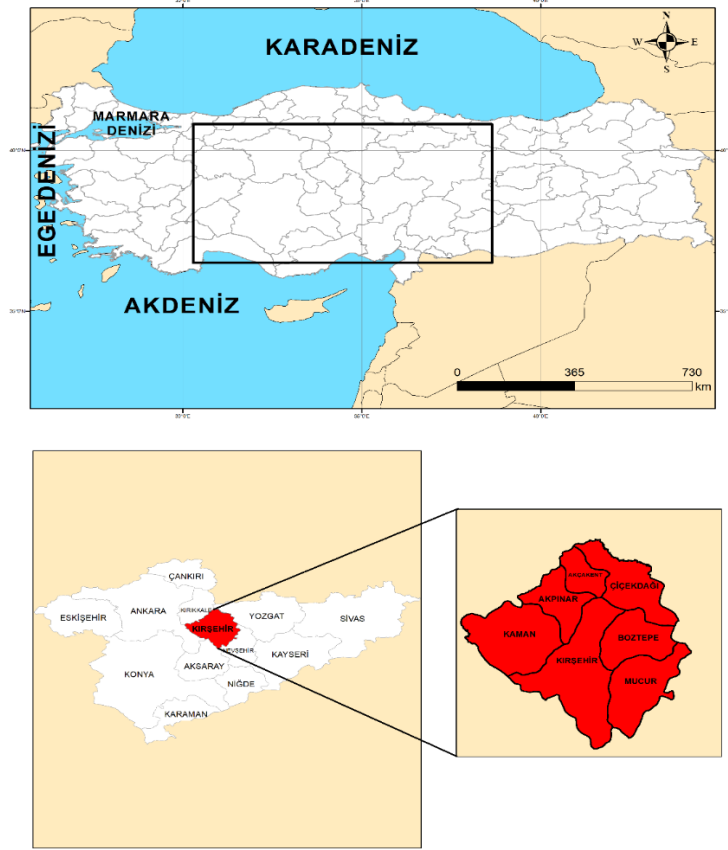
Görüldüğü gibi RES kurulumu için uygun saha seçiminde, farklı araştırmacılar tarafından çok sayıda kriter kullanılmaktadır. Bu çalışmada da RES kurulumu için uygun sahalar için kriterler belirlenirken yukarıda bahsedilen daha önceki çalışmalar göz önünde bulundurulmuştur.

Bu çalışmanın amacı, İç Anadolu Bölgesi'nde yer alan Kırşehir ili sınırları içerisinde RES kurulumu için uygun sahaların tespit edilerek enerji yatırımı çalışmalarına yardımcı olmaktır. Çalışma alanı olan Kırşehir ilinde RES kurulumu için uygun sahalar belirlenirken 15 kriter belirlenmiştir. Bunlar sırasıyla; rüzgâr hızı, rüzgar güç yoğunluğu, yükseklik, eğim, pürüzlülük, arazi kullanımı, litoloji, enerji nakil hatlarına uzaklık, trafo merkezlerine uzaklık, yollara uzaklık, korunan alanlara uzaklık, kuş göç yolları, yerleşim alanlarına uzaklık, fay hatlarına uzaklık ve akarsulara uzaklıktır. Bu kriterlere ait mekânsal katmanlar yardımıyla Kırşehir il geneli için RES uygunluk sahaları çeşitli uygunluk sahalarına göre belirlenmiştir. Son olarak da mevcutta il sınırlarında işletilmekte olan tek kurulu RES olan "Geycek RES" in de uygunluk haritasında 'çok uygun' olarak sınıflandırılan bir bölgede tesis edildiği görülmüştür.

II. MATERYAL ve YÖNTEM

A. ÇALIŞMA ALANI

Bu çalışmadaki çalışma alanı Kırşehir ilidir (**Şekil 1**). İç Anadolu Bölgesi'nde bulunan Kırşehir ilinin yüz ölçümü 6530 km²'dir [16]. Kırşehir'in yüksek çözünürlüklü sayısal yükselti modeli yardımı ile hesaplanan il geneli ortalama yüksekliği, 1146 metredir. Kırşehir'in en yüksek noktası, 1707 metre yüksekliğindeki Kervansaray Dağı'dır [17]. Kırşehir'de 2013 yılında kurulan *Geycek RES*, Mucur ilçesindedir ve 70 türbini ile 116000 kişinin yıllık elektrik tüketimini karşılamaktadır [18].



Şekil 1. Çalışma sahası lokasyon haritası

B. KULLANILAN VERİLER VE YAZILIM ARAÇLARI

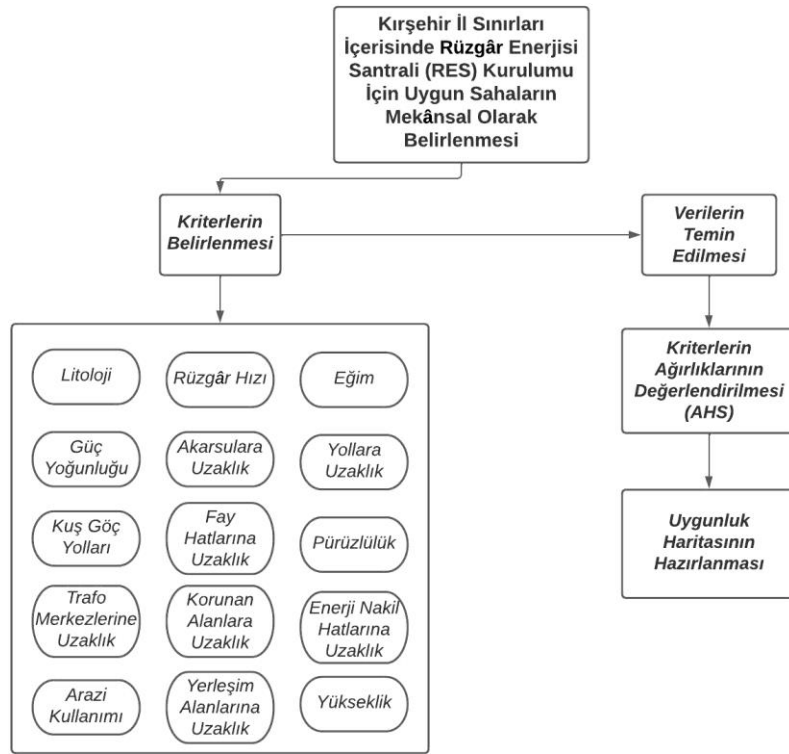
Bu çalışmada RES kurulumu için uygun sahaların mekânsal olarak tespit edilmesi için 15 kriter seçilmiştir.

Seçilen kriterler sırasıyla; rüzgâr hızı, güç yoğunluğu, yükseklik, eğim, pürüzlülük, arazi kullanımı, litoloji, enerji nakil hatlarına uzaklık, trafo merkezlerine uzaklık, yollara uzaklık, korunan alanlara uzaklık, kuş göç yollarına uzaklık, yerleşim alanlarına uzaklık, fay hatlarına uzaklık ve akarsulara uzaklıktır. Çalışmada oluşturulan katmanların elde edilmesinde yararlanılan veri kaynakları ve kuruluşlar Tablo 1’de gösterilmektedir. Çalışmada izlenen yol Şekil 2’de verilmektedir.

Seçilen kriterlere ait mekânsal veriler çözümlenirken Google Earth Pro ile ArcGIS for Desktop platformu ve araçları (*toolboxes*) kullanılmıştır. ArcGIS for Desktop, CBS alanında tüm dünyada yaygın olarak kullanılan bir CBS platformudur. İhtiyaçlara yönelik çok sayıda bileşene (araç, model, yazılım, veritabanı vb.) sahiptir [19]. Çalışmadaki coğrafi verilerin tamamı (raster-vektör) için işlemler **TUREF (Türkiye Ulusal Referans Çerçevesi) TM33 (EPSG:5255)** (3’’lik) datum ve koordinat sisteminde yapılmıştır. Bunun temel sebebi, ITRF96 tabanlı bir modern ve ulusal bir referans datum tanımlama sistemi olan TUREF’in, ED50 datumuna göre saha ölçümleri (surveying application) ile daha yüksek tutarlılıkla örtüşmesidir. Özellikle 1999 Marmara Depremi sonrası kurumların ürettiği ya da işlem yaptığı haritalarda görülen farklı epoklardaki koordinatlandırmalar, uygulamalarda birçok soruna yol açmıştır. Bu sebeple 2000 yılı sonrasında devlet kuruluşları tarafından genel olarak ITRF tabanlı ulusal datum olan TUREF datumuna geçilmesi yönünde çalışmalar yapılmıştır [20].

Tablo 1. Kriterler ve temin edildiği veri kaynakları

Sıra	Kriterler	Veri Kaynağı
1	Rüzgâr Hızı	Global Wind Atlas
2	Güç Yoğunluğu	Global Wind Atlas
3	Yükseklik	NASA EarthData ALOS Palsar
4	Eğim	Sayısal Yükseklik Modeli
5	Pürüzlülük	Sayısal Yükseklik Modeli
6	Arazi Kullanımı	Esri Land Cover 2020
7	Litoloji	MTA Genel Müdürlüğü
8	Enerji Nakil Hatlarına Uzaklık	Üçyel Enerji Müh Dan. Hiz. San. Tic. Ltd. Şti.
9	Trafo Merkezlerine Uzaklık	Üçyel Enerji Müh.Dan. Hiz. San. Tic. Ltd. Şti
10	Yollara Uzaklık	Openstreet Map
11	Korunan Alanlara Uzaklık	Doğa Koruma ve Millî Parklar Genel Müdürlüğü
12	Kuş Göç Yolları	Birdmap
13	Yerleşim Alanlarına Uzaklık	Openstreet Map
14	Fay Hatlarına Uzaklık	MTA Genel Müdürlüğü
15	Akarsulara Uzaklık	Sayısal Yükseklik Modeli



Şekil 2. Çalışma akış şeması

C. ANALİTİK HİYERARŞİ SÜRECİ (AHS) YÖNTEMİ İLE AĞIRLIKLARIN BELİRLENMESİ

“Kırşehir İl Sınırları İçerisinde Rüzgâr Enerjisi Santrali (RES) Kurulumu İçin Uygun Sahaların Mekânsal Olarak Belirlenmesi” adına ÇKKV yöntemlerinden AHS kullanılmıştır. Analitik Hiyerarşi Süreci’nin çalışma için kullanılmasındaki amaç uygun saha analizi haritasının üretilmesinde etkili olan kriterlerin hem kendi içlerinde hem de diğer kriterlere karşı üstünlüklerini subjektif (uzman görüşünü esas alacak şekilde) olarak belirlemektir. Bu çalışmada belirlenen 15 kritere ve alt kriterlere ait

ağırlıklandırılma yapılırken AHS ikili karşılaştırma yöntemi kullanılmıştır. İkili karşılaştırma yapılırken uzman görüşü yerine *bilimsel alanyazın çalışmaları göz önünde bulundurulmuş* ve ‘uygunluk sınıfları’ buna göre tespit edilmiştir. AHS yöntemindeki kriterlerarası ve alt kriterleri kendi içinde sınıflandırırken kullanılan puanlandırma *Saaty'nin 1-9 puanlı “göreceli öncelik değeri ölçeği”* [8] kullanılarak yapılmıştır (Tablo 2) .

Tablo 2. AHS görece öncelik ölçeği [8]

Önem Ölçeği	Açıklaması
1	Eşit Önem
3	Biraz Daha Önemli
5	Orta Derecede Daha Fazla Önem
7	Şiddetle Daha Fazla Önem
9	Çok Güçlü Bir Şekilde Daha Fazla Önem
2,4,6,8	Ara Değerler

Diğer bir deyişle, AHS yönteminin kullanılmasının gerekçesi, en başta kriterler için mekansal olarak elde edilen haritalarda hem kendi alt sınıflarının kendi içlerindeki üstünlüklerini belirlemek, ardından da kriterlerin kendi aralarında üstünlüklerini bir karar matrisi ile ortaya koymaktır. Böylelikle bir RES uygunluk haritasını üretmek için her bir kriterin kadar etkili olacağına dair ağırlıkları analitik olarak tespit edilmiş olmaktadır. Yapılan bu kurguya bağlı olarak çözüm için kurulacak hiyerarşi ilişkileri de Tablo 18’de belirtilmiştir

AHS’de önemli olan başka bir konu da tutarlılık oranıdır. Tutarlılık oranının %10’dan az olması beklenmektedir [18]. Tutarlılık indeksi (Consistency Index:CI), (1)’de belirtilen formül ile hesaplanır. Tutarlılık indeksinin 15 kriter için belirlenen 1,59 (Random Index:RI) değerine bölünmesiyle tutarlılık oranı (Consistency Ratio:CR) hesaplanır (2) [14].

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

λ_{max} : Bir kare matrisin özdeğerleri arasındaki en büyük değerdir. Hesaplayabilmek için öncelikle matrisinin her bir elemanı öncelikler vektörü elemanlarına bölünerek elde edilen yeni matris elemanlarının ortalaması alınmaktadır [8] .

n: kriter sayısı

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

Çalışmada CI 0,049 olarak hesaplanmıştır, kriterlerin tutarlılık oranı(CR) %3’tür ve bu değer %10’un altında olduğundan yapılan ikili karşılaştırmanın “tutarlı” olduğunu göstermektedir [8] .

III. BULGULAR

A. KRİTERLERE AİT MEKANSAL KATMANIN ÜRETİLMESİ

Belirlenen kriterlerin mekânsal katmanları için öncelikle bilimsel yazın araştırılmıştır. 15 kritere ait mekânsal haritaların üretilmesinde genel olarak *ArcGIS for Desktop* platformundaki yazılım ve araçlardan yararlanılmıştır.

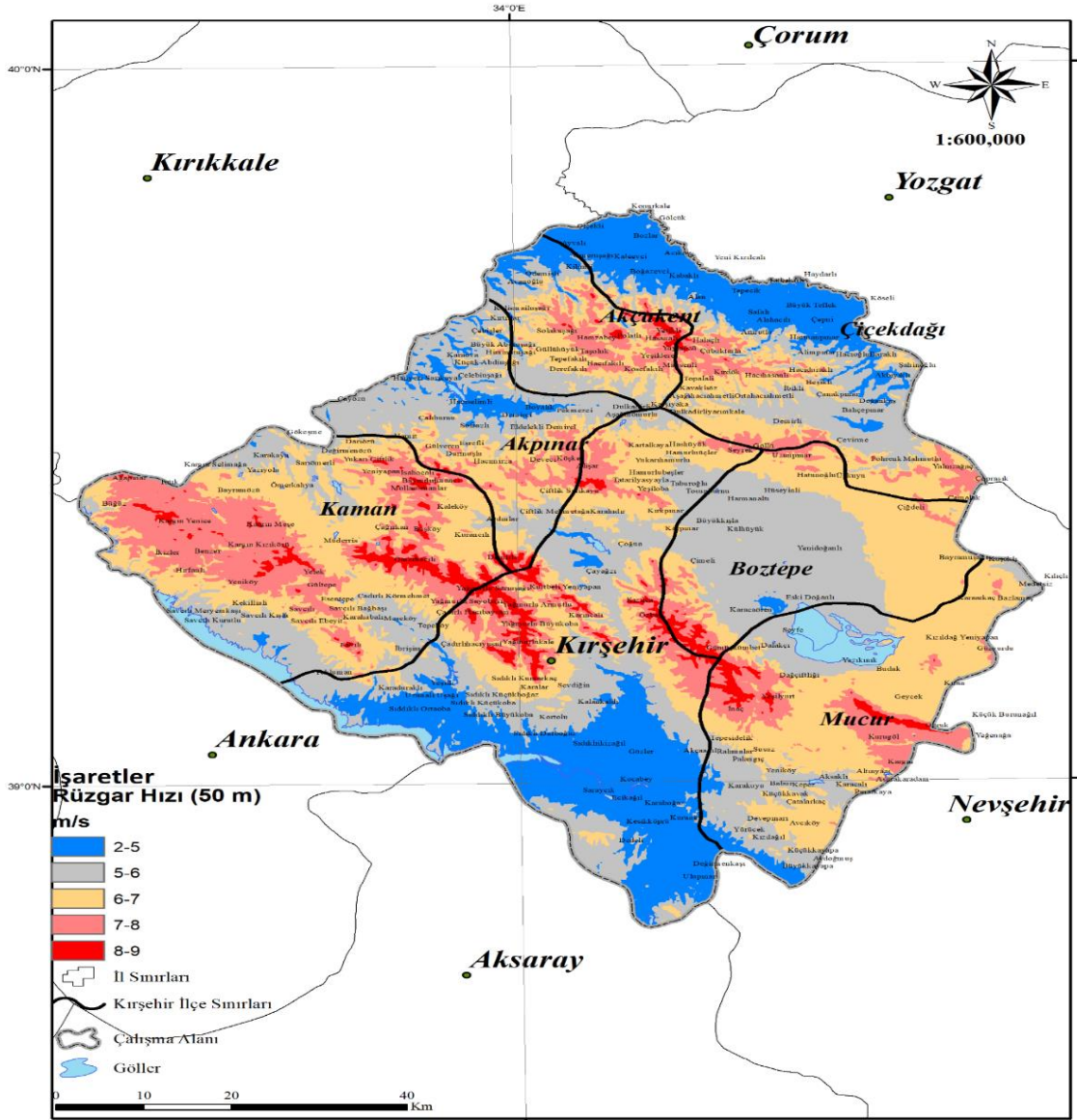
A.1. Rüzgâr hızı kriteri alt kriter ağırlıklandırması ve mekânsal katmanının üretilmesi

Ortalama rüzgâr hızı, RES kurulacak alanlar için önemlidir. 50 m yükseklikteki 5 m/s'den düşük rüzgâr hızı, rüzgâr enerjisi için yetersizdir [21]. Bu sebeple, ikili karşılaştırma matrisi tablosunda değerlendirmeler yapılmıştır. Rüzgâr hızı için 5 ayrı kriter ve AHS tablosunda ağırlıklar belirlenmiştir. AHS tutarlılık oranı %8 olarak hesaplanmıştır.

Rüzgâr hızı (**Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**) haritası için veriler Global Wind Atlas projesi kapsamında oluşturulan çevrimiçi sunucudan elde edilmiştir. Global Wind Atlas'daki rüzgâr hızı verileri; 2008-2017 yılları arasında Avrupa Orta Vadeli Hava Tahmin Merkezi (ing. ECMWF)'nin çeşitli atmosfer seviyeleri için üretilen paylaştığı "ERA5 Reanaliz" verilerinden yararlanılarak çeşitli türbülanslı akış yaklaşımları ile yatay çözünürlüğünün artırılmasıyla yapılmıştır [22]. Bahsi geçen Global Wind Atlas projesi kapsamında veri setlerinde 10 yıllık periyotta mekânsal olarak saatlik ortalama rüzgâr hızları hesaplanmıştır. Bu mekânsal rüzgâr hızı verisetleri farklı seviyelerde üretilmiş ancak rüzgâr enerjisi için genellikle uygulamada 50 m ve 100 m yükseklik için olanlar kullanılmaktadır. Bu çalışmada da Kırşehir ili için 50 m için rüzgâr hızlarına ait mekânsal verisetinden 'ortalama rüzgâr hızı katmanı' üretilmiştir. Katmanda gözlem periyodu boyunca 50 metre için "ortalama rüzgâr hızı(m/s)" gösterilmektedir ve 5 sınıfa ayrılmıştır (Tablo 3), (Şekil 3). Rüzgâr hızı haritasında görüldüğü gibi yüksek rüzgâr hızları 'daha uygun' olarak sınıflandırılmıştır. Hız düşüğe 'kademeli' olarak uygunluk sınıfı da düşmektedir.

Tablo 3 Rüzgâr hızı alt kriteri için ikili karşılaştırma matrisi ve ağırlık değerleri

Rüzgâr Hızı (m/s)	8-9	7-8	6-7	5-6	2-5	Ağırlıklar	
8-9	1	3	5	7	9	0,503	%50,3
7-8	1/3	1	3	5	7	0,260	%26,0
6-7	1/5	1/3	1	3	5	0,134	%13,4
5-6	1/7	1/5	1/3	1	3	0,068	%6,8
2-5	1/9	1/7	1/5	1/3	1	0,035	%3,5



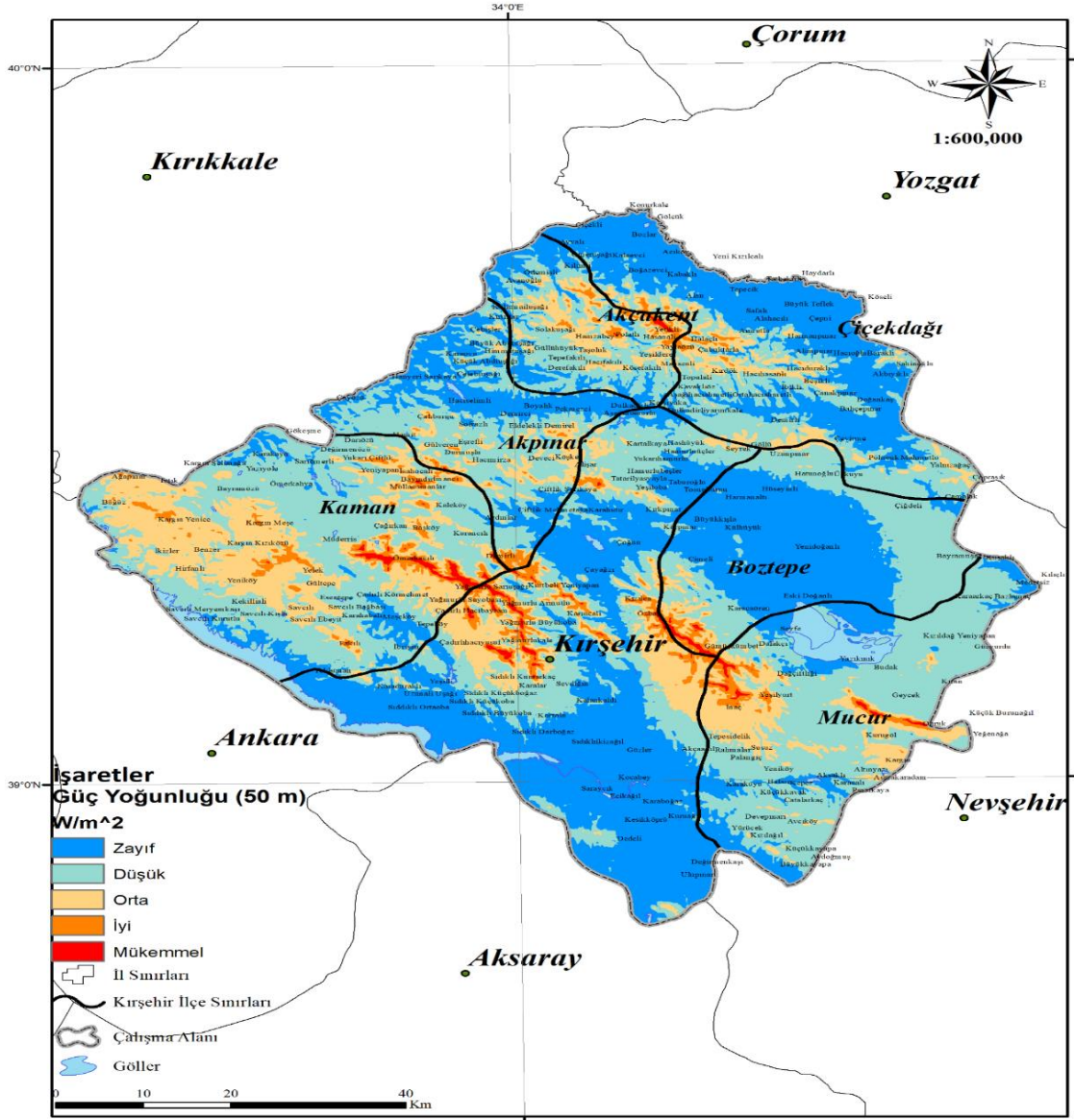
Şekil 3 Rüzgâr hızı haritası

A.2. Rüzgar güç yoğunluğu kriteri alt kriter ağırlıklandırması ve mekânsal katmanının üretilmesi

Rüzgar Güç yoğunluğu da RES kurulacak alanlar için teknik ve önemli bir kriterdir. Güç yoğunluğu katmanı (Şekil 4) için coğrafi veriler Global Wind Atlas'ın çevrimiçi sunucusundan temin edilmiş ve Kırşehir il sınırlarına göre kırılmıştır (ing. *cropping*) [22]. Güç yoğunluğu her ne kadar rüzgar hızına bağlı olarak değişse de topografya ve havanın yoğunluğu rüzgar güç yoğunluğunu etkileyen faktörlerdir [5]. Dolayısıyla 'rüzgar hızı' katmanına 'birebir' benzememektedir. Güç yoğunluğunun SI(Standart International) birim sistemindeki ölçü birimi W/m^2 'dir. Ancak bu çalışmada güç yoğunluğu kriterleri 'sözel' olarak 5'e ayrılmıştır (Tablo 4). RES kurulacak alanlar için "mükemmel güç yoğunluğu" istenen bir durumdur[9], bu sebeple AHS'de en fazla ağırlık değerine sahiptir. Ayrıca güç yoğunluğu için oluşturulan AHS ikili karşılaştırma matrisine göre AHS tutarlılık oranı % 8 olarak belirlenmiştir.

Tablo 4 Rüzgar Güç yoğunluğu alt kriteri için ikili karşılaştırma matrisi ve ağırlık değerleri

Güç Yoğunluğu (W/m²)	Mükemmel	İyi	Orta	Düşük	Zayıf	Ağırlıklar
Mükemmel	1	3	5	7	9	0,503 %50,3
İyi	1/3	1	3	5	7	0,260 %26,0
Orta	1/5	1/3	1	3	5	0,134 %13,4
Düşük	1/7	1/5	1/3	1	3	0,068 %6,8
Zayıf	1/9	1/7	1/5	1/3	1	0,035 %3,5



Şekil 4 Güç yoğunluğu haritası

A.3. Yükseklik alt kriter ağırlıklandırması ve mekânsal katmanının üretilmesi

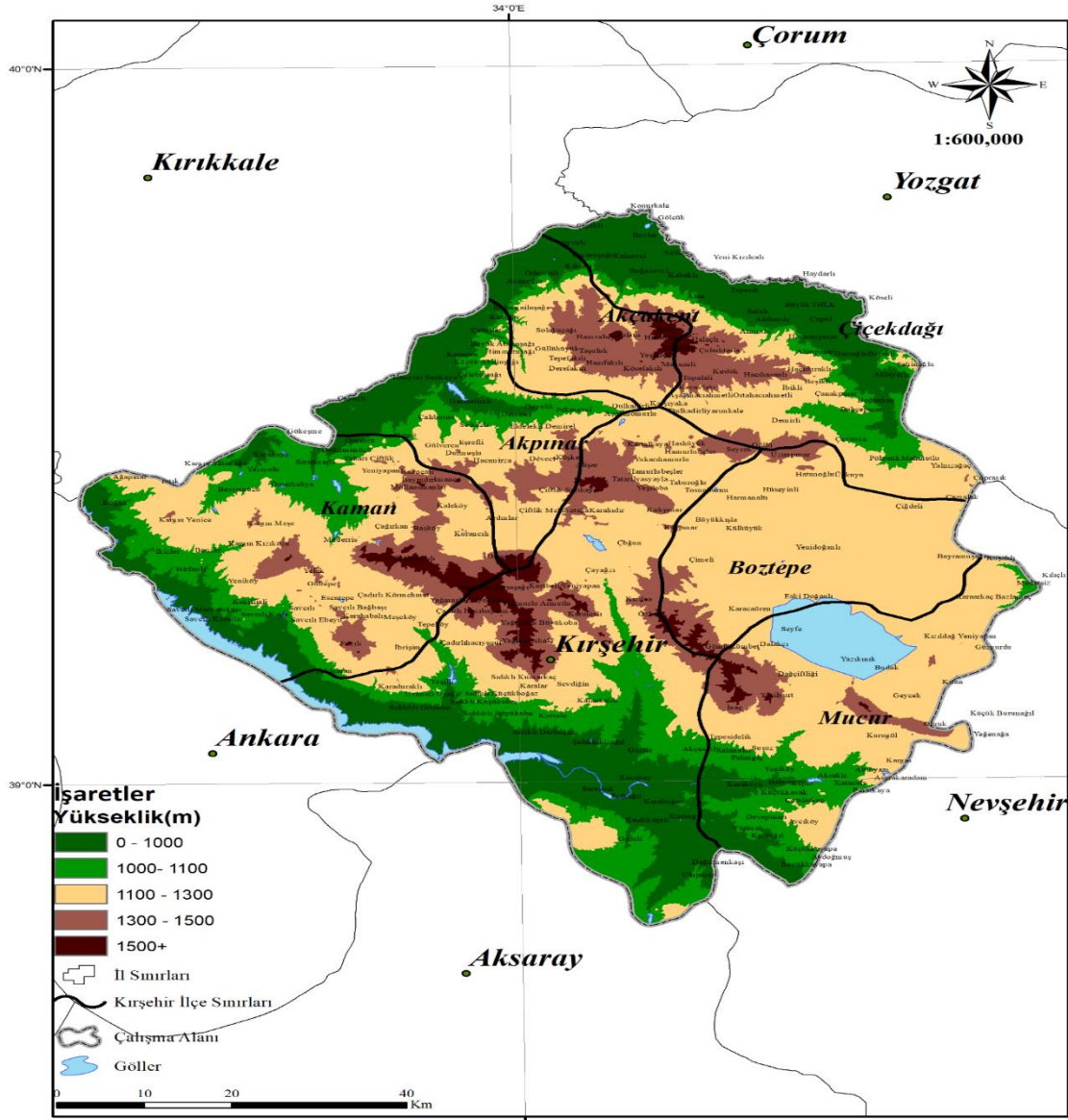
RES kurulurken önemli bir başka kriter ise yüksekliktir. Yükseklik katmanı için gerekli Sayısal Yükselti modeli(SYM) için; il sınırları vektörel formatta (*.shp) dışarı aktarılmış ve NASA Earth Explorer çevrim içi kaynakları arasında sunulan ALOS Palsar uydusundan [23] elde edilmek üzere yüksek çözünürlüklü ortofoto (sayısal-arazi modeli) verilerinin alınması amacıyla ilgili internet sitesine yüklenmiştir [24] . Kırşehir ili için, 8 farklı uydu gözlemi ile elde edilen ‘ortofoto’ kullanılmıştır. Temin edilen veriler ArcGIS for Desktop’da birleştirilmiştir. Üretilen sayısal yükseklik modeli daha sonra Kırşehir il sınırlarına göre kırılmıştır (cropping). Böylelikle çalışma sahası olan Kırşehir il sınırlarına ait 12.5 x 12.5 m çözünürlüklü sayısal yükselti modeli (SYM-ing.:DEM) elde edilmiştir. Üretilen SYM’nin datum ve koordinat sistemi, TUREF TM33 projeksiyon sistemine dönüştürülmüştür.

Atmosfer basıncı düştüğünden dolayı yükseklerle çıkıldıkça Hava yoğunluğu azalmaktadır [25] dolayısıyla Rüzgar Türbin’inin üreteceği güç de azalmaktadır [21]. Bununla beraber yeryüzeyine yakın yerlerde hava sıcaklığı daha yüksektir ve sıcak havanın yoğunluğu da düşük olur. Aynı zamanda düşük yüksekliklerde topografik engeller sebebiyle rüzgar hızı da düşük olmaktadır. Dolayısıyla deniz seviyesine yakın yerler de karasal RES kurulumu için çok uygun değildir.

Bu sebeple 1500’ m’den yüksek ve 0 ila 1000 m arasındaki yükseklikteki yerler, RES kurulumu için uygun olmadığından AHS’de en az ağırlığı almışlardır (Tablo 5) . Kırşehir ili için yükseklik katmanı, 5 alt sınıfa ayrılmıştır (Şekil 5). Katman için oluşturulan AHS ikili karşılaştırma matrisine göre AHS tutarlılık oranı %8’dir.

Tablo 5 Yükseklik alt kriteri için ikili karşılaştırma matrisi ve ağırlık değerleri

Yükseklik (m)	1300-1500	1100-1300	1000-1100	1500+	0-1000	Ağırlıklar	
1300-1500	1	3	5	7	9	0,503	%50,3
1100-1300	1/3	1	3	5	7	0,260	%26,0
1000-1100	1/5	1/3	1	3	5	0,134	%13,4
1500+	1/7	1/5	1/3	1	3	0,068	%6,8
0-1000	1/9	1/7	1/5	1/3	1	0,035	%3,5



Şekil 5 Yükseklik haritası

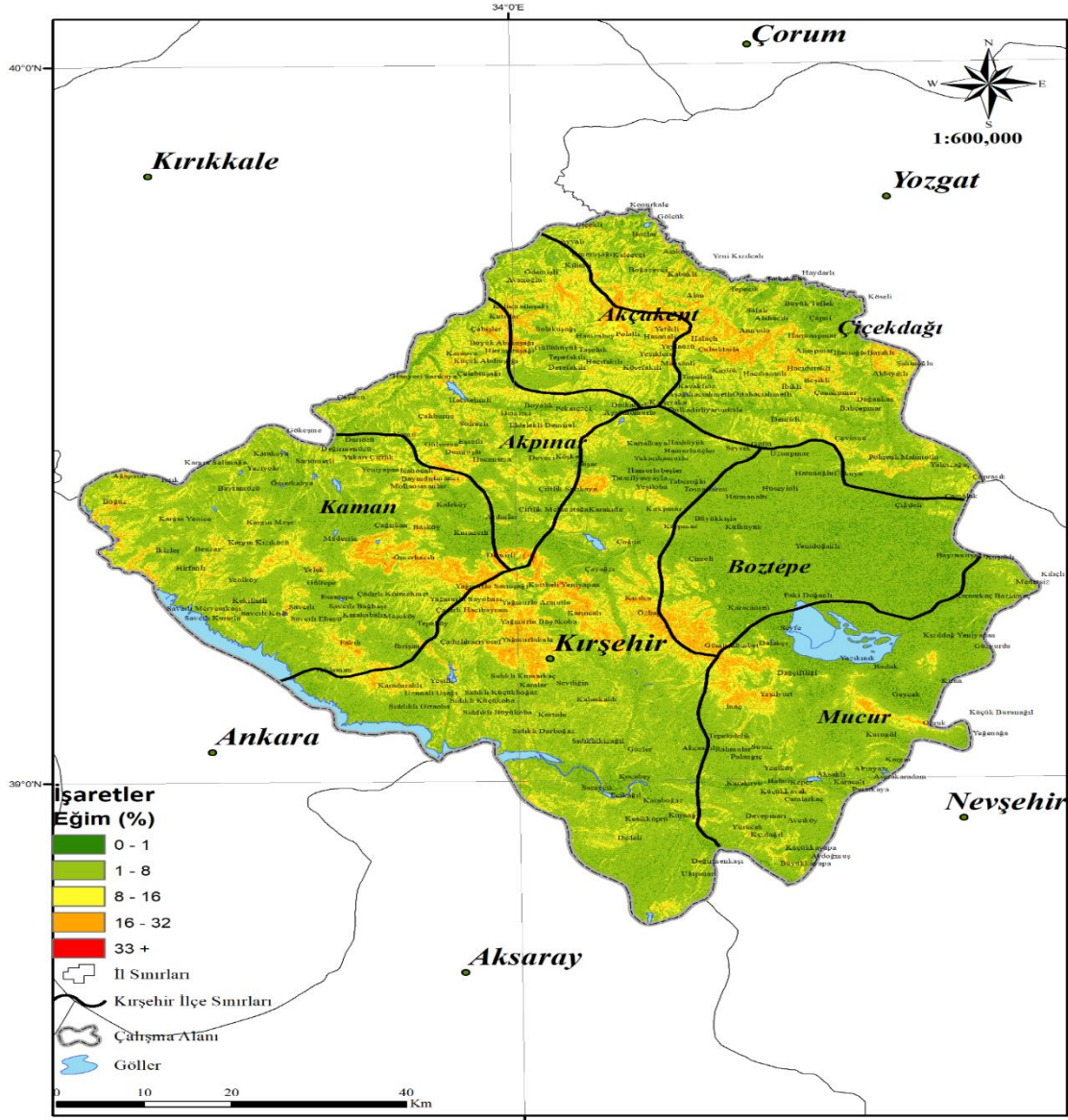
A.4. Eğim kriteri alt kriter ağırlıklandırması ve mekânsal katmanının üretilmesi

RES kurulacak mekânsal analizlerde diğer bir kriter ise eğimdir. Eğimi düşük diğer bir deyişle düzlük araziler, RES kurulumu açısından daha uygundur. Tablo 6'da görüldüğü üzere bu çalışmada eğim için 5 alt sınıfa ayrılmıştır. İkili karşılaştırma matrisine göre AHP tutarlılık oranı %8 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 6 Eğim alt kriteri için ikili karşılaştırma matrisi ve ağırlık değerleri

Eğim (%)	0-1	1-8	8-16	16-32	32+	Ağırlıklar
0-1	1	3	5	7	9	0,503 %50,3
1-8	1/3	1	3	5	7	0,260 %26,0
8-16	1/5	1/3	1	3	5	0,134 %13,4
16-32	1/7	1/5	1/3	1	3	0,068 %6,8
32+	1/9	1/7	1/5	1/3	1	0,035 %3,5

Eğim katmanı; Kırşehir için elde edilen SYM kullanılarak ArcGIS for Desktop’da hazırlanmıştır. ArcMap içerisindeki Arctoolbox araç kutusundaki 3D Analyst araçlarından “Raster Surface – Slope” aracı yardımıyla üretilmiştir (Şekil 6)



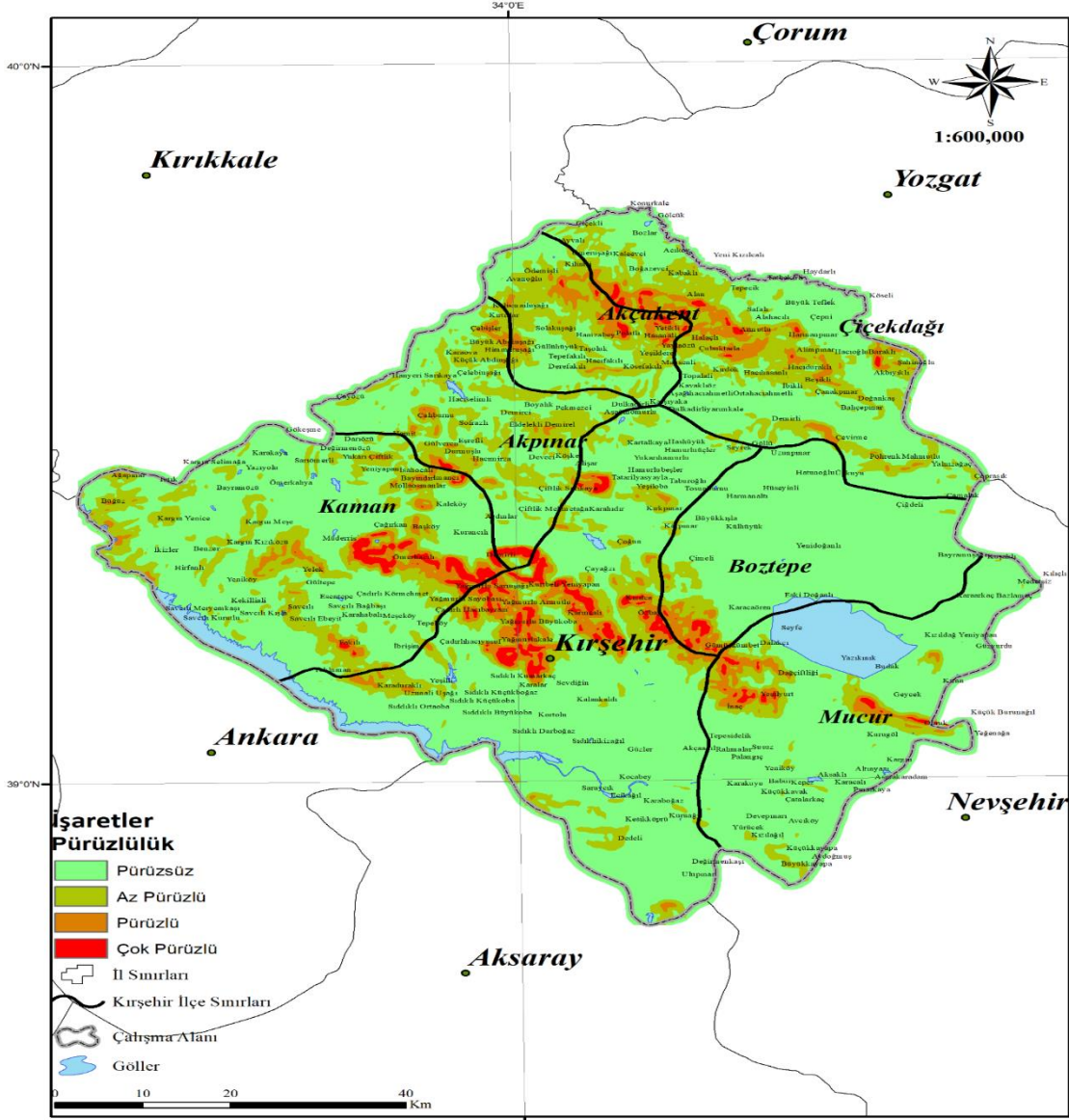
Şekil 6 Eğim haritası

A.5. Pürüzlülük kriteri alt kriter ağırlıklandırması ve mekânsal katmanının üretilmesi

Arazi pürüzlülüğünün artması, rüzgâr hızını yavaşlatır [22]. Bu sebeple çok pürüzlü yerler RES kurulumu açısından uygun değildir. Çalışma sahası olan Kırşehir ili için Pürüzlülük haritası ArcGIS for Desktop’deki ArcMap 10.5 yazılımı içerisinde yer alan Arctoolbox araç kutularından olan “Geomorphometry and Gradient Metrics - Surface Texture - Roughness” araçları ile üretilmiştir (Şekil 7) . Pürüzlülük katmanı oluşturulurken çalışma sahasının SYM yükseklik katmanı kullanılmıştır. Tablo 7’de görüldüğü üzere 4 sınıfa ayrılmıştır. **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.** ve ikili karşılaştırma matrisine göre AHP tutarlılık oranı %7 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 7 Pürüzlülük alt kriteri için ikili karşılaştırma matrisi ve ağırlık değerleri

Pürüzlülük	Pürüzsüz	Az Pürüzlü	Pürüzlü	Çok Pürüzlü	Ağırlıklar
Pürüzsüz	1	3	5	7	0,558 %55,8
Az Pürüzlü	1/3	1	3	5	0,263 %26,3
Pürüzlü	1/5	1/3	1	3	0,122 %12,2
Çok Pürüzlü	1/7	1/5	1/3	1	0,057 %5,7



Şekil 7 Pürüzlülük haritası

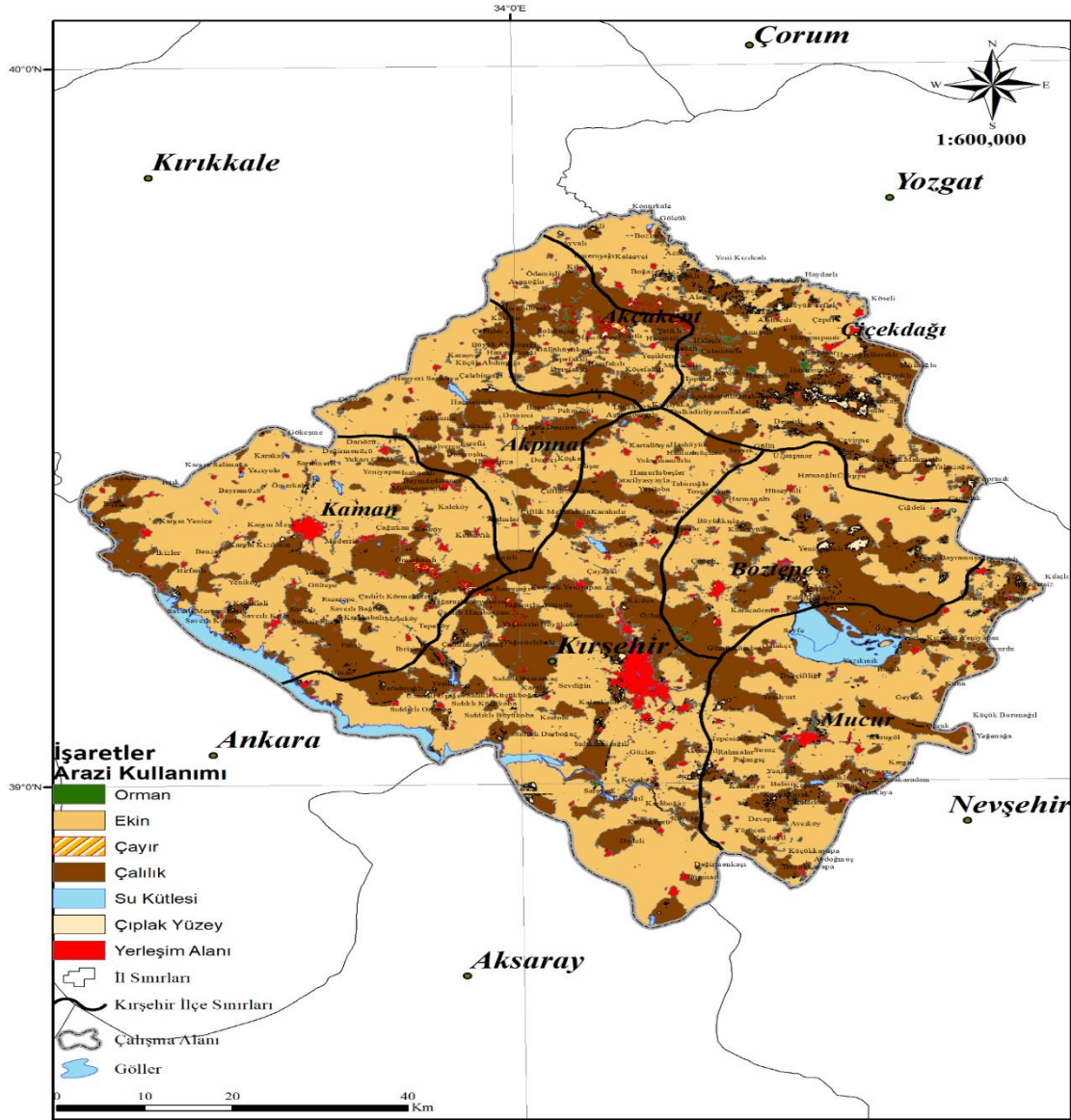
A.6. Arazi Kullanım/Arazi Örtüsü kriteri alt kriter ağırlıklandırması ve mekânsal katmanının üretilmesi

Arazi kullanımı/Arazi örtüsü, RES kurulumuna etki eden bir başka kriterdir. Çünkü kurulum için uygun arazilerin belirlenmesi hem inşaat yapım maliyetini hem de tesisin uzun yıllar boyunca işletilmesini etkiler. Çıplak yüzey olarak adlandırılan ‘taş-kayaç’ zeminler kurulum için daha uygundur. Su kütleleri veya ormanlık alanlar ise kurulum için en az uygun araziler olarak belirlenmiştir.

Arazi kullanımı/Arazi örtüsü haritası; 2020 yılında Sentinel 1-A uydu gözlem verileri yardımıyla üretilen ve güncel olarak çevrim içi sunulan 10 mx 10 m yatay çözünürlüklü ESRI LULC (Land Use-Land Cover) verileri kullanılarak üretilmiştir (Şekil 8) [26] . Çalışma sahası sınırına göre kırılan arazi kullanımı haritası 7 alt sınıfa ayrılmıştır (Tablo 8). İkili karşılaştırma matrisine göre AHP tutarlılık oranı %5'tir.

Tablo 8 Arazi kullanımı/Arazi örtüsü alt kriteri için ikili karşılaştırma matrisi ve ağırlık değerleri

<u>Arazi Kullanımı</u>	Çıplak Yüzey	Çayır	Ekin	Çalılık	Yerleşim Alanı	Su Kütlesi	Orman	Ağırlıklar	
Çıplak Yüzey	1	2	5	5	9	9	9	0,402	%40,2
Çayır	1/2	1	3	3	7	7	7	0,251	%25,1
Ekin	1/5	1/3	1	1	5	5	5	0,125	%12,5
Çalılık	1/5	1/3	1	1	5	5	5	0,125	%12,5
Yerleşim Alanı	1/9	1/7	1/5	1/5	1	1	1	0,032	%3,2
Su Kütlesi	1/9	1/7	1/5	1/5	1	1	1	0,032	%3,2
Orman	1/9	1/7	1/5	1/5	1	1	1	0,032	%3,2



Şekil 8 Arazi kullanımı haritası

A.7. Litoloji kriteri alt kriter ağırlıklandırması ve mekânsal katmanının üretilmesi

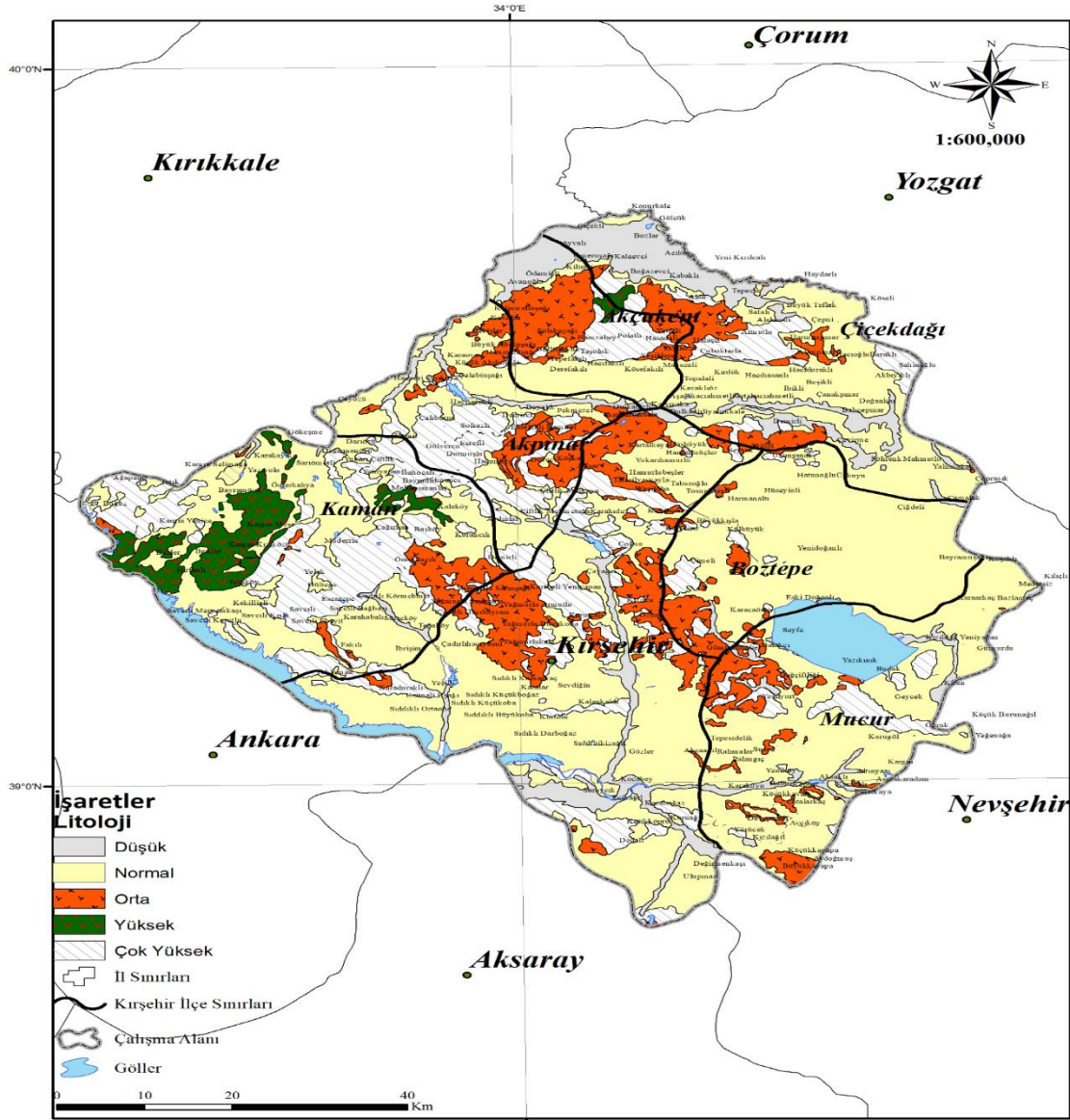
Yukarıda da belirtildiği gibi RES kurulacak arazideki kayacın dayanıklılığı çok önemlidir. Ayrılmamış kuvaterner, diğer bir ismiyle alüvyon zeminler, deprem aktivitesinin fazla olduğu bölgelerde deprem etkisini artırır ve yapılar yıkılır [26]. Bu nedenle ayrılmamış kuvaterner RES kurulumu için en az uygun saha olarak sınıflandırılmıştır ve en az önem derecesine sahiptir (**Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**).

5 alt sınıfa ayrılan Litoloji katmanı ikili karşılaştırma matrisine göre AHP tutarlılık %8 olarak hesaplanmıştır.

Litoloji haritası için; MTA'dan 1/500.000 ölçekli jeoloji haritası Kayseri paftası *.pdf formatında alınmış [24] ve sayısallaştırılmak üzere ArcMAP'e aktarılmış, sayısallaştırılan harita, Kırşehir il sınırlarına göre kırılmıştır. Sonrasında ArcMAP'in çizim editörü ile litolojik sınıflandırmaya göre çizilmiş ve 5 sınıfa ayrılmıştır (**Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**).

Tablo 9 Litoloji alt kriteri için ikili karşılaştırma matrisi ve ağırlık değerleri

Litoloji	Mermer	Ofilyotik Melanj	Bazalt	Ayrılmamış Karasal Kırıntılılar	Ayrılmamış Kuvaterner	Ağırlıklar
Mermer	1	3	5	7	9	0,503 %50,3
Ofilyotik Melanj	1/3	1	3	5	7	0,260 %26,0
Bazalt	1/5	1/3	1	3	5	0,134 %13,4
Ayrılmamış Karasal Kırıntılılar	1/7	1/5	1/3	1	3	0,068 %6,8
Ayrılmamış Kuvaterner	1/9	1/7	1/5	1/3	1	0,035 %3,5



Şekil 9 Litoloji haritası

A.8. Enerji Nakil Hatlarına uzaklık ile Trafo Merkezlerine uzaklık kriterleri alt kriter ağırlıklandırması ve mekânsal katmanının üretilmesi

Kurulacak RES'lerin Enerji Nakil Hatları(ENH) üzerinde olmaması, aynı zamanda da ekonomik sebeplerden dolayı enerji nakil hatlarına çok da uzak olmaması gerekmektedir [14]. Bu çalışmada enerji nakil hatlarına uzaklık katmanı, bu bilgi ışığında hazırlanmıştır. Enerji nakil hatlarına uzaklık ikili karşılaştırma matrisinde (**Tablo 10**) görüldüğü üzere katman 5 alt sınıfa ayrılmıştır. Enerji nakil hatlarına uzaklık kriteri ikili karşılaştırma matrisine göre AHP Tutarlılık oranı ise %8 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 10 Enerji Nakil Hatlarına uzaklık alt kriteri için ikili karşılaştırma matrisi ve ağırlık değerleri

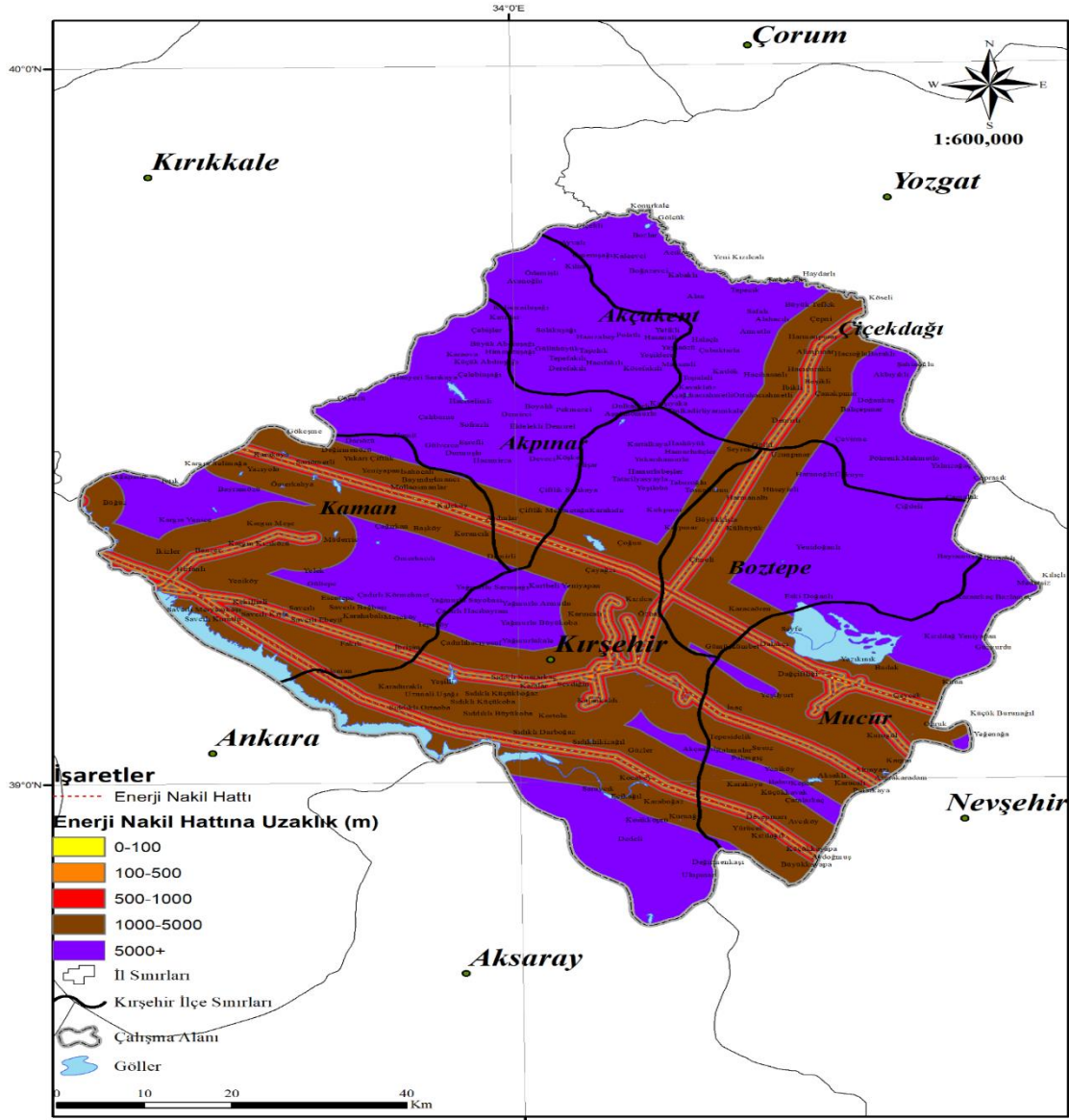
Enerji Nakil Hatlarına Uzaklık (m)	0-100	100-500	500-1000	1000-5000	5000+	Ağırlıklar	
0-100	1	3	5	7	9	0,503	%50,3
100-500	1/3	1	3	5	7	0,260	%26,0
500-1000	1/5	1/3	1	3	5	0,134	%13,4
1000-5000	1/7	1/5	1/3	1	3	0,068	%6,8
5000+	1/9	1/7	1/5	1/3	1	0,035	%3,5

“Trafo merkezlerine uzaklık”, RES kurulumunda bir başka uygunluk kriteridir. Trafo merkezlerine olan uzaklığın artması proje bütçesini etkilemektedir [21]. Trafo merkezlerine uzaklık AHP tablosu bu bilgi ışığında hazırlanmıştır. Enerji nakil hatlarına uzaklık sınıfları gibi 5 alt sınıfa ayrılmıştır. İkili karşılaştırma ve tutarlılık %8 olarak tespit edilmiştir.

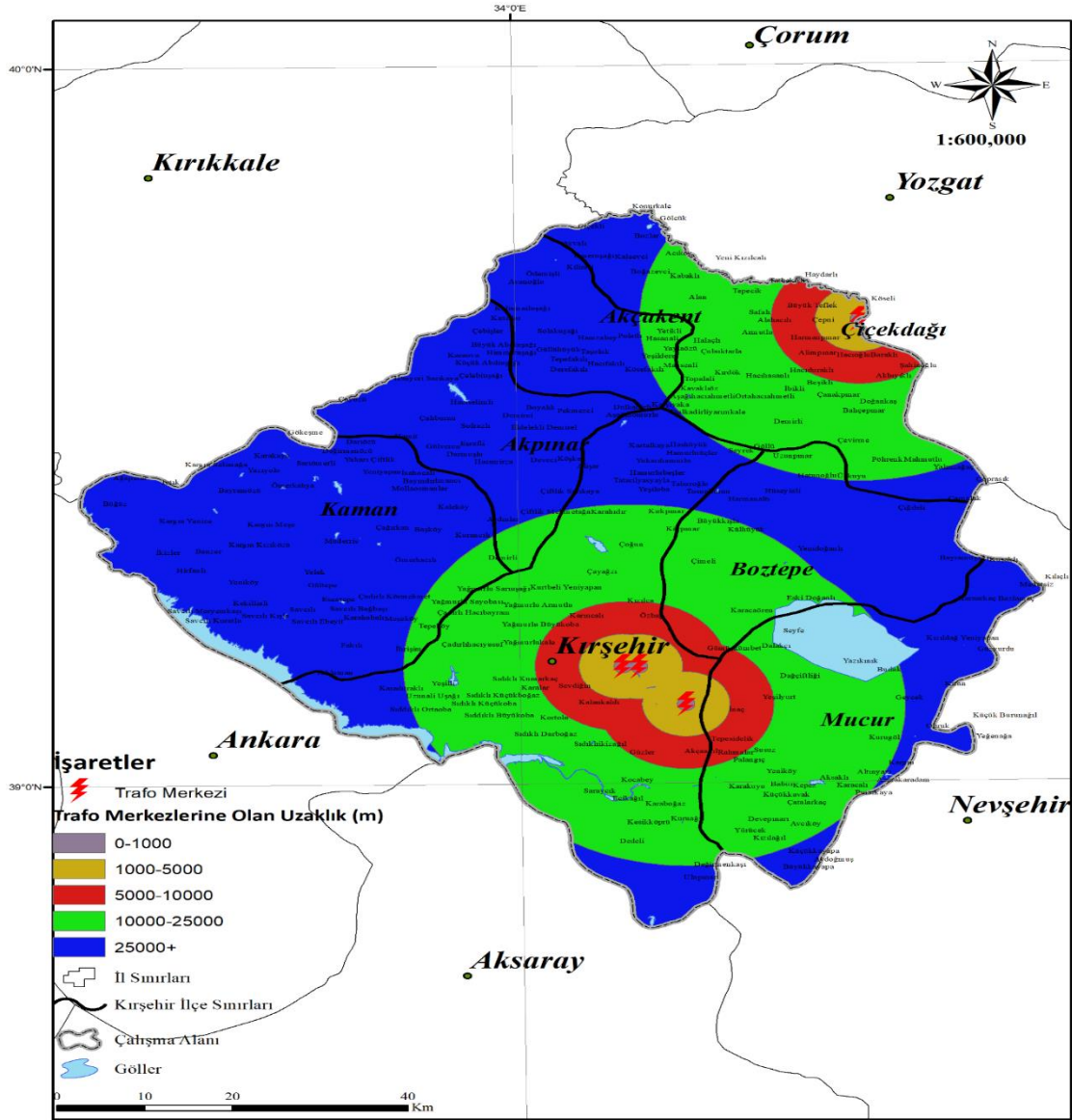
Tablo 11 Trafo merkezlerine uzaklık alt kriteri için ikili karşılaştırma matrisi ve ağırlık değerleri

Trafo Merkezlerine Uzaklık (m)	0-1000	1000-5000	5000-10000	10000-25000	25000+	Ağırlıklar	
0-1000	1	3	5	7	9	0,503	%50,3
1000-5000	1/3	1	3	5	7	0,260	%26,0
5000-10000	1/5	1/3	1	3	5	0,134	%13,4
10000-25000	1/7	1/5	1/3	1	3	0,068	%6,8
25000+	1/9	1/7	1/5	1/3	1	0,035	%3,5

Enerji nakil hatları (ENH) ve trafo merkezlerini (TM) gösteren coğrafi veriler; Üçyel Enerji Mühendislik ve Danışmanlık Hiz. San. Tic. Ltd. Şti'den temin edilmiştir. Temin edilen ENH ve TM yerlerine uzaklıkların hesaplanması için, ArcGIS for Desktop'da ArcMap araçlarından “Analysis - Proximity - Multiple Ring Buffer” aracı kullanılmış ve katmanlar oluşturulmuştur (Şekil 10 ve Şekil 11).



Şekil 10 Enerji nakil hatlarına uzaklık haritası



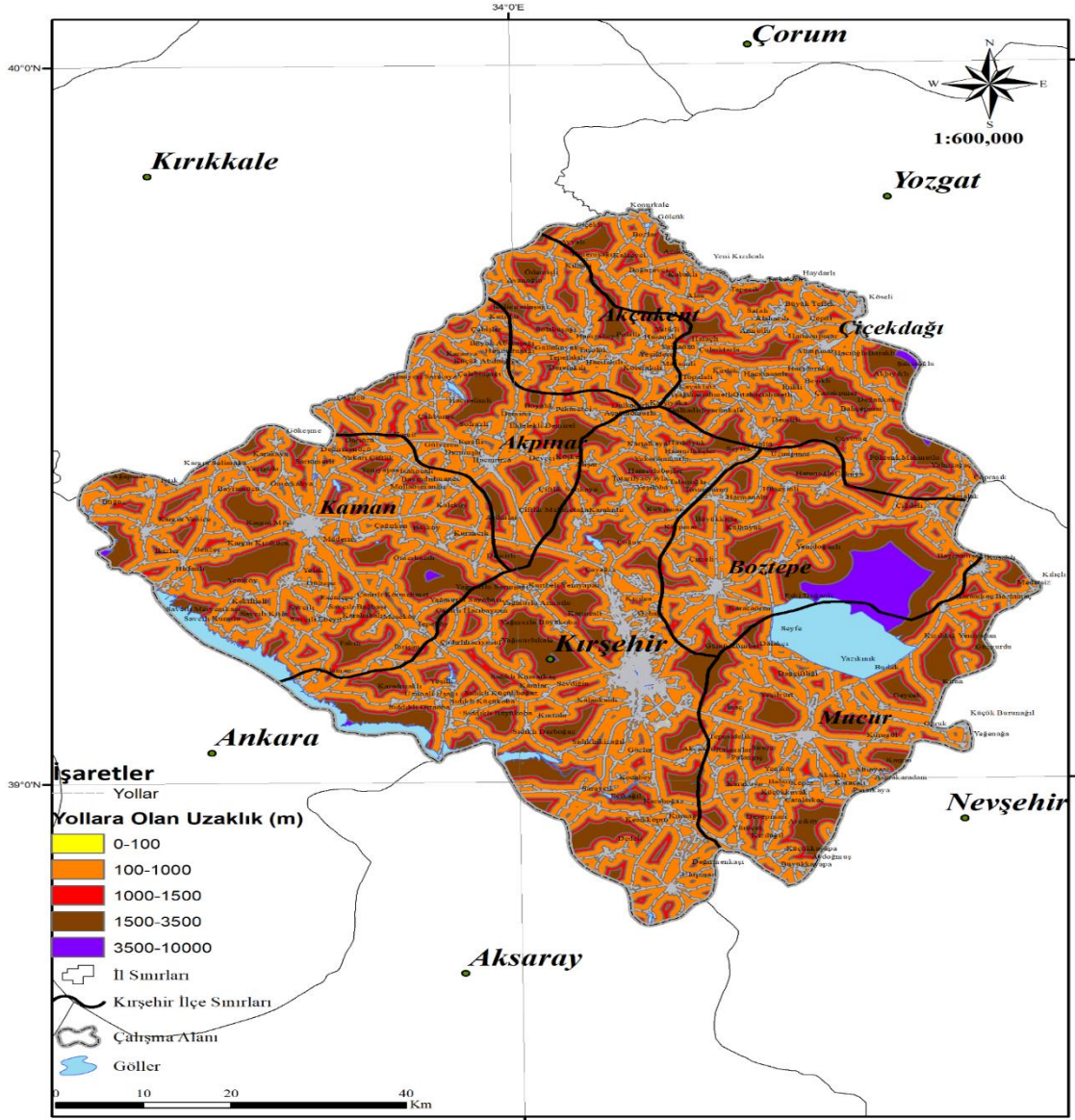
Şekil 11 Trafo merkezlerine uzaklık haritası

A.9. Yollara uzaklık ile Yerleşim yerlerine uzaklık kriterleri alt kriter ağırlıklandırması ve mekânsal katmanının üretilmesi

“Yollara olan uzaklık”, RES mekânsal analizlerinde önemli bir kriterdir. Yollara olan mesafenin artması tercih edilmeyen bir durumdur [27]. Bu sebeple yollara olan uzaklık kriterinin katmanı hazırlanırken 5 alt sınıf belirlenmiştir (Tablo 12). AHP ikili karşılaştırma matrisine göre AHP tutarlılık oranı %8 olarak hesaplanmıştır. Yollara ait coğrafi veriler, Openstreet Map’ten elde edilmiş ArcGIS’e aktarılmış ve “Geoprocessing - Clip” araçlarıyla çalışma alanına göre kırılmıştır [28]. Elde edilen Kırşehir ili sınırları içerisindeki karayolları verileri “Analysis – Proximity – Multiple Ring Buffer” aracı kullanılarak mesafe tamponları üretilmiştir (Şekil 12).

Tablo 12 Yollara uzaklık alt kriteri için ikili karşılaştırma matrisi ve ağırlık değerleri

Yollara Uzaklık (m)	100-1000	1000-1500	1500-3500	3500-10000	0-100	Ağırlıklar
100-1000	1	3	5	7	9	0,503 %50,3
1000-1500	1/3	1	3	5	7	0,260 %26,0
1500-3500	1/5	1/3	1	3	5	0,134 %13,4
3500-10000	1/7	1/5	1/3	1	3	0,068 %6,8
0-100	1/9	1/7	1/5	1/3	1	0,035 %3,5



Şekil 12 Yollara uzaklık haritası

Gürültü, rüzgâr türbinlerinin bir problemidir [29]. Ayrıca sürekli dönen rüzgâr türbinlerinin kanatlarının gölgesi de insanları psikolojik olarak rahatsız edebilmektedir. Rüzgâr enerjisi santrallerini yerleşim yerlerinden uzak tutarak bu sorunlar azaltılabilir. Bu yüzden, yerleşim alanlarına uzaklık kriteri, 5alt sınıfa ayrılmıştır (Tablo 13). Kriteria ait ikili karşılaştırma matrisine göre AHP tutarlılık oranı %8'dir.

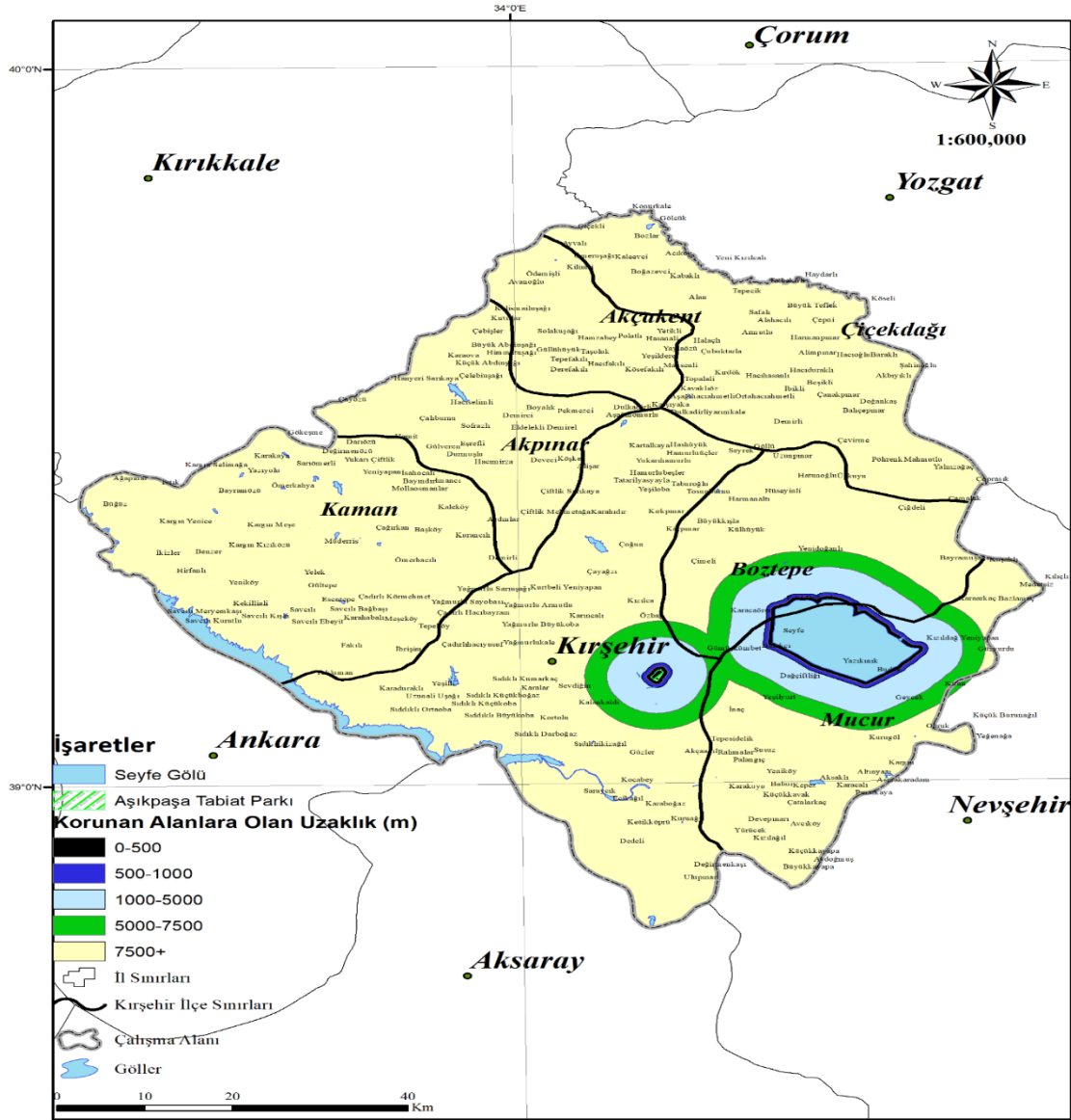
A.10. Korunan Alanlara uzaklık kriteri alt kriter ağırlıklandırması ve mekânsal katmanının üretilmesi

Korunan alanlara uzaklık kriteri, doğal alanları tahribattan korumak ve korunan alanlara olan ekolojik ihtiyacın hiç bitmemesinden dolayı önemlidir [15] . RES kurulumu için yer seçiminde kriter olarak kullanılır. Bu çalışmada korunan alanlara uzaklık kriteri 5 alt sınıfa ayrılmış (Şekil 14) ve AHP tablosunda ikili karşılaştırma yapılarak tutarlılık oranı %8 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 14 Korunan alanlara uzaklık alt kriteri için ikili karşılaştırma matrisi ve ağırlık değerleri

Korunan Alanlara Uzaklık (m)	7500+	5000-7500	1000-5000	1000-100	0-500	Ağırlıklar	
7500+	1	3	5	7	9	0,503	%50,3
5000-7500	1/3	1	3	5	7	0,260	%26,0
1000-5000	1/5	1/3	1	3	5	0,134	%13,4
1000-100	1/7	1/5	1/3	1	3	0,068	%6,8
0-500	1/9	1/7	1/5	1/3	1	0,035	%3,5

Korunan alanlar katmanının oluşturulması için; öncelikle çalışma alanında bulunan korunan alanlar, T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Doğa Koruma ve Milli Parklar Genel Müdürlüğü internet sitesine bakılarak öğrenilmiştir [31]. Ardından T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Mekânsal Planlama Genel Müdürlüğü'nden temin edilen 1/100.000 ölçekli Çevre Düzeni Planlarının gösterildiği paftalar [32], ArcGIS for Desktop'a aktarılmış, burada ArcMap kullanılarak paftalar sayısallaştırılmış (rectify) ve çizim editörü ile pafta üzerinden "Seyfe Gölü" çizilmiştir. Fakat paftalarda "Aşıkpaşa Tabiat Parkı" bulunmadığından Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü Parsel Sorgulama Uygulaması'ndan [33] "Aşıkpaşa Tabiat Parkı"nın *parsel sınırları* belirlenmiş, Google Earth Pro programında ilgili sahanın parsel sınırları çizilmiştir. Çizilen alan *.kmz veri formatında ArcMap'e aktarılmış ve Korunan Alanlar katmanı için "Seyfe Gölü" ile beraber gösterilmiştir. Korunan alanlara uzaklık katmanı, ArcGIS for Desktop'da ArcMap içerisindeki "Analysis Tools – Proximity - MultipleRing Buffer" aracı ile tampon uzaklıklar oluşturularak elde edilmiştir (Şekil 14) .



Şekil 14 Korunan alanlara uzaklık haritası

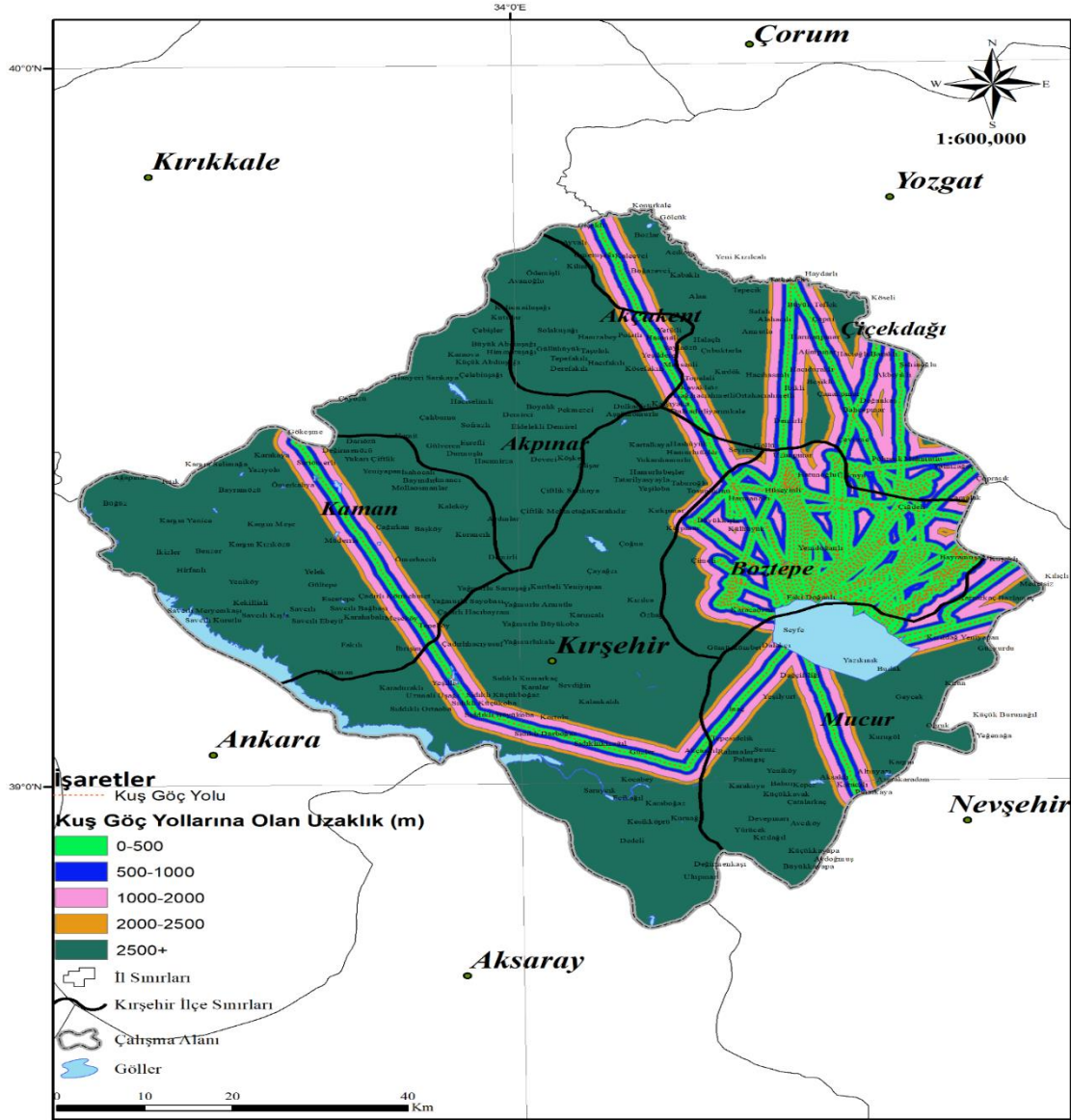
A.11. Kuş göç yollarına uzaklık kriteri alt kriter ağırlıklandırması ve mekânsal katmanının üretilmesi

Kuş göç rotalarını etkileyen, kuşlar üzerinde olumsuz etkileri bulunan ve kuşların çarparak ölümüne sebep olabilecek rüzgâr türbinleri kurulurken kuş göç yollarını incelemek, kuşlar ve insanlık için kriter olarak belirlemek önemli bir husustur [34]. Tablo 15’de görüldüğü üzere kuş göç yollarına uzaklık kriteri 5 alt sınıfa ayrılmıştır. İkili karşılaştırma yapılmış ve tutarlılık %8 olarak belirlenmiştir.

Tablo 15 Kuş göç yollarına uzaklık alt kriteri için ikili karşılaştırma matrisi ve ağırlık değerleri

Kuş Göç Yollarına Uzaklık (m)	2500+	2000-2500	1000-2000	500-100	0-500	Ağırlıkları
2500+	1	3	5	7	9	0,503 %50,3
2000-2500	1/3	1	3	5	7	0,260 %26,0
1000-2000	1/5	1/3	1	3	5	0,134 %13,4
500-100	1/7	1/5	1/3	1	3	0,068 %6,8
0-500	1/9	1/7	1/5	1/3	1	0,035 %3,5

Kuş Göç Yolları katmanı için; *Birdmap* internet sitesinden [35] görüntü olarak alınan harita, ArcMap'e *resim* formatında (*.jpg) aktarılmıştır. Aktarılan resim *Georeferencing* aracıyla sayısallaştırılmış ve çizim editörü ile kuş göç rotaları çizilmiştir. Çizilen kuş göç yollarından, kuş göç yollarına uzaklık katmanı, ArcMap'teki *Analysis Tools - Proximity - MultipleRing Buffer* aracı kullanılarak meydana getirilmiştir (Şekil 15) .



Şekil 15 Kuş göç yollarına uzaklık haritası

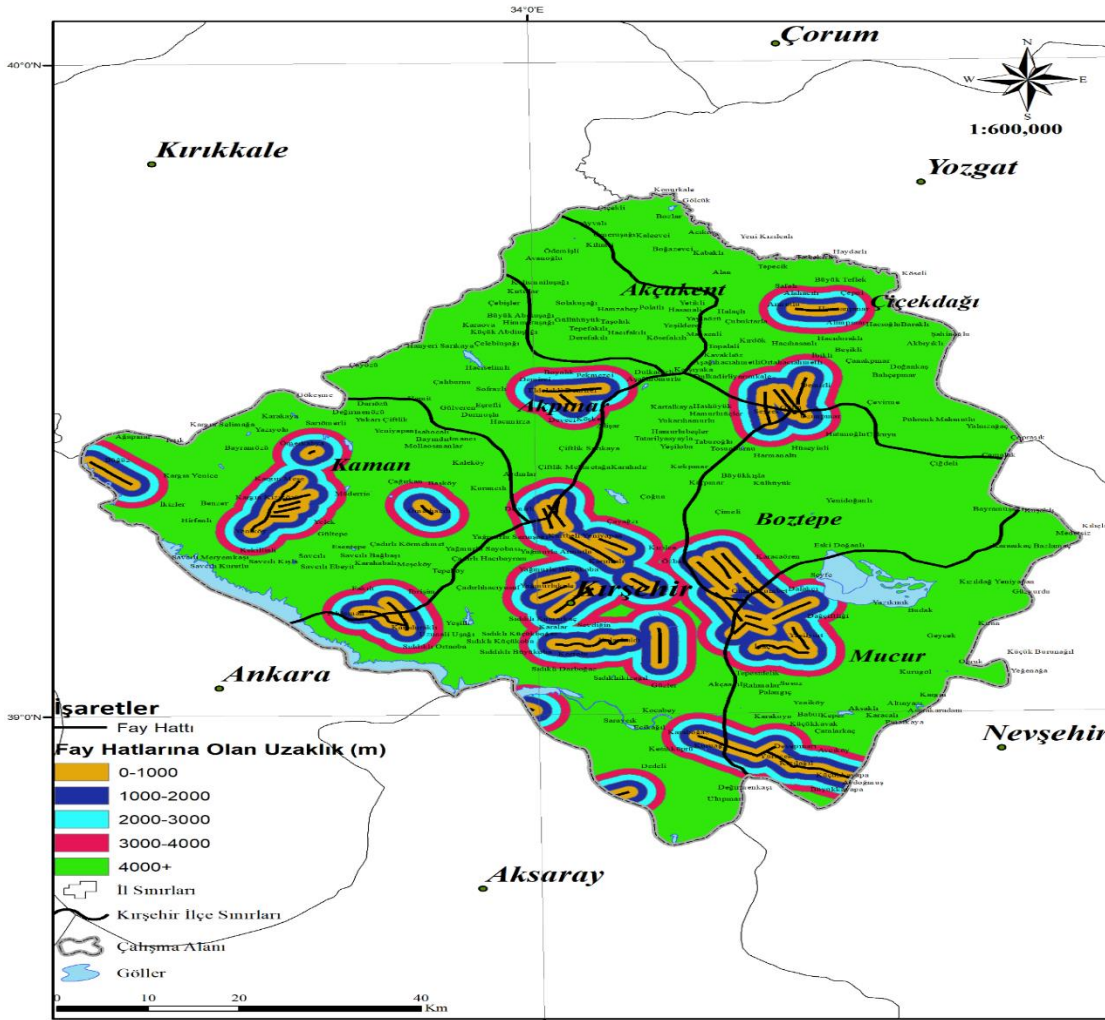
A.12. Fay hatlarına uzaklık kriteri alt kriter ağırlıklandırması ve mekânsal katmanının üretilmesi

Deprem olduğunda yıkılma riski bulunduğu Rüzgâr türbinlerinin fay hatlarının üzerine ya da yakınlıklarına kurulmaması gerekmektedir [27]. Bu bilgiye dayanarak fay hatlarına uzaklık kriterine ait 5 alt sınıf belirlenmiştir. Alt kriterlerin ikili karşılaştırma matrisi tablosu oluşturulmuştur (Tablo 16) . Alt kriterler ikili karşılaştırma matrisinin tutarlılık oranı %8 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 16 Fay hatlarına uzaklık alt kriteri için ikili karşılaştırma matrisi ve ağırlık değerleri

Fay Hatlarına Uzaklık (m)	4000+	3000-4000	2000-3000	1000-2000	0-1000	Ağırlıkları
4000+	1	3	5	7	9	0,503 %50,3
3000-4000	1/3	1	3	5	7	0,260 %26,0
2000-3000	1/5	1/3	1	3	5	0,134 %13,4
1000-2000	1/7	1/5	1/3	1	3	0,068 %6,8
0-1000	1/9	1/7	1/5	1/3	1	0,035 %3,5

Fay hatlarının gösterildiği fay haritası; MTA Genel Müdürlüğü'nden internet sitesinden elde edilmiş [36] ve Kırşehir il sınırlarına göre kırılmıştır. Fay hatlarına uzaklık haritası, ArcGIS for Desktop'da yer alan ArcMap yazılımı araçlarından *Analysis Tools - Proximity - MultipleRing Buffer* aracı kullanılarak üretilmiştir (Şekil 16)



Şekil 16 Fay hatlarına uzaklık haritası

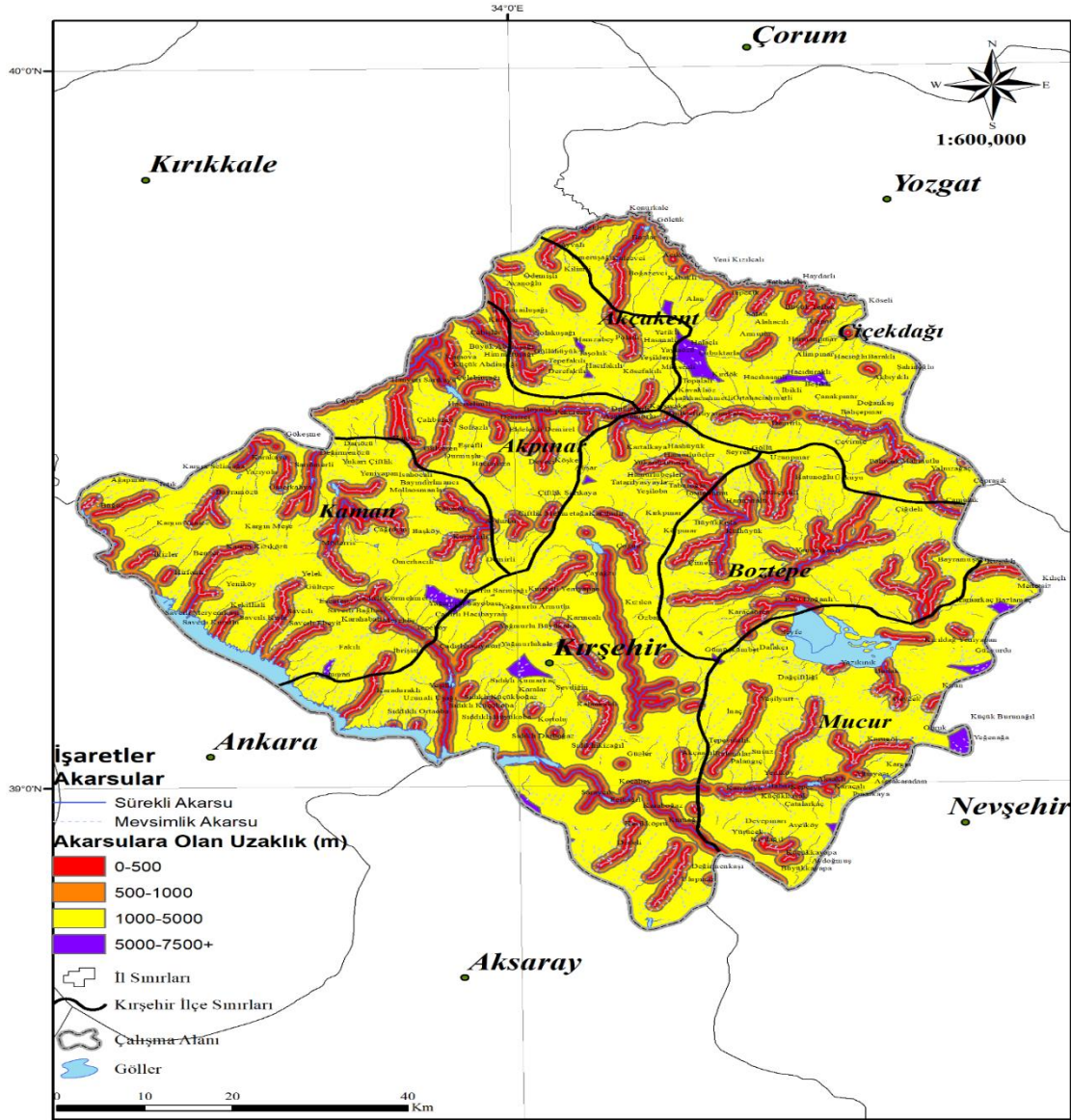
A.13. Akarsulara uzaklık kriteri alt kriter ağırlıklandırması ve mekânsal katmanın üretilmesi

Türbülanslı akış oluşturan atmosferik sınır tabakadaki rüzgârın pürüzlülük etkisinin artması dolayısı ile akarsulara yakın bölgeler, RES kurulumu için istenmeyen bir faktördür [9]. Bu çalışmada akarsulara uzaklık kriteri 4 alt kritere ayrılmıştır. Alt kriterlere ait ikili karşılaştırma matrisi oluşturulmuştur. İkili karşılaştırmalar sonucunda AHP tutarlılık oranı %7 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 17 Akarsulara uzaklık alt kriteri için ikili karşılaştırma matrisi ve ağırlık değerleri

Akarsulara Uzaklık (m)	5000-7500+	1000-5000	500-1000	0-500	Ağırlıkları	
5000-7500+	1	3	5	7	0,558	%55,8
1000-5000	1/3	1	3	5	0,263	%26,3
500-1000	1/5	1/3	1	3	0,122	%12,2
0-500	1/7	1/5	1/3	1	0,057	%5,7

Akarsulara uzaklık haritası için önce topografyadaki vadiler ve akarsu güzergahlarını belirlemek gereklidir. Akarsu güzergahı için ArcGIS for Desktop'daki ArcMap yazılımında, Sayısal Yükseklik Modeli veriseti kullanılarak *Spatial Analyst Tools -Hydrology* araç kutusu içerisinde sırası ile; *Fill - Flow Direction - Flow Accumulation - Stream Order - Stream to Feature* katmanları oluşturulmuştur. Son oluşturulan akarsu güzergahı (stream) katmanını kullanarak yine ArcMap'deki *Analysis Tools - Proximity - MultipleRing Buffer* aracı ile Akarsulara uzaklık katmanı üretilmiştir (Şekil 17)



Şekil 17 Akarsulara uzaklık haritası

B. KRİTERLERİN İKİLİ KARŞILAŞTIRILMASI VE AHS AĞIRLIKLARI

RES kurulumuna uygun sahaların belirlenmesi için kriterlerin birbirlerine olan ağırlıkları alt kriterlerde olduğu gibi yine AHS ile tespit edilmiştir. Kriterlerin ağırlıkları literatürdeki çalışmalardan yararlanarak belirlenmiştir. Kriterlerin ağırlıklarının hesaplanması için ikili karşılaştırma matrisi oluşturulmuş ve kriterlerin birbirlerine göre önemleri 1'den 9'a puanlandırılarak karşılaştırma yapılmıştır (Tablo 18).

Tablo 18'de görüldüğü üzere; 15 kriter arasında %20,8 ile en fazla ağırlık değerine rüzgâr hızı kriteri sahiptir. Güç yoğunluğu %15,1; yükseklik ve eğim %10,5; pürüzlülük, arazi kullanımı ve litoloji %6,9; enerji nakil hattı ve trafo merkezlerine olan uzaklık %4,5; yollara, korunan alanlara ve kuş göç yollarına uzaklık %3; yerleşim alanlarına uzaklık %1,7; fay hatlarına uzaklık %1,4; akarsulara uzaklık %1,3 ağırlık değerlerine sahiptir.

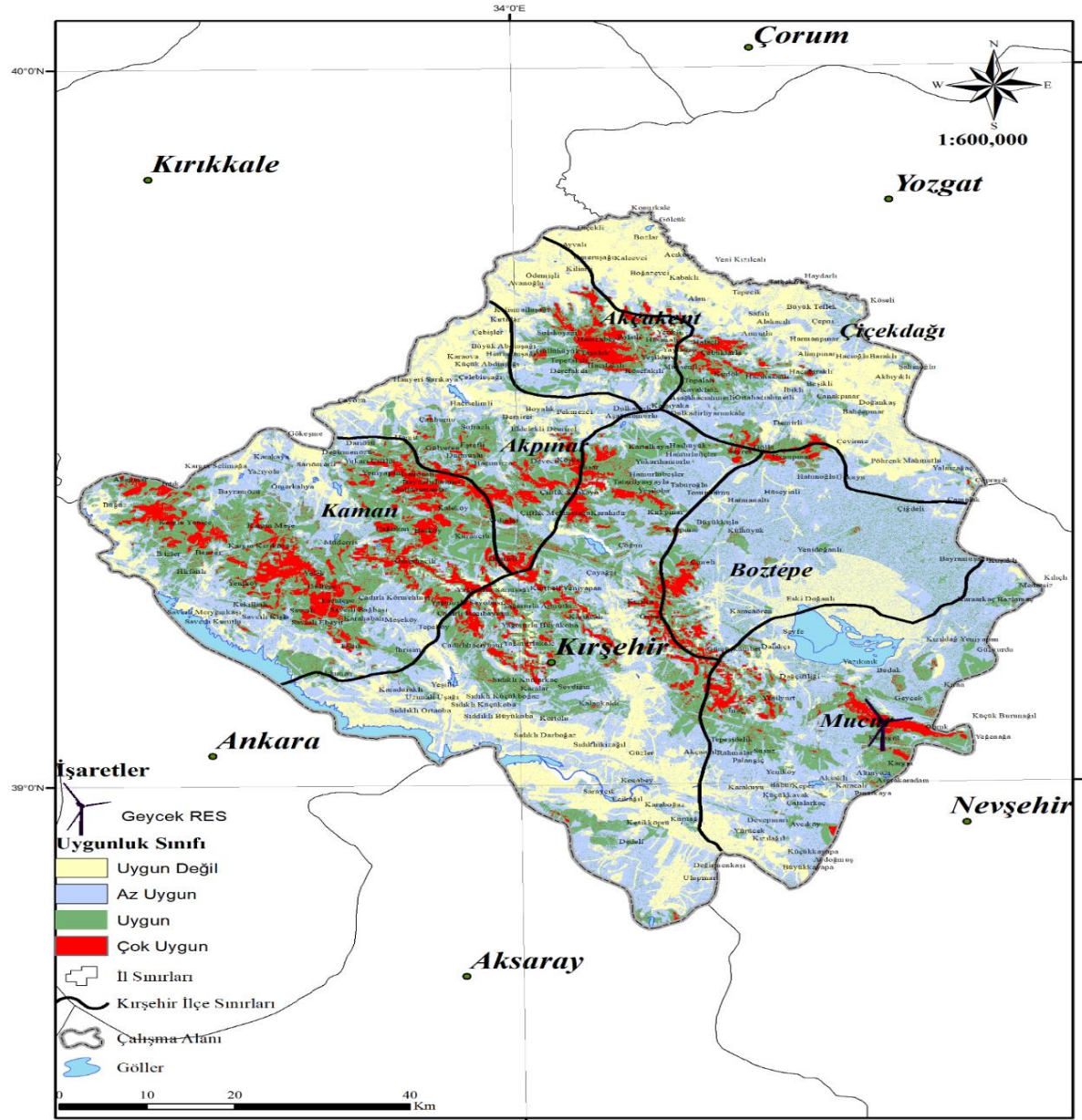
Bu çalışmada kriterler arası hiyerarşik tutarlılık oranı % 3 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 18. Kriterlerin ikili karşılaştırılması ve AHS ağırlık değerleri

Kriterler	Rüzgâr Hızı	Güç Yoğunluğu	Yükseklik	Eğim	Pürüzlülük	Arazi Kullanımı	Litoloji	Enerji Nakil Hatlarına Uzaklık	Trafo Merkezlerine Uzaklık	Yollara Uzaklık	Korunan Alanlara Uzaklık	Kuş Göç Yolları	Yerleşim Alanlarına Uzaklık	Fay Hatlarına Uzaklık	Akarsulara Uzaklık	AHS	
Rüzgâr Hızı	1	2	3	3	4	4	4	5	5	6	6	6	7	8	9	0,208	%20,8
Güç Yoğunluğu	1/2	1	2	2	3	3	3	4	4	5	5	5	6	7	8	0,151	%15,1
Yükseklik	1/3	1/2	1	1	2	2	2	3	3	4	4	4	5	6	7	0,105	%10,5
Eğim	1/3	1/2	1	1	2	2	2	3	3	4	4	4	5	6	7	0,105	%10,5
Pürüzlülük	1/4	1/3	1/2	1/2	1	1	1	2	2	3	3	3	4	5	6	0,069	%6,9
Arazi Kullanımı	1/4	1/3	1/2	1/2	1	1	1	2	2	3	3	3	4	5	6	0,069	%6,9
Litoloji	1/4	1/3	1/2	1/2	1	1	1	2	2	3	3	3	4	5	6	0,069	%6,9
Enerji Nakil Hatlarına Uzaklık	1/5	1/4	1/3	1/3	1/2	1/2	1/2	1	1	2	2	2	3	4	5	0,045	%4,5
Trafo Merkezlerine Uzaklık	1/5	1/4	1/3	1/3	1/2	1/2	1/2	1	1	2	2	2	3	4	5	0,045	%4,5
Yollara Uzaklık	1/6	1/5	1/4	1/4	1/3	1/3	1/3	1/2	1/2	1	1	1	2	3	4	0,030	%3
Korunan Alanlara Uzaklık	1/6	1/5	1/4	1/4	1/3	1/3	1/3	1/2	1/2	1	1	1	2	3	4	0,030	%3
Kuş Göç Yolları	1/6	1/5	1/4	1/4	1/3	1/3	1/3	1/2	1/2	1	1	1	2	3	4	0,030	%3
Yerleşim Alanlarına Uzaklık	1/7	1/6	1/5	1/5	1/4	1/4	1/4	1/3	1/3	1/2	1/2	1/2	1	1	1	0,017	%1,7
Fay Hatlarına Uzaklık	1/8	1/7	1/6	1/6	1/5	1/5	1/5	1/4	1/4	1/3	1/3	1/3	1	1	1	0,014	%1,4
Akarsulara Uzaklık	1/9	1/8	1/7	1/7	1/6	1/6	1/6	1/5	1/5	1/4	1/4	1/4	1	1	1	0,013	%1,3

C. KIRŞEHİR İLİ RES UYGUNLUK HARİTASI

15 adet kritere ait mekânsal katmanlar, AHS yöntemi ile belirlenen önem ağırlıkları oranında etkilerinin ortaya konulması için, ArcGIS for Desktop'daki ArcMap yazılımı araçlarından 'mekansal çözümleme (spatial analysis) "overlay" aracı kullanılmıştır. Bunun için öncelikle vektörel cbs formatındaki veriler "Conversion Tools-to Raster-Feature To Raster" işlemleri ile 25m x 25m yatay çözünürlükte raster veri formatına(GeoTIFF) dönüştürülmüştür. Ardından 15 kritere ait katmanın her biri için ikili karşılaştırma ile hesaplanan (Tablo 18) 0 - 1 arasındaki önem ağırlıkları değerleri, "Spatial Analysis - Overlay - Weighted Sum" aracında kullanılmıştır. Bu araç yardımıyla çalışma alanındaki her bir grid için belirlenen 'uygunluk skoru haritası'nın kolay yorumlanabilmesi için, eşit aralıklı sınıflandırma ile "RES uygunluk haritası" dört alt sınıfa ayrılmıştır. Sınıflar; uygun değil, az uygun, uygun ve çok uygun olarak belirlenmiştir (Şekil 18).



Şekil 18 Kirsehir ili RES uygunluk haritası

IV. SONUÇ

Bu çalışmada Kırşehir il sınırları içerisinde rüzgâr enerjisi santrali (RES) kurulumu için uygun sahaların mekânsal olarak belirlenmesi için 15 kriter seçilmiştir. Kriterlere ait mekânsal veriler üretilmiştir. Kriterlerin ve her bir kriterin alt kriterine ait önem derecelerine göre ağırlıklı çakıştırma yöntemi ile birleştirilmiş ve RES uygunluk haritası elde edilmiştir.

Kriterler arasında en fazla önem ağırlığına sahip olan “rüzgâr hızı katmanı” (Şekil 3) ve çalışma sonucunda üretilen “RES uygunluk haritası” (Şekil 18) incelendiğinde uygunluk sınıflarının hemen hemen örtüştüğü görülmektedir. Fakat RES kurulumu için “rüzgâr hızı kriteri” tek başına yeterli değildir. Çalışmada da gösterildiği gibi insan ve çevre şartlarının ortaya konulduğu diğer kriterlerin de değerlendirilerek mühendislik açıdan en doğru “RES uygunluk haritası” oluşturulmalıdır.

RES kurulumu için önemli kriterlerden biri de “havaalanına uzaklık”tır. Fakat Kırşehir il sınırları içerisinde havaalanı bulunmadığından bu çalışmada bir kriter olarak ele alınmamıştır.

Çalışma alanındaki çok uygun alanlar incelendiğinde hâlihazırda Mucur ilçesi sınırlarında işletilmekte olan **Geycek RES**'in de bu sınıflandırma içerisinde olduğu görülmüştür.

Fosil enerji kaynaklarının giderek azalması, çevreye ve atmosfere verdiği zararlar, ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının devamlı olması, hâlihazırda bulunan iklim krizini daha da derinleştirmektedir. Bununla beraber, ülkemizde fosil yeraltı kaynaklarının sınırlı olması nedeniyle ekonomik olarak dışa bağımlılık da fazladır. Ülkemizin coğrafi şartları dolayısıyla rüzgâr enerjisi potansiyeline yatırımların artırılması ekonomik açıdan faydalı olacaktır.

Rüzgâr Enerji Santrallerinin ilk yatırım maliyetleri çok yüksektir. Bu sebeple fizibilite çalışmaları ve RES kurulacak uygun sahaların belirlenmesi çok önemlidir. RES'ler yalnızca rüzgâr hızının fazla olduğu yerlere kurulamaz. Rüzgâr hızı haricinde birçok başka kriter mevcuttur ve bu kriterlerin de incelenmesi gerekmektedir. Kriterleri inceleyebilmek için Çok Kriterli Karar Verme yöntemlerinden Analitik Hiyerarşi Süreci yöntemine başvurmak kriterlerin birbirlerine karşı önem derecelerini belirleyebilmesi bakımından kolaylık sağlayabilmektedir. Ayrıca çok sayıda kriter için elde edilen mekânsal verinin çözümlenmesinde CBS yazılım ve araçlarının kullanımı da hem işlem pratikliği hem de işlem doğruluğu sağlamaktadır.

Uygunluk haritasına göre Kırşehir'de “çok uygun” olarak sınıflandırılan sahalar RES Sahası olarak öncelikle değerlendirilebilir. Yukarıda da belirtildiği gibi mevcutta il sınırlarında yalnızca bir adet RES işletilmektedir. Kurulum açısından *çok uygun* sahaların enerji üretim potansiyelinin değerlendirilmesi ülkemiz ekonomisine katkı sağlayabileceği düşünülmektedir.

V. KAYNAKLAR

- [1] UNDP, “Delivering Sustainable Energy in a Changing Climate: Strategy Note on Sustainable Energy,” 2016.
- [2] S. I. Seneviratne *et al.*, “Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,” Cambridge, UK & New York USA, 2021. doi: 10.1017/9781009157896.013.
- [3] IPCC, “Climate Change 2021 Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Summary for Policymakers,” 2021.
- [4] M. O. L. Hansen, *Aerodynamics of Wind Turbines*, Third Edition. Routledge, 2015.
- [5] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, and E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*. Baffins Lane, Chichester West Sussex PO19 1UD: John Wiley & Sons Ltd. , 2001.
- [6] K. J. Sediqi, “Gis-based multi-criteria approach for land-use suitability analysis of wind farms: the case study of Karaburun Peninsula, Izmir,-Turkey,” *Master’s Thesis, Izmir Institute of Technology, Turkey*, no. November. İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir, 2016.
- [7] N. Y. Aydın, E. Kentel, and S. Duzgun, “GIS-based environmental assessment of wind energy systems for spatial planning: A case study from Western Turkey,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 1. pp. 364–373, Jan. 2010. doi: 10.1016/j.rser.2009.07.023.
- [8] G. Önder and E. Önder, “Analitik Hiyerarşi Süreci,” in *Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri*, 2nd ed., B. F. Yıldırım and E. Önder, Eds. Bursa: Dora Basım-Yayın Dağıtım Ltd. Şti., 2015, p. 337.
- [9] E. Özşahin and Ç. Kaymaz, “Rüzgâr Enerji Santrallerinin (Res) Kuruluş Yer Seçiminin Cbs İle Analizi: Hatay Örneği,” *TÜBAV Bilim Dergisi*, vol. 6, no. 2. pp. 1–18, 2014. [Online]. Available: <http://dergipark.gov.tr/tubav/issue/21531/230992>
- [10] G. Can and M. A. Yücel, “Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Analitik Hiyerarşi Prosesi Kullanarak Rüzgar Enerji Santralleri İçin Yer Tespiti,” *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, 17. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*. pp. 25–27, 2019.
- [11] D. Arca and H. Keskin Çıtıröğlü, “Güneş Enerjisi Santral (GES) Yapım Yerlerinin CBS Dayalı Çok Kriterli Karar Analizi İle Belirlenmesi: Karabük Örneği,” *Geomatik*, Nov. 2020, doi: 10.29128/geomatik.803200.
- [12] O. Artun, “Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) kullanılarak Osmaniye’deki Rüzgar Enerjisi Santrallerinin (RES) Yatırımına Uygun Alanların Belirlenmesi,” *European Journal of Science and Technology*. pp. 196–205, 2020. doi: 10.31590/ejosat.763866.
- [13] İ. Aydın and D. Öztürk, “Coğrafi Bilgi Sistemleri Tabanlı Analitik Hiyerarşi Yöntemi Kullanılarak Ege Denizi’nde Rüzgâr ve Dalga Enerji Sistemleri İçin Yer Seçimi,” *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendis. Fak. Fen ve Mühendislik Derg.*, vol. 23, no. 67, pp. 217–232, 2021, doi: 10.21205/deufmd.2021236719.
- [14] T. Urfalı and A. Geymen, “CBS ve AHP Yöntemi Yardımıyla Kayseri İli Örneğinde Rüzgâr Enerji Santrallerinin Yer Seçimi,” *Geomatik*, vol. 6, no. 3, pp. 227–237, Sep. 2020, doi: 10.29128/geomatik.772453.
- [15] S. Ekiz, A. Şirin, and A. Erener, “En uygun rüzgâr enerji santrali yerlerinin coğrafi bilgi

- sistemleri ile belirlenmesi: Kocaeli ili örneği,” *Journal of Geodesy and Geoinformation*, vol. 9, no. 1. pp. 59–79, 2022. doi: 10.9733/jgg.2022r0005.t.
- [16] “T. C. Kırşehir Valiliği Resmi İnternet Sitesi.” <http://www.kirsehir.gov.tr/cografya>
- [17] “Wikipedia Özgür Ansiklopedi.” [https://tr.wikipedia.org/wiki/Kırşehir_\(il\)](https://tr.wikipedia.org/wiki/Kırşehir_(il))
- [18] “Polat Enerji A.Ş. İnternet Sitesi.” <https://www.polatenerji.com/85-santrallerimiz/153-geycek-res/>
- [19] “ArcGIS for Desktop.” <https://support.esri.com/en/Products/Desktop/arcgis-desktop/arcmap/10-8-2>
- [20] B. Aktuğ *et al.*, “ED-50 (European Datum-1950) ile TUREF (Türkiye Ulusal Referans Çerçevesi) Arasında Datum Dönüşümü,” *Harit. Derg.*, vol. 50, no. 146, pp. 8–17, 2011.
- [21] E. Kaya, *A’dan Z’ye Rüzgar Santrali*. NORDEX Enerji A. Ş., 2021.
- [22] “Global Wind Atlas İnternet Sitesi.” <https://globalwindatlas.info>
- [23] A. Rosenqvist, “ALOS PALSAR: A Pathfinder Mission for Global-scale Monitoring of the Environment,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 45, no. 11, pp. 3307–3316, 2007.
- [24] “Dataset: ASF DAAC 2015, ALOS PALSAR Radiometric Terrain Corrected high res; Includes Material © JAXA/METI 2007. Accessed through ASF DAAC.” NASA Earth Data ASF (The Alaska Satellite Facility). doi: <https://doi.org/10.5067/JBYK3J6HFSVF>.
- [25] M. Türkeş, *Klimatoloji ve Meteoroloji*, 2nd ed. İstanbul: Kriter Yayıncılık, 2022.
- [26] “Wikipedia Özgür Ansiklopedi.” <https://tr.wikipedia.org/wiki/Alüvyon>
- [27] D. Arca and H. Çıtıröğlü, “Rüzgar Enerjisi Santral (RES) Yapım Yerlerinin CBS Dayalı Çok Kriterli Karar Analizi ile Belirlenmesi: Yenice İlçesi (KARABÜK) Örneği,” *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, vol. 10, no. 2. pp. 168–176, 2020. [Online]. Available: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/karaelmasfen>
- [28] OpenStreetMap, “Openstreet Map Vektörel CBS Karayolu Verileri.” GeoFabrik. [Online]. Available: <http://download.geofabrik.de/europe.html>
- [29] Ü. Şenol, “Rüzgar Enerjisi ve Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Yapay Sınır Ağları Yöntemiyle Tahmini,” *Yozgat Bozok Üniversitesi*, 2017.
- [30] OpenStreetMap, “Openstreet Map Vektörel CBS Yerleşim Yerleri Verileri.” GeoFabrik. [Online]. Available: <http://download.geofabrik.de/europe.html>
- [31] “T. C. Tarım ve Orman Bakanlığı - Doğa Koruma ve Milli Parklar Genel Müdürlüğü İnternet Sitesi.” <https://www.tarimorman.gov.tr/DKMP>
- [32] “Çevre Düzeni Planları (1/100 000 ölçekli).” T.C. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. [Online]. Available: <https://mpgm.csb.gov.tr/1-100.000-olcekli-i-82132>
- [33] “TKGM Parsel Sorgulama.” Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü İnternet Sitesi. [Online]. Available: <https://parselsorgu.tkgm.gov.tr/>
- [34] A. Bahadır, “Coğrafi bilgi sistemleri tabanlı çok kriterli karar analizinin rüzgar türbini yer seçim probleminde uygulanması.” Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara, p. 212, 2014.
- [35] “BIRDMAP İnternet Sitesi (Kuş Göç Yolları).”

<http://birdmap.5dvision.ee/EN/2021/spring/?line=1&track=0&speed=1>








- [36] “MTA Fay Hatları Sayısal Veri Seti (1/25000 ölçekli).” MTA Genel Müdürlüğü. [Online]. Available: https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/hizmetler/doc/diri_fay_haritalari/kirsehir.pdf



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

A Novel Control and Monitoring Interface Design for ROS Based Mobile Robots

 Bilal GUREVIN^{a, *},  Muhammed YILDIZ^b,  Furkan GULTURK^b,  Ihsan PEHLIVAN^c,
 Fatih CALISKAN^d,  Baris BORU^e,  M. Zahid YILDIZ^c

^a Department of Mechatronics Eng., , Graduate School of Education, Sakarya University of Applied Sciences, Sakarya, TURKEY

^b Department of Electrical and Electronics Eng., Graduate School of Education, Sakarya University of Applied Sciences, Sakarya, TURKEY

^c Department of Electrical and Electronics Eng., Faculty of Technology, Sakarya University of Applied Sciences, Sakarya, TURKEY

^d Department of Metallurgy and Materials Eng., , Faculty of Technology, Sakarya University of Applied Sciences, Sakarya, TURKEY

^e Department of Mechatronics Engineering, , Faculty of Technology, Sakarya University of Applied Sciences, Sakarya, TURKEY

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: bilalsau@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.29130/dubited.1214278>

ABSTRACT

In this study, an interface design was carried out in order to provide convenience to the user in the control and monitoring of the Robot Operating System (ROS) based autonomous mobile robot (AMR). Qt Designer and Python were used in the interface design. Thanks to the designed interface, autonomous and manual control of AMR was provided. Using the gmapping algorithm, the environment in the virtual world was mapped and transformed into a picture in .png format and visualized in the interface. The location information from the ROS was transferred to the said picture and the instant tracking of the AMR was done via the interface. It was shown which algorithm is used locally and globally at that moment. While in autonomous mode, the vehicle was provided to move to the previously recorded point. The total distance and time spent by the AMR while moving between two points were also calculated by the interface. The location (x, y, z) and orientations (x, y, z, w) of the previously recorded station were monitored from the stop list. On the other hand, the position (x, y, z) and orientation (x, y, z, w) information of the AMR could be followed as real time via the interface. In this way, when the AMR reaches the goal station, the time elapsed between two points, the transportation distance, settlement information such as the location and orientation of the vehicle can be tracked and be compared via the interface.

Anahtar Kelimeler: AMR, GUI, Path Planning, ROS

ROS Tabanlı Mobil Robotlar İçin Yeni Bir Kontrol ve Görüntüleme Arayüz Tasarımı

ÖZ

Bu çalışmada, Robot İşletim Sistemi (ROS) tabanlı otonom mobil robotun (AMR) kontrolünde ve izlenmesinde kullanıcıya kolaylık sağlamak amacıyla bir arayüz tasarımı gerçekleştirilmiştir. Arayüz tasarımında Qt Designer

ve Python kullanılmıştır. Tasarlanan arayüz sayesinde AMR'nin otonom ve manuel kontrolü sağlanmıştır. Gmapping algoritması kullanılarak sanal dünyadaki ortam haritalanarak .png formatında resme dönüştürülerek arayüzde görselleştirilmiştir. ROS'tan gelen konum bilgisi söz konusu resme aktarılmış ve arayüz üzerinden AMR'nin anlık takibi yapılmıştır. Lokal ve global olarak o an hangi algoritmanın kullanıldığı gösterilmiştir. Otonom modda iken aracın önceden kaydedilen noktaya hareket etmesi sağlanmıştır. AMR'nin iki nokta arasında hareket ederken aldığı toplam mesafe ve süre de arayüz tarafından hesaplanmıştır. Durak listesinden daha önce kaydedilen istasyonun konumu (x, y, z) ve yönleri (x, y, z, w) takip edilebilmiştir. Öte yandan AMR'nin konum (x, y, z) ve yön (x, y, z, w) bilgileri arayüz üzerinden gerçek zamanlı olarak takip edilebilmiştir. Bu sayede AMR hedef istasyona ulaştığında, iki nokta arasında geçen süre, ulaşım mesafesi, aracın konumu, yönü gibi yerleşim bilgileri arayüz üzerinden takip edilip karşılaştırılabilmiştir.

Keywords: AMR, GUI, Path Planning, ROS

Geliş: 04/12/2022, Düzeltme: 08/04/2023, Kabul: 09/04/2023

I. INTRODUCTION

Today, the use of AMR is increased day by day. The use of AMRs is expanded in many areas from the food sector to agriculture, from the health sector to animal husbandry [1-4]. The use of AMRs can be carried out indoors as well as outdoors. For example, AMRs are used in various fields such as the transportation of products between processes in a factory environment, and the transmission of goods leaving the line to the warehouse. ROS-based AMR studies are quite common in the academic field as well as in the industry. Some of the studies carried out are as mentioned below.

Liu et al. carried out a study in which A* and one-way graph method algorithms were used in the path planning of multiple AGVs. The studies were tested in a simulation environment with 20 AGVs [5]. Zhang et al. examined the algorithms used in path planning studies of mobile robots. They expressed the most widely used studies in path planning. And they gave advice on future research [6]. Secchi et al. carried out a study to increase the efficiency of the AGV fleet in terms of delivery time. The studies were tested in a small-scale warehouse [7]. Dongyong et al. carried out a multi-purpose algorithm study against problems such as path planning, avoiding obstacles, and time costs in the movements of multiple robots [8].

Goyal and Nagla presented a new path planning algorithm to improve the ability of mobile robots moving in closed areas to pass through narrow places such as doors. By modifying the A* algorithm, they performed the movement of the robot to the target point without hitting obstacles, in the simulation environment, thanks to the new algorithm they presented [9]. In their study, Park et al. made a path planner that determines the appropriate areas to be crossed with a hierarchical road map while the mobile robot navigates in an unknown environment. They tested the study in a home environment [10].

Aslan and Yazıcı carried out a study to prevent the collision problem of multiple autonomous carriers. Thanks to the algorithm they developed based on the A* algorithm, they realized the path planning of multiple mobile robots moving between multiple start and end points. They provided path planning without conflicts with the tests performed [11]. Garip Batik et al. proposed a path planning study to prevent collisions of more than one mobile robot while moving in the same environment. With the images taken from the camera placed on the ceiling, the positions of the objects and robots were determined. And they made path planning with the help of the A* algorithm. They showed the path planning tracking with the interface they designed in Matlab GUI [12].

Metaheuristic-based studies have also started to be preferred in path planning algorithms due to their computational speed [13]. Yıldırım and Akay worked on optimal path planning in mobile robots. They created fixed objects in certain shapes with the interface they designed in the Matlab interface. In the

system where the starting and destination points were entered, they carried out the route planning to the target point by using PSO (Particle Swarm Optimization), ABC (Artificial Bee Colony) and GA (Genetic Algorithm). They showed that ABC gave more successful results than other algorithms when compared in terms of the shortest path [14]. Yıldırım and Rüştü compared linear and nonlinear objective functions in their study on path planning of mobile robots. They showed that the linear objective function was superior in terms of both time and distance in the study in which the GA was used in global path planning [15].

In this study, an interface design has been carried out in order to provide ease of manual control and tracking of AMR during autonomous movement. AMR must choose the appropriate route while performing its autonomous movement on the known map. In this way, it is possible to reach the destination in the shortest way and in the shortest time. At the same time, the position and accuracy of its position when it settles in the target station are important according to the task it will perform at that station. For example, it may be necessary to be sensitive to the accuracy of the point placed in the process of being integrated into a line at the arriving station or picking up / dropping a product. With the interface developed in line with these needs, the time spent and the distance covered by the AMR between two points during its autonomous movement can be calculated and followed by the user. In addition, the location and position information of the target station and the location and position information at the time the station is reached can also be compared thanks to the interface. Detailed information about the interface design is given in Chapter 3. Virtual environment studies were carried out in the Gazebo program. Rviz program was used to visualize the data coming from the sensors and to follow the vehicle and route. A model originally developed as AMR was used in the virtual environment studies.

In the continuation of the study, in Chapter 2; The path planning algorithms used are mentioned. In Chapter 3; interface, AMR design and working environment are mentioned. Finally, in Chapters 4 and 5, the experimental results and interpretations of the studies using the interface are given.

II. ALGORITHMS

Local and global path planners, which are frequently used in the ROS ecosystem, were preferred to test the autonomous movement of AMR with the developed interface. Dynamic Window Approach local planner (DWA) [16] was chosen as the local planner, and global_planner [17] was chosen as the global planner.

A. LOCAL PLANNER

AMR needs local planner to detect and avoid surrounding objects while going to the determined target. In this study, DWA local planner was preferred because of its fast computation [18]. In DWA, an objective function is created by considering the distance to the objects and the AMR speed. The mobile robot moves concentrically with the dynamic window drawn around it. Calculations are made in this window. Objective function includes distance to nearest obstacle, robot speed, local target distance and distances to global orbit. According to this function, angular and rotational speed pairs are formed [19, 20].

B. GLOBAL PLANNER

Global planners are used to calculate the optimal path to the destination in the known environment [21]. In this study, the global_planner offered by ROS and using the Dijkstra algorithm was chosen as the global planner. Dijkstra divides the global map into cells to form a grid-cell map. From the starting point to the target, values are assigned to each cell according to the distance from the mobile robot. In each iteration, the path towards the target is established by looking at the occupancy of the next neighboring cells [18].

III. SYSTEM IMPLEMENTATION

In this section, the developed GUI and the original AMR design were included. In addition, the ROS version and computer features used were mentioned.

A. GUI Design

In the user interface design phase of the study, Qt Designer program and Python software language were used. The designed interface consists of three main tabs in total. These are; “Amr Manual Control”, “Amr Autonomous Control”, “Log Page” tabs.

A. 1. AMR Manuel Control

In the Amr Manual Control tab, under the title of Amr Indicator, information about the linear and angular velocities of the vehicle, the angle it makes with the horizontal x-axis, and its position on the x-y axis can be followed. Under the Manual Control title shown in Figure 1, linear and angular speed can be given to the vehicle and manual control can be achieved with direction buttons.

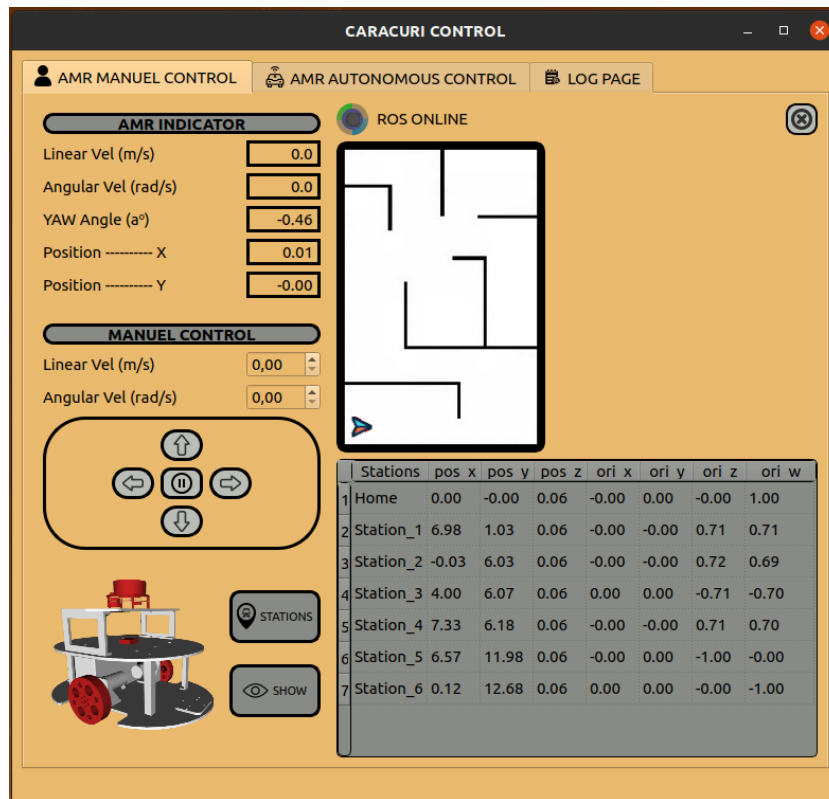


Figure 1. Manuel control interface section

It is possible to follow the vehicle real time on the map in the interface. As seen in Figure 2, it can be seen that the position of the vehicle in the Rviz environment (right image) and its positions in the interface (left image) and orientations are the same.

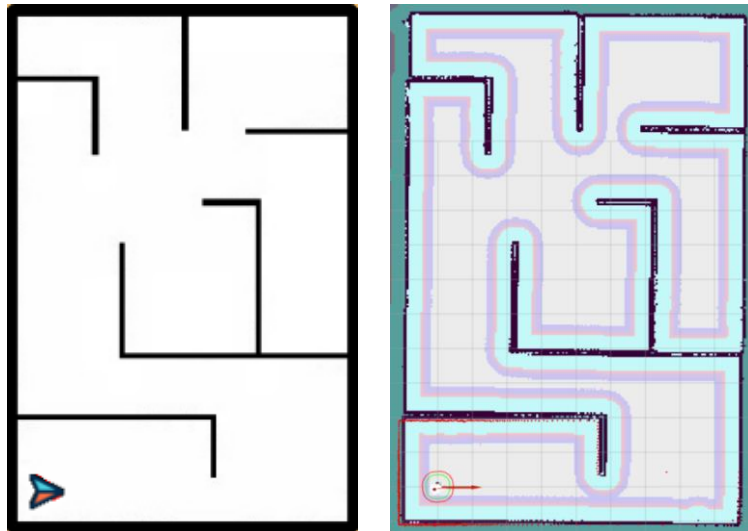


Figure 2. AMR tracking on interface and Rviz

Pressing the Stations / Manual button switches between two different sections. One of these sections is the section under the title Manual Control. The other is the section under the Station Save and Delete heading. Under the Save and Delete Station title, the location information at the point where the vehicle is located can be saved with a name given by the user. During the recording, the position (x, y, z) indicating the position of the vehicle and the orientation (x, y, z, w) indicating the orientation of the vehicle are received. When the Ref button is pressed, the recorded stops are listed in the table on the right with location information in tabular form. Likewise, the desired stop can be selected and deleted. With the Show/Hide button, the locations of the stations on the map can be shown or hidden by station icons. The mentioned features of the interface are shown in Figure 3.

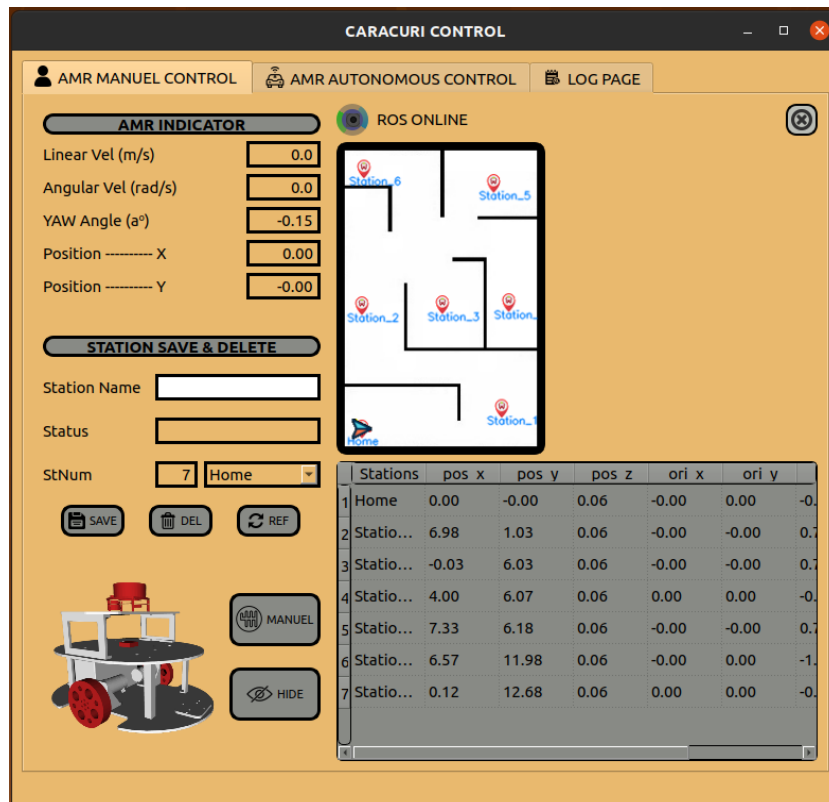


Figure 3. Monitoring of stations in the interface

A. 2. AMR Autonomous Control

AMR can be controlled autonomously in the Amr Autonomous Control tab. The activity of the ROS connection can be seen thanks to the animated icon in the upper middle of the screen. It is possible to exit the program with the cross icon in the upper right corner. In the lower right part of the screen, the previously saved stations are listed with their name, location and position information. After selecting the desired station under the Go To Station title, the autonomous movement of the AMR can be achieved by assigning a task with the Go button. In the same way, the AMR can be stopped by canceling the task thanks to the Stop button during the movement. Under the Amr Indicator title, the real time linear velocity, angular velocity, orientation angle, total distance of the vehicle and how long it took to take that path are displayed. Under the title of Amr Position Indicator, the instant location and position information of the vehicle is displayed. In this way, when the vehicle arrives at any station, the location and position information of the previously recorded station can be compared with the location and position information at the time of arrival. In this way, it is possible to compare which of the different route planning algorithms takes the shortest route and arrives in the least time. Finally, under the title of Path Planning Algorithm, it is shown which path planning algorithms are used locally and globally. The features mentioned in the interface are shown in Figure 4.

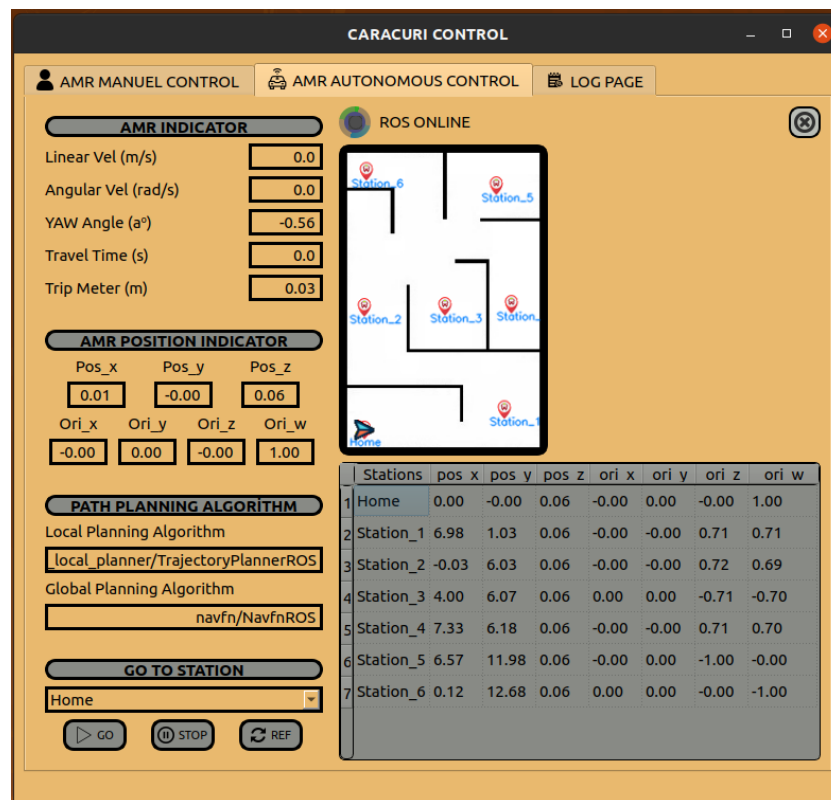


Figure 4. AMR autonomous control via interface

A. 2. Log Page

The third and last section used in the interface design is the section called Log Page. In this section, the error outputs of the python-based software run in the ROS and interface program can be viewed by the user. Thanks to the "try-except" structure, the error in which part of the software is directly printed on the log screen. Log Page section of the interface is as shown in Figure 5.



Figure 5. AMR Log page section

B. AMR DESIGN

In the virtual environment studies carried out in the ROS environment, the originally designed AMR model was used instead of ready-made models such as Turtlebot. SolidWorks solid model design program was used in AMR design. By using the URDF export extension of the SolidWorks program, AMR was transferred to the ROS environment. There are Lidar, IMU, Encoder sensors on the AMR. Thanks to these sensors, mapping and localization processes were carried out. Differential driving system was preferred as the driving system. The AMR design is as shown in Figure 6. The sensor plugin and technical features of the AMR used in the study carried out in the virtual environment are as shown in Table-1.

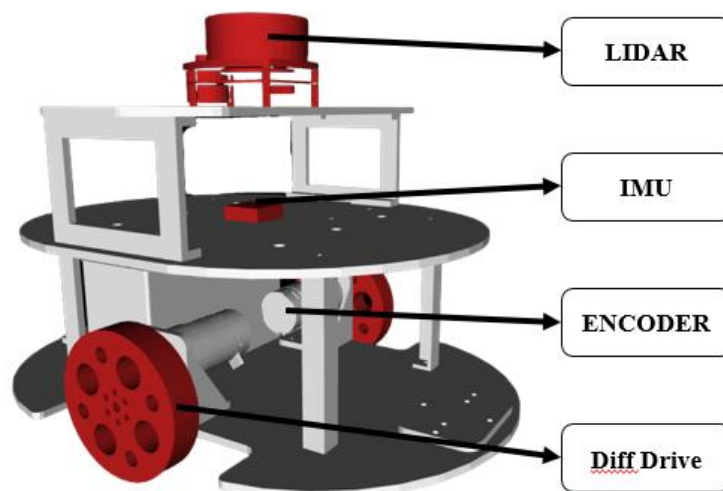


Figure 6. AMR design

Table 1. PC and ROS Features

Drive system	Mid-drive differential drive system
IMU sensor	plugin filename="libgazebo_ros_imu_sensor.so"
Lidar sensor	plugin name="gazebo_ros_head_hokuyo_controller"
Motor encoder	plugin name="differential_drive_controller"
Wheel diameter	10 cm
Distance between wheels	21 cm
AMR dimensions	27 x 27 x 35 (cm)

The transform tree obtained from the URDF format of AMR is as shown in Figure 7. Thanks to the transform tree, the structures to which each limb of the robot is connected can be seen. Here chassis_link refers to the main body of the AMR. IMU sensor, lidar sensor, right and left drive wheels as well as front and rear caster wheels are integrated into the main body. AMR takes the map information as a global reference in its environment and determines its location thanks to the odom data. Positions the main body within the detected point. In this way, the location and position information of the AMR is detected and visualized.

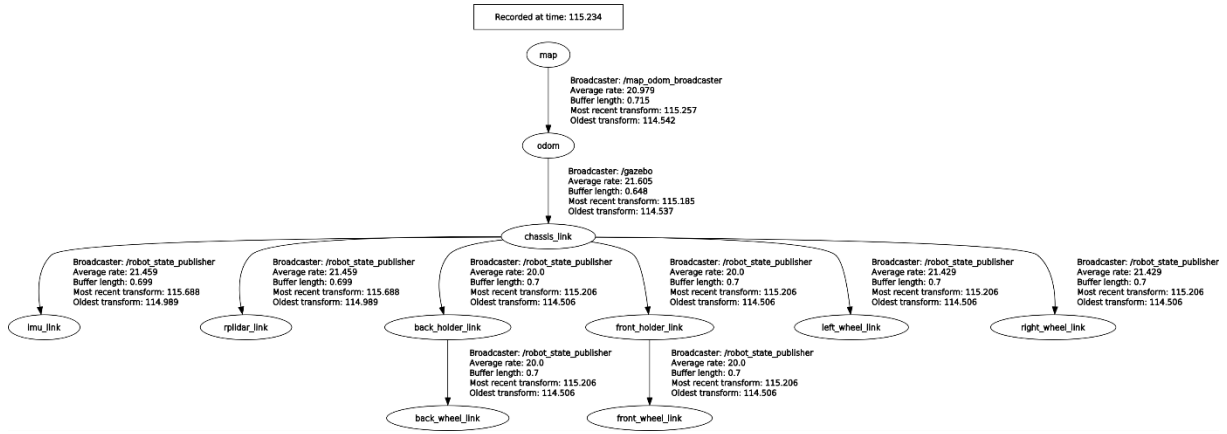


Figure 7. AMR URDF transform tree

C. ROS and PC HARDWARE

The computer and ROS information on which the studies were carried out are as shown in the Table 2 below.

Table 2. PC and ROS Features

OS	Ubuntu 20.04
RAM	32 GB
CPU	Intel Core İ7-9750H @ 12x4,5 GHz
GPU	GeForce RTX 2080 Mobile
ROS	Noetic

Structures called nodes in the ROS ecosystem communicate with each other on the principle of publishing and subscribing to the broadcast. In the study carried out, the node communications in the ROS system are as shown in Figure 8. For example, map information published from /map_server and goal information published from /move_base_simple are read by /move_base. This information is then

processed and published by /move_base. The topic published by /move_base is read by /cmd_vel and the vehicle in the gazebo is moved. Similarly, the continuing cycle can be seen on the figure.

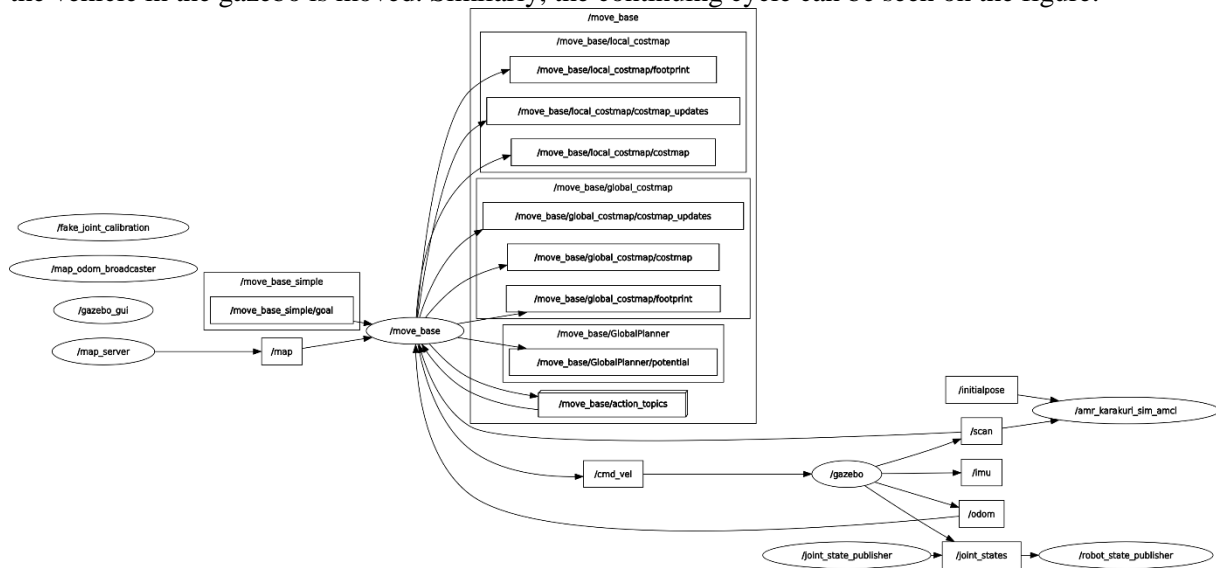


Figure 8. ROS node graph diagram

D. EXPERIMENT SETUP

Gazebo was used as a virtual world to compare the performance of local planners used in the ROS ecosystem [22]. Here, a closed environment with chambers of 15x10 m was created. The AMR was placed at the starting point and made ready for assignment. Figure 9 shows the view of the virtual world in Gazebo and the AMR at the starting point.



Figure 9. Gazebo environment used in the study

The visualization of sensor information and map information received from AMR was performed in Rviz. Thanks to Rviz, it is possible to visualize many data such as AMR's environment and path planning, real time position, orientation, laser and obstacle [23]. Figure 10 shows the location, orientation and map information of the AMR in the Rviz environment.

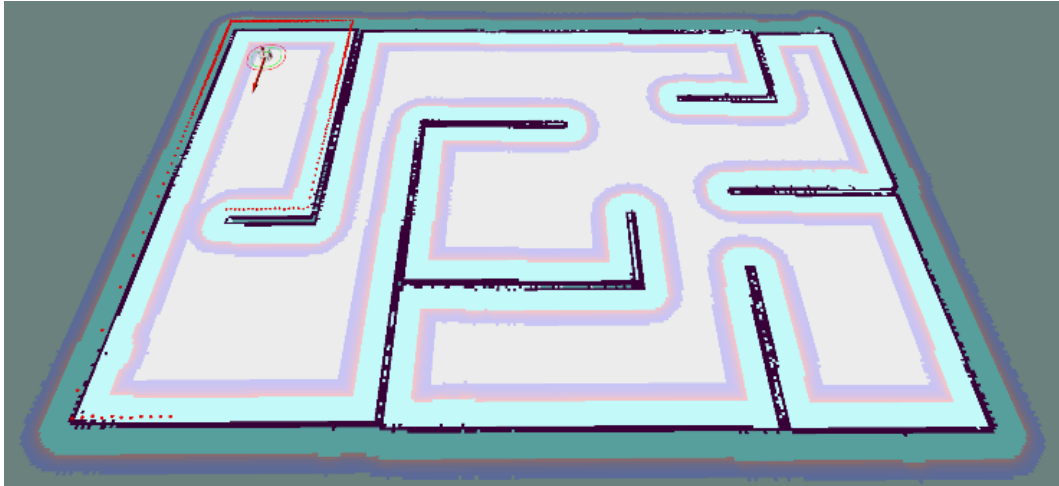


Figure 10. Visualization of Gazebo environment in Rviz

IV. RESULTS ANALYSIS

In this chapter; Autonomous control and monitoring of AMR was performed using the developed interface. AMR was requested to go autonomously to 6 different previously registered stations. For this, the desired station was selected from the list and the “GO” button was pressed. Figure 11 shows the Rviz images of the AMR starting from the "Home" point and going to 6 stops in sequence. The time to reach each station and the distance between each station were tracked through the interface. The results obtained were expressed in Table 3. The position and orientation information of the previously recorded stations and the position and location information when the AMR is placed at the station were shown in Table 4 by pulling from the interface. A detailed discussion of the results obtained is given in section 5.

Table 3. Arrival Times Of Amr And Distance Values Of The Roads

	Distance (m)	Time (sec)
St-1	7,34	17,11
St-2	9,48	21,86
St-3	5,20	16,52
St-4	8,73	25,72
St-5	7,57	21,66
St-6	9,17	24,25
Total	47,49	127,12

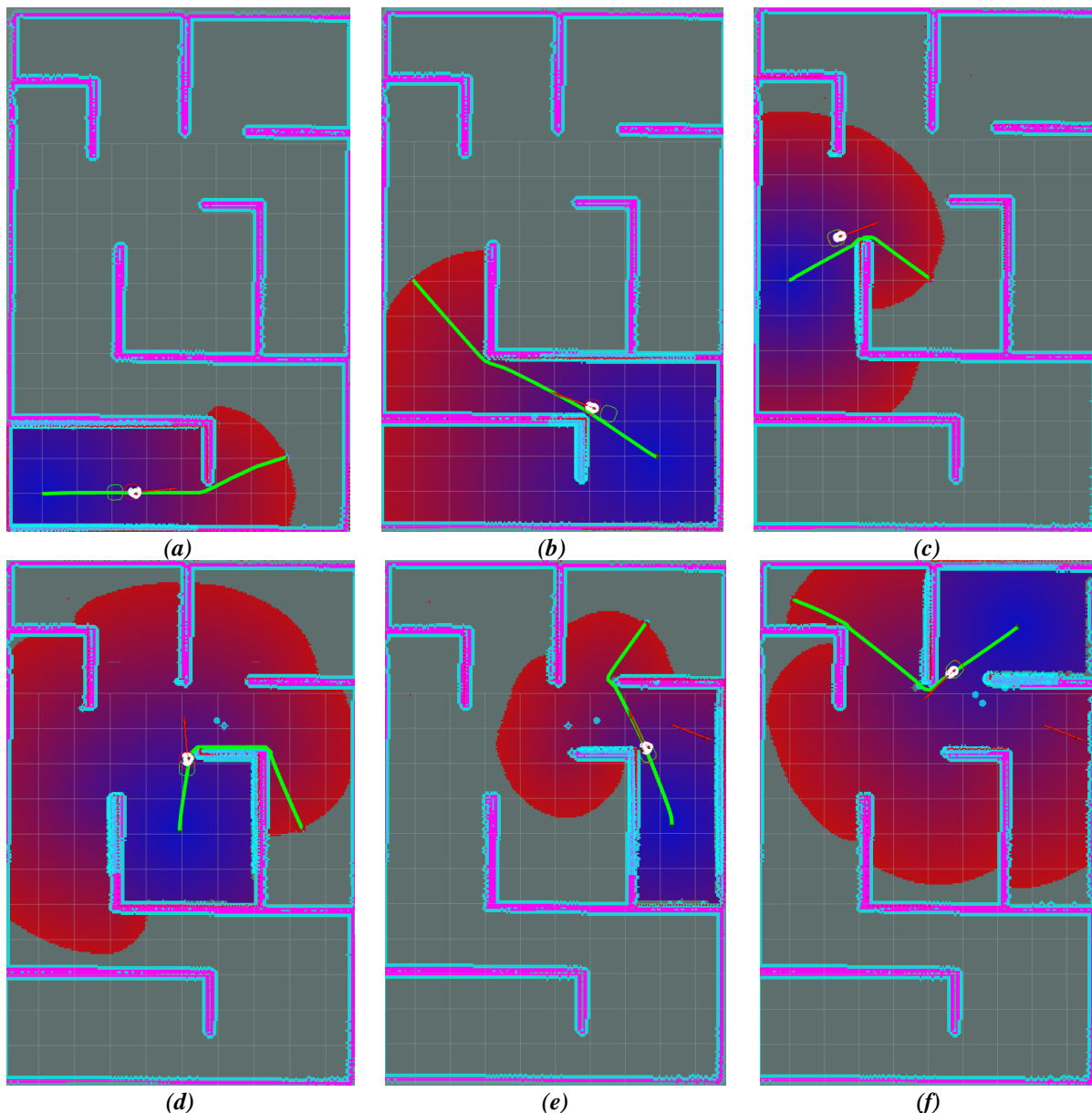


Figure 11. Assigning tasks to six different stations in order (a) from home to station-1 (b) from station-1 to station-2 (c) from station-2 to station-3 (d) from station-3 to station-4 (e) from station-4 to station-5 (f) from station-5 to station-6

Table 4. Comparison Table Of Position And Orientation Values

		Pos-X	Pos-Y	Pos-Z	Ori-X	Ori-Y	Ori-Z	Ori-W
St-1	Goal	6.98	1.03	0.06	0.00	0.00	0.71	0.71
	Real	6.97	0.97	0.06	0.00	0.00	0.65	0.76
St-2	Goal	-0.03	6.03	0.06	0.00	0.00	0.72	0.69
	Real	-0.02	5.91	0.06	0.00	0.00	0.73	0.68
St-3	Goal	4.00	6.07	0.06	0.00	0.00	-0.71	-0.70
	Real	4.05	5.99	0.06	0.00	0.00	0.64	0.77
St-4	Goal	7.33	6.20	0.06	0.00	0.00	0.71	0.70
	Real	7.34	6.06	0.06	0.00	0.00	0.71	0.70
St-5	Goal	6.57	11.98	0.06	0.00	0.00	-1.0	0.00
	Real	6.60	12.02	0.06	0.00	0.00	0.99	0.14
St-6	Goal	0.12	12.68	0.06	0.00	0.00	0.00	-1.0

V. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

In this study, a PyQt-based interface was used for autonomous control and monitoring of ROS-based AMR. DWA_local_planner was used as local planner and global_planner was used as global planner in providing autonomous movement of AMR. As a result of the study, the time spent by the AMR between each station and the distance it took were read from the interface and Table 3 was created.

When we examine Table 3;

- While going from Home to St-1, it took 7.34 m and 17.11 sec.
- While going from St-1 to St-2, it took 9.48 m and 21.86 sec.
- While going from St-2 to St-3, it took 5.20 m and 16.52 sec.
- While going from St-3 to St-4, it took 8.73 m and 25.72 sec.
- While going from St-4 to St-5, it took 7.57 m and 21.66 sec.
- While going from St-5 to St-6, it took 9.17 m and 24.25 sec.
- A total of 47.49 m traveled and 127.12 sec. it took.

as we can see the results.

In addition, when each station is reached, the position and orientation of the AMR was read from the interface again and Table 4 was created.

When we examine Table 4 the recorded goal position values for St-1 are;

- Pos-X=6.98
- Pos-Y=1.03
- Pos-Z=0.06

the orientation values are;

- Ori-X=0.00
- Ori-Y=0.00
- Ori-Z=0.71
- Ori-W=0.71

On the other hand, the position values when the AMR reaches St-1;

- Pos-X=6.97
- Pos-Y=0.97
- Pos-Z=0.06

the orientation values are;

- Ori-X=0.00
- Ori-Y=0.00
- Ori-Z=0.65
- Ori-W=0.76

Similarly, the position and orientation values when the AMR reaches all stations and should be can be seen in Table-4. According to Table-4, the accuracy rates of settling at the target stations were calculated and expressed in Table-5. In this way, it can be measured how accurately the AMR approached when it arrived at the desired station. When the AMR arrived at St-1, it was settled with an accuracy of 99.8% at the x position, 94.1% at the y position, and 100% at the z position. In addition, the x orientation is 100%, the y 100%, the z orientation 91.5%, and the w orientation is 93.4% accurate.

Tablo 5. Table Of Placement Accuracy Of AMRs

	Position			Orientation			
	x (%)	y (%)	z (%)	x (%)	y (%)	z (%)	w (%)
St-1	99.8	94.1	100	100	100	91.5	93.4
St-2	66.6	98	100	100	100	98.6	98.5
St-3	98.7	98.6	100	100	100	90.1	90.9
St-4	99.8	97.7	100	100	100	100	100
St-5	99.5	99.6	100	100	100	-99	7.1
St-6	14.2	95.7	100	100	100	1.04	28

In the autonomous movement of the AMR to a station, the time to reach the station, the distance traveled, the desired position and approach to the station are important work areas. When the literature studies are examined, there are many studies in the field of path planning. However, interface studies that can perform AMR manual control, autonomous control, AMR position and position tracking are negligible.

In this study, a unique ROS-based AMR control interface and AMR design were made and contributed to the literature. Thanks to this interface, which has ROS connections in the background, AMR tracking is easily performed. The path planning study using Local and Global path planning algorithms was carried out and the time and distance covered by AMR in reaching the target were calculated by the interface. In addition, the location and orientation of the target station and the location and orientation information of the AMR when it is placed on the target can be followed by the interface. With the work done, ROS developers have been contributed with interface design in the field of AMR monitoring and control.

ACKNOWLEDGMENT: This study was obtained from the PhD project of SUBU, numbered 075-2022, named "Path Planning with Meta-Heuristic Algorithms in Autonomous Mobile Robots and Designing a New Mobile Robot" supported by BAP. It was also supported within the scope of TUBITAK-2244 project numbered 118C142.

V. REFERENCES

- [1] E.T. Baek and D.Y. Im, "ROS-Based Unmanned Mobile Robot Platform for Agriculture," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 9, p. 4335, 2022.
- [2] P. Karpyshev, V. Ilin, I. Kalinov, A. Petrovsky, and D. Tsetserukou, "Autonomous Mobile Robot for Apple Plant Disease Detection based on CNN and Multi-Spectral Vision System," 2021.
- [3] J. Kriegel, C. Rissbacher, L. Reckwitz, and L. Tuttle-Weidinger, "The requirements and applications of autonomous mobile robotics (AMR) in hospitals from the perspective of nursing officers," *Int. J. Healthc. Manag.*, 2021.
- [4] M. Law *et al.*, "Case studies on the usability, acceptability and functionality of autonomous mobile delivery robots in real-world healthcare settings," *Intell. Serv. Robot.*, vol. 14, no. 3, 2021.
- [5] C. Liu, J. Tan, H. Zhao, Y. Li, and X. Bai, "Path planning and intelligent scheduling of multi-AGV systems in workshop," 2017.
- [6] H. Y. Zhang, W. M. Lin, and A. X. Chen, "Path planning for the mobile robot: A review," *Symmetry (Basel)*, 2018.



- [7] C. Secchi, R. Olmi, F. Rocchi, and C. Fantuzzi, "A dynamic routing strategy for the traffic control of AGVs in automatic warehouses," in *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2015.
- [8] Y. Dongyong, C. Jinyin, N. Matsumoto, and Y. Yamane, "Multi-robot path planning based on cooperative co-evolution and adaptive CGA," 2006.
- [9] J. K. Goyal and K. S. Nagla, "A new approach of path planning for mobile robots," 2014.
- [10] B. Park, J. Choi, and W. K. Chung, "An efficient mobile robot path planning using hierarchical roadmap representation in indoor environment," 2012.
- [11] O. Aslan and A. Yazici, "Conflict-Free Route Planning for Autonomous Transport Vehicle," 2020.
- [12] Z. B. Garip, D. Karayel, S. S. Ozkan, and G. Atali, "Path planning for multiple mobile robots using A* algorithm," *Acta Phys. Pol. A*, vol. 132, no. 3, pp. 685–688, 2017.
- [13] G. Atalı, I. Pehlivan, B. Gürevin, and H. I. Seker, "Chaos in metaheuristic based artificial intelligence algorithms: A short review," *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 29, no. 3. 2021.
- [14] M. Y. Yıldırım and R. Akay, "Mobil Robotların Yol Planlamasında Doğrusallığın İncelenmesi," *Eur. J. Sci. Technol.*, 2021.
- [15] M. Y. Yıldırım and A. Rüştü, "A Comparative Study of Optimization Algorithms for Global Path Planning of Mobile Robots," *Sak. Univ. J. Sci.*, vol. 25, no. 2, pp. 417–428, 2021.
- [16] R. Wiki, http://wiki.ros.org/dwa_local_planner; 2022 [accessed 28 August 2022]
- [17] R. Wiki, http://wiki.ros.org/global_planner; 2022 [accessed 28 August 2022]
- [18] C. Z. Looi and D. W. K. Ng, "A Study on the Effect of Parameters for ROS Motion Planer and Navigation System for Indoor Robot," *Int. J. Electr. Comput. Eng. Res.*, vol. 1, no. 1, 2021.
- [19] B. Cybulski, A. Wegierska, and G. Granosik, "Accuracy comparison of navigation local planners on ROS-based mobile robot," 2019.
- [20] S. Karakaya and H. Ocak, "Açısal Duruş Kontrolü Destekli Özgün bir Dinamik Pencere Yaklaşımı," *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilim. Derg.*, vol. 7, no. 1, 2020.
- [21] P. Marin-Plaza, A. Hussein, D. Martin, and A. De La Escalera, "Global and Local Path Planning Study in a ROS-Based Research Platform for Autonomous Vehicles," *J. Adv. Transp.*, vol. 2018.
- [22] M. M. Moslemi and M. Sadedel, "Behavior Control and Navigation of Two-Wheeled Robot Using ROS-Gazebo," in *2022 8th International Conference on Control, Instrumentation and Automation (ICCIA)*, 2022, pp. 1–6.
- [23] P. Xu, N. Wang, S. L. Dai, and L. Zuo, "Motion planning for mobile robot with modified BIT* and MPC," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 1, 2021.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Bazı Genelleştirilmiş Sabit Çember Sonuçları Üzerine

 Nihal TAŞ^{a,*},  Özlem MORALI KIZANLIK^b

^a Matematik Bölümü, Fen Edebiyat Fakültesi, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, TÜRKİYE

^b Matematik Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: nihaltas@balikesir.edu.tr

DOI: <https://doi.org/10.29130/dubited.1258967>

Öz

Bu çalışmada, son zamanlarda üzerinde çalışılan bir açık problem olan “sabit çember problemi” için yeni sonuçlar araştırmaya çalışacağız. Bunun içinde literatürde var olan bazı bilinen daralma koşullarından esinleneceğiz. Bu anlamda, metrik uzaylar üzerinde JS-Ciric tipinde x_0 -daralma, JS-Hardy Rojers tipinde x_0 -daralma, JS-Reich tipinde x_0 -daralma ve JS-Chatterjea tipinde x_0 -daralma kavramlarını tanımlayacağız. Bu yeni daralma koşulları ile bazı sabit çember teoremleri ve sabit disk sonuçları elde edeceğiz. Son bölümde de, elde edilen teorik sonuçları gerçekleyen bazı örnekler vereceğiz.

Anahtar Kelimeler: Metrik uzay, Sabit çember, Sabit disk

On Some Generalized Fixed Circle Results

ABSTRACT

In this study, we try to search for new results for the “fixed circle problem”, which is an open problem that has been studied recently. In this we inspire by some known contractive conditions that exist in the literature. In this sense, we define the concepts of JS-Ciric type x_0 -contraction, JS-Hardy Rojers type x_0 -contraction, JS-Reich type x_0 -contraction and JS-Chatterjea type x_0 -contraction on metric spaces. With these new contraction conditions, we obtain some fixed circle theorems and fixed disc results. In the last section, we give some examples that demonstrate the theoretical results obtained.

Keywords: Metric space, Fixed circle, Fixed disc

I. GİRİŞ

Sabit nokta nedir?

$X \neq \emptyset$ kümesi üzerinde $T : X \rightarrow X$ bir fonksiyon olsun. Eğer

$$Tx = x$$

olacak şekilde bir $x \in X$ noktası varsa bu x noktasına T fonksiyonunun bir sabit noktası denir.

Sabit nokta kavramı, sabit nokta teorisi altında sıkça çalışılan bir konu haline gelmiştir. Sabit nokta teoremleri, genel olarak belirli koşullar altında verilen bir fonksiyonun sabit noktasının varlığını ve tekliğini garanti etmede yardımcı olmaktadır. Fakat öyle fonksiyon örnekleri vardır ki sabit noktası olmasına rağmen literatürde var olan sabit nokta teoremlerinin koşullarını sağlamaz. Bu durumda da, yeni sabit nokta teoremlerinin araştırılması yeni bir çalışma konusu olarak karşımıza gelmektedir. Yeni teoremler araştırılırken, kullanılan yöntemlerden biri ele alınan daralma koşulunun genelleştirilmesidir. Bu anlamda Ćirić tipinde [1,2], Hardy-Rogers tipinde [3], Reich tipinde [4] ve Chatterjea tipinde [5] daralma koşulları tanımlanmış ve bu koşullar yardımıyla çeşitli sabit nokta teoremleri elde edilmiştir.

Bazı fonksiyon örnekleri de ele alındığında sabit nokta sayısının birden fazla olduğu görülmüştür. Örneğin, $X = \mathbb{R}$ ve $T : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ fonksiyonu her $x \in \mathbb{R}$ için

$$Tx = x^2 + x - 9$$

şeklinde tanımlı olsun. Bu durumda, T fonksiyonunun $x_1 = -3$ ve $x_2 = 3$ gibi iki sabit noktası vardır.

Yukarıdaki örnekte görüldüğü gibi, bir fonksiyonun sabit nokta sayısı birden fazla olduğu durumda bu sabit noktaların geometrik özelliklerinin araştırılması “sabit çember problemi” olarak karşımıza çıkmıştır [6].

Peki sabit çember nedir?

(X, d) bir metrik uzay ve $T : X \rightarrow X$ bir fonksiyon olsun. x_0 merkezli r yarıçaplı çember

$$C_{x_0, r} = \{x \in X : d(x, x_0) = r\}$$

şeklinde tanımlıdır. Eğer her $x \in C_{x_0, r}$ için $Tx = x$ ise bu durumda $C_{x_0, r}$ çemberi T fonksiyonunun bir sabit çemberidir [6].

Sabit çember kavramı benzer şekilde sabit disk kavramına genelleştirilmiştir:

x_0 merkezli r yarıçaplı disk

$$D_{x_0, r} = \{x \in X : d(x, x_0) \leq r\}$$

şeklinde tanımlıdır. Eğer her $x \in D_{x_0, r}$ için $Tx = x$ ise bu durumda $D_{x_0, r}$ diski T fonksiyonunun bir sabit diskidir [7].

Bu problem çerçevesinde, literatürde değişik yaklaşımlar ile farklı sabit çember ve sabit disk sonuçları elde edilmiştir. Örneğin, bu probleme ilk çözüm Özgür ve Taş tarafından Caristi eşitsizliğinden yararlanılarak elde edilmiştir [6]. Daha sonra Özgür tarafından sabit disk kavramı tanıtılıp, simülasyon fonksiyonları yardımıyla bazı sabit disk sonuçları verilmiştir [7]. Taş, Özgür ve Mlaiki 2018 yılında Wardowski tekniği yardımıyla bilinen daralma koşullarından esinlenilerek yeni sabit çember sonuçları ispatlamışlardır [8]. Özgür ve Taş 2018 yılında yardımcı bir fonksiyon ailesi yardımıyla yeni sabit çember teoremleri elde etmişlerdir ve ayrıca sabit çember üzerinde süreksizlik durumlarını da incelemişlerdir [9]. Bisht ve Özgür 2020 yılında $\varepsilon - \delta$ daralma koşulu kavramını kullanarak sabit çember problemine yeni sonuçlar elde etmişler ve sınır ağlarına da bir uygulama vermişlerdir [10]. Çelik ve Özgür 2020 yılında farklı teknikler ile literatüre yeni sabit çember sonuçları kazandırmışlardır [11]. Taş ve Özgür 2020 yılında S -metrik uzaylar üzerinde sabit çember problemine yeni sonuçlar verip, literatürde var olan bazı sabit çember sonuçlarını genellemişlerdir [12]. Özgür ve Taş 2021 yılında Pata Zamfirescu tipinde sabit disk sonuçları elde edip, proximal anlamda bir uygulama vermişlerdir [13]. Roy ve Saha 2022 yılında genelleştirilmiş JS-daralma koşulu yardımıyla sabit çember problemine bir uygulama elde etmişlerdir [14]. Mlaiki ve arkadaşları tarafından 2022 yılında çeşitli ortak sabit çember problemleri de elde edilmiştir [15]. Kaplan ve arkadaşları 2022 yılında yeni bir yardımcı fonksiyon ailesi yardımıyla bu probleme yeni sonuçlar kazandırmışlardır [16]. 2023 yılında da bu problem bulanık esnek küme yardımıyla da çalışılmaya başlanmıştır [17, 18].

Biz de bu çalışmada, metrik uzaylar üzerinde [8] numaralı kaynakta elde edilen sabit çember sonuçlarını JS-daralma koşulu teknikleri [14,19-21] ile birleştirerek yeni sabit çember teoremleri ispatlayacağız. Elde edilen bu sabit çember teoremleri yardımıyla da sabit disk sonuçları vereceğiz. En son olarak, elde edilen teorik sonuçları destekleyen örnekler sunacağız.

II. ANA SONUÇLAR

Bu bölümde bazı sabit çember sonuçları elde edeceğiz. Bunun için de aşağıdaki şekilde tanımlı Ψ ailesini kullanacağız:

Ψ ailesi aşağıdaki koşulları sağlayan $\psi : [0, \infty) \rightarrow [1, \infty)$ fonksiyonlarının sınıfıdır.

- i) ψ artan bir fonksiyondur.
- ii) $\psi(t) = 1 \Leftrightarrow t = 0$.

Yeni sabit çember sonucu elde etmek için aşağıdaki tanımı verelim.

Tanım 2.1. (X, d) bir metrik uzay ve $T : X \rightarrow X$ bir fonksiyon olsun. Her $x \in X$ için $q, r, s, t \in [0, 1)$ ve $q + r + s + t < 1$ olmak üzere

$$d(Tx, x) > 0 \Rightarrow \psi(d(Tx, x)) \leq \psi(d(x, x_0))^q \psi(d(x, Tx))^r \psi(d(x_0, Tx_0))^s \psi \left[\frac{d(x, Tx_0) + d(x_0, Tx)}{2} \right]^t$$

olacak şekilde $x_0 \in X$ ve $\psi \in \Psi$ varsa, T fonksiyonuna JS-Ciric tipinde x_0 -daralma denir.

Önerme 2.2. (X, d) bir metrik uzay ve $T : X \rightarrow X$ fonksiyonu $x_0 \in X$ ile bir JS-Ciric tipinde x_0 -daralma olsun. Bu durumda $x_0 = Tx_0$ dır.

İspat. Tersine $x_0 \neq Tx_0$ olsun. Bu durumda, hipotezden

$$\begin{aligned}
\psi(d(Tx_0, x_0)) &\leq \psi(d(x_0, x_0))^q \psi(d(x_0, Tx_0))^r \psi(d(x_0, Tx_0))^s \psi\left[\frac{d(x_0, Tx_0) + d(x_0, Tx_0)}{2}\right]^t \\
&= \psi(0)^q \psi(d(x_0, Tx_0))^r \psi(d(x_0, Tx_0))^s \psi(d(x_0, Tx_0))^t \\
&= \psi(d(x_0, Tx_0))^{r+s+t}
\end{aligned}$$

elde edilir. $r + s + t < 1$ olduğundan,

$$\psi(d(x_0, Tx_0)) = 1$$

olur ve ψ fonksiyonunun tanımından $d(x_0, Tx_0) = 0$ dır, yani $Tx_0 = x_0$ elde edilir. \square

Teorem 2.3. (X, d) bir metrik uzay, $T: X \rightarrow X$ fonksiyonu $x_0 \in X$ ile JS-Ciric tipinde x_0 -daralma olsun ve r sayısı

$$r = \inf \{d(Tx, x) : x \neq Tx\}$$

şeklinde tanımlansın. Eğer $x \in C_{x_0, r}$ için $d(Tx, x_0) = r$ ise bu durumda, T fonksiyonu $C_{x_0, r}$ çemberini sabit bırakır.

İspat. Aşağıdaki durumları dikkate alalım:

Durum1: $r = 0$ olsun. O halde $C_{x_0, r} = \{x_0\}$ olur ve Önerme 2.2 den $C_{x_0, r}$ çemberi T nin bir sabit çemberidir.

Durum2: $r > 0$ ve $x \in C_{x_0, r}$ noktası $d(x, Tx) > 0$ olacak şekilde bir nokta olsun. Hipotezden,

$$\begin{aligned}
\psi(d(Tx, x)) &\leq \psi(d(x, x_0))^q \psi(d(x, Tx))^r \psi(d(x_0, Tx_0))^s \psi\left[\frac{d(x, Tx_0) + d(x_0, Tx)}{2}\right]^t \\
&= \psi(r)^q \psi(d(x, Tx))^r \psi(0)^s \psi(r)^t \\
&\leq \psi(d(x, Tx))^q \psi(d(x, Tx))^r \psi(d(x, Tx))^t \\
&= \psi(d(x, Tx))^{q+r+t}
\end{aligned}$$

elde edilir. $q + r + t < 1$ olduğundan $\psi(d(x, Tx)) = 1$ olur ve ψ fonksiyonunun tanımından $d(x, Tx) = 0$, yani $Tx = x$ elde edilir. Sonuç olarak, $C_{x_0, r}$ çemberi T nin bir sabit çemberidir. \square

Sonuç 2.4. (X, d) bir metrik uzay, $T: X \rightarrow X$ fonksiyonu $x_0 \in X$ ile JS-Ciric tipinde x_0 -daralma ve r sayısı Teorem 2.3 deki gibi tanımlı olsun. Eğer $x \in D_{x_0, r}$ için $d(Tx, x_0) \leq r$ ise bu durumda, T fonksiyonu $D_{x_0, r}$ diskini sabit bırakır.

İspat. Teorem 2.3 ün ispatına benzer şekilde kolayca görülür. \square

Tanım 2.5. (X, d) bir metrik uzay ve $T: X \rightarrow X$ bir fonksiyon olsun. Her $x \in X$ için $k \in [0,1)$ ve $\alpha + \beta + \gamma + \delta + \eta < 1$, $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta > 0$ olmak üzere

$$d(Tx, x) > 0 \Rightarrow \psi(d(Tx, x)) \leq \psi[\alpha d(x, x_0) + \beta d(x, Tx) + \gamma d(x, Tx_0) + \delta d(x, Tx_0) + \eta d(x_0, Tx)]^k$$

olacak şekilde $x_0 \in X$ ve $\psi \in \Psi$ varsa, T fonksiyonuna JS-Hardy Rojers tipinde x_0 -daralma denir.

Önerme 2.6. (X, d) bir metrik uzay ve $T: X \rightarrow X$ fonksiyonu $x_0 \in X$ ile bir JS-Hardy Rojers tipinde x_0 -daralma olsun. Bu durumda $x_0 = Tx_0$ dır.

İspat. Tersine $x_0 \neq Tx_0$ olsun. Bu durumda, hipotezden

$$\begin{aligned} \psi(d(Tx_0, x_0)) &\leq \psi[\alpha d(x_0, x_0) + \beta d(x_0, Tx_0) + \gamma d(x_0, Tx_0) + \delta d(x_0, Tx_0) + \eta d(x_0, Tx_0)]^k \\ &= \psi[0 + \beta d(x_0, Tx_0) + 0 + 0 + \eta d(x_0, Tx_0)]^k \\ &= \psi[(\beta + \eta)d(x_0, Tx_0)]^k \\ &< \psi[d(x_0, Tx_0)]^k \end{aligned}$$

elde edilir ve bu bir çelişkidir. O halde $Tx_0 = x_0$ olmalıdır. \square

Teorem 2.7. (X, d) bir metrik uzay ve $T: X \rightarrow X$ fonksiyonu $x_0 \in X$ ile bir JS-Hardy Rojers tipinde x_0 -daralma ve r sayısı Teorem 2.3 deki gibi tanımlı olsun. Eğer $x \in C_{x_0, r}$ için $d(Tx, x_0) = r$ ise bu durumda T fonksiyonu $C_{x_0, r}$ çemberini sabit bırakır.

İspat. Aşağıdaki durumları dikkate alalım.

Durum 1: $r = 0$ olsun. O halde $C_{x_0, r} = \{x_0\}$ olur ve Önerme 2.6 dan $C_{x_0, r}$ çemberi T nin bir sabit çemberidir.

Durum 2: $r > 0$ ve $x \in C_{x_0, r}$ noktası $d(Tx, x) > 0$ olacak şekilde bir nokta olsun. Hipotezden,

$$\begin{aligned} \psi(d(Tx, x)) &\leq \psi[\alpha d(x, x_0) + \beta d(x, Tx) + \gamma d(x, Tx_0) + \delta d(x, Tx_0) + \eta d(x_0, Tx)]^k \\ &= \psi[\alpha r + \beta d(x, Tx) + \gamma r + \delta r + \eta r]^k \\ &< \psi[(\alpha + \beta + \gamma + \delta + \eta)d(x, Tx)]^k \\ &< \psi[d(x, Tx)]^k \end{aligned}$$

elde edilir ve bu bir çelişkidir. O halde $Tx = x$ olmalıdır. Sonuç olarak $C_{x_0, r}$ çemberi T nin bir sabit çemberidir.

Sonuç 2.8. (X, d) bir metrik uzay, $T : X \rightarrow X$ fonksiyonu $x_0 \in X$ ile JS-Hardy Rojers tipinde x_0 - daralma ve r sayısı Teorem 2.3 deki gibi tanımlı olsun. Eğer $x \in D_{x_0, r}$ için $d(Tx, x_0) \leq r$ ise bu durumda, T fonksiyonu $D_{x_0, r}$ diskini sabit bırakır.

İspat. Teorem 2.7 nin ispatına benzer şekilde kolayca görülür. \square

Tanım 2.9. (X, d) bir metrik uzay ve $T : X \rightarrow X$ bir fonksiyon olsun. Her $x \in X$ için $k \in [0, 1)$, $\alpha, \beta, \gamma > 0$ ve $\alpha + \beta + \gamma < 1$ olmak üzere

$$d(Tx, x) > 0 \Rightarrow \psi(d(Tx, x)) \leq \psi[\alpha d(x, x_0) + \beta d(x, Tx) + \gamma d(x_0, Tx_0)]^k$$

olacak şekilde $x_0 \in X$ ve $\psi \in \Psi$ varsa T fonksiyonuna JS-Reich tipinde x_0 -daralma denir.

Önerme 2.10. (X, d) bir metrik uzay ve $T : X \rightarrow X$ fonksiyonu $x_0 \in X$ ile bir JS-Reich tipinde x_0 - daralma olsun. Bu durumda $x_0 = Tx_0$ dır.

İspat. Tersine $x_0 \neq Tx_0$ olsun. Bu durumda hipotezden

$$\begin{aligned} \psi(d(Tx_0, x_0)) &\leq \psi[\alpha d(x_0, x_0) + \beta d(x_0, Tx_0) + \gamma d(x_0, Tx_0)]^k \\ &= \psi[\alpha 0 + \beta d(x_0, Tx_0) + \gamma d(x_0, Tx_0)]^k \\ &= \psi[(\beta + \gamma)d(x_0, Tx_0)]^k \\ &< \psi[d(x_0, Tx_0)]^k \end{aligned}$$

elde edilir ve bu bir çelişkidir. O halde $Tx_0 = x_0$ olmalıdır. \square

Teorem 2.11. (X, d) bir metrik uzay ve $T : X \rightarrow X$ fonksiyonu $x_0 \in X$ ile bir JS-Reich tipinde x_0 - daralma ve r sayısı Teorem 2.3 deki gibi tanımlı olsun. Bu durumda, T fonksiyonu $C_{x_0, r}$ çemberini sabit bırakır.

İspat. Aşağıdaki durumları dikkate alalım:

Durum 1: $r = 0$ olsun. O halde $C_{x_0, r} = \{x_0\}$ olur ve Önerme 2.10 dan $C_{x_0, r}$ çemberi T nin bir sabit çemberidir.

Durum 2: $r > 0$ ve $x \in C_{x_0, r}$ noktası $d(Tx, x) > 0$ olacak şekilde bir nokta olsun. Hipotezden,

$$\begin{aligned} \psi(d(Tx, x)) &\leq \psi[\alpha d(x, x_0) + \beta d(x, Tx) + \gamma d(x_0, Tx_0)]^k \\ &= \psi[\alpha r + \beta d(x, Tx) + \gamma r]^k \\ &< \psi[(\alpha + \beta + \gamma)d(x, Tx)]^k \\ &< \psi[d(x, Tx)]^k \end{aligned}$$

elde edilir ve bu bir çelişkidir. O halde $Tx = x$ olmalıdır. Sonuç olarak $C_{x_0, r}$ çemberi T nin bir sabit çemberidir.

Sonuç 2.12. (X, d) bir metrik uzay, $T: X \rightarrow X$ fonksiyonu $x_0 \in X$ ile JS-Reich tipinde x_0 -daralma ve r sayısı Teorem 2.3 deki gibi tanımlı olsun. Bu durumda, T fonksiyonu $D_{x_0, r}$ diskini sabit bırakır.

İspat. Teorem 2.11 in ispatına benzer şekilde kolayca görülür. \square

Tanım 2.13. (X, d) bir metrik uzay ve $T: X \rightarrow X$ bir fonksiyon olsun. Her $x \in X$ için $k \in [0, 1)$ ve $\eta \in (0, 1)$ olmak üzere

$$d(Tx, x) > 0 \Rightarrow \psi(d(Tx, x)) \leq \psi \left[\eta(d(x, Tx_0) + d(x_0, Tx)) \right]^k$$

olacak şekilde $x_0 \in X$ ve $\psi \in \Psi$ varsa, T fonksiyonuna JS-Chatterjea tipinde x_0 -daralma denir.

Önerme 2.14. (X, d) bir metrik uzay ve $T: X \rightarrow X$ fonksiyonu $x_0 \in X$ ile bir JS-Chatterjea tipinde x_0 -daralma olsun. Bu durumda $x_0 = Tx_0$ dir.

İspat. Tersine $x_0 \neq Tx_0$ olsun. Bu durumda, hipotezden

$$\begin{aligned} \psi(d(Tx_0, x_0)) &\leq \psi \left[\eta(d(x_0, Tx_0) + d(x_0, Tx_0)) \right]^k \\ &= \psi \left[2\eta d(x_0, Tx_0) \right]^k \\ &< \psi \left[d(x_0, Tx_0) \right]^k \end{aligned}$$

elde edilir ve bu bir çelişkidir. O halde $Tx_0 = x_0$ olmalıdır. \square

Teorem 2.15. (X, d) bir metrik uzay ve $T: X \rightarrow X$ fonksiyonu $x_0 \in X$ ile bir JS-Chatterjea tipinde x_0 -daralma ve r sayısı Teorem 2.3 deki gibi tanımlı olsun. Eğer $x \in C_{x_0, r}$ için $d(Tx, x_0) = r$ ise bu durumda T fonksiyonu $C_{x_0, r}$ çemberini sabit bırakır.

İspat. Aşağıdaki durumları dikkate alalım.

Durum 1: $r = 0$ olsun. O halde $C_{x_0, r} = \{x_0\}$ olur ve Önerme 2.14 den $C_{x_0, r}$ çemberi T nin bir sabit çemberidir.

Durum 2: $r > 0$ ve $x \in C_{x_0, r}$ noktası $d(Tx, x) > 0$ olacak şekilde bir nokta olsun. Hipotezden,

$$\begin{aligned}
\psi(d(x, Tx)) &\leq \psi[\eta(d(x, Tx_0) + d(x_0, Tx))]^k \\
&= \psi[\eta(r+r)]^k \\
&= \psi[2\eta(r)]^k \\
&< \psi[2\eta d(x, Tx)]^k \\
&< \psi[d(x, Tx)]^k
\end{aligned}$$

elde edilir ve bu bir çelişkidir. O Halde $Tx = x$ olmalıdır. Sonuç olarak $C_{x_0, r}$ çemberi T nin bir sabit çemberidir. \square

Sonuç 2.16. (X, d) bir metrik uzay, $T: X \rightarrow X$ fonksiyonu $x_0 \in X$ ile JS-Chatterjea tipinde x_0 - daralma ve r sayısı Teorem 2.3 deki gibi tanımlı olsun. Eğer $x \in D_{x_0, r}$ için $d(Tx, x_0) \leq r$ ise bu durumda, T fonksiyonu $D_{x_0, r}$ diskini sabit bırakır.

İspat. Teorem 2.15 in ispatına benzer şekilde kolayca görülür. \square

III. ÖRNEKLER

Bu bölümde ikinci bölümde verilen teorik sonuçlara bazı örnekler verilecektir.

Örnek 3.1. $X = \square$ alışımlı metrik uzay ve $T: \square \rightarrow \square$ fonksiyonu her $x \in \square$ için

$$Tx = \begin{cases} 3 & , \quad x = 2 \\ x & , \quad \text{diğer durumlar} \end{cases}$$

şeklinde tanımlansın. Bu duruda T fonksiyonu $x_0 = 0$ ve her $x \in \square$ için

$$\psi(x) = \begin{cases} 1 & , \quad x = 0 \\ 2 & , \quad x = 1 \\ 25 & , \quad \text{diğer durumlar} \end{cases}$$

şeklinde tanımlı $\psi: [0, \infty) \rightarrow [1, \infty)$ fonksiyonu ile JS-Ciric x_0 -daralmadır. Gerçekten, $x = 2$ için

$$d(3, 2) = 1, \quad d(2, 0) = 2, \quad d(0, 0) = 0, \quad d(0, 3) = 3$$

ve $s = 0, r = 0, q = \frac{1}{4}, t = \frac{1}{4}$ seçilirse

$$\psi(1) \leq \psi(2)^q \psi(1)^r \psi(0)^s \psi\left(\frac{2+3}{2}\right)^t \Rightarrow 2 \leq 25^q \cdot 2^r \cdot 1^s \cdot 25^t = 25^{q+t} = \sqrt{25} = 5$$

elde edilir. Ayrıca

$$r = \inf \{d(Tx, x) : x \neq Tx\} = 1$$

olduğundan $C_{0,1} = \{-1,1\}$ çemberi T nin bir sabit çemberidir.

Örnek 3.2. $X = \mathbb{R}$ alışılmış metrik uzay ve $T : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ fonksiyonu her $x \in \mathbb{R}$ için

$$Tx = \begin{cases} 9 & , \quad x = 8 \\ x & , \quad \text{diğer durumlar} \end{cases}$$

şeklinde tanımlansın. Bu durumda T fonksiyonu $x_0 = 0$ ve her $x \in \mathbb{R}$ için

$$\psi(x) = \begin{cases} 1 & , \quad x = 0 \\ 2 & , \quad x = 1 \\ 25 & , \quad \text{diğer durumlar} \end{cases}$$

şeklinde tanımlı $\psi : [0, \infty) \rightarrow [1, \infty)$ fonksiyonu ile JS-Hardy Rojers tipinde x_0 -daralmadır. Gerçekten, $x = 8$ için

$$d(8,0) = 8, d(8,9) = 1, d(0,9) = 9$$

ve $\alpha = \frac{1}{8}0, \gamma = \frac{1}{8}, \delta = \frac{1}{8}, \beta = \frac{1}{2}, \eta = \frac{1}{18}$ seçilirse

$$\psi(1) \leq \psi(4)^k = \psi(4)^{\frac{1}{2}} = \psi(2) = 25$$

elde edilir. Ayrıca

$$r = \inf \{d(Tx, x) : x \neq Tx\} = 1$$

olduğundan $C_{0,1} = \{-1,1\}$ çemberi T nin bir sabit çemberidir.

Örnek 3.3. $X = \mathbb{R}$ alışılmış metrik uzay ve $T : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ fonksiyonu her $x \in \mathbb{R}$ için

$$Tx = \begin{cases} 5 & , \quad x = 4 \\ x & , \quad \text{diğer durumlar} \end{cases}$$

şeklinde tanımlansın. Bu durumda T fonksiyonu $x_0 = 0$ ve her $x \in \mathbb{R}$ için

$$\psi(x) = \begin{cases} 1 & , \quad x = 0 \\ 2 & , \quad x = 1 \\ 25 & , \quad \text{diğer durumlar} \end{cases}$$

şeklinde tanımlı $\psi : [0, \infty) \rightarrow [1, \infty)$ fonksiyonu ile JS-Reich tipinde x_0 -daralmadır. Gerçekten, $x = 4$ için

$$d(4, 0) = 4, d(4, 5) = 1, d(0, 0) = 0$$

ve $\alpha = \frac{1}{8}, \beta = \frac{1}{2}, \gamma = \frac{1}{8}$ seçilirse

$$\psi(1) \leq \psi(1)^{\frac{1}{2}} = \psi(1)$$

elde edilir. Ayrıca

$$r = \inf \{d(Tx, x) : x \neq Tx\} = 1$$

olduğundan $C_{0,1} = \{-1, 1\}$ çemberi T nin bir sabit çemberidir.

Örnek 3.4. $X = \square$ alışılmış metrik uzay ve $T : \square \rightarrow \square$ fonksiyonu her $x \in \square$ için

$$Tx = \begin{cases} 13 & , \quad x = 12 \\ x & , \quad \text{diğer durumlar} \end{cases}$$

şeklinde tanımlansın. Bu durumda T fonksiyonu $x_0 = 0$ ve her $x \in \square$ için

$$\psi(x) = \begin{cases} 1 & , \quad x = 0 \\ 2 & , \quad x = 1 \\ 25 & , \quad \text{diğer durumlar} \end{cases}$$

şeklinde tanımlı $\psi : [0, \infty) \rightarrow [1, \infty)$ fonksiyonu ile JS-Chatterjea tipinde x_0 -daralmadır. Gerçekten, $x = 12$ için

$$d(12, 0) = 12, d(0, 13) = 13$$

ve $\eta = \frac{1}{5}, k = \frac{1}{2}$ seçilirse

$$\psi(1) \leq \psi(\sqrt{5}) = 25$$

elde edilir. Ayrıca

$$r = \inf \{d(Tx, x) : x \neq Tx\} = 1$$

olduğundan $C_{0,1} = \{-1, 1\}$ çemberi T nin bir sabit çemberidir.

IV. KAYNAKLAR

- [1] L. B. Ćirić, “A generalization of Banach’s contraction principle,” *Proceedings of the American Mathematical Society*, vol. 45, no. 2, pp. 267—273, 1974.
- [2] L. B. Ćirić, “Generalized contractions and fixed-point theorems,” *Publications de L’Institut Matheematique*, vol. 12, no. 26, pp. 19—26, 1971.
- [3] G. E. Hardy, and T. D. Rogers, “A generalization of a fixed point theorem of Reich”, *Canadian Mathematical Bulletin*, vol. 6, pp. 201—206, 1973.
- [4] S. Reich, “Some remarks concerning contraction mappings,” *Canadian Mathematical Bulletin*, vol. 14, pp. 121—124, 1971.
- [5] S. K. Chatterjea, “Fixed-point theorems,” *Comptes Rendus de l’Academie Bulgare des Sciences*, vol. 25, pp. 727—730, 1972.
- [6] N. Y. Özgür, and N. Taş, “Some fixed-circle theorems on metric spaces,” *Bulletin of the Malaysian Mathematical Sciences Society*, vol. 42, no. 4, pp. 1433—1449, 2019.
- [7] N. Y. Özgür, “Fixed-disc results via simulation functions,” *Turkish Journal of Mathematics*, vol. 43, no. 6, pp. 2794—2805, 2019.
- [8] N., Taş, N. Y. Özgür, and N. Mlaiki, “New types of Fc-contractions and the fixed-circle problem,” *Mathematics*, vol. 6, pp. 188, 2018.
- [9] N. Y. Özgür, and N. Taş, “Some fixed-circle theorems and discontinuity at fixed circle,” *AIP Conference Proceedings*, vol. 1926, no. 1, pp. 020048, 2018.
- [10] R. K. Bisht, and N. Özgür, “Geometric properties of discontinuous fixed point set of $\varepsilon - \delta$ contractions and applications to neural networks,” *Aequationes Mathematicae*, vol. 94, no. 5, pp. 847—863, 2020.
- [11] U. Çelik, and N. Özgür, “On the fixed-circle problem,” *Facta Universitatis-Series Mathematics and Informatics*, vol. 35, no. 5, pp. 1273—1290, 2020.
- [12] N. Taş, and N. Özgür, “On the geometry of fixed points for self-mappings on S-metric spaces,” *Communications de la Faculté des Sciences de l’Université d’Ankara. Séries A1. Mathematics and Statistics*, vol. 69, no. 2, pp. 1184—1192, 2020.
- [13] N. Özgür, and N. Taş, “Pata Zamfirescu type fixed-disc results with a proximal application,” *Bulletin of the Malaysian Mathematical Sciences Society*, vol. 44, no. 4, pp. 2049—2061, 2021.
- [14] K. Roy, and M. Saha, “Fixed point theorems for a class of extended JS contraction mappings over a generalized metric space with an application to fixed circle problem,” *Proyecciones Journal of Mathematics*, vol. 41, no. 6, pp. 1551—1572, 2022.
- [15] N. Mlaiki, N. Taş, E. Kaplan, S. S. Aiadi, and A. K. Souayah, “Some common fixed-circle results on metric spaces,” *Axioms*, vol. 11, pp. 454, 2022.
- [16] E. Kaplan, N. Mlaiki, N. Taş, S. Haque, and A. K. Souayah, “Some fixed-circle results with different auxiliary functions,” *Journal of Function Spaces*, vol. 2022, 7 pages, Article ID 2775733, 2022.


- [17] D. Gopal, J. M. Moreno, and N. Özgür, “On fixed figure problems in fuzzy metric spaces,” *Kybernetika*, vol. 59, no. 1, pp. 110—129, 2023.
- [18] E. Kaplan, “New fixed-circle results on fuzzy metric spaces with an application to dynamic market equilibrium,” *Mathematica Moravica*, vol. 27, no. 1, pp. 73—83, 2023.
- [19] N. Hussain, V. Parvaneh, B. Samet, and C. Vetro, “Some fixed point theorems for generalized contractive mappings in complete metric spaces”, *Fixed Point Theory and Applications*, vol. 2015, pp. 185, 2015.
- [20] M. Jleli, and B. Samet, “A new generalization of the Banach contraction principle”, *Journal of Inequalities and Applications*, vol. 2014, Article ID 38, 2014.
- [21] M. Jleli, E. Karapınar, and B. Samet, “Further generalizations of the Banach contraction principle”, *Journal of Inequalities and Applications*, vol. 2014, Article ID 439, 2014.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Research Article

Can Economic and Financial Development Curb CO₂ Emissions in Qatar

 Ibrahim ARI^{a,*}

^a Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İstanbul Medeniyet Üniversitesi, İstanbul, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: ibrahim.ari@medeniyet.edu.tr

DOI: <https://doi.org/10.29130/dubited.1168280>

ABSTRACT

This study investigates the impacts of economic and financial development on carbon emissions in Qatar between 1975 and 2018 by analyzing the results of the ARDL and VECM tests. We do so by considering two model specifications, Model 1 and 2, considering CO₂ emission is a dependent variable. In Model 1, economic growth and its square are considered as independent variables to test the basic Environmental Kuznets Curve (EKC) hypothesis. The results provide evidence to confirm the EKC hypothesis for Qatar. In Model 2, various economic and financial variables are specified as regressors, and all the independent variables have a statistically significant impact on CO₂ emissions at a 1% level. The coefficient of real income per capita implies that an increase in income will increase carbon emissions by 72%. On the other hand, financial development's carbon elasticity indicates that an increase in financial development will decrease CO₂ emissions by 32%. The carbon elasticity of foreign trade signifies that an increase in trade will decrease CO₂ emissions by 33%.

Keywords: EKC hypothesis, Economic growth, Financial development, Environment-growth-finance nexus, CO₂ emissions.

Ekonomik ve Finansal Gelişme Katar'daki CO₂ Emisyonlarını Azaltabilir Mi?

ÖZET

Bu çalışma, ARDL ve VECM testlerinin sonuçlarını analiz ederek Katar'da 1975 ve 2018 yılları arasında ekonomik ve finansal gelişmenin karbon emisyonları üzerindeki etkilerini araştırmaktadır. Bunu, CO₂ emisyonunun bağımlı bir değişken olduğunu göz önünde bulundurarak, Model 1 ve 2 olmak üzere iki model spesifikasyonunu dikkate alarak yapıyoruz. Model 1'de, temel Çevresel Kuznets Eğrisi (EKC) hipotezini test etmek için ekonomik büyüme ve karesi bağımsız değişkenler olarak ele alınmıştır. Sonuçlar, Katar için EKC hipotezini doğrulamaktadır. Model 2'de çeşitli ekonomik ve finansal değişkenler regresör olarak belirtilir ve tüm bağımsız değişkenler CO₂ emisyonları üzerinde %1 düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahiptir. Kişi başına reel gelir katsayısı, gelirdeki artışın karbon emisyonlarını %72 oranında artıracaklarını ima eder. Öte yandan, finansal gelişmenin karbon esnekliği, finansal gelişmedeki artışın CO₂ emisyonlarını %32 oranında azaltacağını göstermektedir. Dış ticaretin karbon esnekliği, ticaretteki artışın CO₂ emisyonlarını %33 oranında azaltacağını ifade etmektedir.

Anahtar Kelimeler: EKC hipotezi, Ekonomik büyüme, Karbon emisyonu, Finansal gelişme

Geliş: 29/08/2022, Düzeltme: 01/05/2023, Kabul: 28/05/2023

I.INTRODUCTION

Global warming and climate change have been recognized the facts that adversely impact lives, health, food, agriculture, resource allocations, and many other explicit and hidden sustainability problems. Greenhouse gas (GHG) emissions that have been amplified about 50 fold since the mid-1800s are also now considered as the primary reason for various natural hazards such as heat waves, rain flooding, sea level rises with an ever increasing magnitudes and severity [1]. Anthropogenic GHG emissions became significantly and adversely effective at the time of the industrial revolution because energy use was a crucial input factor of growth in manufacturing commodities and transportation, and the primary sources of energy have been fossil fuels releasing millions of tons of GHGs. A significant portion of worldwide GHG emissions is originated from energy use that is reported between 80 [1] and 90% [2]. In 2017, CO₂ emissions were reported as about three-quarters (74.32%) of total GHG emissions, followed by methane, N₂O, and other emissions (HFCs, CFCs, SF₆) contributed 17.26%, 6.22%, and 2.19%, respectively [1]. In short, as a result of humankind's caseless and relentless exploitation of nature, we are at the edge of future catastrophic natural events, and most of them would be irreversible.

Research and policy circles have expanded their agenda into the causality relationship between air pollution due to CO₂ emissions, economic growth, and financial development. In this regard, the Environmental Kuznets Curve (EKC) has attracted an ever-increasing attention since the 1990s because it has revealed an important statistical understanding and implications for countries' economic progress impact on the environment. The EKC hypothesis states that economic growth initially deteriorates environment up to a tipping point, and then it mitigates, even cures, environmental degradation. However, not all countries satisfy the EKC hypothesis, and some show discrepant behavior from the hypothesis. This is because the EKC considerably depends on countries' development status (i.e., developing and developed countries), drivers for economic growth (i.e., manufacturing, service sector, natural resources, and so on), and policy framework.

Qatar has shifted from a pearl, fishing, and agricultural-based economy to a hydrocarbon-based economy since the first oil extraction in the late 1940s. Qatar is blessed with an abundant amount of natural gas resource and ranked third worldwide after Russia and Iran in terms of proven natural gas reserves [3], [4]. Its purchasing power parity (PPP) per capita was US\$142,000 in 2012 when Qatar was on top of the list. However, it went down to fourth rank with around US\$94,000 in 2019 [5] mainly because of its high dependence on fluctuating oil and natural gas revenues, which constitutes more than 50% of GDP, 85% of export earnings, and 70% of government revenues [6].

Policymakers and academics propose alternative economic pathways for Qatar to escape being an oil and gas-powered rentier state [7]–[9]. This struggle is because economic diversification is one of the primary objectives in Qatar's development agenda, Qatar National Vision (QNV) 2030, and the other objective is to prevent excessive CO₂ emissions for sustainable development. In line with these objectives, Qatar almost eliminated all financial household subsidies for electricity and water, which is about 0.6% of GDP since 2016 and reduced by 77% [10]. This initial step was essential to lower energy and water use waste. In Qatar and many other rich Gulf countries, water implies intensive energy because they desalinate seawater to obtain clean water for 100% of household needs. Besides, Qatar's water consumption is 557 liters/day/inhabitant, which is considerably high and far from global averages [11]. The desalination process requires substantial energy sources, and they

use fossil fuels to meet the requirement because they are oil and gas-abundant countries. Furthermore, Qatar has severely hot weather and uses air conditioning (AC) pervasively, consuming 30-40% of the total electricity capacity in summers [12]. As a result of these challenges, Qatar consumes 11-fold higher energy than the global average 18 thousand MWh [3]. Extreme energy-water consumption has significant and adverse effects on air quality and places Qatar in the first rank worldwide for CO₂ emissions per capita with approximately 39 tones, which is more than eightfold the global average [3].

Qatar's objectives towards reducing CO₂ emissions in the short term put significant pressure on the economy because of upcoming mega-events, such as the 2022 FIFA World Cup, Qatar's first large scale (800MWp) solar farm construction by 2022 [13], and the 2030 national vision manifestation's finale date. Policymakers in Qatar define a general framework for economic development while drawing people's attention to the environment, but it needs to be tailored specific policy and regulations under this framework. Therefore, economic and financial development impact on CO₂ emissions and testing EKC hypothesis become one of the most attractive empirical topics in the literature, and also motivate this study. We attempted to answer the fundamental question in this field: Can economic and financial development curb CO₂ emissions in Qatar?

The rest of this paper is organized as follows: Section 2 provides an overview of the Environmental Kuznets Curve and reviews the previous work on the causal relations on CO₂ emissions for different countries, mainly Qatar. Section 3 explains the data including descriptive statistics and defines two model specifications for ARDL and VECM tests. Section 4 presents our findings from the short long causality effects and reveals the EKC validity. Section 5 demonstrates the conclusions and policy implications.

II. LITERATURE REVIEW

Simon Kuznets [14] illustrated in his seminal study entitled “Economic Growth and Income Inequality” that an increase in income per capita leads to rising income inequality initially up to a certain threshold, and then the inequality begins to decrease. In a similar methodology, Grossman and Krueger (1991) analyzed relationship between various environmental parameters and income, and reported that CO₂ and "smoke" rise by the GDP at low levels, but decreasing when GDP reaches to high levels [15]. This type of relations implies the inverted U-shaped behavior between the tested variables. In line with this, the Environmental Kuznets Curve (EKC) hypothesis fundamentally explains that income per capita deteriorates environment first, and then it starts to improve environmental conditions after a high level of income, as represented in the inverted-U shape relation. In this context, Panayotou (1993) first defines the EKC hypothesis between environmental pollutants and income regarding the similarities with findings of Kuznets (1955). Afterwards, the EKC has become a popular approach in ecological economics following many excellent research and review papers, such as [17]–[20].

Stern (2004) pointed out that the literature accommodates plenty of mixed results even for the same country because of the employed methodology, time span, structural breaks, noise within and across the variables, and sometimes weaknesses associated with econometric analyses such as omitting heteroskedasticity and serial correlations. In this context, Table 1 summarizes the studies in the literature on the EKC hypothesis for different countries, but

mainly for the countries including Qatar, for various policy implications in Section 5 according to their focus, variables, period, methodology, and the EKC result.

Table 1. EKC hypotheses' results reported for Qatar, and those including it.

Author	Country	Variables ^a	Period	Methodology ^b	EKC result
Arouri et al. (2012)	MENA	CO ₂ $f(Y, Y^2, E)$	1981-2005	CCE-MG	Inverted-U
Omri et al. (2015)	MENA	CO ₂ $f(Y, Y^2, E, TR, U, FD)$	1990-2011	GMM	Inverted-U
Jammazi & Aloui (2015)	Qatar	CO ₂ - Y	1980–2013	WWCC	Inverted-U
Mrabet & Alsamara (2017)	Qatar	CO ₂ $f(Y, Y^2, E, EX, U, FD)$	1980-2011	ARDL	U-shaped
Mrabet et al. (2017)	Qatar	EF $f(Y, T, EX)$, EF Y	1980-2011	ARDL	M-increase ^c
Charfeddine (2017)	Qatar	CO ₂ $f(Y, Y^2, E, TR, U, FD)$	1970-2015	MS-VECM	Inverted-U
	Qatar	EF $f(Y, Y^2, E, TR, U, FD)$	1970-2015	MS-VECM	U-shaped
Ansari et al. (2020)	GCC ^d	EF $f(Y, Y^2, E, TR)$	1991-2017	DOLS, FMOLS	U-shaped
Bulut (2020)	Turkey	EF $f(Y, Y^2, FDI, RE, I)$	1970-2016	ARDL, DOLS	Inverted-U
Ben Cheikh et al. (2021)	MENA ^d	CO ₂ $f(Y, Y^2, E)$	1980-2015	PSTR	Inverted-U
Ma et al. (2021)	Germany France	CO ₂ $f(Y, Y^2, RE, NRE, TU, L)$	1995-2015	Panel VECM	Inverted-U
Abulibdeh (2022)	Qatar	CO ₂ $f(Y, Y^2, E, CP)$	1990-2019	ARDL	Inverted-U
Mahmood (2022)	GCC	CO ₂ $f(Y, Y^2, OC, NG)$	1975-2019	NARLD	U-Shaped
Sheikhzeinoddin et al. (2022)	MENA	CIE $f(Y, Y^2, Y^3, EI, POP)$	2000-2015	Panel ARDL	N-Shaped

Notes:(a) EF: Ecological footprint, Y: GDP, Y²: GDP-squared, Y³: GDP-cubed, E: Energy use, TR: Foreign trade (openness and globalization), U: Urbanization, FD: Financial development, EX: Exports, CP: Crop production, POP: Population, EI: Energy Intensity, CIE: Composite index of environment, FDI: Foreign direct investment, TU: Truism development, L: Labor force, RE: Renewable energy use, NRE: Nonrenewable energy use, OC: Oil consumption, NG: Natural gas consumption, I: Industrialization. (b) CCE-MG, GMM, WWCC, MS-VECM, PSTR, DOLS, and FMOLS stand for common correlated effects mean group, the generalized method of moments, wavelet windowed cross correlations, Markov switching vector error correction model, panel smooth transition regression respectively, dynamic ordinary least square, and fully modified ordinary least square. (c) M-increase represents monotonic increase. (d) The GCC and MENA stand for the Gulf Cooperation Council and Middle East and North Africa, respectively.

Comparing the impact of economic and financial development on carbon emissions in developed countries versus emerging countries is a topic that has received a great deal of attention in the literature. Developed countries tend to have higher levels of carbon emissions per capita than emerging countries, but this is partly due to historical emissions [28]. A study by Wei et al. (2010) found that the cumulative CO₂ emissions of developed countries were responsible for 60-80% of the increase in global temperature since the preindustrial era [29]. However, when looking at current emissions, emerging countries such as China and India have surpassed developed countries in terms of total emissions [1]. Economic growth in emerging countries is often accompanied by a significant increase in carbon emissions, but this relationship can be moderated by environmental policies and technological innovation. For example, a study by Zhao et al. (2022) found that environmental regulations can help to reduce the carbon intensity of economic growth in China [30]. Similarly, a study by Zhang et al. (2020) found that renewable energy technology can help to decouple economic growth from carbon emissions in Southeast Asian countries [31].

The financial sector can play an important role in promoting low-carbon development in both developed and emerging countries [32]. Khan and Ozturk (2021) found that financial development can help to reduce carbon emissions in 88 developing countries, including Qatar [33]. Sun et al., (2022) showed that the most carbon-emitting country, currently, China as a developing country can benefit from financial development to reach a low-carbon economy [34]. However, there are controversial studies demonstrating that financial development should be under control to curb carbon emissions and find alternative ways to decrease carbon emissions such as in the United States, a developed country [35]. Overall, the impact

of economic and financial development on carbon emissions is complex and context-specific [36], [37]. However, both developed and emerging countries can take steps to promote low-carbon development through financial policies and technological innovation.

Low-income countries tend to have lower levels of carbon emissions per capita consumption than developed countries because they export carbon emissions to the developed, namely rich, countries, but this relationship can be moderated by economic growth and industrialization [38], [39]. For example, Hundie (2021) found that carbon emissions in poor Sub-Saharan Africa countries such as Ethiopia are likely to increase as these countries undergo industrialization and economic growth [40]. Similarly, Avenyo and Tregenna (2022) found that carbon emissions in low-income countries are likely to increase as these countries adopt more energy-intensive technologies [41]. They also illustrated that as long as rising economic growth and financial development in developing countries, they will adopt more technology-intensive manufacturing processes and thus will decrease carbon emissions. Environmental policies and renewable energy can help to reduce carbon emissions in low-income countries. For example, Edziah et al. (2022) found that renewable energy can help to reduce carbon emissions in low-income countries such as Burkina Faso, Gambia, and Zimbabwe [42]. In line with that, environmental policies can help to reduce emissions in developing countries [43]. Overall, the literature suggests that poor countries face unique challenges in addressing carbon emissions due to their lower levels of economic and financial development. However, these countries can still take steps to reduce their emissions through environmental policies, renewable energy, and access to financial resources and technology transfer.

The relationship between economic and financial development and carbon emissions is also relevant for countries with different levels of energy resources. Energy resource-rich countries tend to have higher levels of carbon emissions per capita, but this relationship can be moderated by environmental policies and technological innovation. For example, Usman et al. (2022) found that carbon emissions in energy resource-rich countries can be reduced by promoting the development of renewable energy, financial development, and implementing carbon pricing policies [44]. Bekhet et al. (2017) demonstrated that financial development can help to reduce carbon emissions in energy resource-rich countries such as Saudi Arabia [45]. In contrast, economic growth up to a certain threshold increases carbon emissions in resource-rich countries [46].

This manuscript contributes to the literature from the perspective of an energy resource-rich and high-income level country, Qatar, by differing from existing studies as follows. First, all the variables were scaled with the population data and employed as per capita macroeconomic and environmental data to be consistent in the model specifications and remove potential noise. This approach also distinguishes our study from the literature by differentiating datasets. Second, CO₂ was treated as a dependent variable instead of an independent as in many studies, particularly related to Qatar. Third, Model 1 focused on the fundamental EKC hypothesis by including only GDP and its square as independent variables to remove possible noise that might be incurred by other variables such as energy use.

III. METHODOLOGY

This study first investigates whether all the variables are stationary by analyzing their integration number with the unit root tests, Augmented Dickey-Fuller (ADF) [47] and Philips

and Perron [48]. Then, according to these pretests, we employed the Autoregressive Distributed Lag (ARDL) [49] cointegration test to examine two model specifications: basic EKC and CO₂ emission specifications, to reveal short and long-term relations among CO₂ emissions, economic and financial development. The ARDL provides whether there is a relationship between dependent and independent variables. We further investigate the causality direction by changing dependent and independent variables in Vector Error Correction Model (VECM) to demonstrate short- and long-run directional impacts for each possible combination and justify the ARDL results.

A. DATA AND DESCRIPTIVE STATISTICS

This study employs various financial and economic variables to investigate their impacts on CO₂ emissions. We assume that some of the variables proxy to the certain variables and used them. The annual data are: (i) CO₂ emissions, (ii) real GDP as a proxy for economic development, (iii) domestic credit to private sector as a proxy for financial development, (iv) foreign trade (the sum of exports and imports) as a proxy for openness and financial development, (v) gross fixed capital formation, which is considered as the total investment. All the data are collected from World Development Indicators of the World Bank for the period of 1975-2018 [50]. It is worth noting that the COVID-19 pandemic has heavily affected macroeconomic and environmental datasets and induced potential structural time breaks, thereby we selected the datasets in the pre-COVID-19 era. The domestic credit, foreign trade, and gross fixed capital formation are normalized with the real GDP shares (2010 US dollars) per capita and population data to eliminate potential noise and make these data consistent with the remaining data in the units. The natural logarithms of all the data are used to reduce heteroscedasticity. Table 2 shows descriptive statistics for the data and variables employed in levels and log-levels.

Table 2. Descriptive statistics.

Variable	Definition	Mean	Min	Max	St. dev.
<i>Levels</i>					
CO ₂	CO ₂ emissions (metric tons per capita)	49.43	35.69	110.95	17.24
GDP	Real GDP (2010 US dollars per capita)	60421.46	39051.91	91455.24	14546.83
FD	Financial development (2010 US dollars per capita)	21854.44	9632.40	52804.29	11085.43
T	Foreign trade (2010 US dollars per capita)	29045.34	7408.30	77622.05	20260.80
INV	Investment (2010 US dollars per capita)	13326.25	2795.09	29566.82	8790.527
<i>Log Levels</i>					
LCO ₂	Log of CO ₂ emissions (metric tons per capita)	1.67	1.55	2.05	0.12
LGDP	Log of Real GDP (2010 US dollars per capita)	4.77	4.59	4.96	0.11
LFD	Log of Financial dev. (2010 US dollars per capita)	1.52	1.06	1.90	0.21
LT	Log of Foreign trade (2010 US dollars per capita)	4.36	3.87	4.89	0.30
LINV	Log of Investment (2010 US dollars per capita)	4.01	3.45	4.47	0.32

Notes: 1. The FD, FT, and INV are, first, gathered as a percentage of GDP, and then they are calculated as per capita measurements by the authors.

B. THE ARDL MODELS

The literature has many studies utilizing bivariate cointegration tests for a long-run relationship among two variables. This methodology has advantages such as a deep understanding of the interrelations between them and potential noise reduction. But, on the other hand, it may induce a shallow understanding of a system that is affected by multivariable, and thereby it incurs biased relations and misses underlying mechanism for the complex systems. In this respect, this study follows the ARDL bounds test proposed by

Pesaran and Shin [49], which is a multivariate cointegration test, to obtain robust and unbiased insights into financial and economic development effects on CO2 emissions. The ARDL test contains several benefits against other cointegration techniques such as Engle and Granger [51], Johansen and Juselius [52], and Johansen [53] methods. Some of the advantages can be listed as follows: the ARDL models (i) permit mixed integration numbers in the order of zero and one, whereas other cointegration methods allow only the same integration number for all variables, (ii) provide unbiased estimates of whether explanatory variables are endogenous or not [49], and (iii) employ a single reduced-form equation for estimating the long-run relations. The ARDL methodology comprises two consecutive stages to test the long- and short-run estimates. If there is a long-run cointegration—Error Correction Term should be negative and statistically significant—, then the short-run equation is estimated. In line with this procedure, we formulated two log-linear functional models for the basic EKC and CO2 emissions specifications.

B.1. Model 1: Basic EKC specification

First, this study investigates the EKC hypothesis in a fundamental model (hereafter, called both the basic EKC, and Model 1, interchangeably) by considering only CO2 emissions and GDP to confirm whether the inverted U-shaped relationship exists between them (see Eq.(1-2)). The model also includes real GDP squared to embed the nonlinearity into the relationship. We exclude financial development, foreign trade, and investment to avoid potential noise and overfitting. The basic EKC model also analyses the short-run estimates (see Eq.(3)) and error correction term showing convergence to the long-run (see Eq.(4)), if there exists the long-run relationship.

$$\Delta(LCO2_t) = \alpha_{11} + \sum_{i=1}^{a_{11}} \beta_{11i} \Delta(LCO2_{t-i}) + \sum_{j=1}^{b_{11}} \gamma_{11j} \Delta(LGDP_{t-j}) + \sum_{k=1}^{c_{11}} \theta_{11k} \Delta(LGDP_{t-k})^2 + \delta_{11} LCO2_{t-1} + \delta_{12} LGDP_{t-1} + \delta_{13} LGDP_{t-1}^2 + \epsilon_{11t} \quad (1)$$

where Δ denotes the first difference operator, and ϵ_{11t} represents the white noise at time t . The common lag order is selected based on Akaike Information Criterion (AIC) because it has superiority over the Schwartz Bayesian criterion (SBC) in small samples by performing consistent and better results [54]. Next, the ARDL bounds test is conducted based on the joint F-statistic whether there is a long-tun relation by testing the null hypothesis of no cointegration, $H_0: \delta_{1x} = 0$, against the alternative of $H_1: \delta_{1x} \neq 0, x = 1, 2, 3$.

ARDL test holds two critical values, called bounds, published by Pesaran et al. (2001) for analyzing the cointegration of regressors. The results are interpreted according to the inconclusiveness band with the upper I(1) and bottom I(0) levels. In this regard, the null hypothesis of no cointegration is rejected if the resulting F-statistics is greater than the upper limit of I(1). The null hypothesis is accepted if the resulting F-statistics is smaller than the bottom threshold of I(0). In the case of falling F-statistics inside the band, the outcome becomes inconclusive. These band levels change with sample sizes, and the first reported critical values are based on large sample sizes. Therefore, Narayan (2005) recalculated critical values for the bounds test in discrete steps of small sample sizes ranging from thirty to eighty observations by employing a similar methodology with Pesaran et al. (2001). In this respect, this study uses Narayan's critical values as we have 44 observations for all the variables.

In case of the existence of a long-run relationship as a result of the first step (see Eq.(1)), the next step is to examine the long and short-run models represented in Eq.(2) and Eq.(3).

$$LCO2_t = \alpha_{12} + \sum_{i=1}^{a_{12}} \beta_{12i}(LCO2_{t-i}) + \sum_{j=1}^{b_{12}} \gamma_{12j}(LGDP_{t-j}) + \sum_{k=1}^{c_{12}} \theta_{12k}(LGDP_{t-k})^2 + \epsilon_{12t} \quad (2)$$

$$\Delta(LCO2_t) = \alpha_{13} + \sum_{i=1}^{a_{13}} \beta_{13i}\Delta(LCO2_{t-i}) + \sum_{j=1}^{b_{13}} \gamma_{13j}\Delta(LGDP_{t-j}) + \sum_{k=1}^{c_{13}} \theta_{13k}\Delta(LGDP_{t-k})^2 + \psi_1 ECT[1]_{t-1} + \epsilon_{13t} \quad (3)$$

where ϵ_{12t} and ϵ_{13t} are the errors, called white noise, and $ECT[1]$ is the Error Correction Term at the first model specification, the basic EKC hypothesis. ECT indicates convergence velocity to equilibrium state from the short-run to the long-run (see Eq.(4)). In other words, it functions as the speed of adjustment to bring the variables back to the long-run equilibrium following a short-run shock. There has to be a statistically significant coefficient ψ_1 with a negative sign for the convergence.

$$ECT[1]_t = LCO2_t - \left(\alpha_{12} + \sum_{i=1}^{a_{12}} \beta_{12i}(LCO2_{t-i}) + \sum_{j=1}^{b_{12}} \gamma_{12j}(LGDP_{t-j}) + \sum_{k=1}^{c_{12}} \theta_{12k}(LGDP_{t-k})^2 \right) \quad (4)$$

B.2. Model 2: CO₂ specification

The basic EKC hypothesis examines only the real GDP effect on CO₂ emissions without involving other economic and financial explanatory variables. This model specification focuses on the relation of integrated economic and financial development indicators with CO₂ emissions by including various regressors, namely domestic credit to the private sector, foreign trade, and investment, along with real GDP. The model equations for the ARDL bounds test, long-run and short-run relations, and ECT equation are given in Eq.(5-8), respectively.

$$\begin{aligned} \Delta(LCO2_t) = & \alpha_{21} + \sum_{i=1}^{a_{21}} \beta_{21i}\Delta(LCO2_{t-i}) + \sum_{j=1}^{b_{21}} \gamma_{21j}\Delta(LGDP_{t-j}) + \sum_{k=1}^{c_{21}} \theta_{21k}\Delta(LFD_{t-k}) \\ & + \sum_{l=1}^{d_{21}} \eta_{21l}\Delta(LT_{t-l}) + \sum_{m=1}^{e_{21}} \zeta_{21m}\Delta(LINV_{t-m}) + \delta_{21}LCO2_{t-1} + \delta_{22}LGDP_{t-1} \\ & + \delta_{23}LFD_{t-1} + \delta_{24}LT_{t-1} + \delta_{25}LINV_{t-1} + \epsilon_{21t} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} LCO2_t = & \alpha_{22} + \sum_{i=1}^{a_{22}} \beta_{22i}(LCO2_{t-i}) + \sum_{j=1}^{b_{22}} \gamma_{22j}(LGDP_{t-j}) + \sum_{k=1}^{c_{22}} \theta_{22k}(LFD_{t-k}) + \sum_{l=1}^{d_{22}} \eta_{22l}(LT_{t-l}) \\ & + \sum_{m=1}^{e_{22}} \zeta_{22m}(LINV_{t-m}) + \epsilon_{22t} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta(LCO2_t) = & \alpha_{23} + \sum_{i=1}^{a_{23}} \beta_{23i}\Delta(LCO2_{t-i}) + \sum_{j=1}^{b_{23}} \gamma_{23j}\Delta(LGDP_{t-j}) + \sum_{k=1}^{c_{23}} \theta_{23k}\Delta(LFD_{t-k}) \\ & + \sum_{l=1}^{d_{23}} \eta_{23l}\Delta(LT_{t-l}) + \sum_{m=1}^{e_{23}} \zeta_{23m}\Delta(LINV_{t-m}) + \psi_2 ECT[2]_{t-1} + \epsilon_{23t} \end{aligned} \quad (7)$$

where ϵ_{2xt} values correspond to the white noises at time t , and ψ_2 shows the convergence velocity for the long-run equilibrium.

$$ECT[2]_t = LCO2_t - \left(\alpha_{22} + \sum_{i=1}^{a_{22}} \beta_{22i}(LCO2_{t-i}) + \sum_{j=1}^{b_{22}} \gamma_{22j}(LGDP_{t-j}) + \sum_{k=1}^{c_{22}} \theta_{22k}(LFD_{t-k}) + \sum_{l=1}^{d_{22}} \eta_{22l}(LT_{t-l}) + \sum_{m=1}^{e_{22}} \zeta_{22m}(LINV_{t-m}) \right) \quad (8)$$

C. THE VECM FOR SHORT AND LONG RUN CAUSALITY

This study further analyzes the short and long-run causality relationship and impacts of financial and economic developments on CO2 emissions by utilizing the Engle and Granger methodology [51]. First, we estimate residuals from the results of the long-run model for CO2 specification. The next is to examine Granger causality with vector-error-correction models (VECM) by combining the long-run model's residuals into the equation. The VECM is superior to standard Granger causality when there is cointegration. The VECM equations for CO2 specification model are given in Eq.(9),

$$\begin{pmatrix} \Delta LCO2_t \\ \Delta LGDP_t \\ \Delta LFD_t \\ \Delta LT_t \\ \Delta LINV_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_{11,1} & v_{12,1} & v_{13,1} & v_{14,1} & v_{15,1} \\ v_{21,1} & v_{22,1} & v_{23,1} & v_{24,1} & v_{25,1} \\ v_{31,1} & v_{32,1} & v_{33,1} & v_{34,1} & v_{35,1} \\ v_{41,1} & v_{42,1} & v_{43,1} & v_{44,1} & v_{45,1} \\ v_{51,1} & v_{52,1} & v_{53,1} & v_{54,1} & v_{55,1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta LCO2_{t-1} \\ \Delta LGDP_{t-1} \\ \Delta LFD_{t-1} \\ \Delta LT_{t-1} \\ \Delta LINV_{t-1} \end{pmatrix} + \dots \quad (9)$$

$$+ \begin{pmatrix} v_{11,p} & v_{12,p} & v_{13,p} & v_{14,p} & v_{15,p} \\ v_{21,p} & v_{22,p} & v_{23,p} & v_{24,p} & v_{25,p} \\ v_{31,p} & v_{32,p} & v_{33,p} & v_{34,p} & v_{35,p} \\ v_{41,p} & v_{42,p} & v_{43,p} & v_{44,p} & v_{45,p} \\ v_{51,p} & v_{52,p} & v_{53,p} & v_{54,p} & v_{55,p} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta LCO2_{t-p} \\ \Delta LGDP_{t-p} \\ \Delta LFD_{t-p} \\ \Delta LT_{t-p} \\ \Delta LINV_{t-p} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ \psi_3 \\ \psi_4 \\ \psi_5 \end{pmatrix} ECT_{t-1} + \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \end{pmatrix}$$

where ϵ_x , ($x = 1, \dots, 5$), denotes independent normally distributed residuals. The lag order p is selected based on AIC criterion. The null hypotheses for bivariate short-run and multivariate long-run VECM Granger causalities are given in

Table 3.

Table 3. The null hypotheses of VECM causality tests for CO₂ specification.

		Short-run ($i = 1, \dots, p$)					Long-run
		ΔLCO_2	$\Delta LGDP$	ΔLFD	ΔLT	$\Delta LINV$	ψ_j
CO ₂ specification	ΔLCO_2	–	$v_{12,i} = 0$	$v_{13,i} = 0$	$v_{14,i} = 0$	$v_{15,i} = 0$	$\psi_1 = 0$
	$\Delta LGDP$	$v_{21,i} = 0$	–	$v_{23,i} = 0$	$v_{24,i} = 0$	$v_{25,i} = 0$	$\psi_2 = 0$
	ΔLFD	$v_{31,i} = 0$	$v_{32,i} = 0$	–	$v_{34,i} = 0$	$v_{35,i} = 0$	$\psi_3 = 0$
	ΔL	$v_{41,i} = 0$	$v_{42,i} = 0$	$v_{43,i} = 0$	–	$v_{45,i} = 0$	$\psi_4 = 0$
	$\Delta LINV$	$v_{51,i} = 0$	$v_{52,i} = 0$	$v_{53,i} = 0$	$v_{54,i} = 0$	–	$\psi_5 = 0$

IV. RESULTS AND DISCUSSION

The Augmented-Dickey-Fuller (ADF), and Phillips and Perron (PP) unit root tests [47], [48] are performed to investigate whether all the variables are stationary. The unit root pretests are

mandatory to continue the following tests without statistical flaws. The ARDL critical bounds are documented in Pesaran et al. (2001) and Narayan (2005), and their validity depends on the integration orders of the variables in the equation. The integration numbers obtained from the unit root tests should be less than or equal to the first order, I(0) and I(1). Table 4 demonstrates that both ADF and PP findings that CO2 emission is stationary in levels, I(0), whereas others have a unit root in levels but are stationary in the first integration order, I(1). The result shows that the equations contain mixed integration orders in I(0) and I(1). This finding enables performing the ARDL test for further investigations.

Table 4. Unit root test results.

Variables	Levels		1 st Difference		Conclusion I(order)
	ADF	PP	ADF	PP	
LCO2	-2.8603 [5]*	-3.3471 (2)**	-5.5540 [0]***	-5.6017 (2)***	I(0)
LGDP	-1.6877 [0]	-1.8469 (4)	-4.5245 [0]***	-4.7813 (4)***	I(1)
LFD	-1.7856 [0]	-1.7738 (2)	-6.0131 [0]***	-6.0308 (6)***	I(1)
LT	-0.9349 [0]	-1.1494 (3)	-5.0397 [0]***	-5.0397 (0)***	I(1)
LINV	-0.5363 [0]	-0.6839 (3)	-5.8063 [0]***	-5.8171 (3)***	I(1)

Notes: 1. *, ** and *** indicate significance level at the 10%, 5% and 1%, respectively. 2. The numbers in parentheses are the lag orders in ADF tests that are selected based on the AIC, and square brackets shows the optimal bandwidths for PP tests.

Table 5 portrays diagnostic test results for the basic EKC and CO2 emissions model specifications. The results validate that these two models are consistent in following the ARDL and VECM tests to estimate reliable and unbiased policy recommendations. The diagnostic tests show that the variables maintain the following requirements. First, they do not have serial correlation and heteroskedasticity problems. Besides, there is zero mean and constant variance, which are implied by a normal distribution. Next, misspecification does not exist in the models according to the Ramsey Regression Equation Specification Error Test (RESET) [56]. Last, real-life time series such as economic and environmental datasets contain structural time breaks in general due to various crises such as the 1973 oil crisis worldwide. Thus, this study examines the structural time stability of the two model specifications by performing the cumulative sum (CUSUM) and cumulative sum of squares (CUSUMSQ) tests (Brown, Durbin, & Evans, 1975). Figure 1 demonstrates the CUSUM and CUSUMSQ graphics that are confined in the critical bounds of 5% significance. These findings imply that the models are stable in the period 1975-2018.

Table 5. Model diagnostic test results.

Test	Basic EKC spec. Stat. (probability)	CO ₂ specification Stat. (probability)
Breusch-Godfrey serial corr. LM test (F-statistic)	0.2725 (0.8925)	1.1214 (0.3707)
Heteroskedasticity: Breusch-Pagan-Godfrey (F)	1.5006 (0.1867)	0.5194 (0.9135)
Heteroskedasticity test: ARCH (F-statistic)	2.3700 (0.1087)	0.0973 (0.7567)
Normality test: Jarque-Bera test	0.4481 (0.7993)	1.2473 (0.5360)
Ramsey RESET test (F-statistics)	2.5671 (0.1217)	1.8382 (0.1672)
CUSUM	Stable	Stable
CUSUMsq	Stable	Stable

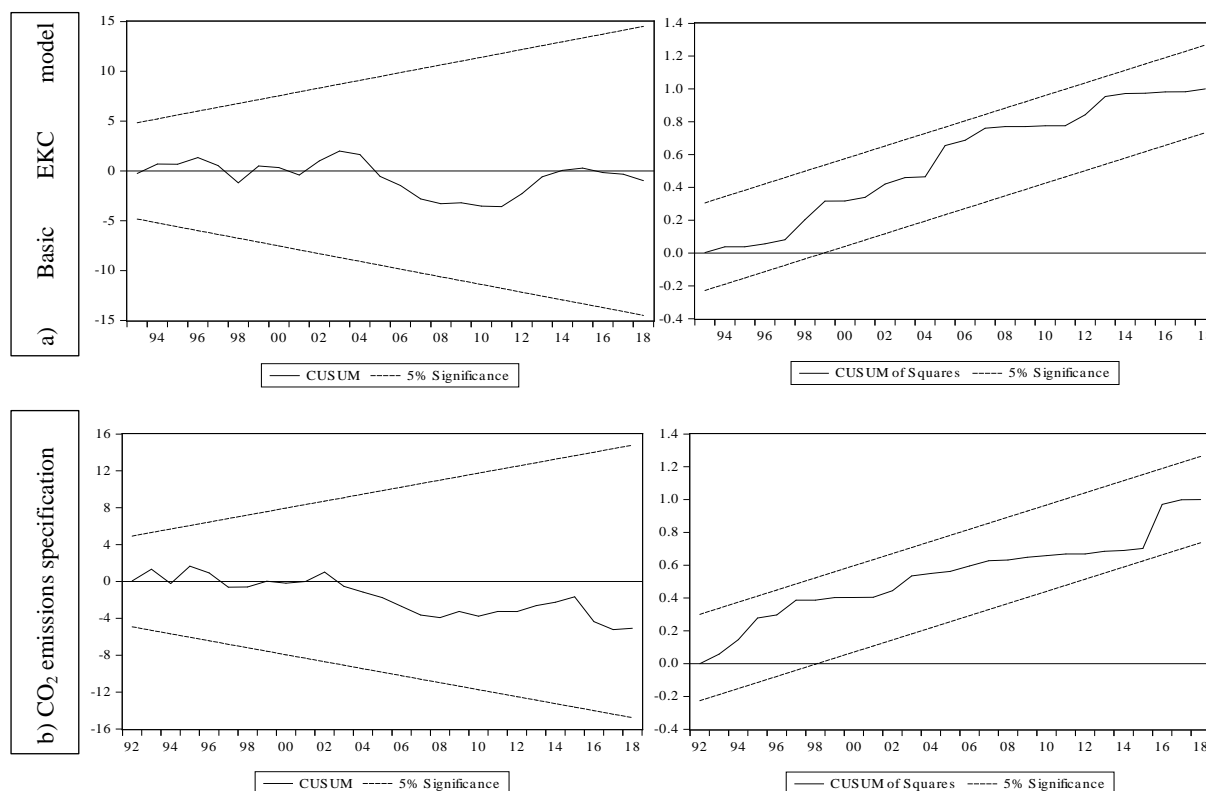


Figure 1. The CUSUM and CUSUM of squares for the three model specifications, (a) the basic EKC, and (b) CO₂ emissions.

This study was carried out with a relatively small time series (N=44 sample size) in the period 1975–2018. Burnham and Anderson (2004) demonstrated that the AIC method in the lag selection outperforms the alternative techniques (such as the SCB approach) that imply unbiased estimates. Thus, this study followed the AIC technique in the ARDL and VECM models. Table 6 shows the estimated F-statistics from the ARDL models for (LCO₂|LGDP, LGDP²) and (LCO₂|LGDP, LFD, LT, LINV) and the corresponding critical bounds at both 1% and 5% significance levels. The results provide evidence that two model specifications (Model 1 and 2) maintain long-run relationships between the dependent variables and regressors at a 1% significance level. These findings enable us to resume the ARDL long-run estimation for two model specifications to propose policy recommendations.

Table 6. Estimated ARDL models and bounds F-tests for cointegrations.

ARDL model	Model spe.	F-statistics	CV 1%		CV 5%	
			I(0)	I(1)	I(0)	I(1)
(LCO ₂ LGDP, LGDP ²)	(2,4,4)	8.5579	5.920	7.197	4.083	5.207
(LCO ₂ LGDP,LFD,LT, LINV)	(4,1,4,3,0)	7.1321	4.394	5.914	3.178	4.45

Notes: 1. The optimal lag orders in the model specification are selected based on the AIC. 2. The CV represents the critical values for the lower I(0) and upper I(1) bounds that are obtained from the table of Case III in Narayan (2005).

Table 7 illustrates the results of the long-run cointegration estimates for the specifications of Model 1 and Model 2 and demonstrate a strong and statistically significant long-run relationship between the dependent variables and regressors at a 1% significance level. In Model 1, the real GDP per capita has a positive and significant cointegration coefficient, whereas its square is negatively and strongly cointegrated with carbon emissions. This result

indicates that income per capita and CO₂ emissions move to a higher or lower level together up to a certain threshold in the long-run, and then carbon emissions turn the opposite direction. In Qatar, carbon emissions rise by an increase in the income before an upper limit in which CO₂ emissions begin to diminish with rising income. This confirms the presence of inverted-U shaped relationship that holds the EKC hypothesis. This result aligns with [21]–[23], [26], [27], [57], but differs from [24], [25], [58], [59] (see Table 1).

Table 7. ARDL long run estimates for Model 1 and 2.

Variables	Basic EKC specification		CO ₂ specification	
	Coefficient	t-Statistics	Coefficient	t-Statistics
LGDP	112.9403***	3.3062	0.7185***	7.8889
LGDP ²	-11.9597***	-3.3054	–	–
LFD	–	–	-0.3217***	-8.7450
LT	–	–	-0.3339***	-13.3623
LINV	–	–	0.1645***	4.9824
ECT _{t-1}	-0.2996***	-6.1791	-1.3785***	-6.3987
R ²	0.9247		0.9760	
Adjusted R ²	0.8899		0.9617	

*Notes: 1. *, ** and *** indicate significance level at the 10%, 5% and 1%, respectively.*

Model 2 estimates the change in CO₂ emissions per capita depending on financial and economic development regressors that are statistically significant at a 1% significance level (see Table 7). The estimated log-linear long-run coefficients of real income per capita for the impact on the CO₂ emissions is 0.718, implying that an increase in the income will increase the carbon emissions by 72%. Financial development's carbon elasticity indicates that an increase in financial development will decrease CO₂ emissions by 32%. The carbon elasticity of foreign trade signifies that an increase in the trade will decrease CO₂ emissions by 33%. The carbon elasticity of investment designates that raising gross fixed capital formation a unit will increase CO₂ emissions by 16%.

The ECT coefficients of Model 1 and Model 2 are estimated at -30% and -138%, respectively, which are negative and statistically significant at a 1% significance level. These findings provide evidence that the basic EKC and CO₂ specifications follow a short-run adjustment to adjust the long-run stability in potential shocks during the period. The adjustment speed is calculated by inverting the absolute ECT values. In this respect, the speeds of adjustment are 3.33 years and less than a year in Model 1 and Model 2, respectively. In other words, these adjustment speeds imply that Model 1 restores the long-run relationship around every 3.5 years, and no shock appears for more than a year in Model 2. In the meantime, the adjusted R² value is large enough, ranging from 0.92 to 0.98, confirming that Models 1 and 2 statistically satisfy the goodness of fit.

Table 8 demonstrates the VECM Granger causality test results, along with their directions, for short and long-run relations between the given variables for the CO₂ specification. This study focuses on the shaded area highlighted in the table, and the remaining results are out of the scope. In this regard, we interpret the findings considering two conditions of CO₂ functioning (i) dependent and (ii) independent variable. First, in the shaded row, the real GDP and foreign trade lead to carbon emissions in the short run at a 1% significance level. Besides, the domestic credit to the private sector also drives CO₂ emissions at a 5% confidence level. Due to the short-run dynamics on carbon emissions, the model converges to the long-run equilibrium at a 10% significance level. Second, in the shaded column considering CO₂ as the independent variable, there is no short-run causality running from

carbon emissions to real income, financial development, foreign development, and investment. In other words, the change in carbon emissions has no impact on other variables in the short run. However, policymakers should concern and give attention to long-run relations for curbing CO₂ emissions given in both Table 7 and Table 8.

Table 8. The short and long run VECM Granger causality analysis for CO₂ specification.

Dependent variable	Short-run					Long-run
	ΔCO_2_t	ΔGDP_t	ΔLFD_t	ΔLT_t	ΔLINV_t	ECM_{t-1}
	χ^2 statistics					Coefficient
	[p-value]					[t-statistics]
ΔCO_2_t	–	12.271*** [0.0065]	10.099** [0.0177]	14.670*** [0.0021]	0.8117 [0.8467]	-0.1051* [-1.7900]
ΔGDP_t	0.5319 [0.9118]	–	11.651*** [0.0087]	6.7522* [0.0802]	1.2162 [0.7491]	-0.0985** [2.4128]
ΔLFD_t	0.9920 [0.8032]	6.9328* [0.0741]	–	2.8755 [0.4112]	5.7259 [0.1257]	0.0902 [0.5436]
ΔLT_t	1.0212 [0.7961]	12.612*** [0.0056]	4.0721 [0.2538]	–	9.6092** [0.0222]	0.4216*** [-2.6760]
ΔLINV_t	1.8211 [0.6104]	3.1357 [0.3712]	3.7989 [0.2840]	2.2143 [0.5291]	–	0.1325 [0.8316]

Notes: 1. The null hypothesis is that there is no causal relationship between variables. 2. Δ is the first difference operator. 3. *, ** and *** indicate significance level at the 10%, 5% and 1%, respectively.

V. CONCLUSION AND POLICY IMPLICATIONS

This study investigates the impacts of economic and financial development on carbon emissions in Qatar between 1975 and 2018 by analyzing the results of the ARDL and VECM tests. In this regard, we define two model specifications, Model 1 and 2, considering CO₂ emission is a dependent variable. In Model 1, economic growth and its square are considered as independent variables to test the basic Environmental Kuznets Curve (EKC) hypothesis. The results provide evidence to confirm the EKC hypothesis for Qatar. In Model 2, various economic and financial variables are specified as regressors, and all the independent variables have a statistically significant impact on CO₂ emissions at a 1% level. The coefficient of real income per capita and investment imply that an increase in both will increase carbon emissions by 72% and 16%, respectively. On the other hand, financial development's carbon elasticity indicates that an increase in financial development will decrease CO₂ emissions by 32%. The carbon elasticity of foreign trade signifies that an increase in trade will decrease CO₂ emissions by 33%.

This study gives some insights into potential reasons for the validity of the EKC hypothesis in Qatar as follows. First, the abundance of natural gas gives Qatar an advantage in generating less polluting energy over other fossil fuels such as oil and coal. As an evidence on that, Mahmood (2022) examined the impacts of oil and natural gas consumption on the environment in the GCC countries and illustrated that natural gas consumption has a less adverse effect on CO₂ emissions than oil consumption [59]. It is worth noting that Qatar and other countries with desert climate endure water scarcity and obtain almost all the clean water by distilling sea water with large desalination plants requiring massive energy. Thus, Qatar may have been releasing relatively less carbon than its counterparts while increasing its GDP by using natural gas-powered plants. Second, the literature provides evidence on curbing carbon emissions by increasing service sector's share in the GDP while rising economic growth, such as in the case of Turkey [60]. This is because the service sector is generally

cleaner than the manufacturing sector. In Qatar, while the shares of the manufacturing and service sector were 9% and 28.6% in 2011, respectively, these ratios changed to 8% and 52.7% in 2020, respectively [61]. This dramatic shift may have been helping Qatar to mitigate the carbon emissions while increasing the GDP.

Qatar must pay attention to keep sustainable economic development by gradually reducing carbon emissions and protecting the environment. This warning is crucial for not only Qatar but also the GCC and MENA countries. This is because the recent literature shows that the MENA countries demonstrate a second turning point for those showing the inverted-U shape behavior between environmental degradation and the GDP [62]. This point reveals an N-shaped pattern implying that environmental degradation has a tendency to rise in the first and last phases of economic growth, and it reduces in the middle phase. Therefore, Qatar should avoid falling into this trap in the last stage and carry on holding the EKC hypothesis. To this end, we provide the following policy recommendations.

This study illustrated that financial development and trade openness mitigate the CO₂ emissions in the long-run, same as the other studies in the literature [22], [57]. In fact, Qatar realized this relationship while preparing its promising national roadmap before 2008, Qatar National Vision 2030 [63]. This document states that “coordination with Gulf Cooperation Council states and with Arab and regional economic organizations to establish trade, investment and financial ties.” However, Qatar experienced a diplomatic crisis with the neighboring and other Middle East countries and they severed financial and trade activities between 2017 and 2021. Qatar should avoid this kind of crisis as much as possible to sustain its financial and trade development, and thus carbon reduction. Moreover, economic policies should focus on financial development and trade openness to continue curbing CO₂ emissions.

Energy use, which commonly accompanies environment-growth studies, was omitted in the model specifications to eliminate potential noise between carbon emissions and energy consumption because Qatar generates electricity and distills water in the plants powered by only fossil fuels. Moreover, economic and financial development’s impact on energy consumption in Qatar was also studied in different studies [23], [26], [45], [64], [65]. In this regard, to keep emissions under control, our recommendation is to implement policies that reduce energy intensity and increase efficiency not only on the supply side but also demand side by eliminating all the energy subsidies and even putting carbon taxes. This may prevent people and industries to waste energy (i.e., electricity) and encourage them to seek alternative ways. The government should give incentives to households and industry is to produce their own electricity from the sun by installing solar PV panels. This is because Qatar has high irradiation and a convenient environment suited for solar energy. Furthermore, the literature demonstrated that renewable energy consumption, such as solar, significantly decreases carbon emissions in the countries demonstrating the validity of EKC hypothesis [66]. Therefore, Qatar should also accelerate its solar farm projects.

Qatar captured an exceptional opportunity in branding and advertising the country’s name worldwide by hosting the FIFA 2022 World Cup. This event may help Qatar to develop foreign trade and financial ties globally, and attract more tourists to explore the distinctive features of both Qatari environment and hospitality. One of the reasons on a dramatic increase in service sector recently is the tourist attraction due to the FIFA organization. As can be seen that tourism development helps carbon reduction with many paths, and there are studies in the literature aligning with this view [66]. Therefore, Qatari policymakers should

have the intention of keeping Qatar an attractive tourist destination and even implement acceleration programs for this purpose. In this way, Qatar might have essential leverage for curbing carbon emissions.

VI. REFERENCES

- [1] WRI, “Historical GHG Emissions: CAIT Data Source,” *Available online at: <https://www.climatewatchdata.org>*, 2021.
- [2] J. Gütschow, L. Jeffery, R. Gieseke, and A. Günther, “The PRIMAP-hist national historical emissions time series (1850-2017),” *GFZ Data Services*. 2019. doi: 10.5880/pik.2019.018.
- [3] BP, “Statistical Review of World Energy, 2020 | 69th Edition,” 2020. [Online]. Available: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>
- [4] A. Meza, I. Ari, M. S. Al-sada, and M. Koç, “Future LNG competition and trade using an agent-based predictive model,” *Energy Strateg. Rev.*, vol. 38, no. August, p. 100734, 2021, doi: 10.1016/j.esr.2021.100734.
- [5] The World Bank, “World Development Indicators. GDP per capita PPP (current international \$),” *[Data]*, 2020. https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.PP.CD?most_recent_value_desc=true&sort=desc&start=1990&view=chart (accessed Jan. 10, 2021).
- [6] MDPS, “Qatar Economic Outlook,” *Minist. Dev. Plan. Stat.*, no. August, pp. 1–50, 2020, [Online]. Available: http://www.mdps.gov.qa/en/knowledge/Doc/QEO/Qatar_Economic_Outlook_2016_2018_EN.pdf
- [7] A. M. Jolo, I. Ari, and M. Koç, “Driving Factors of Economic Diversification in Resource-Rich Countries via Panel Data Evidence,” *Sustainability*, vol. 14, no. 5, p. 2797, Feb. 2022, doi: 10.3390/su14052797.
- [8] B. H. Mohamed, I. Ari, M. S. Al-sada, and M. Koç, “Strategizing Human Development for a Country in Transition from a Resource-Based to a Knowledge-Based Economy,” *Sustainability*, vol. 13, no. 13750, 2021.
- [9] A. Al-mulla, I. Ari, and M. Koç, “Sustainable financing for entrepreneurs : Case study in designing a crowdfunding platform tailored for Qatar,” *Digit. Bus.*, vol. 2, no. 2, p. 100032, 2022, doi: 10.1016/j.digbus.2022.100032.
- [10] M. Al-Saidi, “Instruments of energy subsidy reforms in Arab countries — The case of the Gulf Cooperation Council (GCC) countries,” *Energy Reports*, vol. 6, pp. 68–73, 2020, doi: 10.1016/j.egy.2019.08.020.
- [11] H. Hussein and L. A. Lambert, “A Rentier state under blockade: Qatar’s water-energy-food predicament from energy abundance and food insecurity to a silent water crisis,” *Water (Switzerland)*, vol. 12, no. 4, 2020, doi: 10.3390/W12041051.
- [12] I. Ş. Bayram, O. Alrawi, H. Al-Naimi, and M. Koç, “Direct load control of air conditioners in Qatar: An empirical study,” *2017 6th Int. Conf. Renew. Energy Res. Appl. ICRERA 2017*, vol. 2017-Janua, pp. 1007–1012, 2017, doi: 10.1109/ICRERA.2017.8191209.
- [13] Total, “Al-Kharsaah Solar PV IPP Project,” 2020.
- [14] S. Kuznets, “Economic Growth and Income Inequality,” *Am. Econ. Rev.*, vol. 45, no. 1, pp. 1–28, 1955.
- [15] G. Grossman and A. Krueger, “Environmental Impacts of a North American Free

- Trade Agreement,” *Natl. Bur. Econ. Res.*, no. 3914, 1991, doi: 10.3386/w3914.
- [16] T. Panayotou, *Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development*, vol. 4, no. WP. 238. 1993.
- [17] G. M. Grossman and A. B. Krueger, “Economic Growth and the Environment,” *Q. J. Econ.*, vol. 110, no. 2, pp. 353–377, 1995.
- [18] S. Dinda, “Environmental Kuznets Curve hypothesis: A survey,” *Ecol. Econ.*, vol. 49, no. 4, pp. 431–455, 2004, doi: 10.1016/j.ecolecon.2004.02.011.
- [19] D. I. Stern, “The Rise and Fall of the Environmental Kuznets Curve,” *World Dev.*, vol. 32, no. 8, pp. 1419–1439, 2004, doi: 10.1016/j.worlddev.2004.03.004.
- [20] S. A. Sarkodie and V. Strezov, “A review on Environmental Kuznets Curve hypothesis using bibliometric and meta-analysis,” *Sci. Total Environ.*, vol. 649, pp. 128–145, 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.276.
- [21] M. E. H. Arouri, A. Ben Youssef, H. M’henni, and C. Rault, “Energy consumption, economic growth and CO 2 emissions in Middle East and North African countries,” *Energy Policy*, vol. 45, pp. 342–349, 2012, doi: 10.1016/j.enpol.2012.02.042.
- [22] A. Omri, S. Daly, C. Rault, and A. Chaibi, “Financial development, environmental quality, trade and economic growth: What causes what in MENA countries,” *Energy Econ.*, vol. 48, pp. 242–252, 2015, doi: 10.1016/j.eneco.2015.01.008.
- [23] R. Jammazi and C. Aloui, “On the interplay between energy consumption, economic growth and CO2 emission nexus in the GCC countries: A comparative analysis through wavelet approaches,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 51, pp. 1737–1751, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.07.073.
- [24] Z. Mrabet and M. Alsamara, “Testing the Kuznets Curve hypothesis for Qatar: A comparison between carbon dioxide and ecological footprint,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 70, no. December 2015, pp. 1366–1375, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.12.039.
- [25] Z. Mrabet, M. AlSamara, and S. Hezam Jarallah, “The impact of economic development on environmental degradation in Qatar,” *Environ. Ecol. Stat.*, vol. 24, no. 1, pp. 7–38, 2017, doi: 10.1007/s10651-016-0359-6.
- [26] L. Charfeddine, “The impact of energy consumption and economic development on Ecological Footprint and CO2 emissions: Evidence from a Markov Switching Equilibrium Correction Model,” *Energy Econ.*, vol. 65, pp. 355–374, 2017, doi: 10.1016/j.eneco.2017.05.009.
- [27] N. Ben Cheikh, Y. Ben Zaied, and J. Chevallier, “On the nonlinear relationship between energy use and CO2 emissions within an EKC framework: Evidence from panel smooth transition regression in the MENA region,” *Res. Int. Bus. Financ.*, vol. 55, no. May, p. 101331, 2021, doi: 10.1016/j.ribaf.2020.101331.
- [28] T. Herzog, J. Pershing, and K. A. Baumert, “Navigating the numbers: greenhouse gas data and international climate policy,” WRI: World Resources Institute, Washington, 2005.
- [29] T. Wei *et al.*, “Developed and developing world responsibilities for historical climate change and CO2 mitigation,” *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 109, no. 32, pp. 12911–12915, 2012.
- [30] Y. Zhao, L. Zheng, and J. Zhu, “Could environmental courts reduce carbon intensity? Evidence from cities of China,” *J. Clean. Prod.*, vol. 377, p. 134444, 2022.
- [31] J. Zhang, Z. Fan, Y. Chen, J. Gao, and W. Liu, “Decomposition and decoupling analysis of carbon dioxide emissions from economic growth in the context of China and the ASEAN countries,” *Sci. Total Environ.*, vol. 714, p. 136649, 2020.
- [32] A. O. Acheampong, M. Amponsah, and E. Boateng, “Does financial development mitigate carbon emissions? Evidence from heterogeneous financial economies,”

- Energy Econ.*, vol. 88, p. 104768, 2020.
- [33] M. Khan and I. Ozturk, "Examining the direct and indirect effects of financial development on CO₂ emissions for 88 developing countries," *J. Environ. Manage.*, vol. 293, p. 112812, 2021.
- [34] Y. Sun, W. Guan, Y. Cao, and Q. Bao, "Role of green finance policy in renewable energy deployment for carbon neutrality: Evidence from China," *Renew. Energy*, vol. 197, pp. 643–653, 2022.
- [35] E. Dogan and B. Turkekul, "CO₂ emissions, real output, energy consumption, trade, urbanization and financial development: testing the EKC hypothesis for the USA," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 23, pp. 1203–1213, 2016.
- [36] M. Shahbaz, M. A. Nasir, E. Hille, and M. K. Mahalik, "UK's net-zero carbon emissions target: Investigating the potential role of economic growth, financial development, and R&D expenditures based on historical data (1870--2017)," *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 161, p. 120255, 2020.
- [37] M. Shahbaz, M. A. Destek, K. Dong, and Z. Jiao, "Time-varying impact of financial development on carbon emissions in G-7 countries: Evidence from the long history," *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 171, p. 120966, 2021.
- [38] The World Bank, "World Development Indicators 2010," Washington D.C., 2010.
- [39] G. P. Peters, J. C. Minx, C. L. Weber, and O. Edenhofer, "Growth in emission transfers via international trade from 1990 to 2008," *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 108, no. 21, pp. 8903–8908, 2011, doi: 10.1073/pnas.1006388108.
- [40] S. K. Hundie, "Income inequality, economic growth and carbon dioxide emissions nexus: empirical evidence from Ethiopia," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 28, no. 32, pp. 43579–43598, 2021.
- [41] E. K. Avenyo and F. Tregenna, "Greening manufacturing: Technology intensity and carbon dioxide emissions in developing countries," *Appl. Energy*, vol. 324, p. 119726, 2022.
- [42] B. K. Edziah, H. Sun, P. K. Adom, F. Wang, and A. O. Agyemang, "The role of exogenous technological factors and renewable energy in carbon dioxide emission reduction in Sub-Saharan Africa," *Renew. Energy*, vol. 196, pp. 1418–1428, 2022.
- [43] R. G. Bell and C. Russell, "Environmental policy for developing countries," *Issues Sci. Technol.*, vol. 18, no. 3, pp. 63–70, 2002.
- [44] M. Usman, D. Balsalobre-Lorente, A. Jahanger, and P. Ahmad, "Pollution concern during globalization mode in financially resource-rich countries: do financial development, natural resources, and renewable energy consumption matter?," *Renew. Energy*, vol. 183, pp. 90–102, 2022.
- [45] H. A. Bekhet, A. Matar, and T. Yasmin, "CO₂ emissions, energy consumption, economic growth, and financial development in GCC countries: Dynamic simultaneous equation models," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 70, no. 2017, pp. 117–132, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.089.
- [46] S. Adams, F. Adedoyin, E. Olaniran, and F. V. Bekun, "Energy consumption, economic policy uncertainty and carbon emissions; causality evidence from resource rich economies," *Econ. Anal. Policy*, vol. 68, pp. 179–190, 2020.
- [47] D. A. Dickey and W. A. Fuller, "Distribution of the Estimators for Autoregressive Time Series With a Unit Root," *J. Am. Stat. Assoc.*, vol. 74, no. 366, p. 427, 1979, doi: 10.2307/2286348.
- [48] P. C. B. Phillips and P. Perron, "Testing for a unit root in time series regression," *Biometrika*, vol. 75, no. 2, pp. 335–346, 1988, doi: 10.1093/biomet/75.2.335.
- [49] M. H. Pesaran, Y. Shin, and R. J. Smith, "Bounds testing approaches to the analysis of level relationships," *J. Appl. Econom.*, vol. 16, no. 3, pp. 289–326, 2001, doi:

- 10.1002/jae.616.
- [50] The World Bank, “World Development Indicators,” [Data], 2020. <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators> (accessed Jan. 10, 2021).
- [51] R. F. Engle and C. W. J. Granger, “Co-Integration and Error Correction: Representation, Estimation, and Testing,” *Econometrica*, vol. 55, no. 2, pp. 251–276, 1987.
- [52] S. Johansen and K. Juselius, “Maximum likelihood estimation and inference on cointegration - with applications to the demand for money,” *Oxf. Bull. Econ. Stat.*, vol. 52, no. 2, pp. 169–210, 1990, doi: 10.1111/j.1468-0084.1990.mp52002003.x.
- [53] S. Johansen, “Testing weak exogeneity and the order of cointegration in UK money demand data,” *J. Policy Model.*, vol. 14, no. 3, pp. 313–334, 1992, doi: 10.1016/0161-8938(92)90003-U.
- [54] K. P. Burnham and D. R. Anderson, “Multimodel Inference: Understanding AIC and BIC in Model Selection,” *Sociol. Methods Res.*, vol. 33, no. 2, pp. 261–304, Nov. 2004, doi: 10.1177/0049124104268644.
- [55] P. K. Narayan, “The saving and investment nexus for China: Evidence from cointegration tests,” *Appl. Econ.*, vol. 37, no. 17, pp. 1979–1990, 2005, doi: 10.1080/00036840500278103.
- [56] J. B. Ramsey, “Tests for Specification Errors in Classical Linear Least-Squares Regression Analysis,” *J. R. Stat. Soc. Ser. B*, vol. 31, no. 2, pp. 350–371, 1969.
- [57] A. Abulibdeh, “Time series analysis of environmental quality in the state of Qatar,” *Energy Policy*, vol. 168, no. May, p. 113089, 2022, doi: 10.1016/j.enpol.2022.113089.
- [58] M. A. Ansari, M. R. Ahmad, S. Siddique, and K. Mansoor, “An environment Kuznets curve for ecological footprint: Evidence from GCC countries,” *Carbon Manag.*, vol. 11, no. 4, pp. 355–368, 2020, doi: 10.1080/17583004.2020.1790242.
- [59] H. Mahmood, “The effects of natural gas and oil consumption on CO₂ emissions in GCC countries: asymmetry analysis,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 29, no. 38, pp. 57980–57996, 2022, doi: 10.1007/s11356-022-19851-2.
- [60] U. Bulut, “Environmental sustainability in Turkey: an environmental Kuznets curve estimation for ecological footprint,” *Int. J. Sustain. Dev. World Ecol.*, vol. 00, no. 00, pp. 1–11, 2020, doi: 10.1080/13504509.2020.1793425.
- [61] World Bank, “World bank open data.” <https://data.worldbank.org/indicator/> (accessed Feb. 20, 2023).
- [62] A. Sheikhzeinoddin, M. H. Tarazkar, A. Behjat, U. Al-mulali, and I. Ozturk, “The nexus between environmental performance and economic growth: New evidence from the Middle East and North Africa region,” *J. Clean. Prod.*, vol. 331, no. July 2021, p. 129892, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129892.
- [63] QNV 2030, “Qatar National Vision 2030,” *Ministry of Development Planning and Statistics of Qatar*, 2008. https://www.mdps.gov.qa/en/qnv1/Documents/QNV2030_English_v2.pdf (accessed Feb. 15, 2019).
- [64] I. Ari and M. Koc, “Economic and Financial Development Impacts on Energy Consumption and Air Quality in Qatar,” *J. Manag. Econ. Res.*, vol. 20, no. 1, pp. 313–330, 2022, doi: <http://dx.doi.org/10.11611/yead.1061317>.
- [65] M. Kahia, M. S. Ben Aïssa, and L. Charfeddine, “Impact of renewable and non-renewable energy consumption on economic growth: New evidence from the MENA Net Oil Exporting Countries (NOECs),” *Energy*, vol. 116, pp. 102–115, 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.07.126.
- [66] X. Ma, N. Ahmad, and P. Y. Oei, “Environmental Kuznets curve in France and

Germany: Role of renewable and nonrenewable energy,” *Renew. Energy*, vol. 172, pp. 88–99, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.03.014.



Düzce University Journal of Science & Technology

Research Article

Structural Interpretation and Tectonostratigraphy of High-Pressure Low-Temperature Blueschist Facies Rocks near Orhaneli, Bursa Province, Western Türkiye

 Umit YILDIZ^{a,*1}

^a *Black Hills Natural Science Field Station, Department of Geological Engineering, Faculty, South Dakota School of Mines & Technology, Rapid City, SD, U.S.A.*

* *Corresponding author's e-mail address: umit.yildiz@sdsmt.edu*

DOI: <https://doi.org/10.29130/dubited.1273991>

ABSTRACT

The Izmir-Ankara suture, a Neo-Tethyan collision zone between the Sakarya microcontinent (hanging wall) to the north and the Anatolide-Tauride block (footwall) to the south, including blueschist facies rocks near Dağgüney village, Orhaneli in Bursa, Türkiye, formed during the mid-Cretaceous. This study aims to better understand the tectonostratigraphy and the structural evolution of the high-pressure low-temperature (HP-LT) rocks and their surroundings by examining data obtained from detailed geological mapping near Dağgüney, Orhaneli, Bursa. There are three main tectonostratigraphic units including HP-LT rocks, mélangé, and subophiolitic peridotites. Extensive exposures of lawsonite blueschist, graphitic mica schist, white mica schist, and marble there indicate HP-LT conditions of formation. In addition, the Tavşanlı Zone contains two other rock sequences of significance to subduction-related evolution. These are mélangé, considered to have formed in an accretionary complex that includes metamorphosed radiolarian chert, greenstone, meta-volcanic-tuff, amphibolite, white-mica-schist, blueschist and serpentinite, peridotite which contains dunite, harzburgite, and gabbro, interpreted to have formed as the oceanic lithosphere. Metamorphic foliation, defined by compositional layering and schistosity, trends generally ENE and dips gently northerly. Metamorphic lineation, defined by elongate calcite and sodic amphibole grains, trends WSW and gently plunges. Mesoscopic isoclinal folds are common in the blueschist facies rocks. The majority of the folds trend NNE-SSW and plunge gently eastward in the HP-LT rocks. There are at least four major fault types based on age, cross-cutting relationships, and orientation. Blueschist facies mineral assemblages were preserved in the HP-LT rocks, thus a rapid exhumation mechanism of buoyancy-driven flow is interpreted to have taken place within the subduction channel. The presence of blueschist, amphibolite, and white mica schist within the mélangé suggests that exhumation occurred during subduction.

Keywords: *Lawsonite blueschist, Structural Geology, Tavşanlı Zone, Tectonostratigraphy*

¹ This study was completed by Umit YILDIZ (2013) under the supervision of Dr. Michael Terry. It was produced from the master's thesis entitled

"Tectonostratigraphy, Structural Evolution and Exhumation of High-Pressure Blueschist Facies Rocks Along a Tethyan Suture Zone in Orhaneli, Bursa Province, Western Turkey" conducted in South Dakota School of Mines & Technology, Rapid City, U.S.A.

Orhaneli, Bursa İli, Batı Türkiye Yakınlarındaki Yüksek Basıncılı Düşük Sıcaklıklı Mavişist Fasiyesli Kayaçların Yapısal Yorumlanması ve Tektonostratigrafisi

ÖZET

Kuzeyde Sakarya mikrokıtası (tavan bloğu) ile güneyde Anatolid-Torid bloğu (taban bloğu) arasında bir Neo-Tetis çarpışma bölgesi olan İzmir-Ankara suture hattı, Bursa, Orhaneli, Dağgüney köyü yakınlarındaki mavişist fasiyes kayaları dahil, orta Kretase döneminde oluşmuştur. Bu çalışma, Bursa, Orhaneli, Dağgüney yakınlarındaki ayrıntılı jeolojik haritalamadan elde edilen verileri inceleyerek yüksek basınç düşük sıcaklık (HP-LT) kayaçlarının ve çevrelerinin tektonostratigrafisini ve yapısal evrimini daha iyi anlamayı amaçlamaktadır. Çalışma alanında (HP-LT) kayaçları, melanj ve subofiyolitik peridotitleri içeren üç ana tektonostratigrafik birim vardır. Lavsonit mavişist, grafitli mikaşist, beyaz mikaşist ve mermerin burada yoğun şekilde mostra vermesi, HP-LT oluşum koşullarına işaret etmektedir. Buna ek olarak, Tavşanlı Zonu dalma-batma-ilişkili etkileşim açısından önem taşıyan iki diğer kayaç birimini daha içermektedir. Bunlar, metamorizmaya uğramış radyolarit, greenstone, meta-volkanik-tüf, amfibolit, beyaz-mikaşist, mavişist ve serpantin içeren melanj, ve okyanusal litosfer olarak oluştuğu düşünülen dünit, harzburjit ve gabro içeren peridotitlerdir. Bileşimsel katmanlanma ve şistozite ile tanımlanan metamorfik yapraklanma, genellikle DKD doğrultulu ve hafifçe kuzeye doğru eğimlidir. Yönlenmiş kalsit ve sodik amfibol mineralleri tarafından tanımlanan metamorfik lineasyon, BGB doğrultulu ve düşük açı ile dalım yapmaktadır. Mavişist fasiyes kayalarında mezoskopik izoklinal kıvrımlar yaygındır. Kıvrımların çoğu KKD-GGB doğrultulu ve doğuya doğru düşük açılarla dalmaktadır. Çalışma alanında yaşa, kesme ilişkisine ve doğrultu atımına bağlı olarak en az dört ana fay tipi tespit edilmiştir. HP-LT kayaçlarında mavişist fasiyes mineral topluluklarının kimyasal özellikleri korunmuştur, bu nedenle mavişistlerin yüzeylemesinin dalma-batma kanalı içinde kaldırma kuvveti kaynaklı ve hızlı bir mekanizmayla gerçekleştiği yorumlanmıştır. Ayrıca melanj içinde mavişist, amfibolit ve beyaz mikaşist bulunması, yüzeylemenin dalma-batma sırasında meydana geldiğini açıklamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Lavsonit mavişist, Yapısal Jeoloji, Tavşanlı Zonu, Tektonostratigrafi

Received: 30/03/2023, Revised: 13/04/2023, Accepted: 15/04/2023

I. INTRODUCTION

The study area is located approximately 60 km south of Bursa in northwestern Anatolia, the Asian portion of Türkiye. It lies in the north wall of the Kocasu River adjacent to Dağgüney village, 13.6 km northwest of Orhaneli, Bursa, Türkiye (Figures 1 and 2), and is a part of the Tavşanlı tectonic zone. The east-trending Tavşanlı Zone extends across western and central Türkiye as one of the widest and best-preserved high-pressure (blueschist facies) belts in the world [1]. The zone, with a maximum width of 120 km in the west and an average width of 50-60 km elsewhere, extends for 280 km along the northern margin of the Anatolide-Tauride block. The Tavşanlı Zone, which consists of meta-sedimentary and meta-volcanic rocks, experienced subduction metamorphism which overprints these rocks with regional high-pressure low-temperature (HP-LT) blueschist facies metamorphism [2, 3, 4] in the Late Cretaceous (88-80 Ma) [5, 6, 7]. HP-LT metamorphism, also known as blueschist metamorphism, is a type of metamorphism that occurs under specific geologic conditions. It typically

occurs in subduction zones. The name "blueschist" refers to the blue-colored minerals that are commonly found in rocks undergoing this type of metamorphism, such as glaucophane and lawsonite. These minerals form under the HP-LT conditions of blueschist metamorphism and are indicative of the specific conditions under which this type of metamorphism occurs. Sherlock et al. [6], reported the age of the blueschist metamorphism, based on Rb/Sr phengite dating, as Campanian (80Ma), and these rocks were buried to a depth of 80km [5]. Blueschists in the Sivrihisar, Eskişehir area, in the eastern Tavşanlı Zone, include Ar/Ar phengite dates that range from 88 to 81 Ma [7]. An upper age limit of 53 Ma was given for the high-pressure low-temperature (HP-LT) metamorphism for the Sivrihisar region [6] based on the age of granodiorite stocks that intrudes HP-LT rocks around Orhaneli region [8]. This would indicate that the HP-LT rocks around Orhaneli region reached upper crustal levels by the Early Eocene [1, 4].



Figure 1. Tectonic Map of Türkiye and adjacent areas showing the major sutures and continental blocks [9]. The study area is marked by a yellow star (UTM Zone 35N, European Datum 1979).

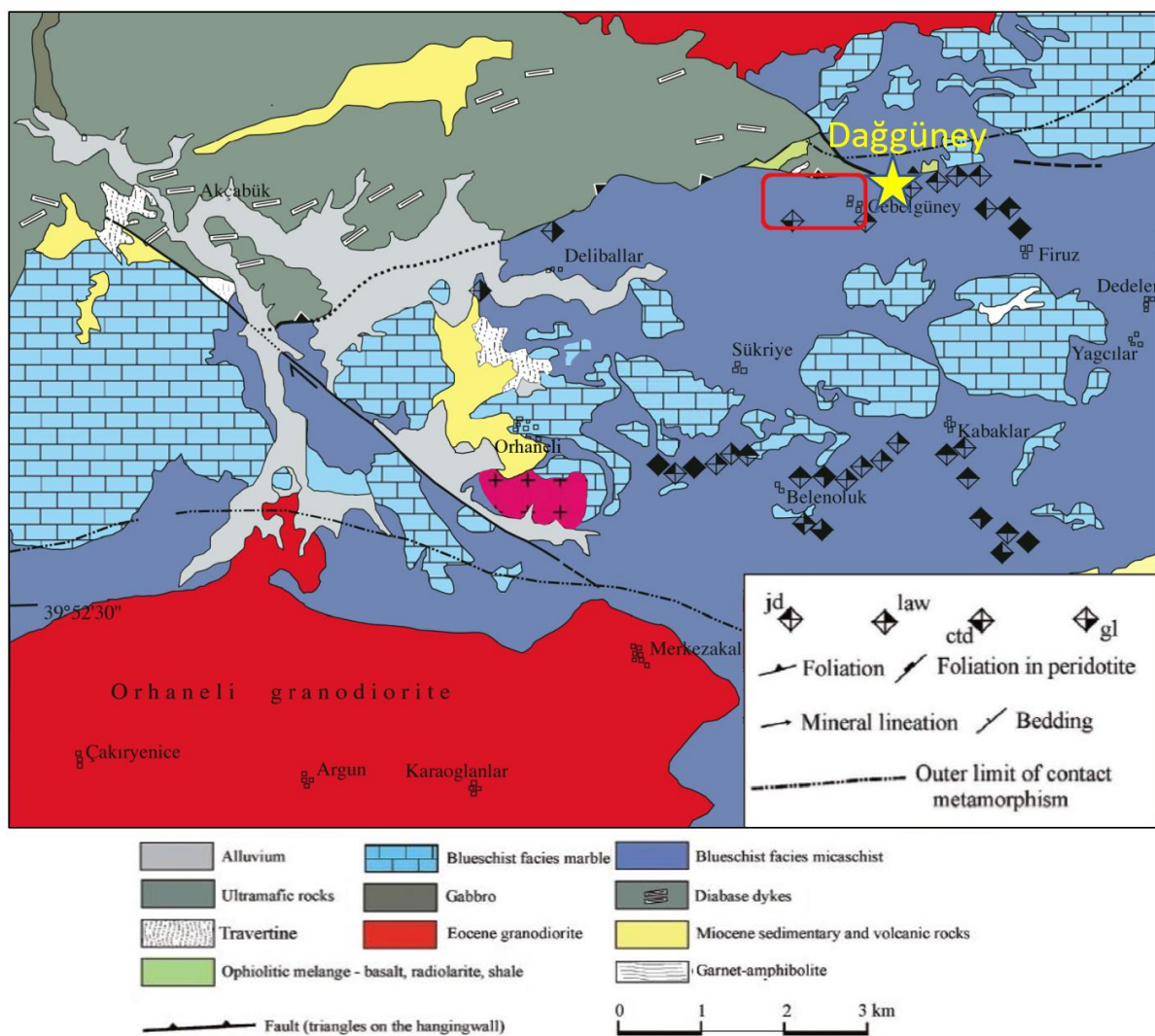


Figure 2. Geologic map of the Dağgüney, Orhaneli area [2]. The study area is marked by the red box.

Micaschists (white mica schist and graphitic mica schist) of the Dağgüney area, have a mineral assemblage of jadeite + chloritoid + lawsonite + glaucophane + quartz + phengite + graphite, and based on this mineral assemblage, pressure-temperature (P-T) conditions of meta-sedimentary rocks (micaschists) of the Orhaneli area was 24 ± 3 kbar and $430 \pm 30^\circ\text{C}$ [2,10]. P-T conditions of metamorphism varied along the strike of the western Tavşanlı Zone. In the western portion, they are reported as 15-16 kbar and 520°C [2], in Sivrihisar region as 22-24 kb and 520°C [11], and as 9-11 kbar and $375\text{-}400^\circ\text{C}$ in the Konya-Altıntekin region (southeastern Tavşanlı Zone) [12].

High-pressure low-temperature (HP-LT) rocks of the Tavşanlı Zone were partly exposed by the latest Cretaceous, Maastrichtian [4] before the Paleocene continent-continent collision, as demonstrated by blueschist debris in the latest Cretaceous clastic strata in the Sakarya Zone, which is on the north of the Tavşanlı Zone. According to Okay [4], the Lower Eocene marine deposits in the Tavşanlı Zone show that by the end of the Paleocene, the Orhaneli Group (which is present in the study area) was on the surface or very close to the surface.

Subduction and exhumation mechanisms of HP-LT blueschist facies rocks have been studied for years, but the exhumation mechanism of the HP-LT rocks is still controversial. The Tavşanlı Zone provides a spectacularly well-exposed blueschist belt that is similar to HP-LT metamorphic belts in Oman [13, 14, 15], in the Cyclades of the Aegean Sea [16, 17], in terms of stratigraphy, petrology, and geochronology.

This field-based study aims to better understand the tectonostratigraphy, the structural evolution, and the exhumation mechanisms of the HP-LT rocks and their surroundings by examining data obtained from detailed geological mapping and tectonostratigraphic field measurements from a unique study area that clearly reveals the tectonic relationships between the accretionary complex and the HP-LT blueschist facies rocks.

II. GEOLOGICAL SETTING

During the Alpine orogeny in the Early Paleogene, continental fragments were juxtaposed by continent-to-continent collision after Tethyan oceanic lithospheres in between were eliminated by east-west trending and northward-dipping subduction zones [18, 19]. The study area lies at the northern margin of the Anatolide-Tauride micro-continent along the Late Cretaceous-Paleocene suture with the Sakarya micro-continent. The area is part of the Tavşanlı zone of high-pressure metamorphism. The Tavşanlı zone is the northern margin of the Anatolide/Tauride block. On the north it is separated from the Sakarya Microcontinent by the Izmir-Ankara suture (Figure 1) that also separates Laurasia and Gondwana mega-continent: on the south is in tectonic contact with the underlying Afyon zone: on the west is in tectonic contact with Bornava Flysc. The Izmir-Ankara suture, including blueschist facies rocks near Orhaneli in Bursa Province, Türkiye, formed during the mid-Cretaceous [2]. Extensive exposures of lawsonite blueschist, graphitic mica schist, white mica schist, and marble there indicate high-pressure and low-temperature conditions of formation [3, 4, 20] in the Late Cretaceous (88-80 Ma) [5, 6, 7].

In addition to the high-pressure low-temperature (HP-LT) blueschist facies rocks, a *mélange* of accretionary complex crops out in multiple locations within the study area and across the region and tectonically overlies the blueschist facies rocks. The *mélange* consists of metamorphosed basalt, metamorphosed radiolarian chert (quartzite), metamorphosed tuff (phyllite), greenstone, knockers of amphibolites, blueschist, serpentinite, and metamorphosed lapilli tuff; possible pillow lavas are also present. Studies show that the *mélange* of the accretionary complex has undergone low-grade metamorphism of $T < 200^{\circ}\text{C}$ and $P \sim 4\text{-}7 \text{ kb}$ [21]. The age of the metamorphism is unknown.

In the Orhaneli region, a large slab of peridotite (the Burhan peridotite) tectonically overlies *mélange*, or the blueschist facies rocks, and is Albian in age [5]. Within the study area, peridotite consists mainly of dunite, harzburgite, and strongly sheared and weathered serpentinite. Hydrothermal silicic alteration of peridotite formed listvenite along the fault zones and the serpentinite margins, but the peridotite shows no sign of regional metamorphism. The peridotite slab is cut by diabase dikes which generally trend E-W also present within the study area.

Low-grade meta-limestone, which is part of the *mélange*, conformably overlies meta-basalt within the accretionary complex. Low-grade meta-limestones are interbedded with cherts and are adjacent to jasper-silica or jasperoid. Jasperoid silica is part of the meta-limestone as it is the possible hydrothermal replacement product of the low-grade meta-limestone.

In the northeast portion of the study area, along the high-angle fault zone, a series of granodioritic intrusions, which generally strike NW-SE, are present. These Early-Middle Eocene plutons [5] intrude blueschist facies rocks, *mélange*, and the peridotite within the study area.

III. METHODS

A. GEOLOGIC MAPPING and FIELDWORK

Two detailed geological maps were produced. The first map, at a scale of 1:6,250, represents the geology of the entire study area. The second map, at a scale of 1:500, was prepared for the rare contact exposure between the high-pressure low-temperature (HP-LT) blueschist facies rocks and the mélangé of an accretionary complex (Figure 3). In addition to the geological maps, two tectonostratigraphic columns were prepared. The first column represents the tectonostratigraphic relationships between the HP-LT rocks and the mélangé of an accretionary complex. The second column represents the interbedded tectonostratigraphic relationship between the low-grade meta-limestones and cherts.

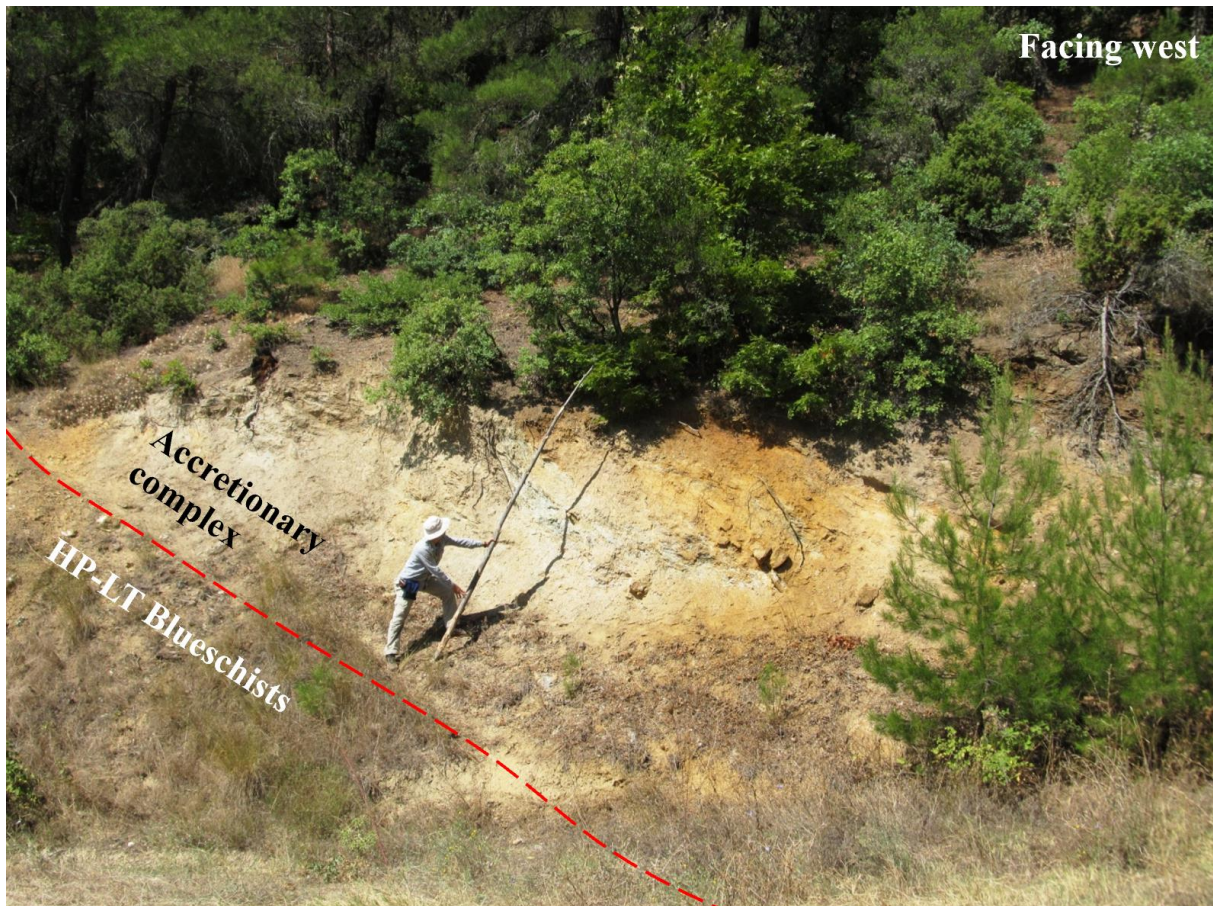


Figure 3. The photograph showing the contact between the HP blueschist rocks and a zone of highly sheared serpentinite forming the base of a section of mélangé of accretionary complex. Red dashes for the contact (Stick length = 5 m). UTM Location: 4423837N – 674130E.

Geologic contacts were drawn on a topographic map and precise locations were obtained by a handheld Garmin GPS unit in European-Datum-1979, UTM-Zone-35N. In certain areas, where vegetation, steep terrain, or inaccessible private land make mapping difficult, geology and structures were approximated and/or inferred based on the surrounding geological evidence. In addition, numerous structural data, which include metamorphic foliation, mineral lineation, fold axis, and fault planes, were measured by right-hand rule using a Brunton compass and later plotted on Allmendinger's stereonet program. Finally, geological maps and tectonostratigraphic columns were digitized in ESRI's ArcMap 10.0 [22] with the representative UTM coordinate system and datum. Additionally, two cross-sections were drawn and digitized in ArcMap 10.0 based on the geological map and the data observed from the structural measurements. Section A-A' trends N-S and section B-B' trends NW-SE.

IV. RESULTS

A. GEOLOGICAL MAPS

A detailed geologic map at a scale of 1:6,250 shows the tectonic relationship and the contacts between the oceanic lithosphere (Burhan peridotite), the accretionary complex (mélange), and the underlying high-pressure low-temperature (HP-LT) metamorphic rocks near the village of Dağgüney (Figure 4).

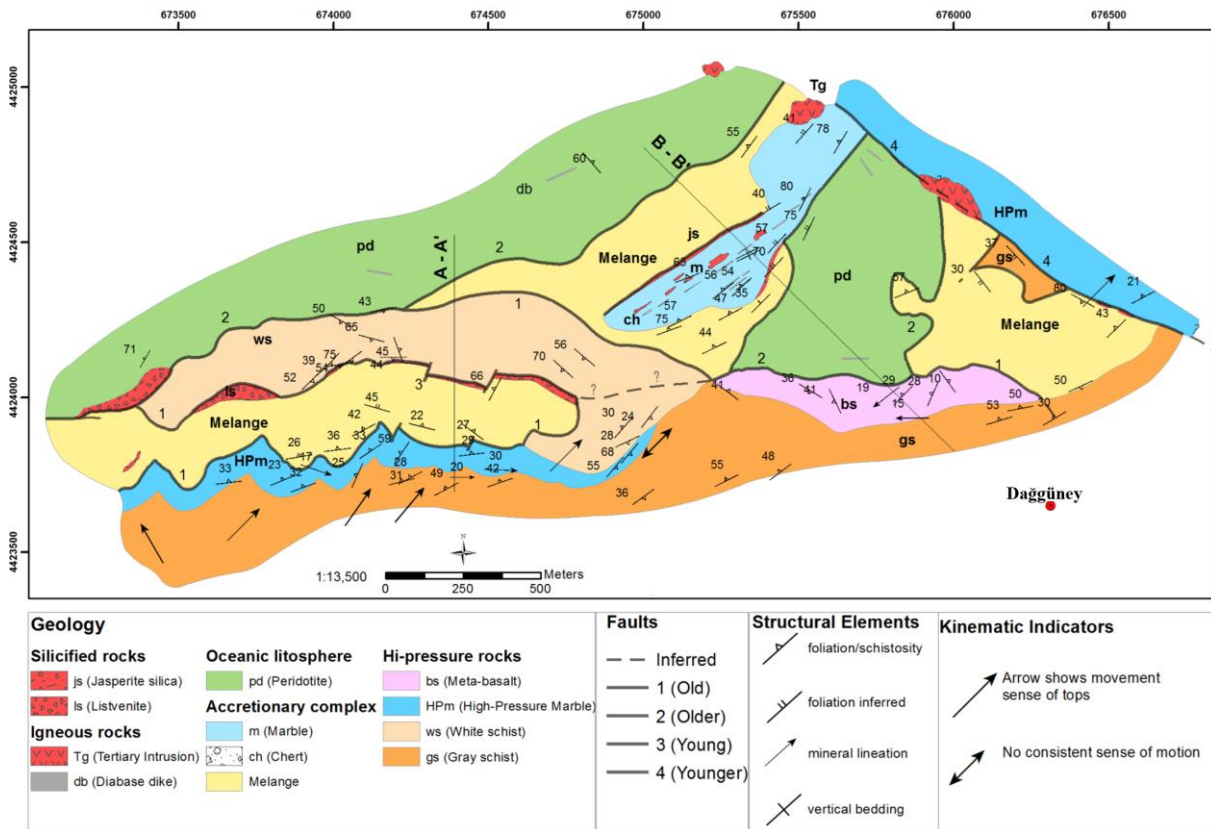


Figure 4. Geologic map of Dağgüney showing the tectonic relationship and the contacts between the oceanic lithosphere, accretionary complex and the HP/LT blueschist facies rocks.

The peridotite unit tectonically overlies both the accretionary complex and the HP-LT blueschist facies rocks and consists of dunite, harzburgite, and minor serpentinite. Orange-colored listvenite, a silicified hydrothermal alteration product of peridotite, occurs locally along the contact with the underlying units. East-west trending diabase dikes cut the peridotite units. Northwest-southeast trending Tertiary plutons mapped as granodiorite, intrude the peridotites and the HP-LT blueschist rocks. The thickness of the peridotite was reported as 2 kilometers [5, 23].

Another detailed geological map was prepared at a 1:500 scale that illustrates the tectonic relationships at the significant contact between the accretionary complex and the HP-LT blueschist facies rocks (Figure 5). This is the only location within the study area where one can observe an actual contact between the accretionary complex and the HP-LT blueschist facies rocks (UTM Location: 4423837N – 674130E).

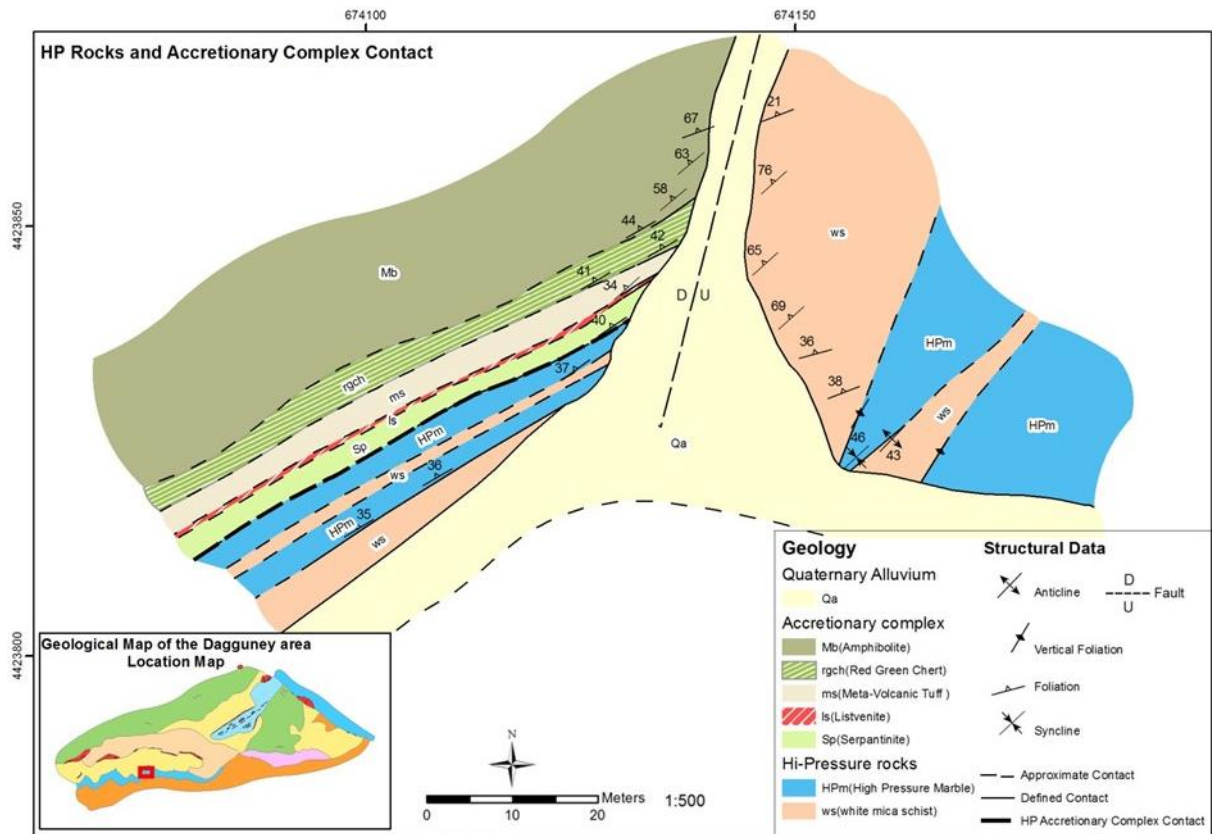


Figure 5. Geologic map showing the tectonic relationship and the contacts between the accretionary complex and the HP-LT blueschist facies rocks.

The accretionary complex is in tectonic contact with both the overlying peridotite and the underlying HP-LT blueschist facies rocks. This unit consists of mélangé which is mainly composed of metamorphosed basalt, metamorphosed radiolarian chert (quartzite), greenstone, metamorphosed volcanic tuff (phyllite), serpentinite with listvenite, marble with chert interlayers and jasper-silica which probably is a replacement product of marble. A single amphibolite block is also present in the accretionary complex.

High-pressure low-temperature (HP-LT) blueschist facies rocks are tectonically overlain by accretionary complex and peridotites. The base of HP-LT rocks is not exposed within the study area. Blueschist facies rocks consist of lawsonite blueschist, HP marble, white mica schist, and graphitic mica schist. The parallel alignment of mineral grains shows a mineral lineation that generally trends east-west. Measured metamorphic foliations within these rocks dip generally northwards. A local garnet-bearing blueschist is also present. HP marble is massive in many outcrops, and elsewhere is interbedded with thin layers of white mica schist, graphitic mica schist, and lawsonite blueschist at the transition zones. White mica schist and graphitic mica schist crop out over a large area around Dağgüney. According to Okay [24], the minimum thickness of micaschists is about 800 meters. Metaconglomerates with quartz clasts and calcite pebbles are also present within the white mica schist. Lawsonite blueschist crops out in several locations in the study area. Okay [25] describes these rocks as classic blueschists and Lisenbee [23] mapped this unit as basic schist. Lawsonite blueschist shows a strong foliation which generally trends northeast, and a strong mineral lineation defined by the parallel alignment of the sodic amphibole grains, which generally trends east-west.

B. TECTONOSTRATIGRAPHY

A tectonostratigraphic column was prepared based on the field measurements of different units within the mélangé found at the significant outcrop (UTM Location: 4423837N – 674130E). This column

shows the tectonostratigraphic relationships of the mélangé units and their underlying contact with the HP-LT rocks (Figure 5). In addition, another tectonostratigraphic column was drawn based on the field measurements of the low-grade meta-limestones and interbedded cherts, which are all underlain by a phyllite unit within the mélangé (Figure 6).

B.1. Tertiary Plutons (Granodiorite)

In the northeastern portion of the study area (Figure 4), along the high-angle, NW-trending fault zone, a series of granodioritic igneous plutons are present. The trend of the intrusions is consistent and is NW-SE which is similar to the high-angle NW trending strike-slip fault in the northeastern portion of the study area. This would suggest that igneous intrusions tend to follow the strike of the major fault. Granodioritic intrusions have a mineral assemblage of plagioclase (35%), potassium feldspar (10%), quartz (45%), hornblende (5%), and biotite (5%). Undeformed Early to Middle Eocene granodiorite bodies (50 Ma $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isochron ages), intrude the blueschists and the overlying peridotites [4].

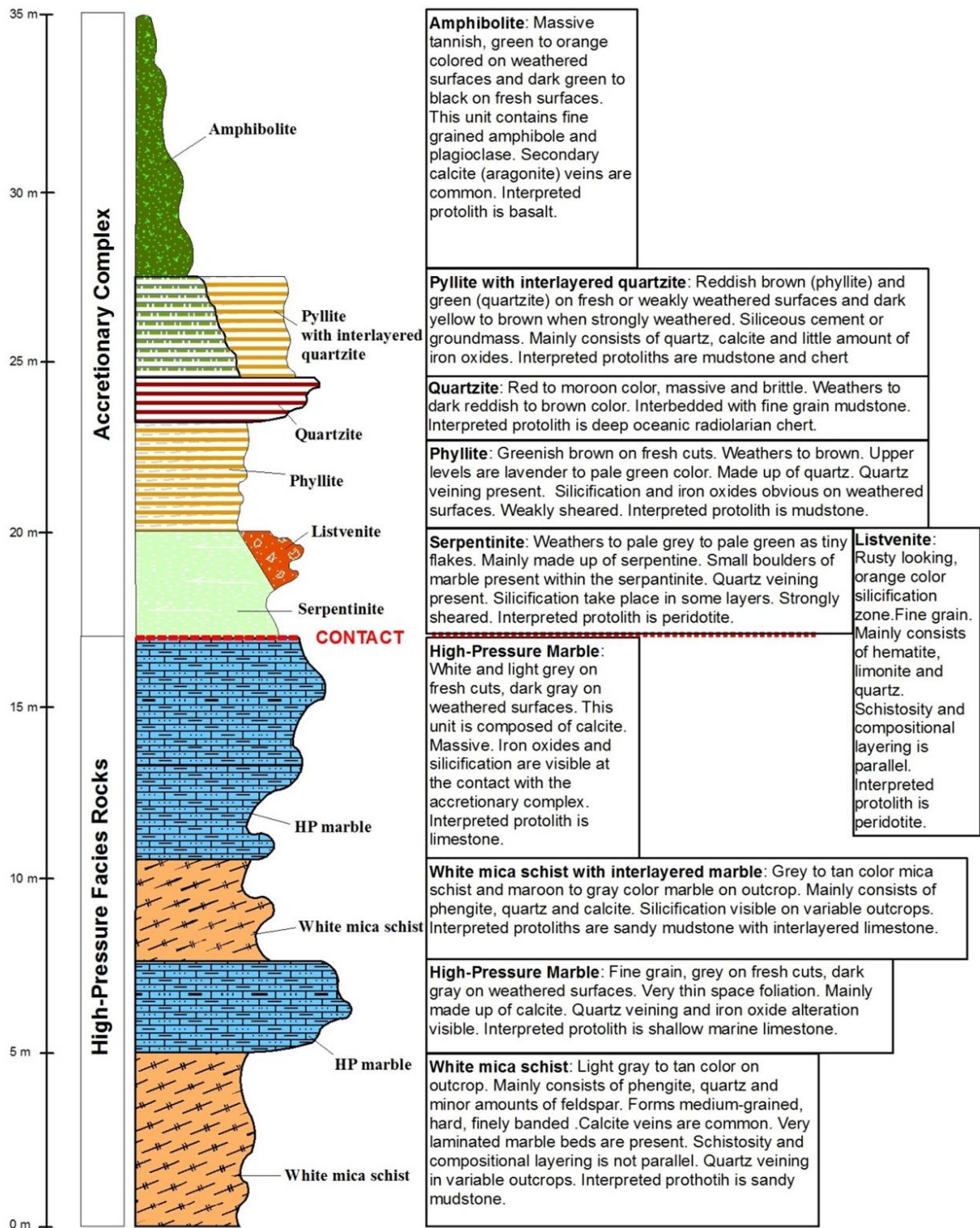


Figure 6. Tectonostratigraphic section illustrating the relation between the HP-LT rocks and the mélangé of the accretionary complex.

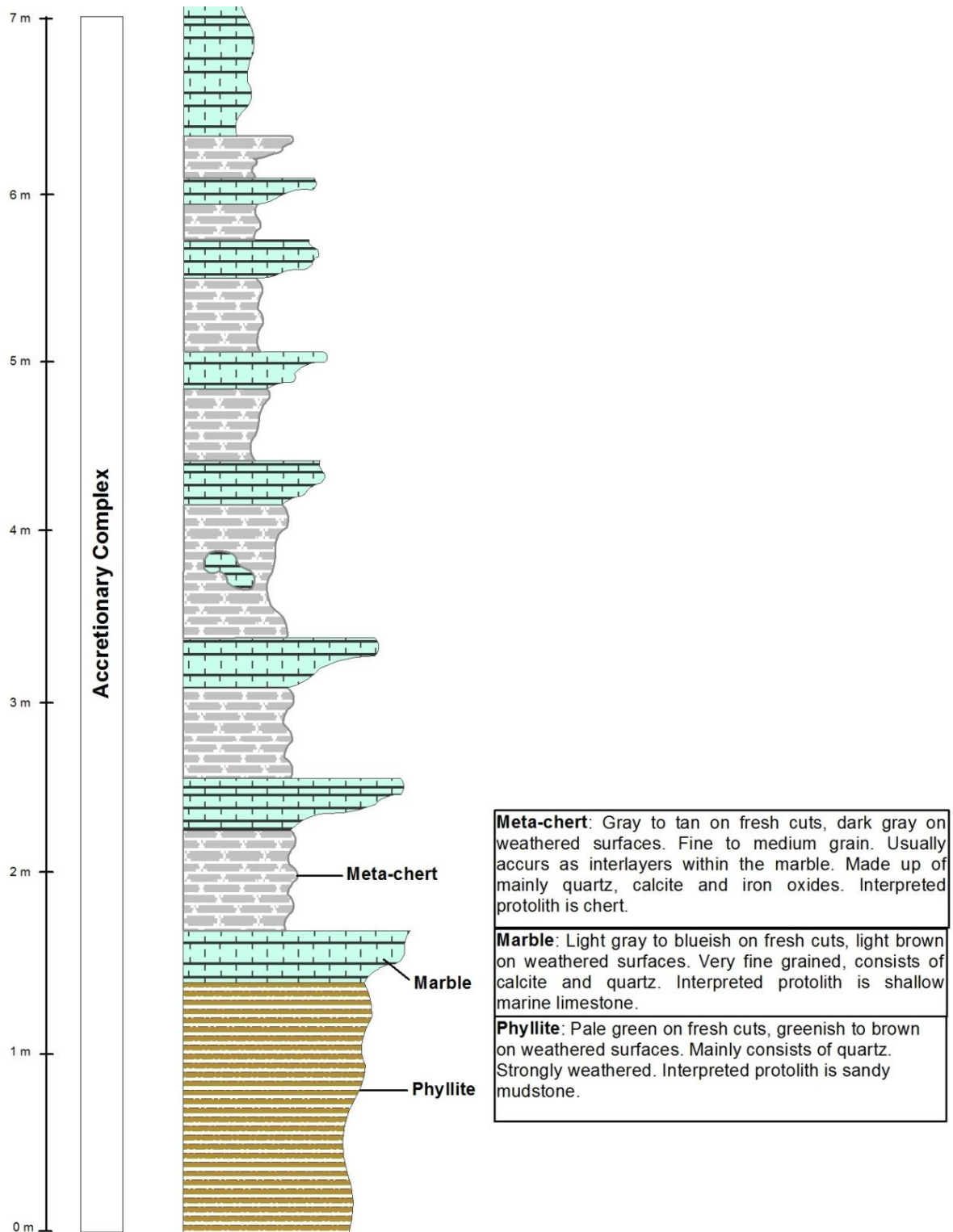


Figure 7. Tectonostratigraphic section showing the low-grade meta-limestone with chert interlayers within the accretionary complex.

B.2. Oceanic Lithosphere (Burhan Peridotite)

The Burhan peridotite slab consists of dunite, harzburgite and minor serpentinite and listvenite. This unit is part of Anatolian ophiolite and is of Albian age [5]. This slab is interpreted to have formed as the oceanic lithosphere and occurs as locally large tectonic sheets, which tectonically overlies the accretionary complex and the HP-LT blueschist facies rocks [23]. The Burhan peridotite obducted

over the Anatolide-Touride block during the Late Cretaceous [26]. The mineral assemblage for peridotite is olivine + orthopyroxene + clinopyroxene + chrome-spinel. The peridotite shows no sign of regional metamorphism as magmatic mineral assemblage of plagioclase + pyroxene is well preserved [26]. In the study area, dunite weathers to serpentinite and makes up most of the peridotite slab. The dunite is fine to medium-grained, composed of yellowish-dark green olivine and tiny black grains of chromite; the rock weathers to orange to light brown at local outcrops. Serpentinite occurs mainly at the base of the peridotite and the shear zones. Strongly sheared and weathered serpentinite is pale green in color, and breaks into tiny flakes. 2 to 3 centimeters bands of chromite deposits are also present within the dunite. Listvenite occurs as a hydrothermal alteration product of the peridotites. Silicification (listvenite) is a late, post-tectonic feature, due to fluid circulation along the fault contacts [1]. Kaya et al. [27] also reported that smaller amounts of silicified listvenite and magnesite are present within the peridotite tectonic slab within the study area. East-west trending diabase dikes crop out within the peridotite units. Diabase dikes consist of mainly hornblende and plagioclase, and as a result, this rock has a salt and paper texture. The rock is gray to pale blue on fresh surfaces, and dark gray to light brown on weathered surfaces. Based on the mineral assemblage and the texture this rock has not gone under HP-LT metamorphism. Diabase dike thickness ranges from 2 to 8 meters within the study area. Dike-peridotite contacts are generally faulted due to later brittle deformation. In some outcrops, however, the original intrusive contacts are preserved, and the dikes can be seen to have narrow chilled margins. This observation indicates that the dikes intruded into cold peridotite [20]. Ar-Ar dating for the diabase dikes was determined by Okay [4] as approximately 90 Ma. Okay and Whitney [1] reported that magmatic hornblende replaced the pyroxene (augite) and that plagioclase is commonly altered into very fine-grained aggregates of pumpellyite and albite. These indicate that the diabase dikes have undergone low-grade metamorphism. The thickness of the peridotite was measured based on field mapping and cross-sections by Okay [5] and on detailed gravity profiles by Lisenbee [23], and is as about 2 kilometers.

B.3. Mélange (Accretionary Complex)

The mélange consists of low-grade metamorphosed basalt, metamorphosed radiolarian chert (quartzite), metamorphosed tuff (phyllite), and metamorphosed basalt (greenstone). Additionally, amphibolite, blueschist, low-grade marble, white mica schist, serpentinite, metamorphosed volcanic lapilli tuff, jasperoid, and listvenite are present within the mélange. Stratigraphic relationships between the different rock types are typically not preserved, except in one outcrop in the study area (Figure 3). Elsewhere, it is difficult to follow bedding without encountering a fault or shear zone. A typical mélange either has a greywacke or serpentinite matrix. The mélange near Dağgüney village has a serpentinite matrix. Metamorphosed basalts within the accretionary complex may have several types of magmatic protoliths [4]. The alkali basalts in the mélange are chemically comparable to Pacific Ocean seamounts, however, the close connection of red radiolarites and cherts suggests that several varieties of basalt represent the edges of such structures rather than the main seamount architecture [28]. Another possible type is the mid-oceanic ridge type. Regardless of their type, these basalts were formed on the oceanic floor and preserved within the mélange of an accretionary complex during the subduction. The mélange within the study area underwent low-grade metamorphism of $T < 200^{\circ}\text{C}$ and $P \sim 4\text{-}7$ kbar [21, 29]. The age of metamorphism is still undefined. Possible pillow lavas are also present in the western portion of the study area. Several basalt outcrops show no deformation and original mineral assemblages were preserved. With its lithological features, internal structure, and its incipient HP metamorphism, the mélange of an accretionary complex represents a Tethyan subduction-accretion complex. According to Okay and Whitney [1], the Ovacık Complex (which includes the mélange in the study area) differs from the Franciscan or Makran-type accretionary complexes in the scarcity of clastic rocks.

Metamorphosed radiolarian chert (quartzite) crops out in several locations in the field area. Meta-radiolarian cherts are maroon to red in color. Radiolaria from cherts within the Ovacık complex from the Tavşanlı and Bornova Flysch zones yield Late Triassic (late Carnian, late Norian), Jurassic and Early Cretaceous (Cenomanian-Hauterivian) ages [30, 31, 32]. These ages indicate that the Neo-Tethyan oceanic crust north of the Anatolide-Touride Block has a minimum age of Late Cretaceous

[4]. Lisenbee [23] reported that Late Cretaceous-Paleocene pollens from tuffaceous rocks are present within the mélange near Dağgüney village. This would indicate that the Neo-Tethyan oceanic crust within the study area has an age between Late Triassic to Paleocene. Greenstone, phyllitic in texture, is also present within the accretionary complex. Local outcrops range from a couple of meters to 50 meters in length. Several outcrops of greenstone occur as interlayers with meta-radiolarian chert (quartzite). The interpreted protolith is basalt. A metamorphosed lapilli tuff outcrop was noted within the mélange unit in the northeastern side of the study field. It is very fine-grained and of a greenish color. Light gray clasts range from 3 to 15 millimeters in diameter. Weathered surfaces are dark brown to light tan. The interpreted protolith is volcanic tuff. Additionally, HP-LT blueschist rocks such as blueschist, marble, and white mica schist knockers are present within the accretionary complex. Metamorphic mineral textures and grain sizes are characteristics of these blueschist facies knockers. An amphibolite knocker is present in the accretionary complex. This rock consists mainly of hornblende, plagioclase, and garnet cut by calcite veinlets and iron oxides and is a typical metamorphic sole. The possible protolith based on the mineral assemblage and the texture is basalt. A marble unit contained within the accretionary complex differs from the high-pressure marble by its grain size and the metamorphic texture. This unit crops out on a ridge crest (locally called Söğütoğlukırı Tepesi) with chert interlayers. The northern margin of the marble chert interlayers is the jasperite-silica unit. Based on the texture, the marble shows no sign of high-pressure metamorphism. This unit is light gray to light blue on fresh surfaces, and light brown to dark gray on weathered surfaces. The marble consists of calcite, quartz grains, and minor amounts of iron oxide and is interbedded with discontinuous meta-chert layers. Field observations indicate that the chert is deformed, this suggests the chert was already within the limestone before the metamorphism and deformation has taken place. The interpreted protolith is shallow marine limestone. Metamorphosed chert in the marble is tan to pale pink on fresh surfaces, and light brown to tan on weathered surfaces. This unit consists of quartz with minor amounts of iron oxide staining. The trend of the meta-chert strikes consistently NE-SW and steeply dips to the NW within the marble. The interpreted protolith is chert. Jasperite-silica crops out also on the same ridge crest in the northern portion of the mapping area. This rock consists of silica that has formed largely by epigenetic replacement [33]. This unit is composed of mainly quartz and minor amounts of hematite and other iron oxides. Jasper-silica occurs as pink to tan on fresh surfaces and reddish pink on weathered surfaces. This unit is very fine-grained. Individual bodies of jasperite-silica range in size from little pods to masses more than half a kilometer in their greatest dimension. The trend of this unit strikes NE-SW and dips steeply to the NW. Jasperite-silica outcrops within the marble indicate that calcite was replaced by silica epigenetically.

B.4. High-Pressure Low-Temperature Blueschist Facies Rocks

High-pressure low-temperature (HP-LT) blueschist facies rocks are tectonically overlain by the peridotite and the mélange. HP-LT rocks consist of four major units. These are lawsonite blueschist, high-pressure (HP) marble, white mica schist, and graphitic mica schist.

B.4.1. Lawsonite Blueschist

Lawsonite blueschist is blue, green, and lavender on fresh cuts and darker gray to blueish green on weathered surfaces. This unit only crops out in the southeastern portion of the study area, where it overlies HP marble and is overlain by the accretionary complex. Lawsonite blueschist consists of glaucophane, lawsonite, chlorite, phengite, and quartz, minor amounts of calcite and iron oxides are also present. A strong foliation and strong mineral lineation are defined not only through the parallel alignment of the sodic amphibole (glaucophane) grains but also through white mica (phengite) grains. Quartz and calcite veinlets are present at local outcrops. The interpreted protoliths are basalt, volcanic tuff, and pyroclastic rocks. On several outcrops, lawsonite blueschist forms very thin bands within the massive HP marble layers. Based upon the cross sections drawn, the structural thickness of the lawsonite blueschist is about 200 meters. According to Okay [25], the structural thickness of the lawsonite blueschist unit is about one kilometer in the Tavşanlı Zone. Lawsonite blueschist shares a common metamorphic and deformational history with the underlying HP marble [1]. Studies indicate that the peak pressure and temperature values of the metamorphism for these rocks (lawsonite

blueschist, HP marble, white mica schist, graphitic mica schist) around Dağgüney area is 24 ± 3 kbar and $430\pm 30^\circ\text{C}$ [2, 4, 10].

B.4.2. HP Marble

High-pressure (HP) marble crops out over large areas within the study area. Outcrops range from a couple of meters to hundreds of meters. Okay [4], reported that HP marble has a structural thickness of several kilometers in the Tavşanlı Zone. This unit is gray to white on fresh surfaces and dark gray on weathered surfaces. Usually, HP marble is fine-grained, consists of calcite and minor quartz, and is locally banded. Calcite minerals possibly transform to aragonite and revert to calcite after exhumation. The marble contains a strong mineral lineation defined by the parallel alignment of elongated calcite grains. This unit provides easy measurements of compositional layering, mineral lineation, fold axes, and schistosity. Quartz veining is also present. HP marble is massive in outcrop scale and is interbedded with thin layers of white mica schist, graphitic mica schist, and lawsonite blueschist at the transition zones. Additionally, a metaconglomerate unit is present in the HP marble unit. The interpreted protolith is Mesozoic shallow marine limestone [4].

B.4.3. White Mica Schist

White mica schist crops out over a large area around Dağgüney. The rock is light gray, pale pink, and tan in color on fresh surfaces, and light brown, dark tan to gray on weathered surfaces. White mica schist unit consists mainly of phengite, quartz, calcite, and minor amounts of iron oxides. Jadeite is also present. Mesoscopic folds and microscopic boudins within the white mica schists are good kinematic indicators. White mica schists crop out within HP marble at several locations. Well-developed metamorphic foliation and strong mineral lineation are defined by the phengite bands. White mica schist contains quartz in the study area, indicating that the protolith is possibly sandy mudstone. A rare metaconglomerate is present within the white mica schist near Dağgüney village, which is composed mainly of phengite, calcite, and quartz; calcite and quartz clasts are elongated and range from a couple of centimeters to 10 centimeters in diameter. Based upon the presence of jadeite, chloritoid, and quartz, micaschists within the study area were metamorphosed at 80 kilometers of depth. According to Okay (2011), the Orhaneli region is possibly the most jadeite-rich area in the world. The structural thickness of the micaschist was measured by Okay [4] as about 800 meters within the Tavşanlı Zone. Okay et al. [34], reported Ordovician and Permo-Carboniferous zircon ages for micaschists within the Tavşanlı Zone. White mica schist shares the same peak metamorphic conditions as the overlying HP marble and lawsonite blueschist.

B.4.4. Graphitic Mica Schist

Graphitic mica schist crops out over a very large area in the southern portion of the study area. This unit is dark gray to dark tan color on fresh surfaces and very dark gray color on weathered surfaces. This unit has a waxy luster and consists of graphite, quartz, calcite, and phengite. Quartz veining is present on local outcrops. Metaconglomerate, similar to those layers within the HP marble and white mica schist, is also present within the graphitic mica schist. Isoclinal and chevron folds are common within this unit. The interpreted protoliths are sandy mudstone with limestone interlayers. Graphitic mica schist shares the same peak metamorphic conditions as the overlying white mica schist, HP marble, and lawsonite blueschist.

C. STRUCTURAL GEOLOGY

C.1. Structural Relations Among the Rock Units

There are three major rock units within the study area. The mutual relations are as shown on the two geological maps, two tectonostratigraphic sections, and two cross-sections which were made based on the detailed field study (Figures 4, 5, 6, and 7). Based on the observed field relationships, the

peridotite unit overlies both the *mélange* of the accretionary complex and the high-pressure blueschist rocks. The accretionary complex overlies the high-pressure blueschist rocks. These relationships are present in the northeastern portion of the study area (Figure 4). Listvenite and serpentinite occur as the basal portions of the ultramafic complex and separate *mélange* and HP-LT rocks from the peridotite (ultramafic complex). The orientation of foliation and compositional layering, which generally strike northeast-southwest and dip gently northwards in the HP-LT rocks, also indicate that the peridotite unit structurally overlays the *mélange* and the HP-LT rock units.

C.2. Metamorphic Foliations

All three major tectonostratigraphic units including the ultramafic complex, accretionary complex, and HP-LT rock units have a metamorphic foliation. The dunite and harzburgite units in the ultramafic complex contain a distinct tectonic foliation defined by the preferred orientation of olivine and elongated grains of enstatite and chromite. The metamorphic foliation generally parallels the compositional layering within the study area. The foliation generally strikes northeast and dips northwest (Figure 8).

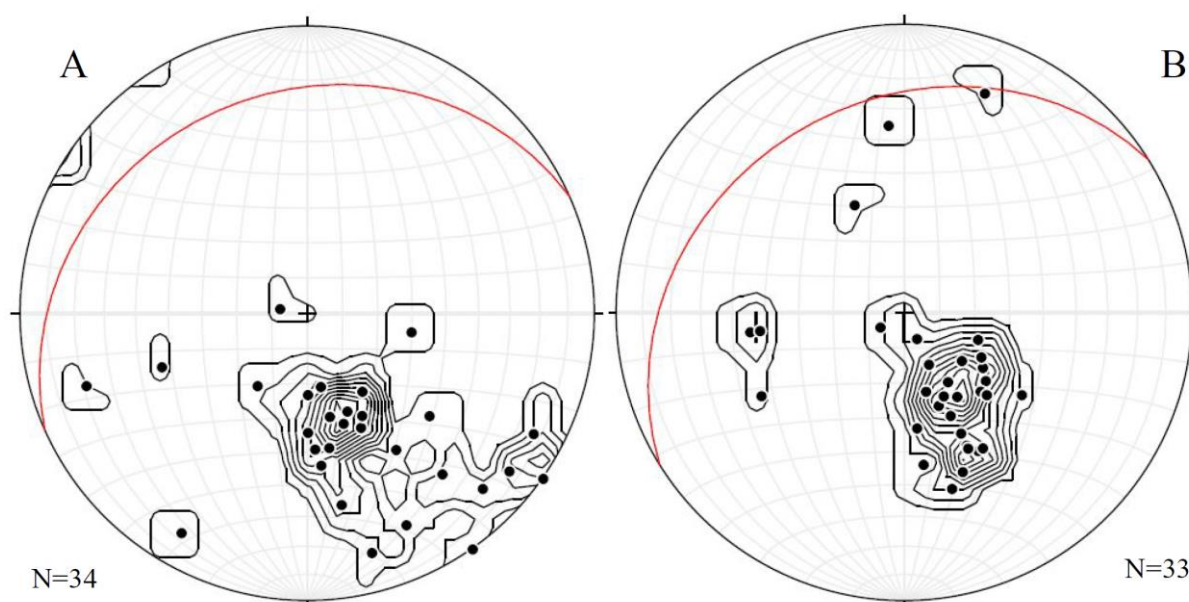


Figure 8. (A)- Equal-area stereonet projection showing 1% area contours of poles to foliation in the accretionary complex. (B)- Equal-area projection showing 1% area contours of poles to foliation in the HP-LT blueschist facies rocks. The contour interval (CI) = 2%.

Attitudes of foliation and compositional layering are the same in the large mass of the Burhan peridotite body to the north and in the smaller isolated mass near Dağgüney. Such a foliation is believed to form during recrystallization in mantle conditions [23]. Foliation generally parallels the compositional layering in the meta-sedimentary and the meta-basalt units (meta-radiolarian chert, meta-volcanic tuff, and greenstone) within the accretionary complex. Figure 8 (A) shows that the foliation defined by compositional layering in the accretionary complex generally strikes at 246° and dips 24° northwesterly. The HP-LT rocks foliation is defined by tabular mica grains and generally strikes at 238° and dips 28° northwesterly as illustrated in Figure 8 (B). The compositional layering within the HP-LT rocks is usually sub-parallel to the metamorphic foliation. Foliation is present in all of the units (HP marble, white mica schist, graphitic mica schist, and lawsonite blueschist).

C.3 Metamorphic Lineations

High-pressure low-temperature (HP-LT) blueschists of the Tavşanlı Zone contain a strong mineral lineation defined by elongated calcite and sodic amphibole grains. These are interpreted to represent a

stretching lineation by Okay et al. [5], Monod et al. [35], and Masuda et al. [36]. Similar lineations, which are defined by the parallel alignment of calcite and glaucophane grains, are present within the study area. Elongated quartz and marble pebbles also display long axes oriented east-west within the study area. Figure 9 (A) shows that mineral lineations on lawsonite blueschist generally trend east-west and plunge on average 19° near Dağgüney village. These measurements are local to a single outcrop. Similar mineral lineation data were reported by Lisenbee [23] for a larger study area near Dağgüney, Orhaneli area. Mineral lineation data trend approximately east-west in the Tavşanlı and Mihaliççık regions, north-south in Sivrihisar [35], and northeast-southwest in the Konya-Altınekin regions [37]. Figure 9 (B) illustrates mineral lineation data obtained from HP-LT rock units at seven different locations (white mica schist, graphitic mica schist, and HP marble), however, shows a slightly different direction. These metamorphic lineation measurements are defined by the parallel alignment of tabular mica grains, and trend generally 252° and plunge 19° . These measurements are consistent with the metamorphic foliation data obtained from the HP-LT rock units.

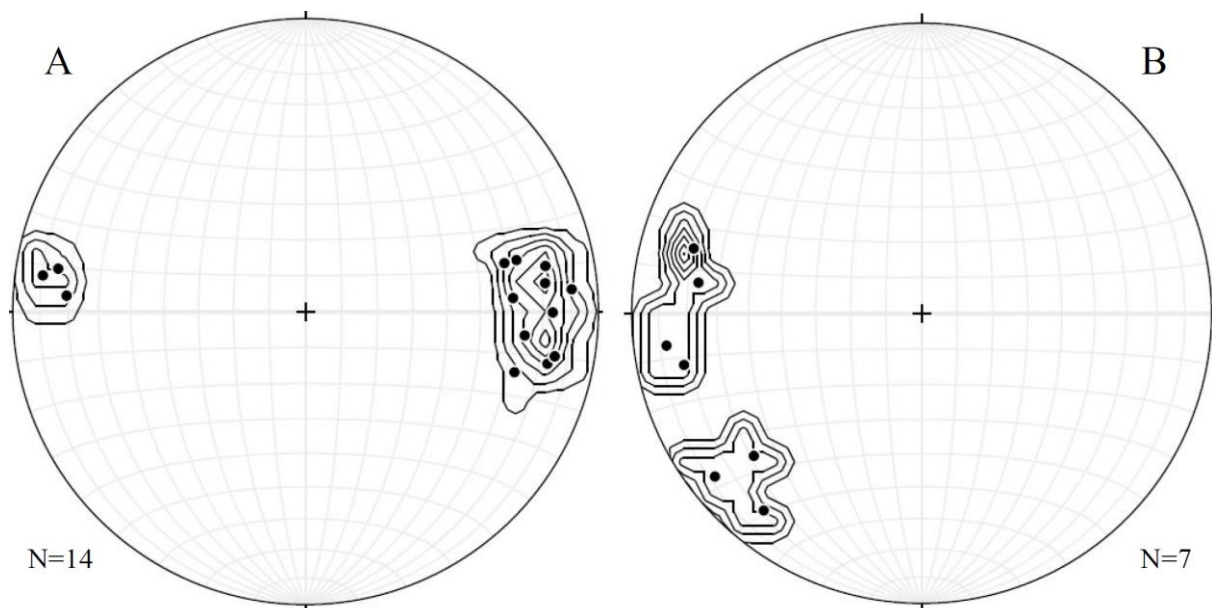


Figure 9. (A)- Equal-area lower hemisphere stereonet projection showing 1% area contours of lineation defined by elongated mineral grains in the lawsonite blueschist unit. (B)- Equal-area lower hemisphere stereonet projection showing 1% area contours of lineation defined by elongated mineral grains in the HP-LT rock units. Contour interval (CI) = 4%.

C.4. Folds

Mesoscopic isoclinal folds are common in the blueschist facies rocks within the study area. Fold axes plunge gently eastward, sub-parallel to the mineral lineation of muscovite, calcite, and glaucophane mineral grains. Both isoclinal recumbent and chevron-type folds are present in the HP-LT rocks within the study area. This suggests at least two different deformation events occurred. The majority of the folds trend ENE-WSW and plunge gently eastward as shown in Figure 10 (A). Mesoscopic isoclinal folds are also present within the mélangé. Figure 10 (B) shows the structural data obtained from the mélangé indicating that the fold axes trend N-S and plunge gently to the east.

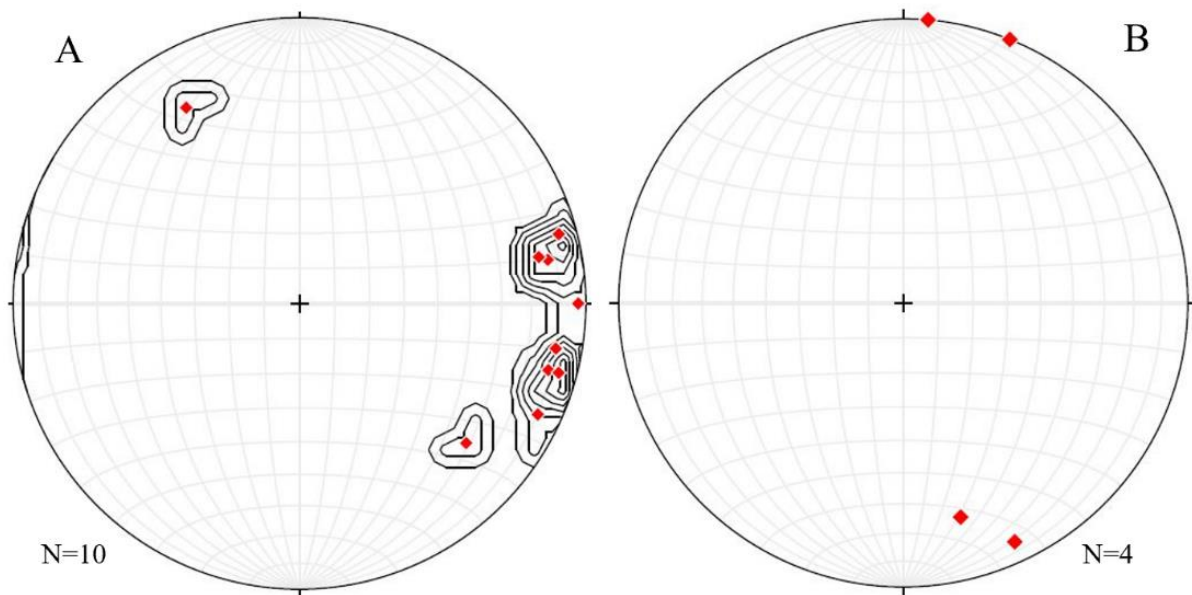


Figure 10. (A)- Equal-area stereonet projection showing fold plunges in the HP-LT blueschist facies rocks. (B)- Equal-area stereonet projection showing fold plunges in the mélangé unit. Red diamonds for fold plunges.

C.5. Faults

Most of the mapped contacts within the study area are tectonic in nature and indicative of a sequence of deformational events. At least four major types of faulting, based on age, cross-cutting relationships, and orientation, are recognized (Figures 4, 11, and 12).

C.5.1. Type 1 Faults

Low-angle fault contacts occur between the mélangé and the HP-LT blueschist facies rocks. This fault type places mélangé onto the blueschist facies rocks and fault planes generally strike east-west and dip to the north. Type-1 faults juxtapose HP-LT rocks in the footwall against the mélangé in the hanging wall (Figure 11). Strong shearing and extremely fine-grained, mylonitized serpentinite are good indicators of type-1 faults. During field mapping, a spectacular outcrop has been recognized by a road cut that provides the ductile fault (type 1) contact between the accretionary complex and the HP-LT rock units (UTM: 4423837N – 674130E). At this location, the fault plane strikes E-W and dips 34°N. Small amounts of silicification (listvenite) occur along the faulted contacts. Knockers of HP marble within the serpentinite are present at this significant outcrop. There is a major jump in the metamorphic grade at this outcrop. Peak metamorphic pressure of 24 kbar for the HP-LT rocks and 7 kbar for the accretionary complex were previously reported by Okay [4]. Based on the 2.7 gr/cm³ average continental crust bulk density, a 46 km thick rock section is missing.

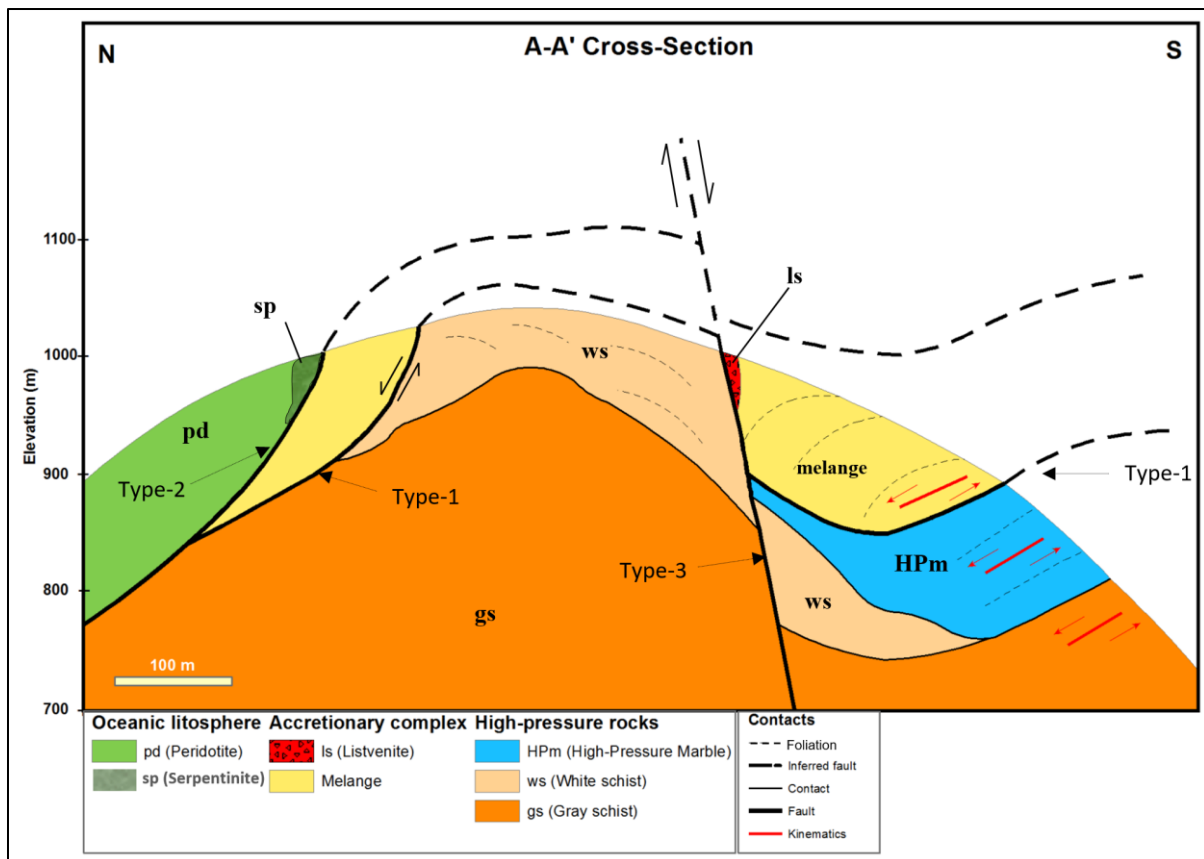


Figure 11. Geologic cross-section A-A' showing the structural relations among the rock units.

C.5.2. Type 2 Faults

Low-angle faults at the base of peridotite sheets. In the klippe of the Burhan peridotite, located approximately one-kilometer northwest of Dağgüney, these faults place peridotite onto the mélangé of the accretionary complex. The larger mass of the Burhan peridotite also overlies the HP-LT blueschist facies rocks (Figure 12). Based upon the structural data, these faults behave as reverse on the northern massive masses and thrust on the smaller masses near Dağgüney village. Strong shearing, serpentinization, and silicification (listvenite) are good indicators of these types of faults.

C.5.3. Type 3 Faults

High-angle, south side down, normal faults (Figures 11 and 12). This fault generally strikes northeast-southwest and dips steeply to the south. The relative motion of the footwall on the north compared to the hanging wall on the south which indicates these are high-angle normal faults with a dip-slip separation of 100 m (Figure 11).

C.5.4. Type 4 Faults

Steeply dipping, northwest-southeast trending strike-slip fault. This fault occurred possibly as a result of the youngest deformation event and juxtaposes peridotite and mélangé against the HP-LT marble in the northeastern portion of the study area. The fault well extends outside the study area. Whether or not the fault crosscuts the Tertiary igneous intrusions is unknown, but it is possible that Tertiary intrusions were emplaced along the trend of the NW striking fault within the study area (Figure 4).

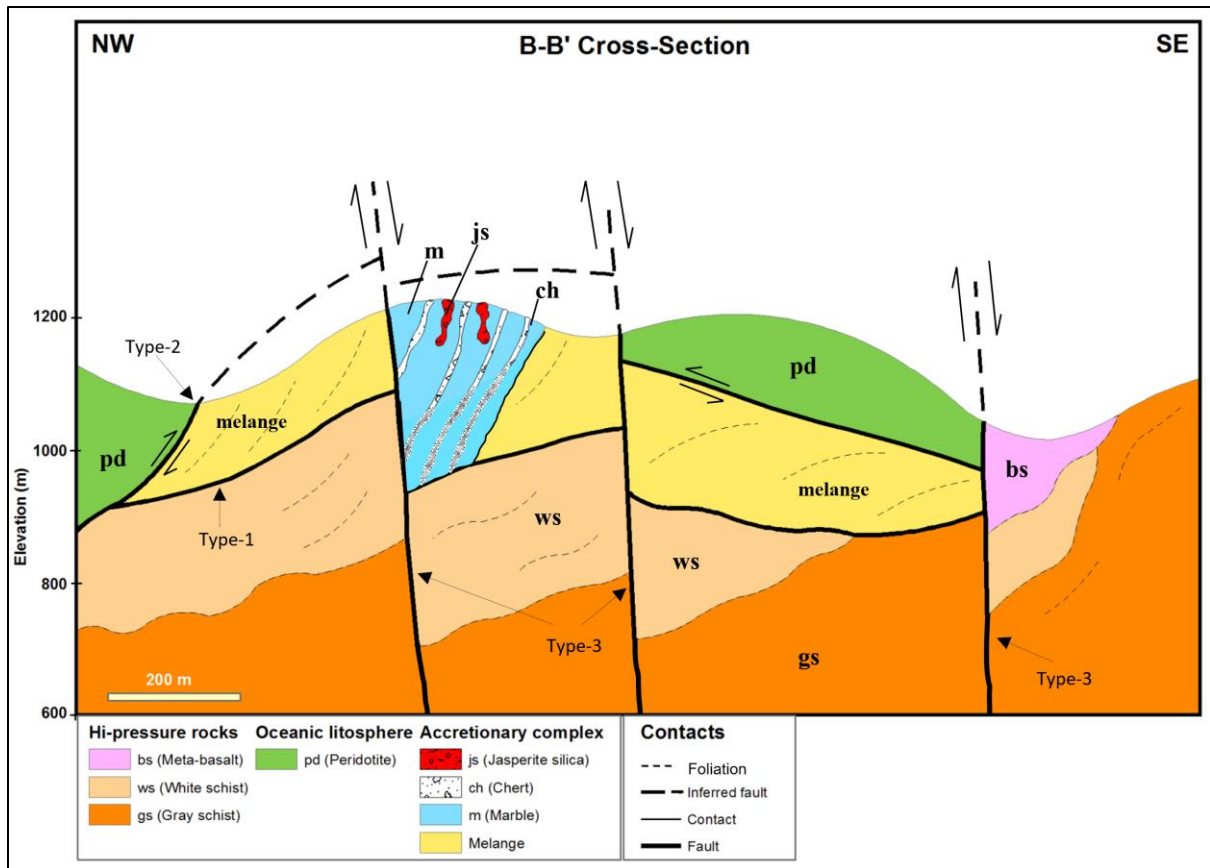


Figure 12. Geologic cross-section B-B' showing the structural relations among the rock units.

V. DISCUSSIONS

Based on the structural data obtained in the field, the structural evolution appears to be as followed (from oldest to youngest): Continental subduction occurred as the Gondwana microcontinent was subducted northward under the Laurasian microcontinent. Gondwanan continental margin rocks (white mica schist, graphitic mica schist, and marble) and oceanic floor rocks (lawsonite blueschist) experienced blueschist facies metamorphism at a depth of 80 km during the Late Cretaceous. Exhumation of the HP-LT rocks, the metamorphic sole, and the mélangé occurred within the same subduction channel. Subsequently, the peridotite slab was obducted over the mélangé and the HP-LT rocks.

The axes of the isoclinal folds are sub-parallel to the mineral lineation. These observations indicate a strong stretching sub-parallel to the present trend of the İzmir-Ankara suture. The shapes of the clasts in the meta-conglomerates of the Orhaneli Group also indicate that the finite strain ellipsoid is of a constructional type (Okay and Whitney, 2010). E-W-trending mineral lineation within the study area is related to N-S-directed compressional fabrics. The accretionary complex and the blueschist facies rocks are characterized by penetrative metamorphic foliation and strong stretching mineral lineation which have been folded. The tectonic contact between the HP-LT blueschist rocks and the overlying accretionary complex represents a major jump in the metamorphic grade. Rocks below the contact have undergone metamorphism at pressures of 24 kbar and those above at pressures of ~7 kbar [5]; this may suggest a 46 km-thick missing section based on the average 2.7 gr/cm³ continental crust bulk density. The mélangé contains a mylonitic serpentine at the base. Such a serpentine mass may have behaved as a lubricant between the mélangé and HP-LT rocks. The mélangé contains low-grade and medium-grade units as well as high-grade blocks which may suggest that it has undergone metamorphism at the same time as blueschist rocks. The mélangé also contains both undeformed and

strongly deformed basalt units. The strongly deformed basalt contains macroscopic faults and talc-filled joints. The mélange shows silicification along the basal contact and secondary mica and quartz veins within the meta-basalt units.

Deformed chert layers are present as interlayers with the low-grade meta-limestone unit within the mélange suggesting that chert formed in the limestone before metamorphism and deformation took place. The chert and meta-limestone unit is interbedded with the phyllite (meta-volcanic tuff) at the base. This indicates that this is a depositional contact and that the limestone protolith formed in the same ocean and at the same time as the volcanic rocks. Jaspereoid silica within the mélange unit adjacent to the meta-limestone is a hydrothermal replacement product of the low-grade meta-limestone. The peridotite does not show any sign of regional metamorphism. Chromite mineralization occurs within peridotite and magnesite veins fill some fractures and faults within the dunite. Serpentinization occurs at the base of peridotite slabs, and it may be due to hydrothermal fluids rising along the fault zones. Listvenite crops out along the high-angle fault zones with or without serpentinite. This indicates that the ultramafic protolith was influenced by hydrothermal fluids. Recognition of an amphibolite unit within the accretionary complex is a discovery for the area and suggests that a metamorphic sole has been exhumed with the accretionary complex. In addition, the presence of blueschist and white mica schist blocks within the accretionary complex suggests that exhumation occurred during subduction. Based on the cross-cutting relationships and type, there are at least four major fault types. The relative ages (youngest to oldest) are as follow:

1. Steeply dipping, NW-trending sinistral strike-slip fault.
2. High-angle, south side down, normal faults.
3. Low-angle faults at the base of peridotite sheets.
4. Low-angle ductile fault contacts between the mélange and the HP-LT blueschist facies rocks.

The presence of amphibolite knockers (metamorphic sole), white mica schist, and lawsonite-mica schist (HP-LT blueschist rocks) within the accretionary complex not only suggests that exhumation occurred during subduction, but also indicates that the metamorphic sole, the accretionary complex, and the HP-LT blueschist facies rocks converged and were exhumed along the same subduction channel. In an exhumation model for the study area proposed by [5], according to this model, a metamorphic sole is interpreted to have formed at the base of the Burhan peridotite slab. Okay's model relies on isobaric cooling of the sole, which is not consistent with the recent data. The sole display a very different metamorphic foliation and degree compared to that of the peridotite, suggesting that the metamorphism of the sole was independent of that of the peridotite.

VI. CONCLUSIONS

The Tavşanlı zone of northwestern Türkiye is a great example of continental crust subducted to a greater depth of 80 km and exhumed to the surface. Blueschist facies mineral assemblages of the HP/LT rocks were well preserved, therefore, the exhumation rate must be rapid enough, that HP/LT blueschist facies rocks would not be overprinted by other facies such as amphibolite and greenschist. HP-LT blueschist rocks have both oceanic and continental protoliths. White mica and graphitic mica schists are continental in origin, whereas lawsonite-blueschist has an oceanic protolith. The mélange of the accretionary complex shows different metamorphic grades including very low-grade to greenschist facies, amphibolites facies, and blueschist facies. The accretionary complex also has both oceanic protoliths (meta-basalts, meta-radiolarian chert) and continental protoliths (low-grade meta-limestone, phyllite). The accretionary complex and the HP-LT blueschist rocks are concordant, they converged and exhumed within the same subduction channel. Peridotites, which contain chromite mineralization, show no sign of regional metamorphism and were later thrust southward, and tectonically overlie the accretionary complex and the HP-LT blueschist facies rocks.

ACKNOWLEDGMENTS: Special thanks go to Dr. Nuri Uzunlar, Dr. Michael P. Terry, and the late Dr. Alvis L. Lisenbee for their help and support.

V. REFERENCES

- [1] A. I. Okay, and D. L. Whitney, "Blueschists, eclogites, ophiolites and suture zones in northwest Turkey: a review and a field excursion guide," *Ofioliti*, vol.35.2, pp. 131-172, 2010.
- [2] A. I. Okay, "Jadeite-chloritoid-glaucophane-lawsonite schists from northwest Turkey: unusually high P/T ratios in continental crust," *Journal of Metamorphic Geology*, vol. 20, pp. 757-768, 2002.
- [3] M. Cetinkaplan, O. Candan, R. Oberhansli, and R. Bousquet, "Pressure temperature evolution of lawsonite eclogite in Sivrihisar; Tavşanlı Zone-Turkey," *Lithos*, vol. 104, pp. 12-32, 2008.
- [4] A. I. Okay, "Tavşanlı Zone: the northern subducted margin of the Anatolide-Tauride Block," *Mineral Research and Exploration Bulletin*, vol. 142, pp. 191-221, 2011.
- [5] A. I. Okay, N. B. W. Harris, and S. P. Kelley, "Exhumation of blueschists along a Tethyan suture in northwest Turkey," *Tectonophysics*, vol. 285, pp. 275-299, 1998.
- [6] S. Sherlock, S. P. Kelley, S. Inger, N. Harris, and A. I. Okay, "40Ar-39Ar and Rb-Sr geochronology of high-pressure metamorphism and exhumation history of the Tavşanlı Zone, NW Turkey," *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. 137, pp. 44-58, 1999.
- [7] N. C. A. Seaton, D. L. Whitney, C. Teyssier, E. Toraman, and M. T. Heizler, "Recrystallization of high-pressure marble (Sivrihisar, Turkey)," *Tectonophysics*, vol. 479, pp. 241-253, 2009.
- [8] N. B. W. Harris, S. P. Kelley, and A. I. Okay, "Post-collision magmatism and tectonics in northwest Turkey," *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. 117, pp. 241-252, 1994.
- [9] A. I. Okay, and O. Tüysüz, "Tethyan sutures of northern Turkey," *Geological Society, London, Special Publications*, vol. 156, pp. 475-515, 1999.
- [10] A. I. Okay, S. Kelley, "Jadeite and chloritoid schists from northwest Turkey: tectonic setting, petrology and geochronology," *Journal of Metamorphic Geology*, vol. 12, pp. 455-466, 1994.
- [11] P. B. Davis, and D. L. Whitney, "Petrogenesis and structural petrology of high-pressure metabasalt pods, Sivrihisar, Turkey," *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. 156, pp. 217-241, 2008.
- [12] G. R. Droop, M. C. Karakaya, Y. Eren, and N. Karakaya, "Metamorphic evolution of blueschists of the Altınekin Complex, Konya area, south-central Turkey," *Geological Journal*, vol. 40, pp. 127-153, 2005.
- [13] S. J. Lippard, A. W. Shelton, and I. G. Gass, "The Ophiolites of Northern Oman," *The Geological Society of London, Memoir*, vol. 11, p. 178, 1986.
- [14] A. E. D. El-Shazly, R. G. Coleman, and J. G. Liou, "Eclogites and blueschists from northeastern Oman: Petrology and P-T evolution," *Journal of Petrology*, vol. 31, pp. 629-666, 1990.

- [15] C. J. Warren, R. A. Parrish, D. J. Waters, and M. P. Searle, "Dating the geologic history of Oman's Semail ophiolite: insights from U-Pb geochronology," *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. 150, pp. 403-422, 2005.
- [16] M. Okrusch, and M. Brocker, "Eclogites associated with high-grade blueschists in the Cyclades archipelago, Greece: A review," *European Journal of Mineralogy*, vol. 2, pp. 451-478, 1990.
- [17] R. B. Forbes, B. W. Evans, and S. P. Thurston, "Regional progressive high-pressure metamorphism, Seward Peninsula, Alaska," *Journal of Metamorphic Geology*, vol. 2, pp. 43-54, 1984.
- [18] A. M. C. Sengor, and Y. Yılmaz, "Tethyan evolution of Turkey: A plate tectonic approach," *Tectonophysics*, vol. 75, pp. 181-241, 1981.
- [19] A. I. Okay, "Alpine-Himalayan blueschists," *Annual Reviews of the Earth and Planetary Sciences*, vol. 17, pp. 55-87, 1989.
- [20] A. I. Okay, "Geology and blueschist metamorphism of ophiolites in northwest Anatolia (Tavşanlı-Kutahya)," *Turkish Geological Society Bulletin*, vol. 24, pp. 85-95, 1981.
- [21] G. Topuz, A. I. Okay, R. Altherr, H. P. Meyer, and L. Nasdala, "Partial high-pressure aragonitization of micritic limestones in an accretionary complex, Tavşanlı Zone, NW Turkey," *Journal of Metamorphic Geology*, vol. 24, pp. 603-613, 2006.
- [22] ArcGIS Desktop 10.0. (2011). Environmental Systems Research Institute, Redlands, CA.
- [23] A. L. Lisenbee, "Structural setting of the Orhaneli ultramafic massif near Bursa, northwestern Turkey," Ph.D. dissertation, Geology Department, Pennsylvania State University, State College, PA, USA, 1972.
- [24] A. I. Okay, "Tectonics and High Pressure Metamorphism in northwest Turkey," presented at the 32nd APAT International Geological Congress, Florence, Italy, Aug. 20-28, 2004.
- [25] A. I. Okay, "Lawsonite zone blueschists and a sodic amphibole producing reaction in the Tavşanlı region, northwest Turkey," *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. 75, pp. 179-186, 1980.
- [26] A. P. Onen, "Neotethyan ophiolitic rocks of the Anatolides of NW Turkey and comparison with Tauride ophiolites," *Journal of the Geological Society of London*, vol. 160, pp. 947-962, 2003.
- [27] O. Kaya, O. Özkoçak, and A. L. Lisenbee, "Stratigraphy of the Pre-Jurassic Blocky Sedimentary Rocks to the South of Bursa, NW Turkey," *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, vol. 109, pp. 15-24, 1989.
- [28] E. Gokten, and M. A. Floyd, "Stratigraphy and geochemistry of pillow basalts within the ophiolitic mélange of the Izmir-Ankara-Erzincan suture zone: implications for the geotectonic character of the northern branch of Neotethys," *International Journal of Earth Sciences* vol. 96, pp. 725-741, 2007.
- [29] A. I. Okay, "Incipient blueschist metamorphism and metasomatism in the Tavşanlı region, Northwest Turkey," *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. 79.4, pp. 361-367, 1982.
- [30] N. Y. Bragin, and U. K. Tekin, "Age of radiolarian-chert blocks from the Senonian ophiolitic mélange (Ankara, Turkey)," *The Island Arc*, vol. 5, pp. 114-122, 1996.

- [31] U. K. Tekin, M. C. Goncuoglu, and N. Turhan, "First evidence of Late Carnian radiolarians from the Izmir-Ankara suture complex, central Sakarya, Turkey: implications for the opening age of the Izmir-Ankara branch of Neo-Tethys," *Geobios*, vol. 35, pp. 127-135, 2002.
- [32] M. C. Goncuoglu, M. K. Yaliniz, and U. K. Tekin, "Geochemistry, tectonomagmatic discrimination and radiolarian ages of basic extrusives within the Izmir-Ankara suture belt (NW Turkey): time constraints for the Neotethyan evolution," *Ofioliti*, vol. 31, pp. 25-38, 2006.
- [33] T. Lovering, "The origin of jasperoid in limestone," *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, vol. 57, pp. 861-889, 1962.
- [34] A. I. Okay, M. Satir, and C. K. Shang, "Ordovician meta granitoid from the Anatolide-Tauride Block, northwest Turkey: geodynamic implications," *Terra Nova*, vol. 20, pp. 280-288, 2008.
- [35] O. Monod, J. Andrieux, Y. Gautier, and J. R. Kienast, "Pontides Taurides relationships in the region of Eskisehir (NW Turkey)," *Bulletin of the Technical University of Istanbul*, vol. 44, pp. 257-277, 1991.
- [36] T. Masuda, S. Nakayama, N. Kimura, K. Onodera, and A. Okamoto, "Triaxial stress state deep in orogenic belts: an example from Turkey," *Journal of Structural Geology*, vol. 26, pp. 2203-2209, 2004.
- [37] Y. Eren, "Tuzgölü havzası güneybatısındaki (Altınekin-Konya) temel kayaçlarının jeolojisi. Haymana-Tuzgolü-Ulukisla Basenleri Uygulamalı Calisma," *Türkiye Petrol Jeologlari Dernegi Ozel Sayısı*, vol. 5, pp. 113-126, 2000.



Düzce University Journal of Science & Technology

Research Article

Dynamical simulation of a four legged robot with shooting at targets using Fuzzy Logic Control

 Ahmet Burak TATAR^{a*},  Beyda TAŞAR^b,  Alper Kadir TANYILDIZI^c,  Oğuz YAKUT^d

^a Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Adıyaman University, Adıyaman, TURKEY

^{b,c,d} Department of Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering, Fırat University, Elazığ, TURKEY

* Corresponding author's e-mail address: atatar@adiyaman.edu.tr

DOI: <https://doi.org/10.29130/dubited.1114836>

ABSTRACT

This research aims to increase defense deterrence by tracking and shooting targets with a gun mounted on a quadruped robot in rough terrain and different environmental conditions. The dynamic movements of the system were modelled as planarly and it was used in walking movement. PID control was used to control the robot leg joints while walking. The performance of the target tracking and firing simulations was evaluated under the disruptive effects due to the walking motion. The elevation angle was calculated in order to track the objects whose coordinates were generated at random. It was observed that the robot tracked the targets at 3°, 6° and 9° with a maximum error of 0.6°. In addition, shootings were made to fixed targets located at 10 different coordinates. The largest shot error value was observed to be 16 cm. As a result, this research will make significant contributions to the defense industry.

Keywords: Fuzzy Control, Turret System, Four-Legged Robot, Barrel Stabilization, Shooting Simulation

Bulanık Mantık Kontrolü kullanarak hedeflere atış yapan dört bacaklı bir robotun dinamik simülasyonu

ÖZ

Bu çalışma, savunmada caydırıcılığı artırmak için engebeli arazi ve farklı çevre koşullarında dört bacaklı bir robot üzerine monte edilmiş silah ile hedefleri takip etmeyi ve vurmaya amaçlamaktadır. Sistemin dinamik hareketleri düzlemsel olarak modellenmiş ve yürüme hareketinde kullanılmıştır. Yürürken robot bacak eklemlerini kontrol etmek için PID kontrolü kullanılmıştır. Yürüme hareketi nedeniyle, bozucu etkiler altında hedef takip ve atış simülasyonlarının başarısı incelenmiştir. Koordinatları rastgele belirlenen hedeflerin takibi için namlu yükseklik açısı hesaplanmıştır. Robotun hedefleri maksimum 0,6° hata ile 3°, 6° ve 9°'de takip ettiği gözlemlenmiştir. Ayrıca 10 farklı koordinatta bulunan sabit hedeflere atışlar yapılmıştır. Maksimum atış hatası değerinin 16 cm olduğu görülmüştür. Dolayısıyla bu çalışma savunma sanayisine önemli katkılar sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Bulanık Kontrol, Taret Sistemi, Dört Bacaklı Robot, Namlu Stabilizasyonu, Atış Simülasyonu

I. INTRODUCTION

In recent years, robotic systems have emerged in all technological areas which mankind benefit from. Robotic systems and products are also widely used in the defense industry [1,2]. Especially multi-legged robots are preferred for their performance in rough terrain conditions. Multi-legged robots offer extra mobility compared to wheeled and other types of robots on uneven floors using foot soles used for each leg [3,4]. Compared to tracked and wheeled robots, legged robots perform better on rough terrain. [5]. In studies on legged robots, mostly four-legged robot studies [6-8] are encountered. Because, the speed-balance coordination of four-legged robots is more successful than robots with 6 or more legs. Quadruped robots have important advantages while walking on rough surfaces [9].

Usage of technological weapon systems in the defense field is increasing day by day. As gun systems gain the ability to work outside of human control depending on the advancement of technology, the importance attached to automatic gun systems increases day by day under the law [10]. Gun target assignment is a problem that aims to increase the hit rate. It is an important expectation that the gun system can make a successful hit under disruptive effects [11]. Successful hits from moving vehicles can be achieved by barrel stabilization. The design and implementation of an active stabilization system for gun systems can also reduce the physiological effects stemming from soldiers' war stress [12]. Studies on barrel stabilization [13,14], fire control systems [15,16], target tracking [17,18] can be found in the literature. Studies have been carried out in this area by using different control methods for weapon stabilization [19-21].

Many studies about robotics, were controlled by a fuzzy logic method in recent years. In the literature, there are many studies in which the fuzzy logic method for motion and trajectory control of mobile and anthropoid robots, air and land autonomous robots and manipulators are used [22-32]. The idea of fuzzy logic was discovered and suggested by L. A. Zadeh at the University of California, Berkeley in 1962 [33]. This discovery was considered valid when E. H. Mamdani at the University of London realized control applications with fuzzy logic [34]. In addition, studies on target tracking with fuzzy logic controller [35-37] have been done. There are also studies [38,39] in which walking motion using PID control method in quadruped robots.

In this study, a uniaxial gun system was located on a quadruped robot's body. To determine the dynamic behavior of the robot, the system was planarly modeled and simulated. Joints are controlled by PID method for balanced walking motion of the robot.

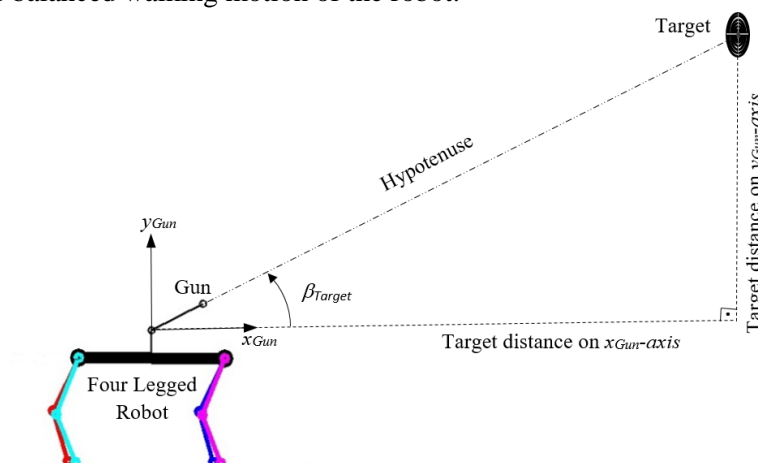


Figure 1. Shooting simulations of the four-legged robot towards the fixed target

To ensure that the gun follows the target accurately and fires toward fixed objects while the robot was moving, gun barrel stabilization was created. Due to the movement of the robot, the robot body causes

disruptive effects on the barrel system during the shooting at the fixed target. To keep the barrel in the reference coordinates against these disruptive effects, the Fuzzy Logic control method is used. An image of the shot made towards fixed targets is given in Figure 1. In the simulations, mathematical equations expressing the planar dynamic behavior of the projectile were used.

β_{target} calculation is made by using the hypotenuse value of the right triangle in the Pythagorean theorem, depending on the position error of the gun barrel in the horizontal and vertical axes with respect to the target. In the simulation, the robot's position relative to the fixed target constantly changes as the robot is walking. Therefore, since the barrel reference angle β_{target} will constantly change, this angle value needs to be updated for each position.

The study's entire content is explained in detail in the chapters denoted by their titles. The first chapter provides a theoretical overview of the significance of legged robots, automatic weapon control, four-legged robots, target identification and fire control systems, the necessity of barrel stability for successful shooting, and upcoming robot technologies. The kinematic study of the robot system was performed in the second chapter. Planar modeling was used in the third chapter to produce the system's dynamic behavior. The dynamic expressions of the system were then computed. The fourth chapter provides details on the PID control system used and the robot's "trot" walking simulation. Graphs of position and velocity were obtained as a result of the simulation. The control strategy based on fuzzy logic that was utilized to stabilize the barrel and effectively track the target is described in the following chapter. To offer barrel orientation to three different reference positions, control applications were simulated. This chapter contains the graphic results of the simulation of the system subjected to disruptive effects. In the sixth chapter, shooting simulations were created with many fixed targets that were distributed at random. These hits produced results that were shown in a table. The success rates of hits under particular physical conditions were looked at in the previous chapter. On the system, the impacts of the fuzzy logic control mechanism are discussed.

II. FORWARD AND INVERSE KINEMATIC ANALYSIS

Kinematic analysis in robotic systems is divided into two as forward and inverse kinematics. Forward kinematic is the determination of the end-effector configuration (position and orientation) of the robot for a given joint angle. Also, finding the necessary angles for the robot end-effector with a given position and orientation is known as inverse kinematics [40].

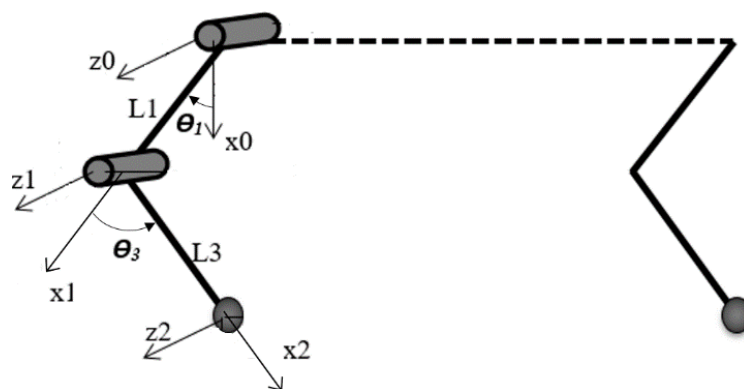


Figure 2. Axial placement of the robot's one leg

Denavit-Hartenberg method [41] was used to perform forward kinematic analysis. The D-H table created using this method was presented in Table 1. In addition, the axis set distribution of the single leg of the planar robot's single leg was given in Figure 2.

Table 1. D-H Table

Link	θ	d	α	a
1	θ_1	0	0	l_1
2	θ_3	0	0	l_3

The transformation matrices of the joints (A_i) are calculated by the obtained D-H table. The transformation matrix of the shoulder joint's end-effector on the robot leg was obtained as in (1) and (2). As a result, forward kinematic expressions were found with the expression in (3).

$${}^2_0T = A_1 A_2 \quad (1)$$

$${}^2_0T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_3) & -\sin(\theta_1 + \theta_3) & 0 & l_1 \cos \theta_1 + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_3) \\ \sin(\theta_1 + \theta_3) & \cos(\theta_1 + \theta_3) & 0 & l_1 \sin \theta_1 + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{p}_x = l_1 \cos \theta_1 + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_3), \mathbf{p}_y = l_1 \sin \theta_1 + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_3), \mathbf{p}_z = 0 \quad (3)$$

The inverse kinematic expressions of the robot's one leg were also given by using the forward kinematic equations obtained in (4) and (5).

$$\cos \theta_3 = \sqrt{\frac{p_x^2 + p_y^2 - l_1^2 - l_3^2}{2l_1 l_3}}, \sin \theta_3 = \pm \sqrt{1 - \cos^2 \theta_3}, \theta_3 = \arctan\left(\frac{\sin \theta_3}{\cos \theta_3}\right) \quad (4)$$

$$\cos \theta_1 = \frac{p_x l_3 \cos \theta_3 + p_y l_3 \sin \theta_3}{p_x^2 + p_y^2}, \sin \theta_1 = \pm \sqrt{1 - \cos^2 \theta_1}, \theta_1 = \arctan\left(\frac{\sin \theta_1}{\cos \theta_1}\right) \quad (5)$$

III. DYNAMIC ANALYSIS

The motion equations of the system were obtained to determine the dynamic behavior of a four-legged robot modeled as planarly. Robot's physical model was shown in Figure 3. When creating the physical model, it is assumed that all the joints of the robot have circular motion. The robot has four legs each with two degrees of freedom (2DOF). In addition, the robot body has a total of 3 degrees of freedom: a circular motion relative to the ground, a translational movement on the vertical axis and a translational movement on the horizontal axis. Finally, the gun system placed on the robot also has a single rotating joint. Thus, the system has 12 DOF totally. The parameter, expressed as "a" on the physical model, refers to the distance of the barrel system placed on the robot to body's center. Also, "b" is the barrel length and α represents the amount of angular rotation of the robot body relative to the ground. Using the physical model given in Fig. 1, the dynamic expressions were obtained according to the Lagrange-Euler method.

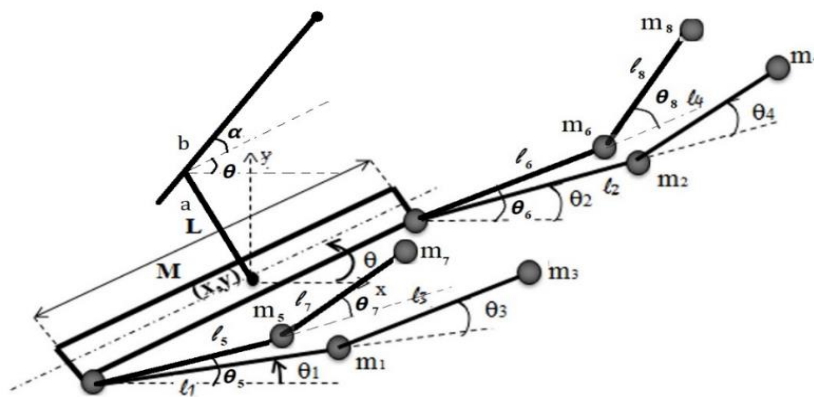


Figure 3. Quadruped robot's physical model

Schilling [42] argues that the use of the Lagrange-Euler method would be more efficient in achieving the result when creating a dynamic model of any robot mechanism. It is obtained by taking the difference of kinetic(T) and potential(V) energy in (6).

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial}{\partial \dot{q}_i} L(q, \dot{q}_i) - \frac{\partial}{\partial q_i} L(q, \dot{q}_i) = \tau_i \quad 1 \leq i \leq n \quad (6)$$

Here, n represents the DOF number, q_i is the position of the moving components (legs or gun) in the system, i is the component index.

$$L = T - V \quad (7)$$

$$T = \frac{1}{2}M(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2}I\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}m_1(\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) + \frac{1}{2}m_2(\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) + \frac{1}{2}m_3(\dot{x}_3^2 + \dot{y}_3^2) + \frac{1}{2}m_4(\dot{x}_4^2 + \dot{y}_4^2) + \frac{1}{2}m_5(\dot{x}_5^2 + \dot{y}_5^2) + \frac{1}{2}m_6(\dot{x}_6^2 + \dot{y}_6^2) + \frac{1}{2}m_7(\dot{x}_7^2 + \dot{y}_7^2) + \frac{1}{2}m_8(\dot{x}_8^2 + \dot{y}_8^2) + \frac{1}{2}m_n(\dot{x}_n^2 + \dot{y}_n^2) \quad (8)$$

$$V = Mgy + m_1gy_1 + m_2gy_2 + m_3gy_3 + m_4gy_4 + m_5gy_5 + m_6gy_6 + m_7gy_7 + m_8gy_8 + m_ngy_n \quad (9)$$

System's Lagrange expression was found with (7), where the total kinetic energy of the system was found with (8) and the total potential energy of the system was found with (9). The explanations of the physical parameters in the equations were given in Nomenclature.

In order to obtain the kinetic and potential energy expressions, the position equations of the robot body and legs must be determined as in Appendix-1. Velocity equations were calculated as a result of time-based derivatives of position expressions of all joints. The Lagrange equation was derived from velocity expressions as in Appendix-2. When the Lagrange equation was adapted according to (6), the dynamic motion equations will be found to calculate the appropriate torque values required by all joints on the system. The mathematical expressions of the dynamic motion equations were also included in Appendix-3. The Jacobian matrix form generated in (10) should be used to transmit the reaction force of the ground to the robot body during the movement of the robot and to determine the effects of this force.

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_i}{\partial x} & \frac{\partial x_i}{\partial y} & \frac{\partial x_i}{\partial \theta} & \frac{\partial x_i}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x_i}{\partial \theta_2} & \frac{\partial x_i}{\partial \theta_3} & \frac{\partial x_i}{\partial \theta_4} & \frac{\partial x_i}{\partial \theta_5} & \frac{\partial x_i}{\partial \theta_6} & \frac{\partial x_i}{\partial \theta_7} & \frac{\partial x_i}{\partial \theta_8} \\ \frac{\partial y_i}{\partial x} & \frac{\partial y_i}{\partial y} & \frac{\partial y_i}{\partial \theta} & \frac{\partial y_i}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y_i}{\partial \theta_2} & \frac{\partial y_i}{\partial \theta_3} & \frac{\partial y_i}{\partial \theta_4} & \frac{\partial y_i}{\partial \theta_5} & \frac{\partial y_i}{\partial \theta_6} & \frac{\partial y_i}{\partial \theta_7} & \frac{\partial y_i}{\partial \theta_8} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_n}{\partial x} & \frac{\partial x_n}{\partial y} & \frac{\partial x_n}{\partial \theta} & \frac{\partial x_n}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x_n}{\partial \theta_2} & \frac{\partial x_n}{\partial \theta_3} & \frac{\partial x_n}{\partial \theta_4} & \frac{\partial x_n}{\partial \theta_5} & \frac{\partial x_n}{\partial \theta_6} & \frac{\partial x_n}{\partial \theta_7} & \frac{\partial x_n}{\partial \theta_8} & \frac{\partial x_n}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial y_n}{\partial x} & \frac{\partial y_n}{\partial y} & \frac{\partial y_n}{\partial \theta} & \frac{\partial y_n}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y_n}{\partial \theta_2} & \frac{\partial y_n}{\partial \theta_3} & \frac{\partial y_n}{\partial \theta_4} & \frac{\partial y_n}{\partial \theta_5} & \frac{\partial y_n}{\partial \theta_6} & \frac{\partial y_n}{\partial \theta_7} & \frac{\partial y_n}{\partial \theta_8} & \frac{\partial y_n}{\partial \alpha} \end{bmatrix} \quad (11)$$

When the appropriate parameters were adapted to this Jacobian matrix form, the expressions showing the effect of the movements on the horizontal and vertical axes to the body and legs were shown in Appendix-4. The Jacobian matrix form, which calculates the effect of movements of the gun barrel with a single degree of freedom on the body was given in (11), and the gun barrel Jacobian was also given in Appendix 5. The numerical values of the four-legged robot's physical parameters with the gun barrel system were given in Table 2.

Table 2. Physical Parameters of the Robot

Parameter	Value	Parameter	Value
M	12 kg	m_1, m_2, m_5, m_6	1.5 kg
l_g	0.8 m	m_3, m_4, m_7, m_8	0.5 kg
l_1, l_2, l_5, l_6	0.24 m	a	0.1 m
l_3, l_4, l_7, l_8	0.2 m	b	0.3 m
m_n	0.6 kg		

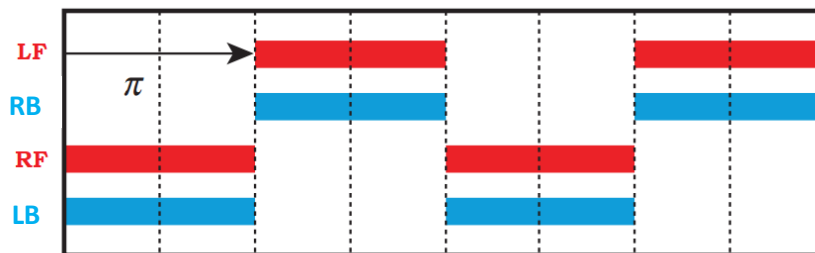
IV. WALKING PATTERN AND SIMULATION WITH PID CONTROL OF FOUR-LEGGED ROBOT

The traditional PID controller for automated systems is widely used in industry. This is because the PID controllers are easy to understand and implement [43]. In PID method, the control signal is obtained as in (12) according to the proportional (P), integral (I) and derivative (D) coefficients.

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{d e(t)}{d t} + K_i \int_0^t e(t) d t \quad (12)$$

K_p in equation (12) refers to the proportional coefficient, K_d refers to the derivative coefficient and K_i is the integral coefficient. The integral term gives a control output that is proportional to the time integral of the error. This ensures that the permanent status error is zero [44]. The controller's P, I and D coefficients were chosen as $K_p=500$, $K_d=50$, $K_i=0.1$ by trial-and-error technique.

Trajectory planning of the robot is done by determining the angular reference positions that the robot's legs need to track. PID controller was applied to the system to bring these joints into reference angles. Four-legged robots have four different types of gaits, such as "walking, pacing, trotting, galloping". The most commonly used mode of movement is the "trotting" gait. Because with this gait, the movement of the robot can be achieved at any desired velocity in a limited range [45]. The trot gait pattern shown in Fig. 4. was used for simulations [46]. Due to difficulty in walking control, many four-legged robot studies were performed using a "trot" gait, in which a front leg and a rear leg move in pairs [47]. The motion of this gait pattern has a disruptive effect on the barrel stabilization.



LF: Left Forward Leg, **RF:** Right Forward Leg, **LB:** Left Back Leg, **RB:** Right Back Leg

Figure 4. Trot gait pattern of quadruped robots

Figure 5 shows that the robot's foot follows a sinusoidal path in the horizontal and vertical axis while one leg steps during the trot walk. The leg has two phases, in the air (flight) and the ground (stance). The robot is in the stance phase when it is in touch with the ground. When contact with the ground is lost, the flight phase begins.

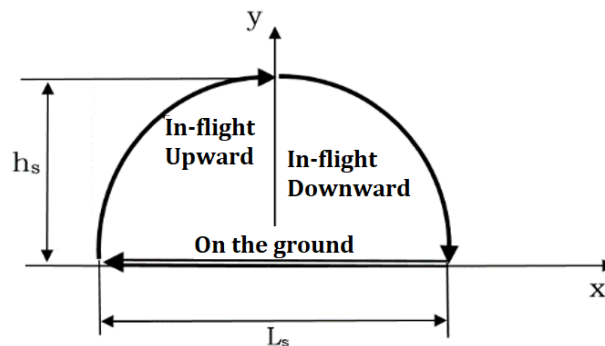


Figure 5. Robot leg's one step trajectory

The sinus function that calculates the trajectory that the robot leg should follow in flight phase was given in (13). h_{step} is leg's height from the ground. The ω is the step movement's frequency. L_s

indicates the amount of translation of the leg at x-direction in one step. If the walking time for a period is shown in T_G , the V_r translation velocity can be calculated as shown in (14).

$$h_s = h_{step} \sin(2\pi\omega t) \quad (13)$$

$$V_r = \frac{L_s}{T_G} \quad (14)$$

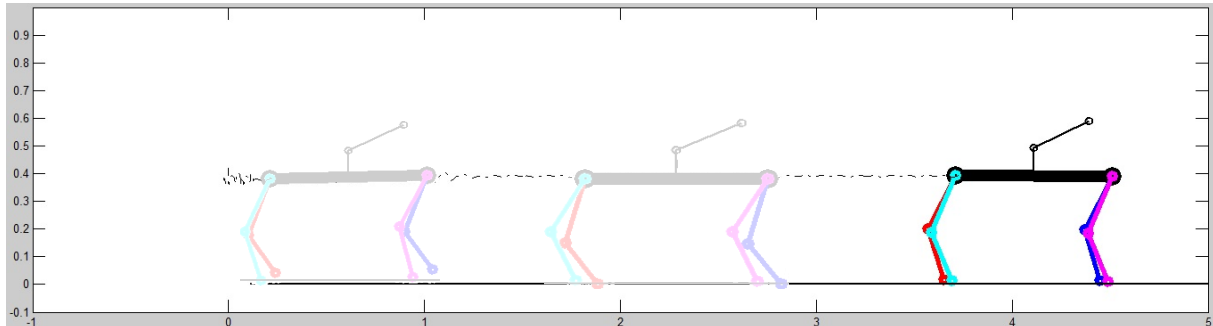


Figure 6. *Four legged robot's trot gait simulation*

Quadruped robot's trot gait was simulated. As shown in the simulation image in Fig. 6., the robot appears to have advanced about 4 meters. The walking motion is a 7-second simulation and results were given graphically in Fig. 7. According to the graphs, in the first moments of the walking, body center's up-and-down oscillation amplitude on the vertical axis is observed to be around 0.05 m. Similarly, the body's angular swing was around 2° - 3° . These amplitudes have decreased considerably as of the third second of the simulation. In addition, the robot continues to move horizontally with 1 m / s velocity.

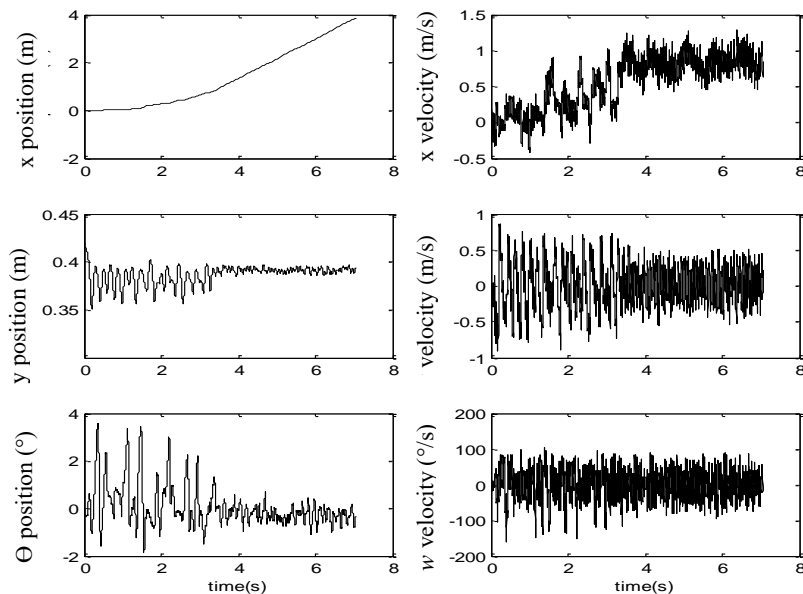


Figure 7. *Quadruped robot's position and velocity graphs*

V. APPLICATION OF THE GUN BARREL STABILIZATION FOR A QUADRUPED ROBOT DURING WALKING WITH FUZZY LOGIC CONTROL METHOD

The main point on which fuzzy logic controllers are based is the incorporation of an expert system operator's knowledge, experience, intuition, and control strategy as a knowledge base in the controller's design. Verbal rules based on knowledge and experience are used to carry out control

procedures. For example, if an expert identifies the control behaviors necessary for the system in verbal terms such as "small", "fast", and "slow", the rules to be created with "IF-THEN" commands will be obtained by using verbal terms [48].

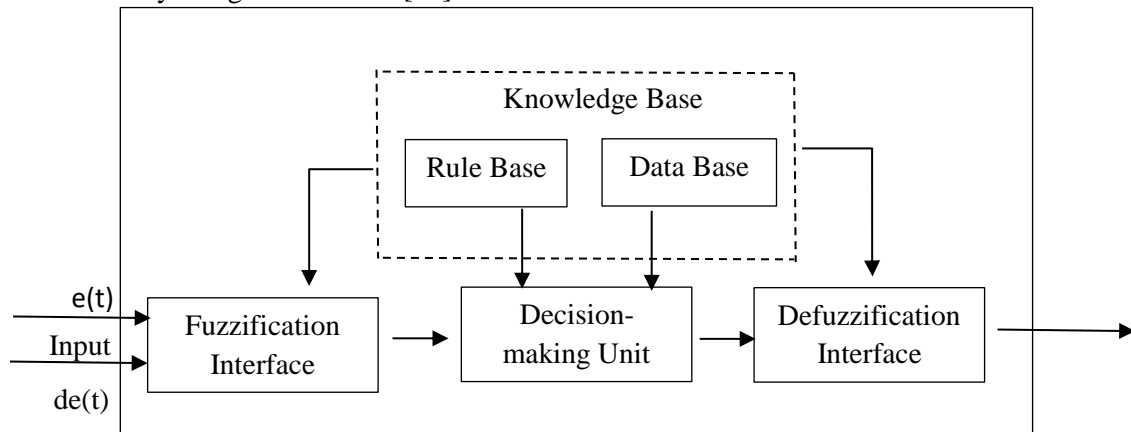


Figure 8. The basic structure of a fuzzy logic control system

Basic structure of the Fuzzy Logic control system is given in Fig. 8. [49]. Fuzzy Control System consists of four basic units. The concept of fuzzy logic functions like the human sense and inference mechanism. Fuzzy logic, unlike other classical control methods, performs the inspection by taking the intermediate values between two values into account. The output of the fuzzy controller consists of blurring input and output values using the associated membership functions. The input value has a different meaning through the associated membership function.

Fuzzy logic control method was used for gun barrel stabilization. The control signal was calculated at the output by considering the error and the derivative-error at the fuzzy logic control input. Triangular membership functions were used in the fuzzy logic control structure. The boundary values of the membership functions were determined by trial and error techniques. The rule table for input and output was shown in Table 3.

Table 3. Rule table for membership functions

		Derivative of the Error (d_e/d_t)		
		dNe	dZe	dPe
Error (e)	Ne	Nu	Zu	Nu
	Ze	Nu	Zu	Pu
	Pe	Pu	Zu	Pu

The membership functions specified for the error input are given in Fig. 9. Definitions of the expressions in Table 3 are given below;

Ne: Negative Error, **dNe:** Derivative Negative Error

Ze: Zero Error, **dZe:** Derivative Zero Error

Pe: Positive Error, **dPe:** Derivative Positive Error

Nu: Negative Control Output

Zu: Zero Control Output

Pu: Positive Control Output

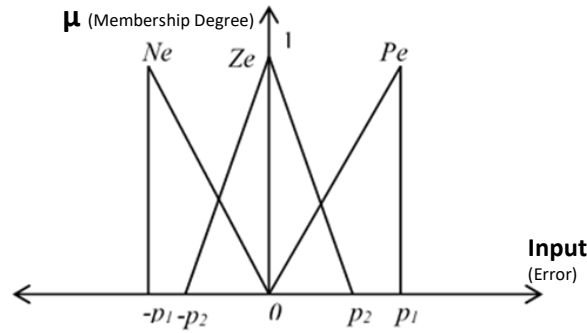


Figure 9. Membership functions for error input (e)

The determined membership functions of the input which is the derivative of the error are given in Fig. 10. The membership functions of the control output are given in Fig. 11.

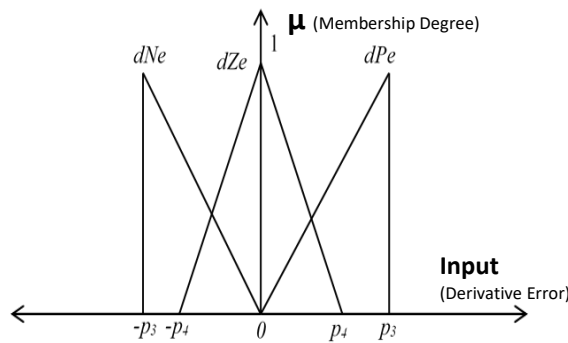


Figure 10. Membership functions for derivative error input (d_e/d_t)

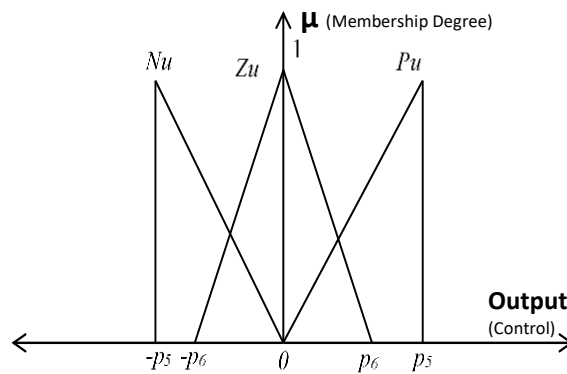


Figure 11. Membership functions for control output (u)

The limit values of the membership functions in the fuzzy logic control structure were determined as the numerical values shown in Table 4. by trial and error technique.

Table 4. Limit values for membership functions

p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6
10	1	100	10	50	10

Shooting simulations were performed at three different reference target angles 3° , 6° , and 9° during the walking movement. These target angles were randomly determined considering the difficulty of tracking targets at very narrow angles. It has been shown that by choosing small values as in the

reference angles, the robot tracks the target more precisely under the disruptive effects and makes successful hits on the target. Controls were made for three different target angles during walking. The initial barrel angle is accepted as zero in simulations. As mentioned earlier, the barrel reference angle is equal to the sum of the relative angle of the barrel and the relative angle of the ($\beta_{target}=\alpha+\theta$).

Target-1;

The system responses of the simulation trying to keep the β_{target} angle at 3° relative to the ground are presented in Figure 12. Gun barrel's angular position relative to the body α is oscillating in relation to body motions. The controller followed the target by instantly calculating the β_{target} reference angle with very small errors and oscillations. This error was found to be 0.57° maximum.

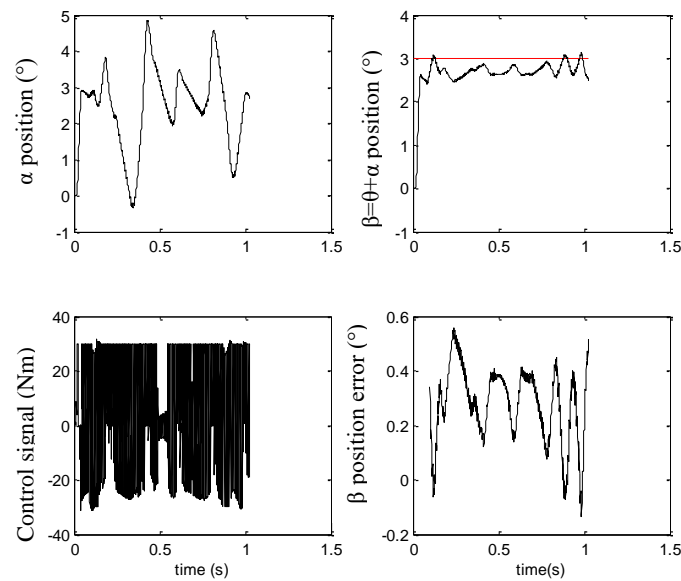


Figure 12. System responses for $\beta_{target}=3^\circ$ in simulation

Target-2;

The system responses of the simulation performed while trying to keep the β_{target} angle at 6° relative to the ground, were presented graphically in Fig. 13. The angular position error value is about 0.62° .

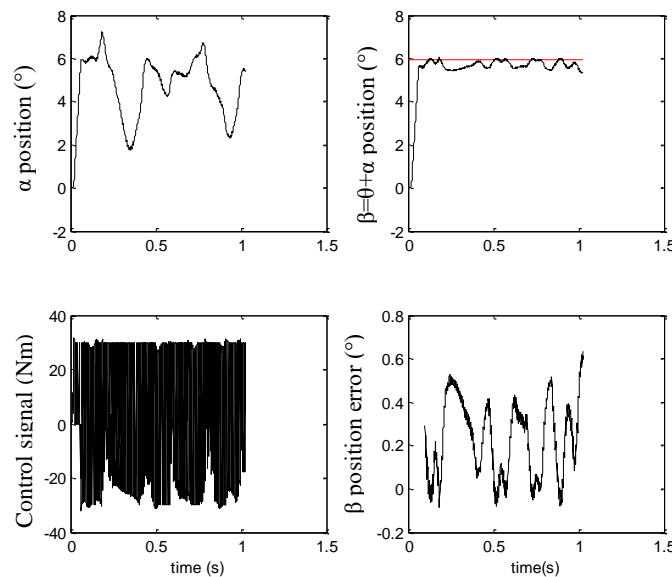


Figure 13. System responses for $\beta_{target}=6^\circ$

Target-3;

The system responses of the simulation performed while trying to keep the β_{target} angle at 9° relative to the ground, are showed in Fig. 14. The angular error size around the reference position is no more than 0.6° . Shooting was made at $t = 1s$ of the simulations. Therefore, the graphics show the part where the gun tracks the target until the shooting was made. It is evident from the presented graphs that the Fuzzy Logic controller used in the simulations can hold the barrel around the reference position very successfully.

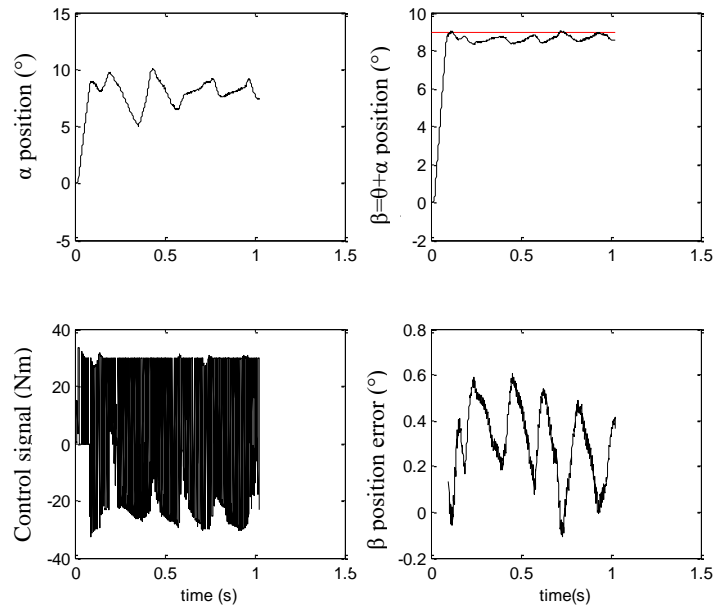


Figure 14. System responses for $\beta_{target} = 9^\circ$

VI. SHOOTING SIMULATIONS

The success of shooting simulations to fixed targets with random coordinates was evaluated. Hits were made with disruptive effects while the robot was walking. In simulations, the dynamic equations of the bullet used to hit the target were also taken into account. Figure 15 is the block diagram expressing the control loop of the system.

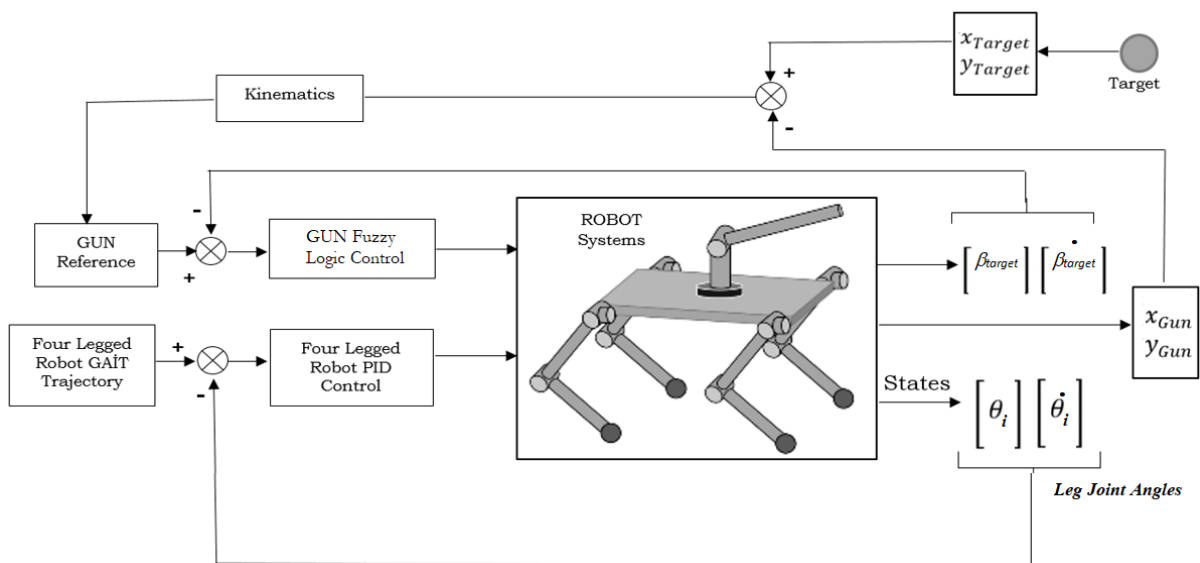


Figure 15. Control loop diagram of the system

In the dynamics of the projectile, environmental conditions, penetration pressure at the moment of impact and projectile's physical parameters were used. Related to this, the graph in Figure 16 taken from study [50] shows the change in bore pressure and velocity of the projectile depending on the length of the barrel. Bullet ballistic curves in the barrel were used.

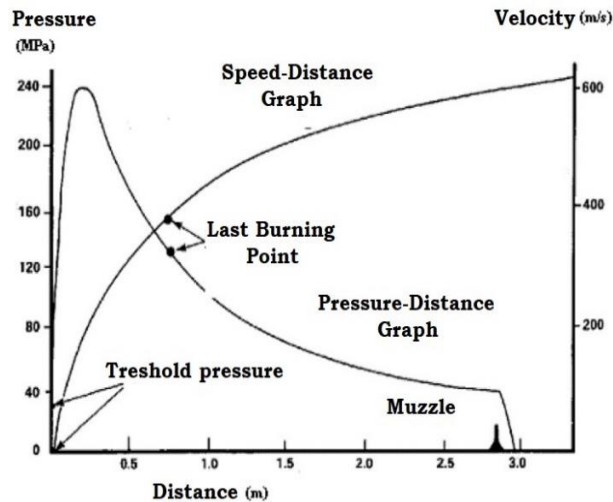


Figure 16. Features in gun barrel

Looking at the Fig. 16, the pressure steadily rises to the maximum. Depending on the barrel length, the pressure value starts to decrease again till the bullet leaves the barrel. The time it takes for bullets to exit the barrel is as short as 5-10 milliseconds, depending on the rate of combustion.

Table 5. Projectile features

Technical Characteristics			
<u>Specification</u>	Stanag 4090	<u>Projectile Contact Force</u>	min. 20,4 kgf
		<u>Shell Model Number</u>	9 mmx19 parabellum shell
<u>Cartridge Length</u>	29,69 – 0,3 mm	<u>Projectile Weight</u>	8 ±0,075 g
<u>Cartridge Weigth</u>	~12,15 g	<u>Shell Material</u>	Brass (CuZn30)
<u>Velocity</u>	370 ± 10 m/s (in 16 m)	<u>Capsule</u>	9 mm capsule, boxer
<u>Velocity Standart Deviation</u>	max. 9 m/s		
<u>Average shell mouth pressure</u>	max. 2850 bar		
<u>Distribution</u>	max. 7,6 cm (in 46 m)		

Technical properties of 9 mm parabellum bullet were used. These technical specifications were given in Table 5. [51]. Projectile core other than shell weighs $m_{projectile} = 8$ grams. The physical model was shown in Fig. 17. indicates the dynamic behavior of the projectile during the planar movement.

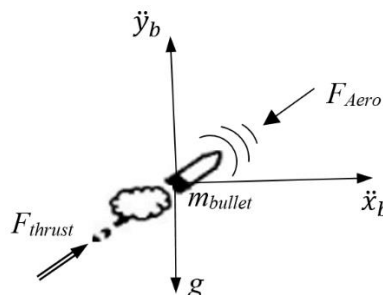


Figure 17. The physical model of the projectile

The projectile core, which is accepted as the point mass, can move linearly along the x-axis and y-axis. The projectile fired from the gun barrel with F_{thrust} force leaves the barrel with V_b velocity. From this moment on, only the gravity and the F_{Aero} frictional force caused by the atmosphere influence the projectile core during its aerial movement. The thrust pressure P_b was calculated as in (15).

The parameters in the model $P=1500$, $\lambda=500$, $\omega_b=50$ are defined numerically. It was presumed that the time t for projectiles leaving the barrel is within the range of (0-10) milliseconds. Since the shooting was made at $t = 1$ s, the thrust force and velocity remained constant from that moment on. F_{thrust} is calculated as in (16). A_b refers to the surface area under pressure.

$$P_b = P e^{-\lambda t} \sin(2\pi\omega_b t) \quad (15)$$

$$F_{thrust} = A_b P_b \quad (16)$$

Planar dynamics analysis of the bullet was carried out according to Newton's laws of motion. x_b is the equations on the horizontal axis and y_b on the vertical axis. Also, g is the acceleration of gravity. The friction force F_{Aero} , which occurs while moving with V_b velocity in the atmosphere, is calculated by (19).

$$\ddot{x}_b = \frac{F_{thrust}^x - F_{Aero}^x}{m_{bullet}} \quad (17)$$

$$\ddot{y}_b = \frac{F_{thrust}^y - F_{Aero}^y - g}{m_{bullet}} \quad (18)$$

$$F_{Aero} = \frac{1}{2} \rho S C_d V_b^2 \quad (19)$$

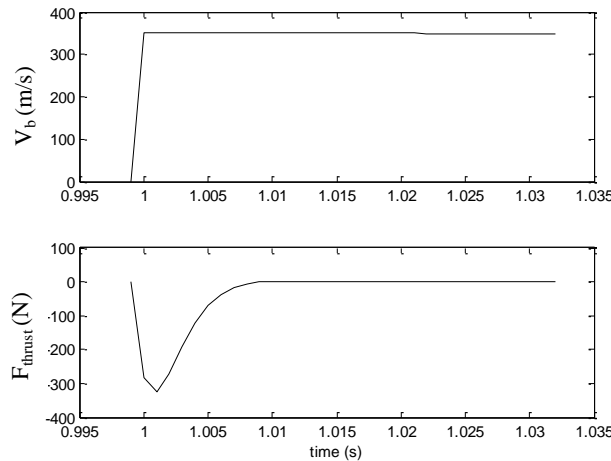


Figure 18. Ballistics of projectile

ρ is the density of air, S is the surface area perpendicular to the bullet's direction of advance. Friction coefficient between the projectile and the air was $C_d=0.12$. The temporal change of F_{thrust} and V_b during shooting simulation is given in Figure 18. The coordinates of the fixed targets were determined randomly, ranging from 5-12 meters horizontally and 0.5-2 meters vertically. During this one-second period, the barrel stabilization, which is necessary to point the gun at the target, is provided by the fuzzy logic control method. β_{target} was calculated instantaneously, considering the robot's variable position during walking. The reference angle can be calculated by the expression (20), depending on the e_x -gun position error in horizontal axis and the e_y in vertical axis.

$$\beta_{target} = \text{atan2} \left(\frac{e_y}{e_x} \right) = \text{atan2} \left(\frac{y_{target} - y_{gun}}{x_{target} - x_{gun}} \right) \quad (20)$$

System was simulated with the Runge-Kutta method. This method is frequently used in numerical solutions of differential equations [52]. Fig. 19. shows the simulation image of a precise hit made by the four-legged robot while walking.

Table 6. Shooting control results of projectile

Target Number	x_{target} (m)	y_{target} (m)	Error (m)
1	14.18	1.27	0.16
2	12.64	0.79	0.07
3	8.93	1.88	0.13
4	12.56	1.94	0.06
5	9.09	1.13	0.05
6	6.63	1.28	0.05
7	7.51	0.66	0.14
8	13.12	1.90	0.10
9	11.22	0.65	0.07
10	9.16	1.50	0.16

According to Table 6 target coordinate and error values for 10 different fixed targets were given in Table 6. The highest product error value is found as 0.16 m in the 1st and 10th throws. The smallest product error value was 0.05 m. Mean value is 0.099 m and the standard deviation is calculated as 0.044 m.

The main purpose of this study is to keep the barrel at the target in the face of disruptive effects. Fuzzy Logic control method has been applied and the success of this controller on target hit has been studied. Looking at Table 6, it is evident that fixed targets are chosen randomly between 5 and 15 meters in the horizontal axis and between 0.5 and 1.5 meters in the vertical axis. In order to see the stabilization success, it was required to shoot at short distance targets in the horizontal direction. Because, if the distance to the horizontal target is increased, the bullet reaches the target with a greater deviation due to gravity.

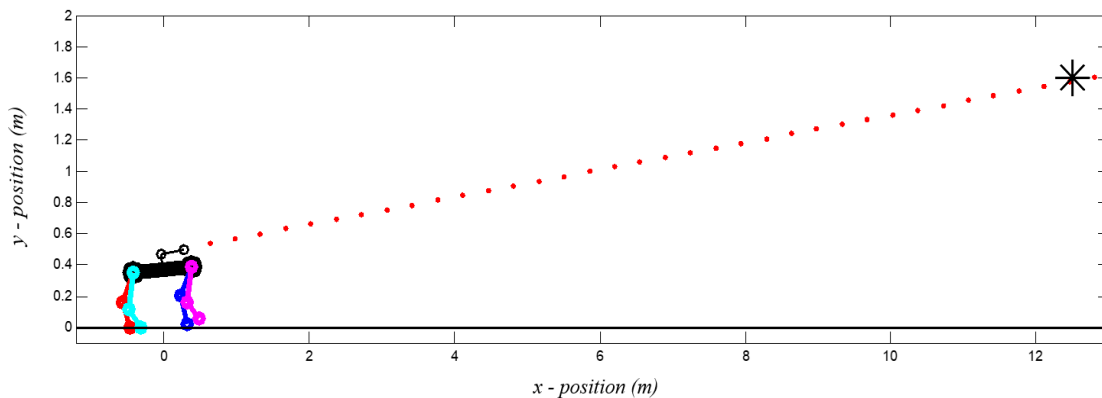


Figure 19. Shooting control simulation of projectile

VII. RESULTS AND RECOMMENDATIONS

In this work, a DOF-equipped gun turret was mounted on a four-legged robot. The main objective is to guide the gun toward the target, track the target, and assure accurate striking while stabilizing the gun barrel while the robot is moving. A planar model of the system was used. Considering that walking and shooting simulations require a planar model. Additionally, it serves as the foundation for experiments. Trot walking patterns were used to simulate movement. The robot body's oscillation during this walking was perceived as having a disruptive effect on the gun turret. The barrel was pointed at the target using a fuzzy logic control mechanism under this disruptive impact. Trial and error technique was used to determine the controller's parameters. According to the results, the maximum product error value in shooting towards fixed targets from a four-legged robot was 0.16 m.

The results can be compared, and strategies to improve the success rate can be devised, by using a variety of control methods with diverse characteristics with the research to be done in this subject.

Nomenclature

M	Robot Body(RB)'s mass	β_{target}	Barrel reference angle
x	RB's position in horizontal axis	m_n	Gun barrel(GB) mass
y	RB's position in vertical axis	w	Step motion's frequency
m_{1-8}	Leg limbs(LL)' masses	L_s	Step length
θ	RB's angular position to floor by vertical axis	F_{thrust}	Projectile force
θ_{1-8}	LL's angular positions	F_{aero}	Frictional force (atmosphere and gravity)
l_g	RB's length	V_b	Projectile velocity
l_{1-8}	LL's lengths	P_b	Repulsion pressure
a	Gun turret length	A_b	Pressure surface area
b	Gun barrel length	C_d	Friction coefficient between projectile and air
x_{1-8}	LL's positions in horizontal axis	x_{target}	Target position on the horizontal axis
y_{1-8}	LL's positions in vertical axis	y_{target}	Target position on the vertical axis
I	Body's moment of inertia	e_x	Horizontal position error
α	Gun barrel's relative angular position to body	e_y	Vertical position error
x_n	Gun barrel(GB) position on the horizontal axis	y_n	Gun barrel(GB) position on the vertical axis

Funding: There isn't any funding source for this research.


Conflict of Interest: Ahmet Burak TATAR, Alper Kadir TANYILDIZI, Beyda TAŞAR and Oğuz YAKUT declare that they have no conflict of interest.

Data Availability Statement: All data used to support the findings of this study are included within the article.

Acknowledgement

This study was produced as part of the doctoral thesis titled "Four-Legged Hunter Robot" carried out under the supervision of Prof. Dr. Oğuz YAKUT in the Department of Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering at Firat University.

ORCID

Ahmet Burak TATAR  <http://orcid.org/0000-0001-5848-443X>
 Alper Kadir TANYILDIZI  <http://orcid.org/0000-0003-3324-5445>
 Beyda TAŞAR  <http://orcid.org/0000-0002-2771-3524>
 Oğuz YAKUT  <http://orcid.org/0000-0002-0986-1435>

VIII. REFERENCES

- [1] S. Zhang, J. Yao, Y. Wang, Z. Liu, Y. Xu, Y. Zhao, "Design and motion analysis of reconfigurable wheel-legged mobile robot", *Defence Technology*, 18, 1023-1040, 2022 doi: 10.1016/j.dt.2021.04.013
- [2] K.L. Foster, M.D. Petty, "Estimating the tactical impact of robot swarms using a semi-automated forces system and design of experiments methods", *The Journal of Defense Modeling and Simulation*, 18(3), 247-269, 2021 doi: 10.1177/15485129211008532

- [3] J.T. Machado, M.F. Silva, “An overview of legged robots”, *International symposium on mathematical methods in Engineering*. Çankaya, Ankara, Turkey, 1-39 (2015).
- [4] J. Liu, M. Tan, X. Zhao, “Legged robots-an overview”, *Trans Inst. Meas. Control*. 29(2), 185-202, 2007 doi: 10.1177/0142331207075610
- [5] X. Ding, H. Chen, “Dynamic modelling and locomotion control for quadruped robots based on center of Inertia on SE(3)”, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 138, 011004/1-8, 2016 doi: 10.1115/1.4031728
- [6] X. Chang, H. Ma, H. An, “Quadruped Robot Control through Model Predictive Control with PD Compensator”, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 19(11), 3776-3784, 2021 doi: 10.1007/s12555-020-0734-9
- [7] Y. Zheng, K. Xu, Y. Tian, H. Deng, X. Ding, “Bionic Design and Analysis of a Novel Quadruped Robot with a Multistage Buffer System”, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 35(32), 2-21, 2022 doi: 10.1186/s10033-022-00700-9
- [8] J. Cui, Z. Li, J. Qiu, T. Li, “Fault-tolerant motion planning and generation of quadruped robots synthesised by posture optimization and whole body control”, *Complex&Intelligent Systems*, 8, 2991-3003, 2022 doi: 10.1007/s40747-022-00652-6
- [9] M.U. Atique, R.I. Sarker, A.R. Ahad, “Development of an 8DOF quadruped robot and implementation of inverse kinematics using Denavit-Hartenberg convention”, *Heliyon* 01053, 1-19, 2018 doi: 10.1016/j.heliyon.2018.e01053
- [10] N. Weizmann, “Autonomous weapon system under international law”, *Academy Briefing*. 8, pp. 3, 2014.
- [11] M.A. Şahin, K. Leblebicioğlu, “Approximating the optimal mapping for weapon target assignment by fuzzy reasoning”, *Information Sciences* 255, 30-44, 2014 doi: 10.1016/j.ins.2013.08.004
- [12] A.P. White, “Control design for an inertially stabilized rifle”, *Master Thesis, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Department of Electrical Engineering, Blacksburg, Virginia*, pp. 1, 2007
- [13] W. Rone, P.B. Tzvi, “Dynamic modeling and simulation of a yaw-angle quadruped maneuvering with a planar robotic tail”, *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control* 138, 084502/1-7, 2016 doi: 10.1115/1.4033103
- [14] Ö. Özüğür, M.K. Leblebicioğlu, “Shooter localization using sensor networks and optimization based fusion process”, *The Journal of Defense Sciences* 15, 207-235, 2016
- [15] J. Shukla, “Dynamic analysis of gun control system of main battle tank”, *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, 28(2), 2022.
- [16] İ.S. Kuseyri, “Stabilization and DOB-Based Disturbance Rejection for MBT Gun-Barrel Elevation Drive”, *Int. J. Adv. Eng. Pure Sci.*, 32(2), 206-211, 2020.
- [17] M.F. Hocaoglu, “Weapon target assignment optimization for land based multi-air defense systems: A goal programming approach”, *Computers & Industrial Engineering* 128, 681-689, 2019 doi: 10.1016/j.cie.2019.01.015
- [18] I.B. Saksvik, A. Alcocer, V. Hassani, A. Pascoal, “Target Tracking of an Underwater Glider Using a Small Unmanned Surface Vessel”, *IFAC PapersOnLine*, 55(31), 478-483, 2022 doi: 10.1016/j.ifacol.2022.10.473
- [19] A.B. Tatar, A.K. Tanyıldızı, O. Yakut, “Four legged hunter (FLH) robot: design and shooting control to moving targets with SMC”, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 104, 102117, 1-15, 2020.
- [20] A.B. Tatar, A.K. Tanyıldızı, O. Yakut, “Shooting control application from a quadruped robot with a weapon system via Sliding-mode Control method”, *Defence Science Journal*, 70(4), 404-411, 2020.
- [21] A.B. Tatar, B. Taşar, O. Yakut, “A shooting control application of four-legged robots with gun turret”, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45, 5191-5206, 2020.
- [22] O. Castillo, H. Neyoy, J. Soria, P. Melin, F. Valdez, “A new approach for dynamic fuzzy logic parameter tuning in Ant Colony Optimization and its application in fuzzy control of a mobile robot”, *Applied Soft Computing* 28, 150–159, 2015 doi: 10.1016/j.asoc.2014.12.002
- [23] F. Abdessemed, M. Faisal, M. Emmadeddine, R. Hedjar, K. Al-Mutib, M. Alsulaiman, H. Mathkour, “A Hierarchical Fuzzy Control Design for Indoor Mobile Robot”, *International*

- Journal of Advanced Robotic Systems* 11(33), 2014 doi: 10.5772/57434
- [24] E. Kayacan, H. Ramon, W. Saeys, “Adaptive Neuro-Fuzzy Control of a Spherical Rolling Robot Using Sliding-Mode-Control-Theory-Based Online Learning Algorithm”, *IEEE Transactions On Cybernetics* 43(1), 2013 doi: 10.1109/TSMCB.2012.2202900
- [25] I. Siradjuddin, L. Behera, T. M. McGinnity, “Image-Based Visual Servoing of a 7-DOF Robot Manipulator Using an Adaptive Distributed Fuzzy PD Controller”, *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics* 19(2), 2014 doi: 10.1109/TMECH.2013.2245337
- [26] Q. Zhou, H. Li, P. Shi, “Decentralized Adaptive Fuzzy Tracking Control for Robot Finger Dynamics”, *IEEE Transactions On Fuzzy Systems* 23(3), 2015 doi: 10.1109/TFUZZ.2014.2315661
- [27] C.F. Juang, Y.H. Chen, Y.H. Jhan, “Wall-Following Control of a Hexapod Robot Using a Data-Driven Fuzzy Controller Learned Through Differential Evolution”, *IEEE Transactions On Industrial Electronics* 62(1), 2015 doi: 10.1109/TIE.2014.2319213
- [28] Z. Li, S. Xiao, S.S. Ge, H. Su, “Constrained Multilegged Robot System Modeling and Fuzzy Control With Uncertain Kinematics and Dynamics Incorporating Foot Force Optimization”, *IEEE Transactions On Systems, Man, And Cybernetics: Systems* 46(1), 2016 doi: 10.1109/TSMC.2015.2422267
- [29] H. Li, C. Wu, S. Yin, H.K. Lam, “Observer-Based Fuzzy Control for Nonlinear Networked Systems Under Unmeasurable Premise Variables”, *IEEE Transactions On Fuzzy Systems* 24(5), 2016 doi: 10.1109/TFUZZ.2015.2505331
- [30] Y. Takahashi, T. Ishii, C. Todoroki, Y.I. Maeda, T. Nakamura, “Fuzzy Control for a Kite-Based Tethered Flying Robot”, *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics* 19(3), 2015 doi: 10.1109/FUZZ-IEEE.2014.6891839
- [31] M.A. Sanchez, O. Castillo, J. R. Castro, “Generalized Type-2 Fuzzy Systems for controlling a mobile robot and a performance comparison with Interval Type-2 and Type-1 Fuzzy Systems”, *Expert Systems with Applications* 42, 5904–5914, 2015 doi: 10.1016/j.eswa.2015.03.024
- [32] P. Melin, L. Astudillo, O. Castillo, F. Valdez, M. Garcia, “Optimal design of type2 and type-1 fuzzy tracking controllers for autonomous mobile robots under perturbed torques using a new chemical optimization paradigm”, *Expert Systems with Applications* 40, 3185–3195, 2013 doi: 10.1016/j.eswa.2012.12.032
- [33] L. A. Zadeh, “Fuzzy Sets”, *Information and Control* 8, 338-353, 1965
- [34] E.H. Mamdani, S. Assilian, “An Experiment in Linguistic Synthesis With a Fuzzy Logic Controller”, *International Journal of Man-Machine Studies* 7, 1-13, 1974 doi: doi.org/10.1006/ijhc.1973.0303
- [35] I. Harmati, K. Skrzypczyk, “Robot team coordination for target tracking using fuzzy logic controller in game theoretic framework”, *Robotics and Autonomous System* 57, 75-86, 2009 doi: 10.1016/j.robot.2008.02.004
- [36] R.C. Luo, T.M. Chen, “Target tracking by grey prediction theory and look-ahead fuzzy logic control”, *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Detroit, Michigan*, 1176-1181, 1999 doi: 10.1109/ROBOT.1999.772521
- [37] S. McGinnity, G.W. Irwin, “Fuzzy logic approach to manoeuvring target tracking”, *IEEE Proceedings- Radar, Sonar and Navigation* 145(6), 337-341, 1998 doi: 10.1049/ip-rsn:19982427
- [38] A. Latif, K. Shankar, P.T. Nguyen, “Legged fire fighter robot movement using PID”, *Journal of Robotics and Control* 1(1), 15-18, 2020 doi: 10.18196/jrc.1104
- [39] C. Semini, N.G. Tsagarakis, B. Vanderborcht, Y. Yang, D.G. Caldwell, “HyQ- Hydraulically Actuated Quadruped Robot: Hopping Leg Prototype”, *Proceedings of the 2nd Biennial IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, Scottsdale, USA*, 19-22, 2008 doi: 10.1109/BIOROB.2008.4762913
- [40] A. Patwardhan, A. Prakash, R.G. Chittawadigi, “Kinematic analysis and development of simulation software for nex dexter robotic manipulator”, *Procedia Computer Science* 133, 660-667, 2018 doi: 10.1016/j.procs.2018.07.101
- [41] J. Denavit, R.S. Hartenberg, “A kinematic notation for Lower-pair mechanisms based on matrices”, *ASME Jappl. Mechan.*, 215-221, 1955

- [42] J.R. Schilling, “Fundamentals of Robotics and analysis and control”, *Prentice Hall of India, New Delhi*, 2003
- [43] Ibrahim, K., Sharkawy, A.B: “A hybrid PID control scheme for flexible joint manipulators and a comparison with sliding mode control”, *Ain Shams Engineering Journal* 9, 3451-3457, 2018 doi: 10.1016/j.asej.2018.01.004
- [44] Aström JK, Hägglund T., “PID Controllers: Theory, Design”, and Tuning, *Instrument Society of America, USA*, 70, 1995
- [45] Kim, H.K., Won, D., Kwon, O., Kim, T.J., Kim, S.S., Park, S: “Foot trajectory generation of hydraulic quadruped robots on uneven terrain”, *Proceedings of the 17th World Congress the International Federation of Automatic Control Seoul, Korea*, 3021-3026, 2008 doi: 10.3182/20080706-5-KR-1001.1846
- [46] Aoi, S., Katayama, D., Fujiki, S., Tomita, N., Funato, T., Yamashita, T., Senda, K., Tsuchiya, K: “A stability-based mechanism for hysteresis in the walk-trot transition in quadruped locomotion”, *Journal of The Royal Society*, 10, 1-12, 2013. doi: 10.1098/rsif.2012.0908
- [47] Liu, Q., Chen, X., Han, B., Luo, Z., Luo, X: “Virtual constraint based control of bounding gait of quadruped robots”, *Journal of Bionic Engineering*, 14, 218-231, 2017 doi: 10.1016/S1672-6529(16)60393-1
- [48] M. Hacimurtazaoğlu, “Locking application with fuzzy logic”, *Conference of Academic Information, Akdeniz University* 15, 642-647, 2013
- [49] Y.J. Wang, “Constant force feedback controller design using PID-like fuzzy technique for tapping mode atomic force microscopes”, *Intelligent Control and Automation* 4, 263-279, 2013 doi: 10.1109/CCDC.2009.5192264
- [50] F. Yıldırım, “The effect of geometric changes of propellants which used in large caliber weapons on barrel pressure and muzzle velocity”, *Master Thesis – Ankara University, Ankara, Turkey*, 5-6, 2013
- [51] <http://www.millisavunma.com/mkek-hafif-ve-agir-muhimmat-alesi/>, (last update) 21.01.2017, 18:48 (2017)
- [52] J.R. Rice, “Numerical methods, software and analysis”, *Mc-Graw Hill, New York*, 1983

Appendices

1.

$$x_1 = x - \frac{l_g}{2} \cos \theta + l_1 \cos \theta_1 \quad (\text{a1.1})$$

$$y_1 = y - \frac{l_g}{2} \sin \theta + l_1 \sin \theta_1 \quad (\text{a1.2})$$

$$x_2 = x + \frac{l_g}{2} \cos \theta + l_2 \cos \theta_2 \quad (\text{a1.3})$$

$$y_2 = y + \frac{l_g}{2} \sin \theta + l_2 \sin \theta_2 \quad (\text{a1.4})$$

$$x_3 = x - \frac{l_g}{2} \cos \theta + l_1 \cos \theta_1 + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_3) \quad (\text{a1.5})$$

$$y_3 = y - \frac{l_g}{2} \sin \theta + l_1 \sin \theta_1 + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_3) \quad (\text{a1.6})$$

$$x_4 = x + \frac{l_g}{2} \cos \theta + l_2 \cos \theta_2 + l_4 \cos(\theta_2 + \theta_4) \quad (\text{a1.7})$$

$$y_4 = y + \frac{l_g}{2} \sin \theta + l_2 \sin \theta_2 + l_4 \sin(\theta_2 + \theta_4) \quad (\text{a1.8})$$

$$x_5 = x - \frac{l_g}{2} \cos \theta + l_5 \cos \theta_5 \quad (\text{a1.9})$$

$$y_5 = y - \frac{l_g}{2} \sin \theta + l_5 \sin \theta_5 \quad (\text{a1.10})$$

$$x_6 = x + \frac{l_g}{2} \cos \theta + l_6 \cos \theta_6 \quad (\text{a1.11})$$

$$y_6 = y + \frac{l_g}{2} \sin \theta + l_6 \sin \theta_6 \quad (\text{a1.12})$$

$$x_7 = x - \frac{l_g}{2} \cos \theta + l_5 \cos \theta_5 + l_7 \cos(\theta_5 + \theta_7) \quad (\text{a1.13})$$

$$y_7 = y - \frac{l_g}{2} \sin \theta + l_5 \sin \theta_5 + l_7 \sin(\theta_5 + \theta_7) \quad (\text{a1.14})$$

$$x_8 = x + \frac{l_g}{2} \cos \theta + l_6 \cos \theta_6 + l_8 \cos(\theta_6 + \theta_8) \quad (\text{a1.15})$$

$$y_8 = y + \frac{l_g}{2} \sin \theta + l_6 \sin \theta_6 + l_8 \sin(\theta_6 + \theta_8) \quad (\text{a1.16})$$

$$x_n = x - a \sin \theta + b \cos(\alpha + \theta) \quad (\text{a1.17})$$

$$y_n = y + a \cos \theta + b \sin(\alpha + \theta) \quad (\text{al.18})$$

2.

$$\begin{aligned}
L = & \frac{1}{2}M\dot{x}^2 + \frac{1}{2}M\dot{y}^2 + \frac{1}{2}I\dot{\theta}^2 + \frac{m_1\dot{x}^2}{2} + \frac{m_1\dot{y}^2}{2} + \frac{m_1l_g^2\dot{\theta}^2}{8} + \frac{m_1l_1^2\dot{\theta}_1^2}{2} + \frac{m_1l_g\dot{x}\dot{\theta}\sin\theta}{2} - m_1\dot{x}l_1\dot{\theta}_1\sin\theta_1 - \frac{m_1l_g\dot{y}\dot{\theta}\cos\theta}{2} \\
& + m_1\dot{y}l_1\dot{\theta}_1\cos\theta_1 - \frac{m_1l_gl_1\dot{\theta}\dot{\theta}_1\cos(\theta-\theta_1)}{2} + \frac{m_2\dot{x}^2}{2} + \frac{m_2\dot{y}^2}{2} + \frac{m_2l_g^2\dot{\theta}^2}{8} + \frac{m_2l_2^2\dot{\theta}_2^2}{2} - \frac{m_2l_g\dot{x}\dot{\theta}\sin\theta}{2} - m_2\dot{x}l_2\dot{\theta}_2\sin\theta_2 \\
& + m_2\dot{y}l_2\dot{\theta}_2\cos\theta_2 + \frac{m_2l_g\dot{y}\dot{\theta}\cos\theta}{2} + \frac{m_2l_gl_2\dot{\theta}\dot{\theta}_2\cos(\theta-\theta_2)}{2} + \frac{m_3\dot{x}^2}{2} + \frac{m_3\dot{y}^2}{2} + \frac{m_3l_g^2\dot{\theta}^2}{8} + \frac{m_3l_3^2\dot{\theta}_1^2}{2} + \frac{m_3l_3^2(\dot{\theta}_1+\dot{\theta}_3)^2}{2} \\
& + \frac{m_3l_g\dot{x}\dot{\theta}\sin\theta}{2} - m_3\dot{x}l_1\dot{\theta}_1\sin\theta_1 - m_3\dot{x}l_3(\dot{\theta}_1+\dot{\theta}_3)\sin(\theta_1+\theta_3) + m_3\dot{y}l_1\dot{\theta}_1\cos\theta_1 - \frac{m_3l_g\dot{y}\dot{\theta}\cos\theta}{2} \\
& + m_3\dot{y}l_3(\dot{\theta}_1+\dot{\theta}_3)\cos(\theta_1+\theta_3) - \frac{m_3l_gl_1\dot{\theta}\dot{\theta}_1\cos(\theta-\theta_1)}{2} - \frac{m_3l_gl_3\dot{\theta}(\dot{\theta}_1+\dot{\theta}_3)\cos(\theta-\theta_1-\theta_3)}{2} + m_3l_1l_3\dot{\theta}_1(\dot{\theta}_1+\dot{\theta}_3)\cos\theta_3 \\
& + \frac{m_4\dot{x}^2}{2} + \frac{m_4\dot{y}^2}{2} + \frac{m_4l_g^2\dot{\theta}^2}{8} + \frac{m_4l_4^2\dot{\theta}_2^2}{2} + \frac{m_4l_4^2(\dot{\theta}_2+\dot{\theta}_4)^2}{2} - \frac{m_4l_g\dot{x}\dot{\theta}\sin\theta}{2} - m_4\dot{x}l_4(\dot{\theta}_2+\dot{\theta}_4)\sin(\theta_2+\theta_4) - m_4\dot{x}l_2\dot{\theta}_2\sin\theta_2 \\
& + \frac{m_4l_g\dot{y}\dot{\theta}\cos\theta}{2} + \frac{m_4l_gl_2\dot{\theta}\dot{\theta}_2\cos(\theta-\theta_2)}{2} + \frac{m_4l_gl_4\dot{\theta}(\dot{\theta}_2+\dot{\theta}_4)\cos(\theta-\theta_2-\theta_4)}{2} + m_4l_2l_4\dot{\theta}_2(\dot{\theta}_2+\dot{\theta}_4)\cos\theta_4 + \frac{m_5\dot{x}^2}{2} + \frac{m_5\dot{y}^2}{2} \\
& + \frac{m_5l_g^2\dot{\theta}^2}{8} + \frac{m_5l_5^2\dot{\theta}_5^2}{2} + \frac{m_5l_g\dot{x}\dot{\theta}\sin\theta}{2} - \frac{m_5l_g\dot{y}\dot{\theta}\cos\theta}{2} - m_5\dot{x}l_5\dot{\theta}_5\sin\theta_5 + m_5\dot{y}l_5\dot{\theta}_5\cos\theta_5 - \frac{m_5l_gl_5\dot{\theta}\dot{\theta}_5\cos(\theta-\theta_5)}{2} + \frac{m_6\dot{x}^2}{2} \\
& + \frac{m_6\dot{y}^2}{2} + \frac{m_6l_g^2\dot{\theta}^2}{8} + \frac{m_6l_6^2\dot{\theta}_6^2}{2} - \frac{m_6l_g\dot{x}\dot{\theta}\sin\theta}{2} - m_6\dot{x}l_6\dot{\theta}_6\sin\theta_6 + \frac{m_6l_g\dot{y}\dot{\theta}\cos\theta}{2} + m_6\dot{y}l_6\dot{\theta}_6\cos\theta_6 + \frac{m_7\dot{x}^2}{2} + \frac{m_7\dot{y}^2}{2} \\
& + \frac{m_7l_g^2\dot{\theta}^2}{8} + \frac{m_7l_7^2\dot{\theta}_5^2}{2} + \frac{m_7l_7^2(\dot{\theta}_5+\dot{\theta}_7)^2}{2} - m_7\dot{x}l_5\dot{\theta}_5\sin\theta_5 - m_7\dot{x}l_7(\dot{\theta}_5+\dot{\theta}_7)\sin(\theta_5+\theta_7) + \frac{m_7l_g\dot{x}\dot{\theta}\sin\theta}{2} - \frac{m_7l_g\dot{y}\dot{\theta}\cos\theta}{2} \\
& + m_7\dot{y}l_5\dot{\theta}_5\cos\theta_5 + m_7\dot{y}l_7(\dot{\theta}_5+\dot{\theta}_7)\cos(\theta_5+\theta_7) - \frac{m_7l_gl_5\dot{\theta}\dot{\theta}_5\cos(\theta-\theta_5)}{2} - \frac{m_7l_gl_7\dot{\theta}(\dot{\theta}_5+\dot{\theta}_7)\cos(\theta-\theta_5-\theta_7)}{2} \\
& + m_7l_5l_7\dot{\theta}_5(\dot{\theta}_5+\dot{\theta}_7)\cos\theta_7 + \frac{m_8\dot{x}^2}{2} + \frac{m_8\dot{y}^2}{2} + \frac{m_8l_g^2\dot{\theta}^2}{8} + \frac{m_8l_8^2\dot{\theta}_6^2}{2} + \frac{m_8l_8^2(\dot{\theta}_6+\dot{\theta}_8)^2}{2} - \frac{m_8l_g\dot{x}\dot{\theta}\sin\theta}{2} - m_8\dot{x}l_6\dot{\theta}_6\sin\theta_6 \\
& + \frac{m_8l_g\dot{y}\dot{\theta}\cos\theta}{2} + m_8\dot{y}l_6\dot{\theta}_6\cos\theta_6 + m_8\dot{y}l_8(\dot{\theta}_6+\dot{\theta}_8)\cos(\theta_6+\theta_8) + m_8l_6l_8\dot{\theta}_6(\dot{\theta}_6+\dot{\theta}_8)\cos\theta_8 + \frac{m_8l_gl_6\dot{\theta}\dot{\theta}_6\cos(\theta-\theta_6)}{2} \\
& + \frac{m_8l_gl_8\dot{\theta}(\dot{\theta}_6+\dot{\theta}_8)\cos(\theta-\theta_6-\theta_8)}{2} + \frac{m_n\dot{x}^2}{2} + \frac{m_n\dot{y}^2}{2} + \frac{m_n a^2\dot{\theta}^2}{2} + \frac{m_n b^2(\dot{\alpha}+\dot{\theta})^2}{2} - m_n\dot{x}a\dot{\theta}\cos\theta - m_n\dot{y}a\dot{\theta}\sin\theta \\
& - m_n\dot{x}b(\dot{\alpha}+\dot{\theta})\sin(\alpha+\theta) + m_n\dot{y}b(\dot{\alpha}+\dot{\theta})\cos(\alpha+\theta) + m_nab\dot{\theta}(\dot{\alpha}+\dot{\theta})\sin\alpha - Mgy - m_1gy + m_1g\frac{l_g}{2}\sin\theta \\
& - m_1gl_1\sin\theta_1 - m_2gy - m_2g\frac{l_g}{2}\sin\theta - m_2gl_2\sin\theta_2 - m_3gy + m_3g\frac{l_g}{2}\sin\theta - m_3gl_1\sin\theta_1 - m_3gl_3\sin(\theta_1+\theta_3) \\
& - m_4gy + m_4g\frac{l_g}{2}\sin\theta - m_4gl_2\sin\theta_2 - m_4gl_2\sin(\theta_2+\theta_4) - m_5gy + m_5g\frac{l_g}{2}\sin\theta - m_5gl_5\sin\theta_5 - m_6gy \\
& - m_6g\frac{l_g}{2}\sin\theta - m_6gl_6\sin\theta_6 - m_7gy + m_7g\frac{l_g}{2}\sin\theta - m_7gl_5\sin\theta_5 - m_7gl_7\sin(\theta_5+\theta_7) - m_8gy + m_8g\frac{l_g}{2}\sin\theta \\
& - m_8gl_8\sin\theta_8 - m_ngy - m_nga\cos\theta - m_nga\sin(\alpha+\theta)
\end{aligned}$$

3.

$$\begin{aligned}
\Sigma F_x = & M\ddot{x} + m_1\ddot{x} + \frac{m_1l_g\ddot{\theta}\sin\theta}{2} + \frac{m_1l_g\dot{\theta}^2\cos\theta}{2} - m_1l_1\ddot{\theta}_1\sin\theta_1 - m_1l_1\dot{\theta}_1^2\cos\theta_1 + m_2\ddot{x} - \frac{m_2l_g\ddot{\theta}\sin\theta}{2} - \frac{m_2l_g\dot{\theta}^2\cos\theta}{2} \\
& - m_2l_2\ddot{\theta}_2\sin\theta_2 - m_2l_2\dot{\theta}_2^2\cos\theta_2 + m_3\ddot{x} + \frac{m_3l_g\ddot{\theta}\sin\theta}{2} + \frac{m_3l_g\dot{\theta}^2\cos\theta}{2} - m_3l_1\ddot{\theta}_1\sin\theta_1 - m_3l_1\dot{\theta}_1^2\cos\theta_1 \\
& - m_3l_3(\ddot{\theta}_1+\ddot{\theta}_3)\sin(\theta_1+\theta_3) - m_3l_3(\dot{\theta}_1+\dot{\theta}_3)^2\cos(\theta_1+\theta_3) + m_4\ddot{x} - \frac{m_4l_g\ddot{\theta}\sin\theta}{2} - \frac{m_4l_g\dot{\theta}^2\cos\theta}{2} - m_4l_2\ddot{\theta}_2\sin\theta_2 \\
& - m_4l_2\dot{\theta}_2^2\cos\theta_2 - m_4l_4(\ddot{\theta}_2+\ddot{\theta}_4)\sin(\theta_2+\theta_4) - m_4l_4(\dot{\theta}_2+\dot{\theta}_4)^2\cos(\theta_2+\theta_4) + m_5\ddot{x} + \frac{m_5l_g\ddot{\theta}\sin\theta}{2} \\
& + \frac{m_5l_g\dot{\theta}^2\cos\theta}{2} - m_5l_5\ddot{\theta}_5\sin\theta_5 - m_5l_5\dot{\theta}_5^2\cos\theta_5 + m_6\ddot{x} - \frac{m_6l_g\ddot{\theta}\sin\theta}{2} - \frac{m_6l_g\dot{\theta}^2\cos\theta}{2} - m_6l_6\ddot{\theta}_6\sin\theta_6 \\
& - m_6l_6\dot{\theta}_6^2\cos\theta_6 + m_7\ddot{x} + \frac{m_7l_g\ddot{\theta}\sin\theta}{2} + \frac{m_7l_g\dot{\theta}^2\cos\theta}{2} - m_7l_5\ddot{\theta}_5\sin\theta_5 - m_7l_5\dot{\theta}_5^2\cos\theta_5 \\
& - m_7l_7(\ddot{\theta}_5+\ddot{\theta}_7)\sin(\theta_5+\theta_7) - m_7l_7(\dot{\theta}_5+\dot{\theta}_7)^2\cos(\theta_5+\theta_7) + m_8\ddot{x} - m_8l_6\ddot{\theta}_6\sin\theta_6 - m_8l_6\dot{\theta}_6^2\cos\theta_6 \\
& - m_8l_8(\ddot{\theta}_6+\ddot{\theta}_8)\sin(\theta_6+\theta_8) - \frac{m_8l_g\ddot{\theta}\sin\theta}{2} - \frac{m_8l_g\dot{\theta}^2\cos\theta}{2} - m_8l_8(\dot{\theta}_6+\dot{\theta}_8)^2\cos(\theta_6+\theta_8) + m_n\ddot{x} \\
& - m_n a\ddot{\theta}\cos\theta + m_n a\dot{\theta}^2\sin\theta - m_n b(\ddot{\alpha}+\ddot{\theta})\sin(\alpha+\theta) - m_n b(\dot{\alpha}+\dot{\theta})^2\cos(\alpha+\theta)
\end{aligned}$$

$$\Sigma F_y = M\ddot{y} + m_1\ddot{y} - \frac{m_1l_g\ddot{\theta}\cos\theta}{2} + \frac{m_1l_g\dot{\theta}^2\sin\theta}{2} + m_1l_1\ddot{\theta}_1\cos\theta_1 - m_1l_1\dot{\theta}_1^2\sin\theta_1 + m_2\ddot{y} + \frac{m_2l_g\ddot{\theta}\cos\theta}{2} - \frac{m_2l_g\dot{\theta}^2\sin\theta}{2}$$

$$\begin{aligned}
& +m_2l_2\ddot{\theta}_2 \cos \theta_2 - m_2l_2\dot{\theta}_2^2 \sin \theta_2 + m_3\ddot{y} - \frac{m_3l_g\ddot{\theta} \cos \theta}{2} + \frac{m_3l_g\dot{\theta}^2 \sin \theta}{2} + m_3l_1\ddot{\theta}_1 \cos \theta_1 - m_3l_1\dot{\theta}_1^2 \sin \theta_1 \\
& + m_3l_3(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_3) \cos(\theta_1 + \theta_3) - m_3l_3(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3)^2 \sin(\theta_1 + \theta_3) + m_4\ddot{y} + \frac{m_4l_g\ddot{\theta} \cos \theta}{2} - \frac{m_4l_g\dot{\theta}^2 \sin \theta}{2} \\
& + m_4l_2\ddot{\theta}_2 \cos \theta_2 - m_4l_2\dot{\theta}_2^2 \sin \theta_2 + m_4l_4(\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_4) \cos(\theta_2 + \theta_4) - m_4l_4(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_4)^2 \sin(\theta_2 + \theta_4) + m_5\ddot{y} \\
& - \frac{m_5l_g\ddot{\theta} \cos \theta}{2} + \frac{m_5l_g\dot{\theta}^2 \sin \theta}{2} + m_5l_5\ddot{\theta}_5 \cos \theta_5 - m_5l_5\dot{\theta}_5^2 \sin \theta_5 + m_6\ddot{y} + \frac{m_6l_g\ddot{\theta} \cos \theta}{2} - \frac{m_6l_g\dot{\theta}^2 \sin \theta}{2} \\
& + m_6l_6\ddot{\theta}_6 \cos \theta_6 - m_6l_6\dot{\theta}_6^2 \sin \theta_6 + m_7\ddot{y} + m_7l_5\ddot{\theta}_5 \cos \theta_5 - m_7l_5\dot{\theta}_5^2 \sin \theta_5 + m_7l_7(\ddot{\theta}_5 + \ddot{\theta}_7) \cos(\theta_5 + \theta_7) \\
& - \frac{m_7l_g\ddot{\theta} \cos \theta}{2} + \frac{m_7l_g\dot{\theta}^2 \sin \theta}{2} - m_7l_7(\dot{\theta}_5 + \dot{\theta}_7)^2 \sin(\theta_5 + \theta_7) + m_8\ddot{y} + \frac{m_8l_g\ddot{\theta} \cos \theta}{2} - \frac{m_8l_g\dot{\theta}^2 \sin \theta}{2} \\
& + m_8l_6\ddot{\theta}_6 \cos \theta_6 - m_8l_6\dot{\theta}_6^2 \sin \theta_6 + m_8l_8(\ddot{\theta}_6 + \ddot{\theta}_8) \cos(\theta_6 + \theta_8) - m_8l_8(\dot{\theta}_6 + \dot{\theta}_8)^2 \sin(\theta_6 + \theta_8) + m_n\ddot{y} \\
& - m_n a \ddot{\theta} \sin \theta - m_n a \dot{\theta}^2 \cos \theta + m_n b (\ddot{\alpha} + \ddot{\theta}) \cos(\alpha + \theta) - m_n b (\dot{\alpha} + \dot{\theta})^2 \sin(\alpha + \theta) + Mg + m_1g + m_2g \\
& + m_3g + m_4g + m_5g + m_6g + m_7g + m_8g + m_n g
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\tau = & I\ddot{\theta} + \frac{m_1l_g^2\ddot{\theta}}{4} + \frac{m_1l_g\ddot{x} \sin \theta}{2} - \frac{m_1l_g\ddot{y} \cos \theta}{2} - \frac{m_1l_gl_1\dot{\theta}_1 \cos(\theta - \theta_1)}{2} + \frac{m_1l_gl_1\dot{\theta}_1(\dot{\theta} - \dot{\theta}_1) \sin(\theta - \theta_1)}{2} + \frac{m_2l_g^2\ddot{\theta}}{4} - \frac{m_2l_g\ddot{x} \sin \theta}{2} \\
& + \frac{m_2l_g\ddot{y} \cos \theta}{2} + \frac{m_2l_gl_2\ddot{\theta}_2 \cos(\theta - \theta_2)}{2} - \frac{m_2l_gl_2\dot{\theta}_2(\dot{\theta} - \dot{\theta}_2) \sin(\theta - \theta_2)}{2} + \frac{m_3l_g^2\ddot{\theta}}{4} + \frac{m_3l_g\ddot{x} \sin \theta}{2} + \frac{m_3l_gl_3\dot{\theta}_1(\dot{\theta} - \dot{\theta}_1) \sin(\theta - \theta_1)}{2} \\
& - \frac{m_3l_gl_3(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3) \cos(\theta - \theta_1 - \theta_3)}{2} + \frac{m_3l_gl_3(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3)(\dot{\theta} - \dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_3) \sin(\theta - \theta_1 - \theta_3)}{2} + \frac{m_4l_g^2\ddot{\theta}}{4} - \frac{m_4l_g\ddot{x} \sin \theta}{2} + \frac{m_4l_g\ddot{y} \cos \theta}{2} \\
& + \frac{m_4l_gl_2\ddot{\theta}_2 \cos(\theta - \theta_2)}{2} - \frac{m_4l_gl_2\dot{\theta}_2(\dot{\theta} - \dot{\theta}_2) \sin(\theta - \theta_2)}{2} + \frac{m_4l_gl_4(\ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_4) \cos(\theta - \theta_2 - \theta_4)}{2} + \frac{m_5l_g^2\ddot{\theta}}{4} + \frac{m_5l_g\ddot{x} \sin \theta}{2} \\
& - \frac{m_4l_gl_4(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_4)(\dot{\theta} - \dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_4) \sin(\theta - \theta_2 - \theta_4)}{2} - \frac{m_5l_g\ddot{y} \cos \theta}{2} - \frac{m_5l_gl_5\dot{\theta}_5 \cos(\theta - \theta_5)}{2} + \frac{m_5l_gl_5\dot{\theta}_5(\dot{\theta} - \dot{\theta}_5) \sin(\theta - \theta_5)}{2} + \frac{m_6l_g^2\ddot{\theta}}{4} \\
& - \frac{m_6l_g\ddot{x} \sin \theta}{2} + \frac{m_6l_g\ddot{y} \cos \theta}{2} + \frac{m_6l_gl_6\dot{\theta}_6 \cos(\theta - \theta_6)}{2} - \frac{m_6l_gl_6\dot{\theta}_6(\dot{\theta} - \dot{\theta}_6) \sin(\theta - \theta_6)}{2} + \frac{m_7l_g^2\ddot{\theta}}{4} + \frac{m_7l_g\ddot{x} \sin \theta}{2} \\
& - \frac{m_7l_g\ddot{y} \cos \theta}{2} - \frac{m_7l_gl_5\dot{\theta}_5 \cos(\theta - \theta_5)}{2} + \frac{m_7l_gl_7\dot{\theta}_5(\dot{\theta} - \dot{\theta}_5) \sin(\theta - \theta_5)}{2} - \frac{m_7l_gl_7(\dot{\theta}_5 + \dot{\theta}_7) \cos(\theta - \theta_5 - \theta_7)}{2} \\
& + \frac{m_7l_gl_7(\dot{\theta}_5 + \dot{\theta}_7)(\dot{\theta} - \dot{\theta}_5 - \dot{\theta}_7) \sin(\theta - \theta_5 - \theta_7)}{2} + \frac{m_8l_g^2\ddot{\theta}}{4} - \frac{m_8l_g\ddot{x} \sin \theta}{2} + \frac{m_8l_g\ddot{y} \cos \theta}{2} + \frac{m_8l_gl_6\dot{\theta}_6 \cos(\theta - \theta_6)}{2} \\
& - \frac{m_8l_gl_6\dot{\theta}_6(\dot{\theta} - \dot{\theta}_6) \sin(\theta - \theta_6)}{2} + \frac{m_8l_gl_8(\ddot{\theta}_6 + \ddot{\theta}_8) \cos(\theta - \theta_6 - \theta_8)}{2} - \frac{m_8l_gl_8(\dot{\theta}_6 + \dot{\theta}_8)(\dot{\theta} - \dot{\theta}_6 - \dot{\theta}_8) \sin(\theta - \theta_6 - \theta_8)}{2} \\
& - \frac{m_1l_gl_1\dot{\theta}_1 \sin(\theta - \theta_1)}{2} + \frac{m_2l_gl_2\dot{\theta}_2 \sin(\theta - \theta_2)}{2} - \frac{m_3l_gl_1\dot{\theta}_1 \sin(\theta - \theta_1)}{2} - \frac{m_3l_gl_3\dot{\theta}_1(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3) \sin(\theta - \theta_1 - \theta_3)}{2} \\
& + \frac{m_4l_gl_2\dot{\theta}_2 \sin(\theta - \theta_2)}{2} + \frac{m_4l_gl_4\dot{\theta}_4(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_4) \sin(\theta - \theta_2 - \theta_4)}{2} - \frac{m_5l_gl_5\dot{\theta}_5 \sin(\theta - \theta_5)}{2} + \frac{m_6l_gl_6\dot{\theta}_6 \sin(\theta - \theta_6)}{2} \\
& - \frac{m_7l_gl_5\dot{\theta}_5 \sin(\theta - \theta_5)}{2} - \frac{m_7l_gl_7\dot{\theta}_7(\dot{\theta}_5 + \dot{\theta}_7) \sin(\theta - \theta_5 - \theta_7)}{2} + \frac{m_8l_gl_6\dot{\theta}_6 \sin(\theta - \theta_6)}{2} + \frac{m_8l_gl_8\dot{\theta}_8(\dot{\theta}_6 + \dot{\theta}_8) \sin(\theta - \theta_6 - \theta_8)}{2} \\
& + m_n a^2 \ddot{\theta} + m_n b^2 \ddot{\theta} + m_n b^2 \ddot{\alpha} - m_n \ddot{x} a \cos \theta - m_n \ddot{x} b \sin(\alpha + \theta) - m_n \ddot{y} a \sin \theta + m_n \ddot{y} b \cos(\alpha + \theta) + m_n \ddot{\alpha} ab \sin \alpha \\
& + m_n ab \dot{\alpha}^2 \cos \alpha + 2m_n ab \dot{\theta} \sin \alpha + 2m_n ab \dot{\theta} \dot{\alpha} \cos \alpha - m_1g \frac{l_g}{2} \cos \theta + m_2g \frac{l_g}{2} \cos \theta - m_3g \frac{l_g}{2} \cos \theta + m_4g \frac{l_g}{2} \cos \theta \\
& - m_5g \frac{l_g}{2} \cos \theta + m_6g \frac{l_g}{2} \cos \theta - m_7g \frac{l_g}{2} \cos \theta + m_8g \frac{l_g}{2} \cos \theta - m_n g a \sin \theta + m_n g b \cos(\alpha + \theta)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\tau_1 = & m_1l_1^2\ddot{\theta}_1 - m_1l_1\ddot{x} \sin \theta_1 + m_1l_1\ddot{y} \cos \theta_1 - \frac{m_1l_gl_1\ddot{\theta} \cos(\theta - \theta_1)}{2} + \frac{m_1l_gl_1\dot{\theta}(\dot{\theta} - \dot{\theta}_1) \sin(\theta - \theta_1)}{2} + m_3l_1^2\ddot{\theta}_1 + m_3l_3^2\ddot{\theta}_3 \\
& + m_3l_3^2\ddot{\theta}_1 - m_3l_1\ddot{x} \sin \theta_1 - m_3l_3\ddot{x} \sin(\theta_1 + \theta_3) + m_3l_1\ddot{y} \cos \theta_1 + m_3l_3\ddot{y} \cos(\theta_1 + \theta_3) - \frac{m_3l_gl_1\dot{\theta} \cos(\theta - \theta_1)}{2} \\
& + \frac{m_1l_gl_1\dot{\theta}(\dot{\theta} - \dot{\theta}_1) \sin(\theta - \theta_1)}{2} - \frac{m_3l_gl_3\dot{\theta} \cos(\theta - \theta_1 - \theta_3)}{2} + \frac{m_3l_gl_3\dot{\theta}(\dot{\theta} - \dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_3) \sin(\theta - \theta_1 - \theta_3)}{2} + 2m_3l_1l_3\dot{\theta}_1 \cos \theta_3 \\
& - 2m_3l_1l_3\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 \sin \theta_3 + m_3l_1l_3\dot{\theta}_3 \cos \theta_3 - m_3l_1l_3\dot{\theta}_3^2 \sin \theta_3 + \frac{m_1l_gl_1\dot{\theta}_1 \sin(\theta - \theta_1)}{2} + \frac{m_3l_gl_1\dot{\theta}_1 \sin(\theta - \theta_1)}{2} \\
& + \frac{m_3l_gl_3\dot{\theta}_3(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3) \sin(\theta - \theta_1 - \theta_3)}{2} + m_1gl_1 \cos \theta_1 + m_3gl_1 \cos \theta_1 + m_3gl_3 \cos(\theta_1 + \theta_3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\tau_2 = & m_2l_2^2\ddot{\theta}_2 - m_2l_2\ddot{x} \sin \theta_2 + m_2l_2\ddot{y} \cos \theta_2 + m_4l_2^2\ddot{\theta}_2 + m_4l_4^2\ddot{\theta}_2 + m_4l_2^2\ddot{\theta}_4 - m_4l_2\ddot{x} \sin \theta_2 + \frac{m_2l_gl_2\dot{\theta} \cos(\theta - \theta_2)}{2} \\
& - \frac{m_2l_gl_2\dot{\theta}(\dot{\theta} - \dot{\theta}_2) \sin(\theta - \theta_2)}{2} - m_4l_4\ddot{x} \sin(\theta_2 + \theta_4) + m_4l_2\ddot{y} \cos \theta_2 + m_4l_4\ddot{y} \cos(\theta_2 + \theta_4) + \frac{m_4l_gl_2\dot{\theta} \cos(\theta - \theta_2)}{2} \\
& - \frac{m_4l_gl_2\dot{\theta}(\dot{\theta} - \dot{\theta}_2) \sin(\theta - \theta_2)}{2} + \frac{m_4l_gl_4\dot{\theta} \cos(\theta - \theta_2 - \theta_4)}{2} - \frac{m_4l_gl_4\dot{\theta}(\dot{\theta} - \dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_4) \sin(\theta - \theta_2 - \theta_4)}{2} + 2m_4l_2l_4\dot{\theta}_2 \cos \theta_4
\end{aligned}$$

$$-2m_4l_2l_4\dot{\theta}_2\dot{\theta}_4 \sin \theta_4 + m_4l_2l_4\ddot{\theta}_4 \cos \theta_4 - m_4l_2l_4\dot{\theta}_4^2 \sin \theta_4 - \frac{m_2l_g l_2 \dot{\theta} \ddot{\theta}_2 \sin(\theta - \theta_2)}{2} - \frac{m_4l_g l_2 \dot{\theta} \ddot{\theta}_2 \sin(\theta - \theta_2)}{2} - \frac{m_4l_g l_4 \dot{\theta} (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_4) \sin(\theta - \theta_2 - \theta_4)}{2} + m_2gl_2 \cos \theta_2 + m_4gl_2 \cos \theta_2 + m_4gl_4 \cos(\theta_2 + \theta_4)$$

$$\tau_3 = m_3l_3^2\ddot{\theta}_1 + m_3l_3^2\ddot{\theta}_3 - m_3l_3\ddot{x} \sin(\theta_1 + \theta_3) + m_3l_3\ddot{y} \cos(\theta_1 + \theta_3) - \frac{m_3l_g l_3 \ddot{\theta} \cos(\theta - \theta_1 - \theta_3)}{2} + m_3l_1l_3\ddot{\theta}_1 \cos \theta_3 + \frac{m_3l_g l_3 \dot{\theta} (\dot{\theta} - \dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_3) \sin(\theta - \theta_1 - \theta_3)}{2} - m_3l_1l_3\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 \sin \theta_3 + \frac{m_3l_g l_3 \dot{\theta} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3) \sin(\theta - \theta_1 - \theta_3)}{2} + m_3gl_3 \cos(\theta_1 + \theta_3) + m_3l_1l_3\dot{\theta}_1(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3) \sin \theta_3$$

$$\tau_4 = m_4l_4^2\ddot{\theta}_2 + m_4l_4^2\ddot{\theta}_4 - m_4l_4\ddot{x} \sin(\theta_2 + \theta_4) + m_4l_4\ddot{y} \cos(\theta_2 + \theta_4) + \frac{m_4l_g l_4 \ddot{\theta} \cos(\theta - \theta_2 - \theta_4)}{2} + m_4l_2l_4\ddot{\theta}_2 \cos \theta_4 - \frac{m_4l_g l_4 \dot{\theta} (\dot{\theta} - \dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_4) \sin(\theta - \theta_2 - \theta_4)}{2} - m_4l_2l_4\dot{\theta}_2\dot{\theta}_4 \sin \theta_4 - \frac{m_4l_g l_4 \dot{\theta} (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_4) \sin(\theta - \theta_2 - \theta_4)}{2} + m_4gl_4 \cos(\theta_2 + \theta_4) + m_4l_2l_4\dot{\theta}_2(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_4) \sin \theta_4$$

$$\tau_5 = m_5l_5^2\ddot{\theta}_5 - m_5l_5\ddot{x} \sin \theta_5 + m_5l_5\ddot{y} \cos \theta_5 + m_7l_5^2\ddot{\theta}_5 + m_7l_7^2\ddot{\theta}_7 + m_7l_7^2\ddot{\theta}_5 - m_7l_5\ddot{x} \sin \theta_5 - \frac{m_5l_g l_5 \ddot{\theta} \cos(\theta - \theta_5)}{2} + \frac{m_5l_g l_5 \dot{\theta} (\dot{\theta} - \dot{\theta}_5) \sin(\theta - \theta_5)}{2} - m_7l_7\ddot{x} \sin(\theta_5 + \theta_7) + m_7l_5\ddot{y} \cos \theta_5 + m_7l_7\ddot{y} \cos(\theta_5 + \theta_7) - \frac{m_7l_g l_5 \ddot{\theta} \cos(\theta - \theta_5)}{2} + \frac{m_5l_g l_5 \dot{\theta} (\dot{\theta} - \dot{\theta}_5) \sin(\theta - \theta_5)}{2} - \frac{m_7l_g l_7 \dot{\theta} \cos(\theta - \theta_5 - \theta_7)}{2} + \frac{m_7l_g l_7 \dot{\theta} (\dot{\theta} - \dot{\theta}_5 - \dot{\theta}_7) \sin(\theta - \theta_5 - \theta_7)}{2} + 2m_7l_5l_7\ddot{\theta}_5 \cos \theta_7 - 2m_7l_5l_7\dot{\theta}_5\dot{\theta}_7 \sin \theta_7 + m_7l_5l_7\ddot{\theta}_7 \cos \theta_7 - m_7l_5l_7\dot{\theta}_7^2 \sin \theta_7 + \frac{m_5l_g l_5 \dot{\theta} \ddot{\theta}_5 \sin(\theta - \theta_5)}{2} + \frac{m_7l_g l_5 \dot{\theta} \ddot{\theta}_5 \sin(\theta - \theta_5)}{2} + \frac{m_7l_g l_7 \dot{\theta} (\dot{\theta}_5 + \dot{\theta}_7) \sin(\theta - \theta_5 - \theta_7)}{2} + m_5gl_5 \cos \theta_5 + m_7gl_5 \cos \theta_5 + m_7gl_7 \cos(\theta_5 + \theta_7)$$

$$\tau_6 = m_6l_6^2\ddot{\theta}_6 - m_6l_6\ddot{x} \sin \theta_6 + m_6l_6\ddot{y} \cos \theta_6 + m_8l_6^2\ddot{\theta}_6 + m_8l_8^2\ddot{\theta}_6 + m_8l_6^2\ddot{\theta}_8 - m_8l_6\ddot{x} \sin \theta_6 + \frac{m_6l_g l_6 \ddot{\theta} \cos(\theta - \theta_6)}{2} - \frac{m_6l_g l_6 \dot{\theta} (\dot{\theta} - \dot{\theta}_6) \sin(\theta - \theta_6)}{2} - m_8l_8\ddot{x} \sin(\theta_6 + \theta_8) + m_8l_6\ddot{y} \cos \theta_6 + m_8l_8\ddot{y} \cos(\theta_6 + \theta_8) - \frac{m_8l_g l_6 \dot{\theta} (\dot{\theta} - \dot{\theta}_6) \sin(\theta - \theta_6)}{2} + \frac{m_8l_g l_8 \ddot{\theta} \cos(\theta - \theta_6 - \theta_8)}{2} + 2m_8l_6l_8\ddot{\theta}_6 \cos \theta_8 - \frac{m_8l_g l_8 \dot{\theta} (\dot{\theta} - \dot{\theta}_6 - \dot{\theta}_8) \sin(\theta - \theta_6 - \theta_8)}{2} - 2m_8l_6l_8\dot{\theta}_6\dot{\theta}_8 \sin \theta_8 + m_8l_6l_8\ddot{\theta}_8 \cos \theta_8 - m_8l_6l_8\dot{\theta}_8^2 \sin \theta_8 - \frac{m_6l_g l_6 \dot{\theta} \ddot{\theta}_6 \sin(\theta - \theta_6)}{2} - \frac{m_8l_g l_6 \dot{\theta} \ddot{\theta}_6 \sin(\theta - \theta_6)}{2} - \frac{m_8l_g l_8 \dot{\theta} (\dot{\theta}_6 + \dot{\theta}_8) \sin(\theta - \theta_6 - \theta_8)}{2} + m_6gl_6 \cos \theta_6 + m_8gl_6 \cos \theta_6 + m_8gl_8 \cos(\theta_6 + \theta_8)$$

$$\tau_7 = m_7l_7^2\ddot{\theta}_5 + m_7l_7^2\ddot{\theta}_7 - m_7l_7\ddot{x} \sin(\theta_5 + \theta_7) + m_7l_7\ddot{y} \cos(\theta_5 + \theta_7) - \frac{m_7l_g l_7 \ddot{\theta} \cos(\theta - \theta_5 - \theta_7)}{2} + \frac{m_7l_g l_7 \dot{\theta} (\dot{\theta} - \dot{\theta}_5 - \dot{\theta}_7) \sin(\theta - \theta_5 - \theta_7)}{2} + m_7l_5l_7\ddot{\theta}_5 \cos \theta_7 - m_7l_5l_7\dot{\theta}_5\dot{\theta}_7 \sin \theta_7 + \frac{m_7l_g l_7 \dot{\theta} (\dot{\theta}_5 + \dot{\theta}_7) \sin(\theta - \theta_5 - \theta_7)}{2} + m_7l_5l_7\dot{\theta}_5(\dot{\theta}_5 + \dot{\theta}_7) \sin \theta_7 + m_7gl_7 \cos(\theta_5 + \theta_7)$$

$$\tau_8 = m_8l_8^2\ddot{\theta}_8 + m_8l_8^2\ddot{\theta}_6 - m_8l_8\ddot{x} \sin(\theta_6 + \theta_8) + m_8l_8\ddot{y} \cos(\theta_6 + \theta_8) + \frac{m_8l_g l_8 \ddot{\theta} \cos(\theta - \theta_6 - \theta_8)}{2} - \frac{m_8l_g l_8 \dot{\theta} (\dot{\theta} - \dot{\theta}_6 - \dot{\theta}_8) \sin(\theta - \theta_6 - \theta_8)}{2} + m_8l_6l_8\ddot{\theta}_6 \cos \theta_8 - m_8l_6l_8\dot{\theta}_6\dot{\theta}_8 \sin \theta_8 - \frac{m_8l_g l_8 \dot{\theta} (\dot{\theta}_6 + \dot{\theta}_8) \sin(\theta - \theta_6 - \theta_8)}{2} + m_8l_6l_8\dot{\theta}_6(\dot{\theta}_6 + \dot{\theta}_8) \sin \theta_8 + m_8gl_8 \cos(\theta_6 + \theta_8)$$

$$\tau_n = m_nb^2\ddot{\alpha} + m_nb^2\ddot{\theta} - m_nb\ddot{x} \sin(\alpha + \theta) + m_nb\ddot{y} \cos(\alpha + \theta) + m_nab\ddot{\theta} \sin \alpha + m_nab\dot{\theta}\dot{\alpha} \cos \alpha - m_nab\dot{\theta}(\dot{\theta} + \dot{\alpha}) \cos \alpha + m_ngb \cos(\alpha + \theta)$$

4.

$$[J_{R_{shoulder}}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & (-l_g/2) \sin \theta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & (l_g/2) \cos \theta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
[J_{L_{\text{shoulder}}}] &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & (l_g/2)\sin\theta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & (-l_g/2)\cos\theta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
[J_1] &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & (l_g/2)\sin\theta - l_1\sin\theta_1 & -l_1\sin\theta_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & (-l_g/2)\cos\theta + l_1\cos\theta_1 & l_1\cos\theta_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
[J_2] &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & (-l_g/2)\sin\theta - l_2\sin\theta_2 & 0 & -l_2\sin\theta_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & (l_g/2)\cos\theta + l_2\cos\theta_2 & 0 & l_2\cos\theta_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
[J_3] &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & (l_g/2)\sin\theta - l_1\sin\theta_1 - l_3\sin(\theta_1+\theta_3) & -l_1\sin\theta_1 - l_3\sin(\theta_1+\theta_3) & 0 & -l_3\sin(\theta_1+\theta_3) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & (-l_g/2)\cos\theta + l_1\cos\theta_1 + l_3\cos(\theta_1+\theta_3) & l_1\cos\theta_1 + l_3\cos(\theta_1+\theta_3) & 0 & l_3\cos(\theta_1+\theta_3) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
[J_4] &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & (-l_g/2)\sin\theta - l_2\sin\theta_2 - l_4\sin(\theta_2+\theta_4) & 0 & -l_2\sin\theta_2 - l_4\sin(\theta_2+\theta_4) & 0 & 0 & -l_4\sin(\theta_2+\theta_4) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & (l_g/2)\cos\theta + l_2\cos\theta_2 + l_4\cos(\theta_2+\theta_4) & 0 & l_2\cos\theta_2 + l_4\cos(\theta_2+\theta_4) & 0 & 0 & l_4\cos(\theta_2+\theta_4) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
[J_5] &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & (l_g/2)\sin\theta - l_5\sin\theta_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & -l_5\sin\theta_5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & (-l_g/2)\cos\theta + l_5\cos\theta_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & l_5\cos\theta_5 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
[J_6] &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & (-l_g/2)\sin\theta - l_6\sin\theta_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & -l_6\sin\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & (l_g/2)\cos\theta + l_6\cos\theta_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & l_6\cos\theta_6 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
[J_7] &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & (l_g/2)\sin\theta - l_5\sin\theta_5 - l_7\sin(\theta_5+\theta_7) & 0 & 0 & 0 & 0 & -l_5\sin\theta_5 - l_7\sin(\theta_5+\theta_7) & 0 & -l_7\sin(\theta_5+\theta_7) & 0 \\ 0 & 1 & (-l_g/2)\cos\theta + l_5\cos\theta_5 + l_7\cos(\theta_5+\theta_7) & 0 & 0 & 0 & 0 & l_5\cos\theta_5 + l_7\cos(\theta_5+\theta_7) & 0 & l_7\cos(\theta_5+\theta_7) & 0 \end{bmatrix} \\
[J_8] &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & (-l_g/2)\sin\theta - l_6\sin\theta_6 - l_8\sin(\theta_6+\theta_8) & 0 & 0 & 0 & 0 & -l_6\sin\theta_6 - l_8\sin(\theta_6+\theta_8) & 0 & -l_8\sin(\theta_6+\theta_8) \\ 0 & 1 & (l_g/2)\cos\theta + l_6\cos\theta_6 + l_8\cos(\theta_6+\theta_8) & 0 & 0 & 0 & 0 & l_6\cos\theta_6 + l_8\cos(\theta_6+\theta_8) & 0 & l_8\cos(\theta_6+\theta_8) \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

5.

$$[J_n] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -a\cos\theta - b\sin(\alpha + \theta) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -b\sin(\alpha + \theta) \\ 0 & 1 & -a\sin\theta + b\cos(\alpha + \theta) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b\cos(\alpha + \theta) \end{bmatrix}$$



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Periyodik Oluklu bir Kanalda Laminer Pulsatif Akışın Isı Transferi Karakteristiğinin Sayısal Analizi

 Selma AKÇAY^{a,*}

^a Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Çankırı Karatekin Üniversitesi, Çankırı, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: selmaakcay@karatekin.edu.tr

DOI: <https://doi.org/10.29130/dubited.1110551>

ÖZ

Bu çalışmada, periyodik oluklu bir kanalda laminer pulsatif akışın hidrolik ve ısıl davranışları üzerindeki etkileri sayısal olarak analiz edilmiştir. Sayısal çözümler, sonlu hacim yaklaşımı ile analiz yapan FLUENT programı ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, pulsatif genlik (A), Strouhal sayısı (St), Reynolds sayısı (Re) değiştirilmiş ve diğer parametreler sabit tutulmuştur. Oluklu kanalın alt ve üst yüzeyleri $T_w=350K$ sıcaklığında korunmuştur. Sayısal sonuçlar, Nusselt sayısı (Nu), sürtünme faktörü (f) ve termo-hidrolik etkinlik (THE) açısından sürekli akış şartları ile karşılaştırılarak sunulmuştur. Pulsatif parametrelerin ve Reynolds sayısının kanal içindeki davranışını gözlemlemek için anlık akış ve sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Çalışma sonuçları, kanal içindeki akışın kanal geometrisinden, pulsatif parametrelerden ve Reynolds sayısından önemli derecede etkilendiğini göstermiştir. Artan Re ve pulsatif parametreler ile hafif bir basınç düşüşü ile ısı transferinde kayda değer bir iyileşme sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Isı transferi, Oluklu kanal, Pulsatif akış, Sürtünme faktörü

Numerical Analysis of Heat Transfer Characteristic of Laminar Pulsating Flow in a Periodical Corrugated Channel

ABSTRACT

In this study, the effects of laminar pulsating flow on hydraulic and thermal behaviors in a periodical corrugated channel are numerically analyzed. Numerical solutions are realized with the FLUENT software, which analyzes with a finite volume approach. In the study, the pulsating amplitude (A), Strouhal number (St) and Reynolds number (Re) were changed and other parameters were kept constant. The lower and upper surfaces of the corrugated channel are preserved at $T_w = 350$ K. Numerical results are presented in terms of Nusselt number (Nu), friction factor (f), and thermo-hydraulic efficiency (THE) by comparing them with steady flow conditions. Instantaneous flow and temperature distributions are obtained to observe the behaviors of the pulsating parameters and Reynolds number in the channel. The results of the study show that the flow in the channel is significantly affected by the channel geometry, pulsating parameters and Reynolds number. With increasing Re and pulsating parameters, a significant improvement is achieved in heat transfer with slightly pressure drop.

Keywords: Heat transfer, Corrugated channel, Pulsating flow, Friction factor

I. GİRİŞ

Dalgalı ve oluklu yüzey geometrilerinin, ısı transferi iyileştirme çalışmalarında uzun süredir kullanıldığı bilinmektedir. Dalgalı/oluklu yüzeyler hem kendi kendine akış salınımına neden olduğu hem de ısı transfer alanını artırdığı için pek çok mühendislik uygulamalarında tercih edilen pasif ısı transfer yöntemidir. Bu yöntemler, ısıtma ve soğutma sistemleri, hava şartlandırma, ısı değiştiricileri, ulaştırma sektörü, güneş hava ısıtıcısı, kimya ve gıda prosesleri gibi pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [1-7]. Bugüne kadar dalgalı/oluklu kanalların akış ve ısı transferini inceleyen pek çok deneysel ve sayısal çalışma yapılmış ve bu çalışma sonuçları ile dalgalı/oluklu yüzeylerin, düz kanallarla karşılaştırıldığında basınç düşümünde bir miktar artışla birlikte ısı transferi iyileşmesinde önemli bir potansiyele sahip olduğu bildirilmiştir [8-13].

Kurtulmus ve Sahin [14] oluklu kanallarda akış ve ısı transfer davranışını inceleyen bir derleme çalışması sunmuşlardır. Çalışmalarında, akış ve ısı transferini iyileştirmek amacıyla oluklu kanallarda uygulanan aktif ve pasif metodlar üzerine odaklanmışlardır. Ayrıca oluklu kanalların dizayn parametrelerini, enerji sistemlerindeki sonuçlarını ve uygulamalarda karşılaşılan zorlukları araştırmışlar ve tartışmışlardır. Zontul vd. [15] yaptıkları deneysel ve sayısal çalışma ile dikdörtgen oluklu bir kanalda akış ve ısı transferini inceleyerek anlık akış görüntülerini elde etmişlerdir. Çalışma sonucunda, Reynolds sayısı (Re) ile Nusselt sayısının (Nu) ve sürtünme faktörünün (f) arttığını, termohidrolik performansın (THP) ise azaldığını rapor etmişlerdir. Brodnianská ve Kotšmíd [16] farklı dalga şekline sahip bir kanalda ısı transferini deneysel ve sayısal olarak incelemişler ve artan Re ve azalan kanal yükseliği ile ısı transferinin iyileştiğini bildirmişlerdir. Mehta vd. [17] asimetrik dalgalı kanallarda duvar dalga genliğinin akış ve ısı performansına etkilerini laminar akış koşullarında sayısal olarak analiz etmişler ve artan Re ve duvar dalga genliklerinde Nu'nun arttığını bildirmişlerdir.

Doğal taşınımın kullanıldığı pasif yöntemler, her ne kadar ekonomik ve güvenli olsa da bu yöntemle elde edilen taşınım ısı transfer hızı oldukça düşüktür. Daha yüksek ısı transfer hızı gereken uygulamalarda, bu yöntem yetersiz kalmaktadır. Özellikle elektronik cihazlar gibi hassas parçaların etkin bir şekilde çalışabilmesi için uygun sıcaklık koşullarının sağlanması gerekmektedir. Bu nedenle daha yüksek ısı transferi gereken uygulamalarda aktif tekniklerden yararlanılmaktadır. Aktif teknikler, akış ve yüzey salınımları, jet çarpması, manyetik ve elektrik alan uygulamaları, temel akışkana nano boyutlu parçacıkların ilavesi gibi uygulamaları içermektedir. Bu konuda yapılan araştırmalar, bu uygulamaların daha yüksek ısı transferi sağladığını bildirmiştir [18-20].

Sürekli akış yerine pulsatif akışın kullanılması ısı transferi iyileştirmede etkili bir yaklaşımdır. Pulsatif akış, periyodik salınımlar ile homojen bir akış karışımı sağlayarak ısı ve kütle transferini artırmaktadır. Pek çok araştırmacı bu konuda değerli çalışmalar sunmuştur. Bu çalışmaların sonucunda, bir miktar basınç düşüşü ile pulsatif parametrelere bağlı olarak ısı transferinde önemli iyileşme elde edildiği bildirilmiştir [21, 22]. Ye vd. [23] yaptıkları kapsamlı bir derleme çalışmasında, ısı transferi iyileştirmede pulsatif akışın kullanıldığı çalışmaları incelemişlerdir. Esfe vd. [24] ısı transferi içeren ve içermeyen durumlar için pulsatif akış kullanılan uygulamaları kapsayan bir derleme çalışması sunmuştur. Munoz-Camara vd. [25] yaptıkları çalışma ile akışkan olarak propilen glikol kullanıldığı delikli bölmeler içeren dairesel bir kanalda laminar akış şartlarında, salınımlı akışın ısı transfer oranını 3-5 kat artırdığını bildirmişlerdir.

Aktif ve pasif ısı transferi iyileştirme tekniklerinin birlikte kullanılması sistemin termal performansını artırmada daha etkili olabilir. Birleşik teknikler olarak adlandırılan bu yöntem, aktif ve pasif yöntemlerden daha yüksek ısı transfer artışına sahiptir. Son yıllarda, ısı transferi iyileştirme konusunda birleşik yöntemlere olan ilgi artmıştır. Dalgalı/oluklu kanallarda pulsatif akış şartlarında akış ve ısı transferi davranışları incelemek için pek çok araştırma yapılmış ve pulsatif parametrelerin kanal geometrisine ve diğer akış özelliklerine bağlı olarak ısı performansını arttırdığı kanıtlanmıştır [26-33]. Akdag vd. [34-36] yaptıkları üç ayrı çalışma ile sinusoidal, trapezoidal ve üçgen dalgalı kanallarda laminar pulsatif akış şartlarında akış ve ısı transferini araştırmışlar ve artan pulsatif parametreler ve Re

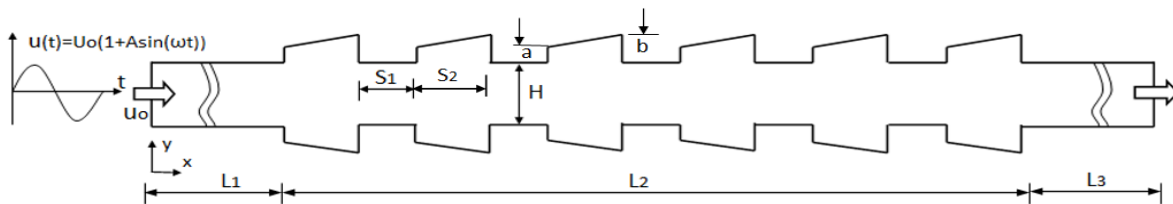
ile ısı performansının arttığını belirterek sürtünme kaybının da bir miktar yükseldiğini bildirmişlerdir. Pan vd. [37] deneysel ve sayısal çalışmaları ile kare oluklu bir kanalda pulsatif akışın, akış ve ısı transferi üzerindeki etkilerini incelemişler ve artan genlikle birlikte ısı iyileşmenin arttığını bildirmişlerdir. Kurtulmus ve Sahin [38] sinusoidal dalgalı bir kanalda, türbülanslı pulsatif akış şartlarında $0,11 \leq St \leq 2,07$ aralığı için hidrolik ve ısı davranışlarını deneysel ve sayısal olarak araştırmışlar ve en yüksek ısı transferi iyileşmesinde optimum bir St olduğunu ve artan Re ile pulsatif frekansın etkilerinin azaldığını rapor etmişlerdir. Hoang vd. [39] V-şeklinde oluklu bir kanalda pulsatif akış şartlarında basınç düşüşü ve ısı transfer özelliklerini, farklı Reynolds sayılarında, pulsatif genlik ($A \leq 1,0$) ve pulsatif frekans değerlerinde ($0,0 \leq St \leq 0,79$) sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, pulsatif akışın sürekli akış koşullarına göre ısı transferini önemli derecede iyileştirdiğini ve ısı performansının 1,4 kat arttığını bildirmişlerdir. Aslan vd. [40] üçgen oluklu bir kanalda akış salınımlarının ısı transferi ve sürtünme faktörü üzerindeki etkilerini türbülanslı akış için sayısal olarak analiz etmişlerdir. Reynolds sayısının artması ile Nusselt sayısının azaldığını, sürtünme faktörünün ise arttığını, ayrıca artan salınım frekansı ile Nusselt sayısının, sürtünme faktörünün ve termo-hidrolik performansın arttığını bildirmişlerdir.

Mevcut literatür araştırmasına göre, farklı geometriye sahip oluklu kanallarda sürekli ve pulsatif akış şartlarında akış ve ısı transferini inceleyen pek çok çalışmaya rastlanmaktadır. Bu çalışmaların temel amacı, en yüksek ısı transferini mümkün olan en az basınç düşüşü ile sağlayan kanal geometrisini ve akışla ilgili diğer parametreleri belirlemektir. Bu şartları sağlayan uygun ısı transfer teknolojisi halen araştırılmaktadır ve bu konuda yeni çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışma, farklı geometriye sahip periyodik oluklu bir kanalda akış ve ısı transferi üzerindeki pulsatif akışın etkilerini araştırmaya odaklanmıştır. Yapılan çalışmada periyodik oluklu bir kanalda pulsatif parametrelerin ve Reynolds sayısının hidrolik ve ısı performans üzerindeki etkileri sürekli akış şartları ile karşılaştırılarak sayısal olarak incelenmiştir.

II. SAYISAL ÇALIŞMA

A. SAYISAL MODELİN GEOMETRİSİ

Bu bölümde, sayısal modelin geometrisi detaylı olarak açıklanmıştır. Şekil 1, çalışmada kullanılan periyodik oluklu bir kanalın geometrisini göstermektedir. Kanal yüksekliği $H=12$ mm'dir. Kanalın giriş ve çıkışında ısıtılmamış düz bölümlerin uzunluğu sırasıyla $L_1=5H$ ve $L_3=10H$ olarak düşünülmüştür. Oluklu bölümler arasındaki mesafe $S_1=H$ olarak alınmıştır. Kanalın periyodik genişleyen bölümleri ile ilgili ölçüler $S_2=1,5H$, $a=2$ mm ve $b=5$ mm olarak alınmıştır. Kanalın L_2 uzunluğu altı adet oluklu bölümleri içermektedir. Zontul vd. [15] dikdörtgen oluklu bir kanalın 2B ve 3B simülasyonlarından elde edilen sonuçları, deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlar ve 2B modelin kabul edilebilir doğruluk sağladığını bildirmişlerdir. Bu nedenle, sunulan çalışmada kanalın genişliğinin diğer boyutlara göre yeterince uzun olduğu kabul edilerek simülasyonlar iki boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada tüm geometrik parametreler sabit tutulmuştur.



Şekil 1. Sayısal modelin geometrisi

B. KORUNUM DENKLEMLERİ VE KULLANILAN EŞİTLİKLER

Sayısal çalışmada, akışkan sıkıştırılmaz, tek fazlı ve Newton tipi olup akışkan özelliklerinin değişmediği kabul edilmiştir. Akış, zamana bağlı laminar akış şartlarında gerçekleşmektedir. Yerçekimi ve radyasyonla ısı transferi ihmal edilmiştir. Bu kabuller doğrultusunda korunum denklemleri aşağıda verilmiştir [41, 42].

Süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \quad (1)$$

Momentum denklemi:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \nabla^2 u_j \quad (2)$$

Enerji denklemi:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{1}{RePr} \nabla^2 T \quad (3)$$

Çalışmada ilgili parametreler, Reynolds sayısı (Re), pulsatif frekansı temsil eden Strouhal sayısı (St), pulsatif genlik (A), sürtünme faktörü (f), Nusselt sayısı (Nu) ve termo-hidrolik etkinlik (THE) olarak belirlenmiş ve bu parametreler ile ilgili eşitlikler aşağıda verilmiştir.

Re ve hidrolik çap (D_h) sırasıyla Eşitlik 4 ve Eşitlik 5 ile hesaplanmıştır.

$$Re = \frac{\rho u D_h}{\mu} \quad (4)$$

$$D_h = \frac{4HW}{2(H+W)} \quad (5)$$

Burada, H ve W , sırasıyla kanalın yüksekliğini ve genişliğini, ρ akışkan yoğunluğunu, μ dinamik viskoziteyi, u ise kanal girişinde akışkanın ortalama hızını temsil etmektedir.

Boyutsuz pulsatif frekans olarak kabul edilen Strouhal sayısı Eşitlik 6 ile elde edilmiştir.

$$St = \frac{\omega D_h}{u} \quad (6)$$

Burada, $\omega (=2\pi f)$ radyan cinsinden açısal hızı, f ise frekansı göstermektedir.

Isı transfer miktarı, Nusselt sayısı ile hesaplanmış ve ortalama Nusselt sayısı Eşitlik 7 ile verilmiştir.

$$Nu = \frac{h D_h}{k_f} \quad (7)$$

burada k_f akışkanın ısı iletkenlik katsayısını gösterir, h ise taşınım ile ısı transfer katsayısını temsil etmekte olup Eşitlik 8 ile hesaplanmıştır.

$$h = \frac{Q_{conv}}{A_L \Delta T_{lm}} \quad (8)$$

$$Q_{conv} = mC(\bar{T}_{i,b} - \bar{T}_{o,b}) \quad (9)$$

burada, Q_{conv} , A_L , m ve C sembolleri sırasıyla taşınım ısı transfer hızını, toplam ısı transfer alanını, kütleli debiyi ve özgül ısıyı göstermektedir. Kanaldaki logaritmik sıcaklık farkı (ΔT_{lm}) Eşitlik 10 ile bulunmuştur.

$$\Delta T_{lm} = \frac{(\bar{T}_{i,b} - \bar{T}_{o,b})}{\ln\left(\frac{T_w - \bar{T}_{i,b}}{T_w - \bar{T}_{o,b}}\right)} \quad (10)$$

Burada, $T_{i,b}$, $T_{o,b}$, ve T_w sırasıyla kanal giriş ve çıkışındaki akışkanın ortalama yığın sıcaklığını ve kanal yüzey sıcaklığını temsil etmektedir.

Çevrim ortalamalı Nusselt sayısı (Nu_p) Eşitlik 11 ile hesaplanmıştır. Nu_p için önce kanal uzunluğu boyunca ortalama Nu değerleri elde edilmiş ve daha sonra bu değerlerin bir çevrim boyunca zaman ortalaması hesaplanmıştır.

$$Nu_p = \frac{1}{\tau L} \int_0^\tau \int_{x_o}^L Nu(x,t) dx dt \quad (11)$$

Burada, τ çevrimin zaman periyodunu, L ısıtılmış kanal uzunluğunu, x_o kanal girişindeki adyabatik uzunluğu göstermektedir.

Nusselt sayısına göre hesaplanan ısı transfer performansı (η) Eşitlik 12 ile verilmiştir.

$$\eta = \frac{Nu_p}{Nu_s} \quad (12)$$

Burada, Nu_p ve Nu_s sırasıyla pulsatif akış ve sürekli akış şartlarında hesaplanan Nusselt sayılarını temsil etmektedir.

Yüzey alanının artması ve pulsatif parametreler, her ne kadar ısı transfer hızını artırsa da kanal içindeki sürtünmeler nedeniyle basınç düşüşünü de yükseltecektir. Bu nedenle ısı transferi iyileştirme çalışmaları, basınç düşüşü ile birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Sürtünme faktörü (f) ve boyutsuz sürtünme faktörü (Γ), sırasıyla Eşitlik 13 ve 14 ile hesaplanmıştır.

$$f = \frac{2\Delta P D_h}{\rho u^2 L} \quad (13)$$

$$\Gamma = \frac{f_p}{f_s} \quad (14)$$

burada ΔP kanal giriş ve çıkışı arasındaki basınç farkı, f_p ve f_s ise sırasıyla pulsatif akış ve sürekli akış için hesaplanan sürtünme faktörlerini göstermektedir.

Pulsatif akışın sürekli akışa göre performansı, Nusselt sayısı ve sürtünme faktörüne bağlı olarak hesaplanan termo-hidrolik etkinlik (THE) ile analiz edilmektedir (Eşitlik 15).

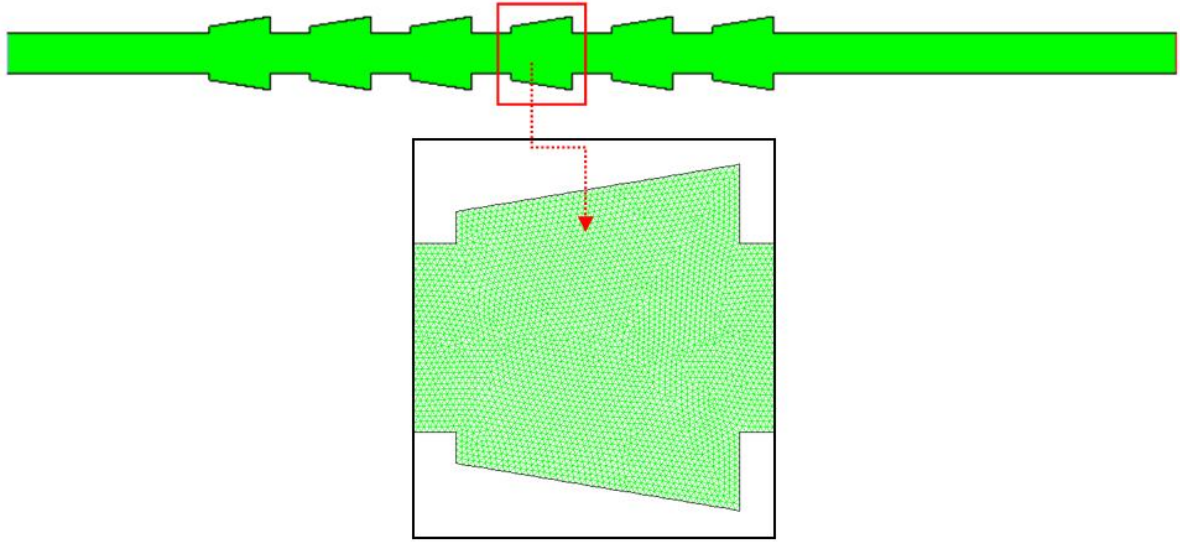
$$THE = \frac{(Nu_p/Nu_s)}{(f_p/f_s)^{1/3}} \quad (15)$$

C. SAYISAL METHOD

Sayısal modelin geometrisi ve ağ yapısı, Gambit programı ile oluşturulmuştur. Şekil 2'de, oluşturulan sayısal modelin ağ yapısı detayı ile birlikte verilmiştir. Farklı eleman yapılarında ağ yapısı oluşturulmuş ve yüksek ağ kalitesi (0.95) nedeniyle üçgen elemanlar tercih edilmiştir. Sayısal

çözümler, FLUENT 15.0 [41] programı yardımıyla gerçekleştirilmiş ve iterasyonlarda hız/basınç eşleşmesi için SIMPLE algoritması kullanılmıştır. Uzamsal ayrıklaştırma için ikinci dereceden ileri fark (upwind) şeması kullanılmıştır. Yakınsama kriteri olarak tüm eşitlikler için 10^{-7} değeri ayarlanmıştır.

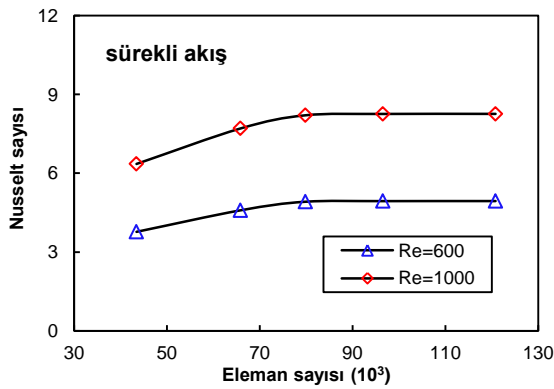
Sayısal çalışma, farklı pulsatif genlikler (A : 0.5, 1 ve 1.5), Strouhal sayıları (St : 2, 5, 8) ve Reynolds sayıları (Re : 200, 600, 1000) için gerçekleştirilmiştir. İş yapan akışkan olarak su kullanılmış ve kanal malzemesi alüminyum seçilmiştir.



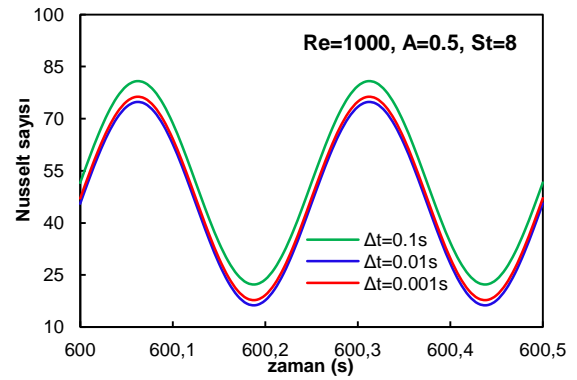
Şekil 2. Sayısal modelin ağ yapısı

D. AĞ ve ZAMAN ADIMI BAĞIMSIZLIK TESTLERİ

Sayısal çalışmada, çözümlerin ağ yapısından bağımsız olduğunu belirlemek için çeşitli eleman sayılarında Nusselt sayıları hesaplanmış ve 125596 eleman sayısından sonra Nusselt sayısındaki değişiminin %1'in altında olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, sayısal modele 125596 eleman sayısındaki ağ yapısı uyarlanmıştır. Sürekli akış şartları için farklı Reynolds sayılarında hesaplanan eleman sayısı ile Nusselt sayısının değişimi Şekil 3a'da sunulmuştur. Çözümlerin zaman adımından (Δt) bağımsız olduğu en uygun zaman adımı boyutunu belirlemek için farklı zaman adımlarında Nusselt sayıları hesaplanmış ve $\Delta t=0,01s$ zaman adımından sonra Nusselt sayısındaki değişiminin oldukça küçük olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3b). Bu nedenle, iterasyonlar $\Delta t=0,01s$ zaman adımında 3600s'ye kadar devam etmiş ve daha sonra akış ve ısı transfer hesaplamaları elde edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3. (a) Eleman sayısı ile Nusselt sayısının değişimi, (b) Farklı zaman adımları için Nusselt sayısının değişimi

E. SINIR ŞARTLARI

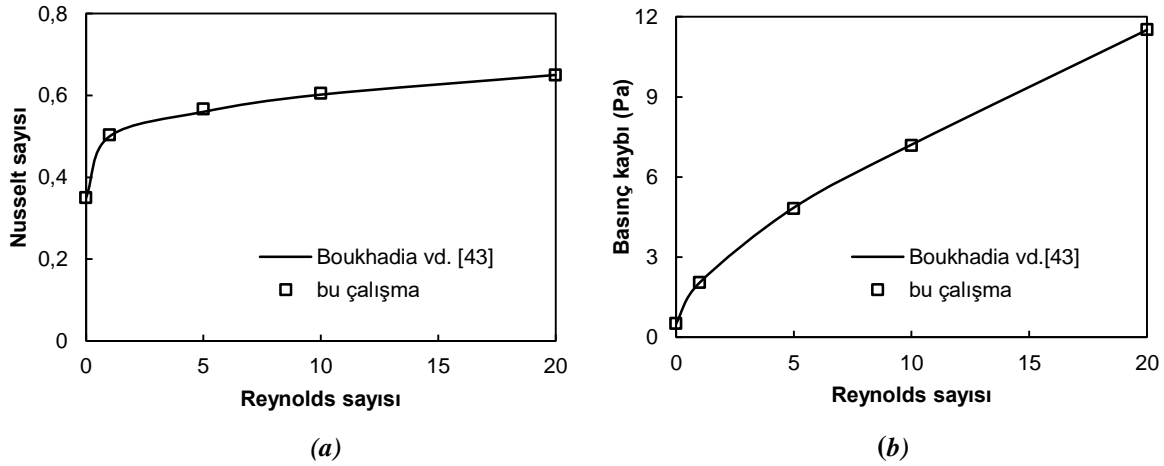
Akışkanın kanala $T_i=293\text{K}$ sıcaklığında uniform olarak girdiği kabul edilmiştir. Kanal girişinde “hız giriş” sınır şartı uygulanmış ve sinusoidal hız profili Eşitlik 16 ile tariflenmiştir.

$$u_{in} = u[1 + A\sin(\omega t)] \quad (16)$$

Burada, u akışkanın kanal girişindeki ortalama hızı, A pulsatif genlik, ω ise açısal hızdır. Açısal hızla bağlı olarak hesaplanan pulsatif frekans, Strouhal sayısı (St) olarak tariflenmiştir. Kanal çıkışında “dışa akış” sınır şartı uygulanmıştır. Bu sınır şartının uygunluğunu kontrol etmek amacıyla orta ekseninde kanal boyunca hızların konuma göre türevi çizdirilmiş ve türev büyüklüklerinin sıfıra eşit olduğu kontrol edilmiştir. Kanalin oluklu alt ve üst yüzeyleri $T_w=350\text{K}$ sıcaklığında sabit tutulmuştur. Kanal giriş ve çıkışındaki düz bölümler için adyabatik sınır şartı ve tüm yüzeyler için kaymaz sınır şartı tariflenmiştir.

III. TARTIŞMA ve SONUÇLAR

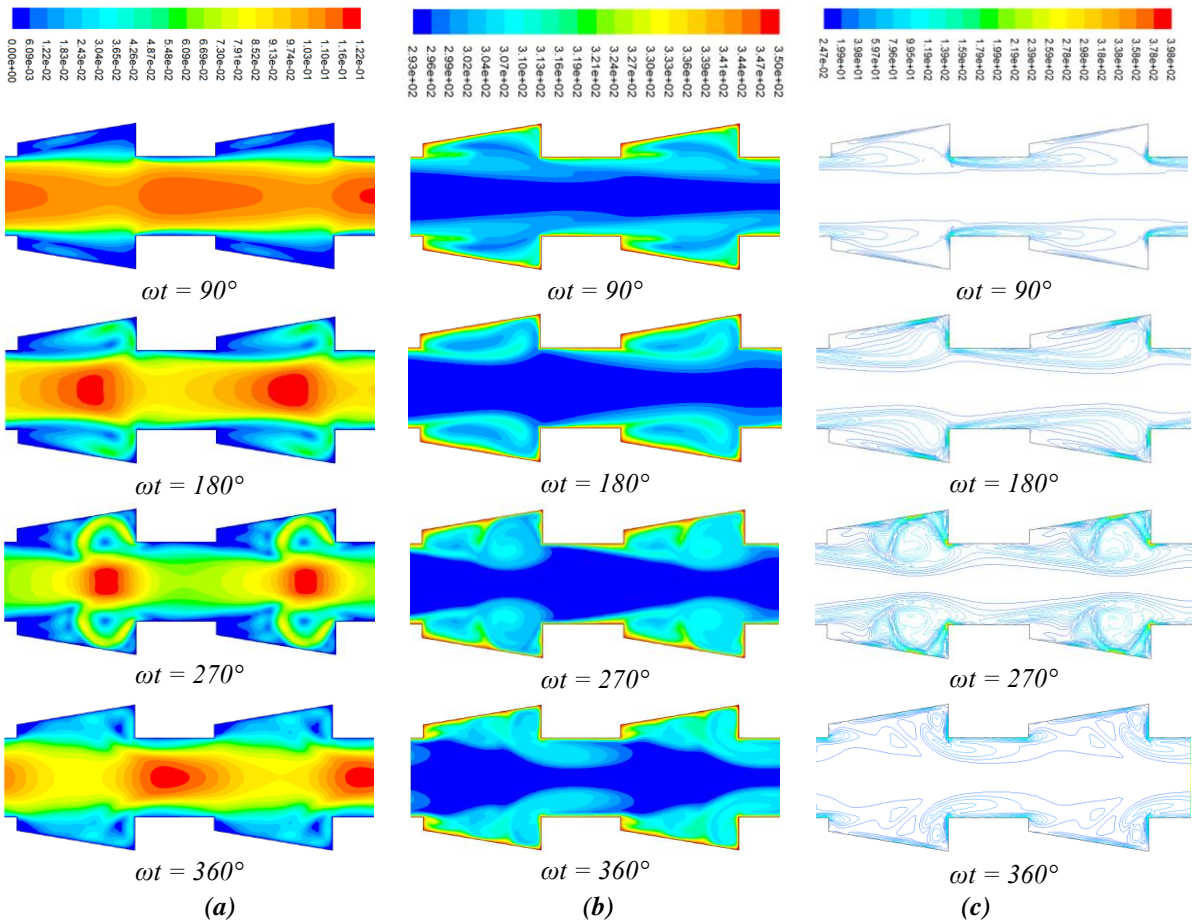
Sayısal çalışmanın doğruluğunu belirlemek için elde edilen çözümler, Boukhadia vd. [43] tarafından yapılan sayısal çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, 12mm hidrolik çapında bir kanal akışında $0 \leq Re \leq 20$ için Nusselt sayısı (a) ve basınç düşüşü (b) hesaplanmıştır. Her iki çalışma sonucu arasındaki uyum Şekil 4 ile gösterilmiştir. Çalışma, aynı zamanda Akcay [44] tarafından, aynı kanal geometrisi kullanılarak yapılan sayısal çalışma ile de doğrulanmıştır (Bakınız Ref. [44]).



Şekil 4. Sayısal çözümün önceki çalışmalarla karşılaştırılması, (a) Re ile Nu, (b) Re ile basınç kaybı (Pa)

Bu bölümde, periyodik oluklu bir kanalda Re ve pulsatif parametrelerin akış ve ısı transferi üzerindeki etkileri sürekli akış şartları ile karşılaştırılarak tartışılmıştır. Pulsatif akış nedeniyle kanal içinde zamana bağlı periyodik bir akış oluşmaktadır. Bu nedenle, ısı transferi de periyodik olarak değişecektir. Isı transferi ve sürtünme faktörü hesaplamalarında bir pulsatif çevrim dikkate alınarak yapılmıştır. Bir pulsatif çevrim $\omega t=2\pi$ radyan veya 360° olarak kabul edilmiştir. Pulsatif akışta, akış ve ısı transfer davranışını gözlemlemek için kanal içinde farklı parametrelerde anlık akış ve sıcaklık görüntüleri elde edilmiştir.

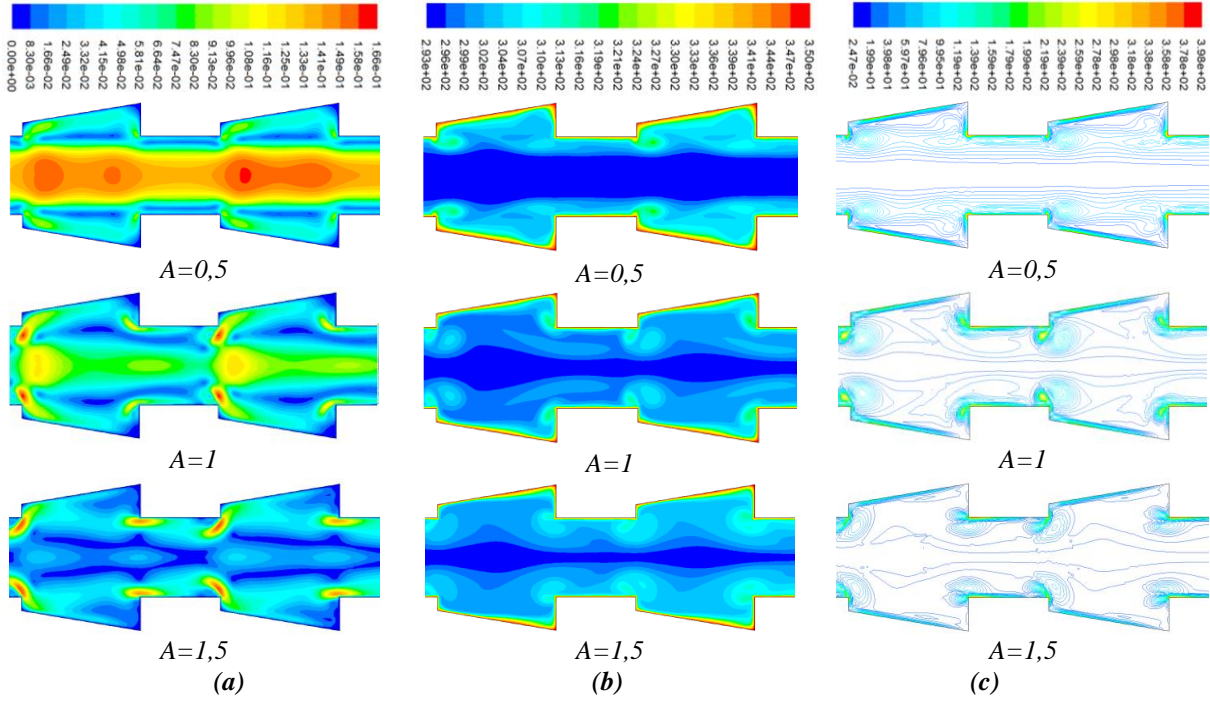
Şekil 5 a, b, c, $Re=1000$, $A=0,5$, $St=2$ için bir pulsatif çevrim boyunca sırasıyla hız, sıcaklık ve vorteks yapılarını göstermektedir. Kanalda bir çevrim boyunca akış ve sıcaklık alanlarının oldukça değiştiği gözlenmektedir. Faz açılarından, $\omega t = 90^\circ$ ve $\omega t = 360^\circ$ 'de akış aşağı yönde hareket ederken, $\omega t = 180^\circ$ ve $\omega t = 270^\circ$ 'de ters yönde yani kanal girişine doğru akmaktadır. $\omega t = 90^\circ$ olduğunda oluklu kanalın genişleyen bölümlerinde yüzeye yakın ve uzunlamasına akış döngüleri oluşmaya başlamıştır ve kanal merkezinde herhangi bir akış çevrimleri oluşmaz. $\omega t = 180^\circ$ faz açısında akış, ters yönde akmaya başlar, ana akış inceler ve akış döngüleri kanalın genişleyen kısmını kaplayarak daha da büyüdüğü görülmüştür, ayrıca bu yapılar kanalın merkezine doğru genişlemiştir. $\omega t = 270^\circ$ 'de akış ters yönde akmaya devam eder, kanaldaki akış yapısı oldukça bozulmuştur. Kanalın genişleyen kısmındaki resirkülasyon bölgeleri oldukça belirgindir. Bu döngüler kanal yüzeylerine yakın sıcak akışkan ile merkezdeki soğuk akışkanı karıştırarak homojen bir akış karışımı sağlamaktadır. $\omega t = 360^\circ$ 'de ise akış, aşağı doğru akmaya başlar ve ters akışta meydana gelen resirkülasyon bölgeleri ana akışa katılmıştır. Pulsatif genlik ve frekans ile her çevrimde bu durum periyodik olarak yinelenir. Akış yapısındaki bu değişiklikler, hız ve ısı sınır tabakalarının gelişimini periyodik olarak engelleyerek ısı direnci azaltır ve böylece ısı transferi iyileşir. Hız alanındaki bu değişimler, sıcaklık alanlarına da yansır. Şekil 5b'de, sıcaklık alanlarından, kanal yüzey sıcaklığının periyodik olarak değiştiği görülmektedir.



Şekil 5. $Re=1000$, $A=0,5$, $St=2$ için bir çevrim boyunca (a) Hız alanları, (b) Sıcaklık dağılımı ve (c) Vorteks yapıları

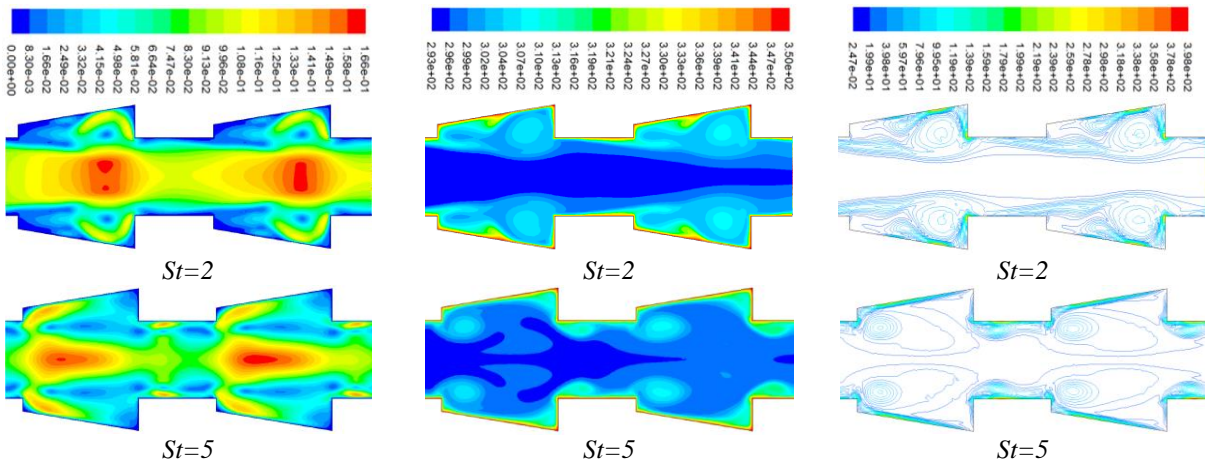
Şekil 6a, b, c'de, $Re=1000$, $St=8$ ve $\omega t=270^\circ$ parametreleri için farklı pulsatif genlikler ile sırasıyla hız, sıcaklık ve vorteks yapıları gösterilmiştir. Düşük genliklerde ($A=0,5$), $\omega t=270^\circ$ faz açısında ana akış, ters yönde hareket ederken kanalın genişleyen bölümlerinde ikincil akış döngülerinin oluştuğu görülmektedir. Artan genlikle birlikte akışta kopmalar meydana gelmiş ve ana akış yapısı tamamen bozulmuştur. Düşük genliklerde, vorteks çizgilerinin daha düz ve kanal yüzeyine yakın olduğu, artan

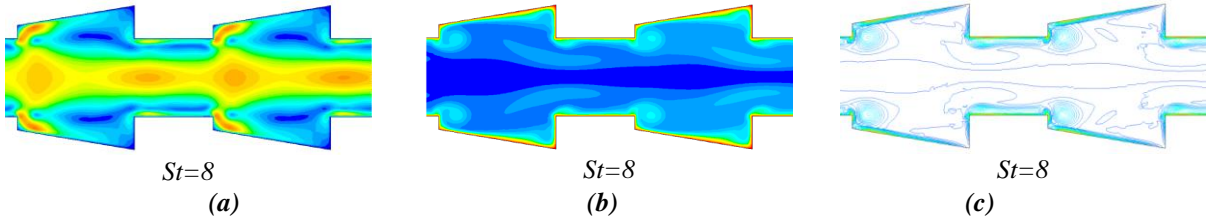
genlikle birlikte kanalın merkezinde ve kanalın genişleyen bölümlerinin başlangıç ve bitimindeki yüzeylerde resikülasyon bölgelerinin yoğunlaştığı gözlenmektedir. Bu durum sıcaklık alanlarını da etkilemekte ve artan genlikle birlikte kanal yüzeyindeki sıcaklık farkı azalmaktadır. $A=1$ durumunda kanal yüzey sıcaklığının $A=0,5$ durumuna göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu şekillerden, akış ve sıcaklık alanlarının pulsatif genlikten oldukça etkilendiği anlaşılmaktadır.



Şekil 6. $Re=1000$, $St=8$ ve $\omega t=270^\circ$ 'de farklı pulsatif genlikler ile (a) Hız alanları, (b) Sıcaklık dağılımları ve (c) Vorteks yapıları

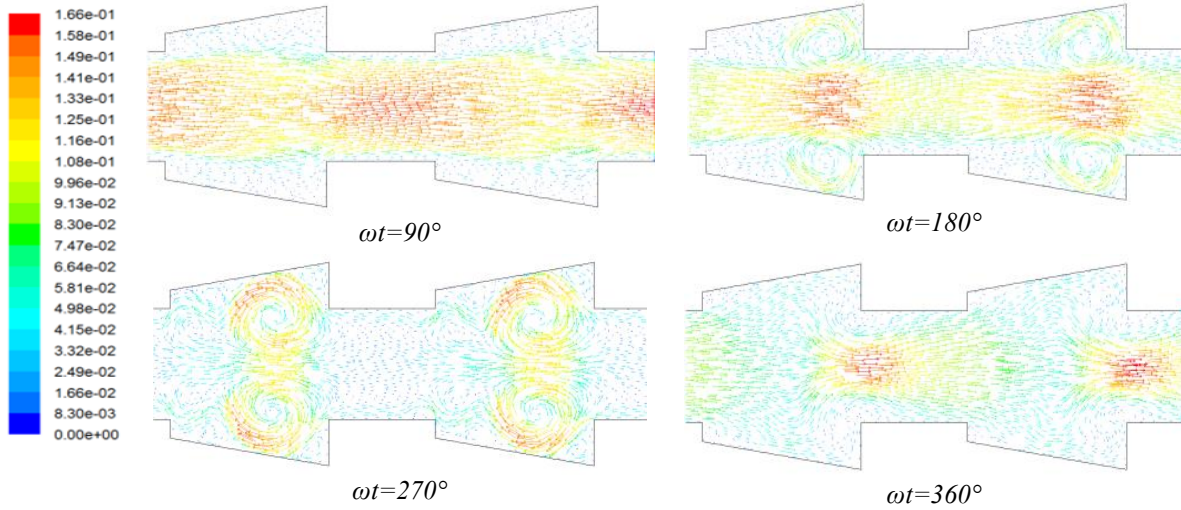
Şekil 7a, b, c ile $Re=1000$ $A=1$, $\omega t=180^\circ$ için farklı Strouhal sayılarında sırasıyla hız, sıcaklık ve vorteks dağılımları verilmiştir. Strouhal sayısı arttıkça ana akış kalınlığı azalarak akışta bozulmaların arttığı görülmektedir. Düşük frekanslarda resikülasyon bölgeleri kanalın genişleyen bölümünde yoğunlaşırken, yüksek frekanslarda kanal içine yayılmıştır. Yüksek Strouhal sayısı, akış içinde pulsatif bileşenlerin sıklığını artırmaktadır, bu durum sıcak olan kanal yüzeylerinin daha hızlı soğumasına neden olacaktır. Yüksek Strouhal sayılarında, kanal yüzeylerinin sıcaklığının daha düşük olduğu görülmektedir. Bu görüntülerden, akış ve ısı transferi iyileştirmede Strouhal sayısının yani pulsatif frekansın önemli bir rolü olduğu söylenebilir.





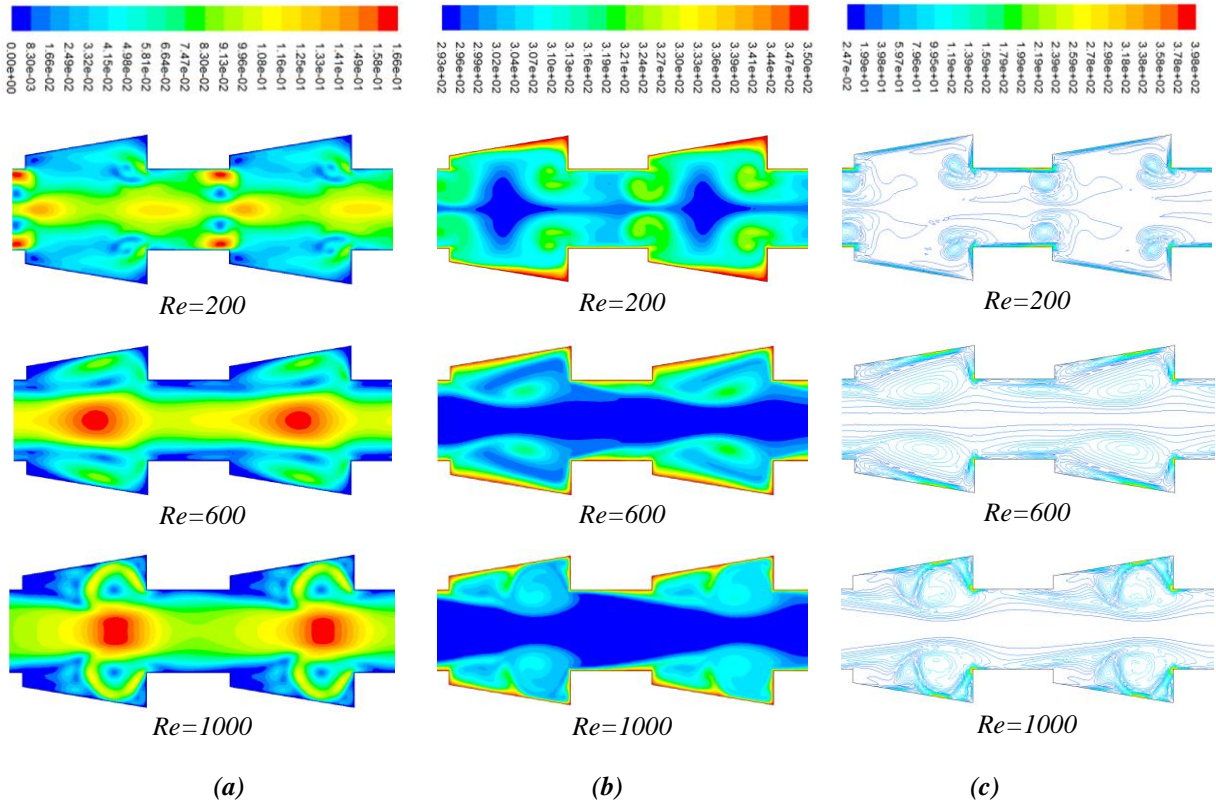
Şekil 7. $Re=1000$ $A=1$, $\omega t=180^\circ$, farklı Strouhal sayıları ile, (a) Hız alanı, (b) Sıcaklık dağılımı ve (c) Vorteks yapıları

Şekil 8 ile $Re=1000$, $A=1$ ve $St=2$ için bir pulsatif çevrim boyunca hız vektörleri sunulmuştur. Her faz açısı ile hız vektörlerinin yapıları da değişmektedir. $\omega t=90^\circ$ faz açısında hız vektörlerinin yönü akış yönünde (kanalın aşağı yönünde) iken, $\omega t=180^\circ$ 'de hız vektörleri ters yöne (kanal girişi yönünde) dönmüştür. Yine bu faz açısında, kanalın genişleyen bölümünde ana akıştan ayrılan ikincil akış döngüleri oluşmaya başlamış ve ana akış incelmıştır. $\omega t=270^\circ$ 'de hız vektörleri yine ters yöndedir, ana akış yapısı tamamen bozulmuştur. Kanalda oluklu kaviteleşmelerin içerisinde, iki büyük resirkülasyon bölgeleri meydana gelmiştir. Kanal yüzeylerine yakın sıcak akışkan tabakası, bu döngüler ile kanal merkezine taşınmaktadır. Kanal merkezindeki daha soğuk akışkan tabakası ile kanal yüzeyine yakın bölgelerdeki sıcak akışkan tabakası karışmaktadır. Bu durum akışın homojen bir şekilde karışmasına neden olarak ısı transfer hızını artırmaktadır. $\omega t=360^\circ$ faz açısında ise hız vektörleri aşağı akış yönüne döner ve böylelikle bir pulsatif çevrim tamamlanmış olur.



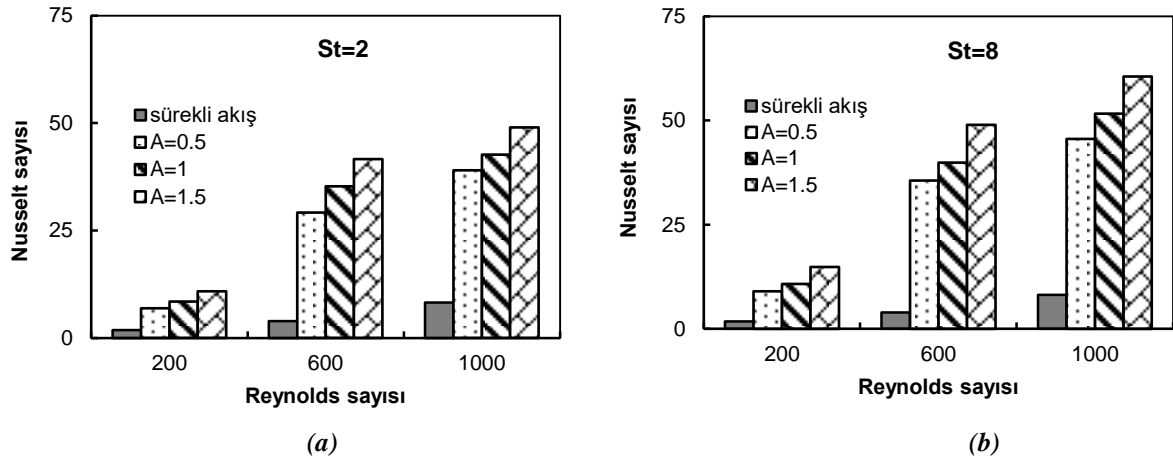
Şekil 8. Bir pulsatif çevrim boyunca hız vektörleri ($Re=1000$, $A=1$ ve $St=2$)

Şekil 9a, b, c'de $A=0,5$, $St=2$ ve $\omega t=270^\circ$ için farklı Reynolds sayılarının hız, sıcaklık ve vorteks alanları üzerindeki etkileri gösterilmektedir. $\omega t=270^\circ$ faz açısında, akış ters yönde akmaktadır. Artan akış hızı, kanaldaki atalet kuvvetlerinin ve kütsel debinin artmasına neden olur. Bu durum, yüksek Reynolds sayılarında sıcak kanal yüzeylerinin daha fazla miktardaki akışkan kütlesi ile temas etmesi anlamına gelmektedir. Artan atalet kuvvetleri ile pulsatif parametrelerin etkisi kanal içindeki akış ve sıcaklık alanlarını oldukça değiştirmektedir. Yüksek Reynolds sayılarında, kanal içindeki akış döngülerinin arttığı ve vorteks yapılarının kanalın tamamına yayıldığı görülmektedir. Ayrıca $Re=200$ 'de, kanal yüzeylerine yakın akışkan sıcaklığının daha yüksek olduğu, artan Reynolds sayılarında yüzey sıcaklığının azaldığı görülmektedir. Yüksek Reynolds sayılarında kanal yüzey sıcaklığının oldukça düştüğü ve ısı transferinin arttığı gözlenmiştir.



Şekil 9. $A=0,5$, $St=2$ ve $\omega t=270^\circ$ 'de farklı Re ile, (a) Hız alanları, (b) Sıcaklık dağılımları, (c) Vorteks yapıları

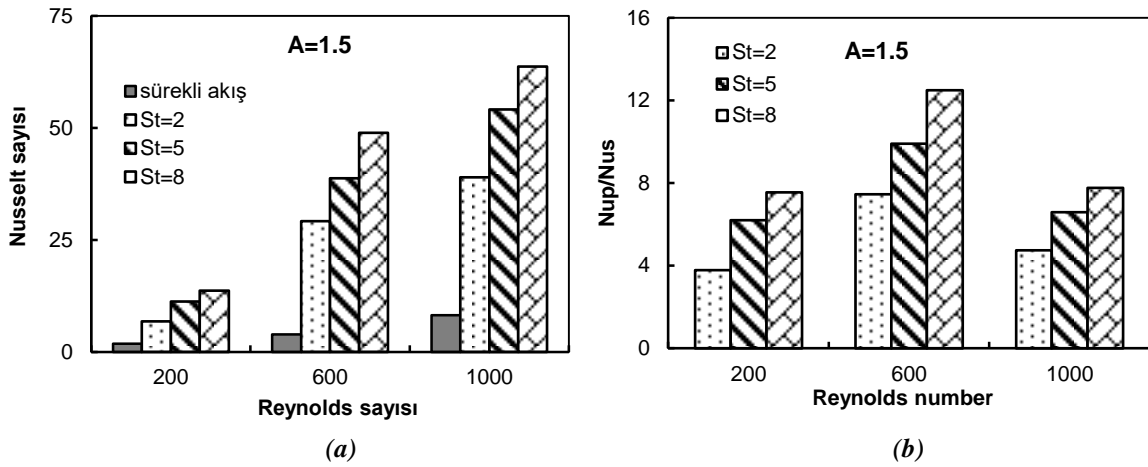
Şekil 10a'da $St=2$ ve 10b'de $St=8$ için A ve Re ile Nu 'nın değişimi sürekli akış şartları ile karşılaştırılarak verilmiştir. Şekillerden, her iki pulsatif frekans için A ve Re ile Nu 'nın arttığı, ancak yüksek Strouhal sayısında bu artışın daha fazla olduğu görülmektedir. En yüksek ısı transferi, $Re=1000$, $A=1,5$ ve $St=8$ parametrelerinde $Nu_p=60,56$ olarak elde edilmiştir.



Şekil 10. Pulsatif genlik ve Reynolds sayısı ile Nusselt sayısının değişimi, (a) $St=2$, (b) $St=8$

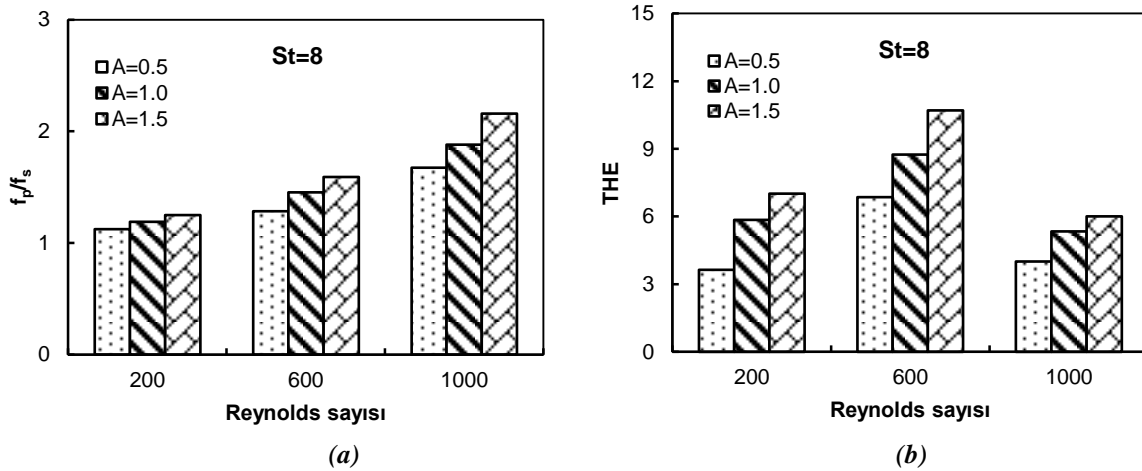
Şekil 11, sabit bir genlik için ($A=1,5$), St ve Re ile Nusselt sayısının değişimini (a) ve ısı transfer performansının (b) değişimi göstermektedir. Şekil 11a'da, artan St ve Re ile Nusselt sayısının sürekli akış şartlarına göre oldukça arttığı gözlenmektedir. Şekil 11b'de St ile ısı transfer performansının yükseldiği, ancak $Re=600$ değerinde bir tepe noktası olduğu görülmektedir. Çünkü $Re=600$ 'de, sürekli akış şartlarında elde edilen Nusselt sayısındaki (Nu_s) artış, $Re=1000$ 'den daha düşüktür ve

dolayısıyla ısı transfer performansındaki artış daha fazla olmaktadır. $Re=1000$ 'de ise Nu_s değeri $Re=600$ 'e göre daha yüksek olması nedeniyle ısı transfer performansındaki artış daha az olmaktadır.



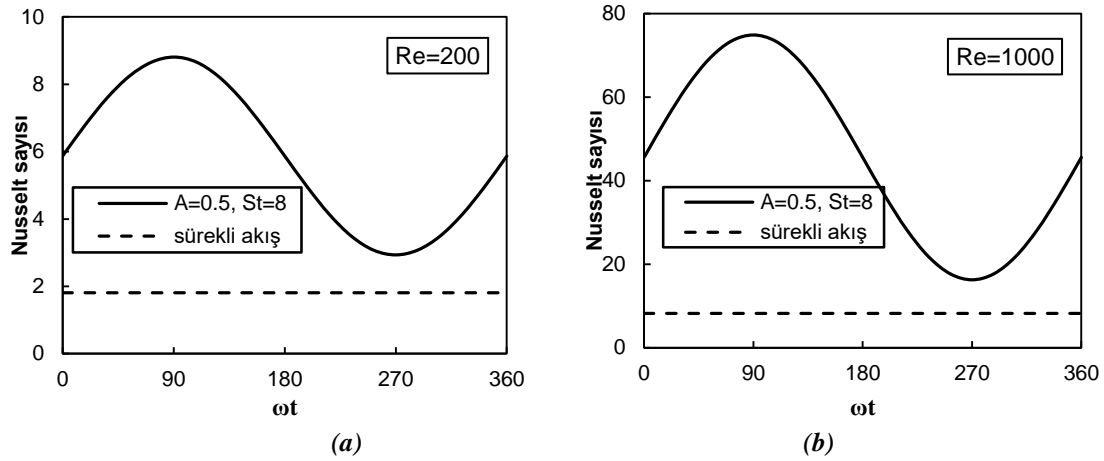
Şekil 11. $A=1,5$ için St ve Re ile, (a) Nusselt sayısı, (b) Isı transfer performansı

Şekil 12'de sabit bir Strouhal sayısı ($St=8$) için A ve Re ile (a) boyutsuz sürtünme faktörünün ve (b) termo-hidrolik etkinliğin değişimi verilmektedir. Artan A ve Re ile boyutsuz sürtünme faktörü artmaktadır (Şekil 12a). En yüksek boyutsuz sürtünme faktörü $Re=1000$, $St=8$ ve $A=1,5$ 'da, $f_p/f_s=2,16$ olarak elde edilmiştir. Şekil 12b'de ise $Re=600$ 'de ısı transfer performansının daha yüksek, boyutsuz sürtünme faktörünün daha az olması nedeniyle THE değeri en yüksek değere ulaşmıştır. En yüksek THE, $Re=600$, $St=8$ ve $A=1,5$ 'de yaklaşık 10,71 olarak bulunmuştur.



Şekil 12. $St=8$ için A ve Re ile, (a) Boyutsuz sürtünme faktörü, (b) Termo-hidrolik etkinlik

Şekil 13'de, $Re=200$ (a) ve $Re=1000$ (b) değerlerinde pulsatif akış ($A=0,5$ ve $St=8$) için bir çevrim boyunca Nusselt sayısının değişimi, sürekli akış şartları ile karşılaştırılarak sunulmuştur. Her iki Reynolds sayısında, bir pulsatif çevrim için Nusselt sayılarının sinusoidal olarak değiştiği görülmektedir. $Re=200$ değerinde pulsatif akışta Nusselt sayısının değişiminin daha küçük bir aralıkta değiştiği, $Re=1000$ 'de ise bu değişimin daha büyük bir aralıkta olduğu gözlenmiştir. Ayrıca her iki Reynolds sayısında, pulsatif akışta sürekli akış şartlarına göre ısı transferinin oldukça yükseldiği, $Re=1000$ 'de bu artışın daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 13. Sürekli akış ve bir pulsatif çevrim için Nusselt sayısının karşılaştırılması, (a) $Re=200$, (b) $Re=1000$

IV. SONUC

Bu çalışmada, periyodik oluklu bir kanalda pulsatif akış şartlarında Reynolds sayısının ve pulsatif parametrelerin, hidrolik ve ısı davranışları üzerindeki etkileri sürekli akış şartlarıyla karşılaştırılarak sayısal olarak analiz edilmiştir. Kanal içinde farklı parametreler için anlık akış ve sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Sayısal sonuçlar, akış ve sıcaklık alanlarının kanal geometrisinden, pulsatif genlik, Strouhal sayısı ve Reynolds sayısından oldukça etkilendiğini göstermiştir. Kanal içinde pulsatif parametrelere ve akış hızına bağlı olarak ısı transferi iyileşmesinde önemli bir rolü olan resirkülasyon bölgelerinin oluştuğu gözlenmiştir. Artan pulsatif genlik, Strouhal sayısı ve Reynolds sayısı ile ısı transferi ve boyutsuz sürtünme faktörü artmıştır. Pulsatif akışta ($Re=1000, A=1,5$ ve $St=8$), sürekli akış şartlarına göre Nusselt sayısının 12 kat, boyutsuz sürtünme katsayısının ise aynı parametrelere göre 2,16 kat arttığı görülmüştür. $Re=600$ 'de THE eğrisi için bir tepe noktası meydana gelmiştir. En yüksek THE ise $Re=600, A=1,5$ ve $St=8$ parametrelerinde 10,71 olarak elde edilmiştir. Bu çalışma ile kanal geometrisine bağlı olarak pulsatif parametrelerin ısı transferi iyileştirmede yüksek bir potansiyele sahip olduğu görülmüştür.

V. KAYNAKLAR

- [1] T. Alam, R.P. Saini, and J.S. Saini, "Use of turbulators for heat transfer augmentation in an air duct –A review," *Renewable Energy*, vol. 62, pp. 689-715, 2014.
- [2] Z. Li, and Y. Gao, "Numerical study of turbulent flow and heat transfer in cross corrugated triangular ducts with delta-shaped baffles," *Int J Heat and Mass Transfer*, vol. 108, pp. 658-670, 2017.
- [3] F. Menasria, M. Zedairia, and A. Moumni, "Numerical study of thermohydraulic performance of solar air heater duct equipped with novel continuous rectangular baffles with high aspect ratio," *Energy*, vol. 133, pp. 593-608, 2017.
- [4] J.A. Modi, and M.K. Rathod, "Comparative study of heat transfer enhancement and pressure drop for fin-and-circular tube compact heat exchangers with sinusoidal wavy and elliptical curved rectangular winglet vortex generator," *Int J Heat and Mass Transfer*, vol. 141, pp. 310-326, 2019.
- [5] G. Surendhar, G. Srinivasan, P. Muthukumar, and S. Senthilmurugan, "Performance analysis

of arc rib fin embedded in a solar air heater,” *Therm Sci Eng Prog*, vol. 23, no. 100891, 2021.

[6] R.K. Ajeel, K. Sopian, and R. Zulkifli, “Thermal-hydraulic performance and design parameters in a curved-corrugated channel with L-shaped baffles and nanofluid,” *Journal of Energy Storage*, vol. 34, no. 101996, 2021.

[7] A.A. Sertkaya, M. Ozdemir, and E. Canli, “Effects of pin fin height, spacing and orientation to natural convection heat transfer for inline pin fin and plate heat sinks by experimental investigation,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 177, no. 121527, 2021.

[8] A.H. Altun, H. Nacak, and E. Canli, “Effects of trapezoidal and twisted trapezoidal tapes on turbulent heat transfer in tubes,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 211, no. 118386, 2022.

[9] M.E. Nakhchi, M. Hatami, and M. Rahmati, “Experimental investigation of performance improvement of double-pipe heat exchangers with novel perforated elliptic turbulators,” *Int J Thermal Science*, vol. 168, no. 107057, 2021.

[10] P. Naphon, and K. Kornkumjayrit, “Numerical analysis on the fluid flow and heat transfer in the channel with V- shaped wavy lower plate,” *Int Commun Heat Mass Transfer*, vol. 35, pp. 839-843, 2008.

[11] H.M. Deylami, N. Amanifard, M. Sanaei, and R. Kouhikamali, “Numerical investigation of heat transfer and pressure drop in a corrugated channel,” *Int J Engineering Transactions A: Basics*, vol. 26, no. 7, pp. 771-780, 2013.

[12] N.E. Davkhar, and N.K. Deshmukh, “Review on analysis of heat transfer and fluid flow characteristics in corrugated duct,” *International Journal of Research Publication and Reviews*, vol. 2, no. 1, pp. 262-268, 2021.

[13] X. Liu, Y. Fu, J. Wang, H. Zhang, and J. Zhu, “Investigation on flow and heat transfer in rectangular cross-section sinusoidal channels,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 176, no. 107490, 2022.

[14] N. Kurtulmus, and B. Sahin, “A review of hydrodynamics and heat transfer through corrugated channels,” *Int Commun Heat Mass Transf*, vol. 108, no. 104307, 2019.

[15] H. Zontul, H. Hamzah, N. Kurtulmuş, and B. Şahin, “Investigation of convective heat transfer and flow hydrodynamics in rectangular grooved channels,” *Int Commun Heat and Mass Transfer*, vol. 126, no. 105366, 2021.

[16] Z. Brodnianská, and S. Kotšmíd, “Intensification of convective heat transfer in new shaped wavy channel configurations,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 162, no. 106794, 2021.

[17] S.K. Mehta, S. Pati, and L. Baranyi, “Effect of amplitude of walls on thermal and hydrodynamic characteristics of laminar flow through an asymmetric wavy channel,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 31, no. 101796, 2022.

[18] M. Kilic, and A. Abdulvahitoğlu, “Numerical investigation of heat transfer at a rectangular channel with combined effect of nanofluids and swirling jets in a vehicle radiator,” *Thermal Science*, vol. 23, no. 6A, pp. 3627-3637, 2019.

[19] F. Selimefendigil, and H.F. Oztop, “MHD pulsating forced convection of nanofluid over parallel plates with blocks in a channel,” *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 157–158,

pp. 726–740, 2019.

[20] S.M. Jalil, “Experimental and numerical investigation of axial heat transfer enhancement by oscillatory flows,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 137, pp. 352-364, 2019.

[21] I.A. Davletshin, A.N. Mikheev, N.I. Mikheev, and R.R. Shakirov, “Heat transfer and structure of pulsating flow behind a rib,” *Int J Heat and Mass Transfer*, vol. 160, no. 120173, 2020.

[22] D. Duan, Y. Cheng, M. Ge, W. Bi, P. Ge, and X. Yang, “Experimental and numerical study on heat transfer enhancement by flow-induced vibration in pulsating flow,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 207, no. 118171, 2022.

[23] Q. Ye, Y. Zhang, and J. Wei, “A comprehensive review of pulsating flow on heat transfer enhancement,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 196, no. 117275, 2021.

[24] M.H. Esfe, M. Bahiraei, A. Torabi, and M. Valadkhani, “A critical review on pulsating flow in conventional fluids and nanofluids: Thermo-hydraulic characteristics,” *Int Commun Heat and Mass Transfer*, vol. 120, no. 104859, 2021.

[25] J. Munoz-Camara, D. Crespi-Llorens, J.P. Solano, and P. Vicente, “Baffled tubes with superimposed oscillatory flow: Experimental study of the fluid mixing and heat transfer at low net Reynolds numbers,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 123, no. 110324, 2021.

[26] T. Nishimura, N. Oka, Y. Yoshinaka, and K. Kunitsugu, “Influence of imposed oscillatory frequency on mass transfer enhancement of grooved channels for pulsatile flow,” *Int J Heat Mass Transfer*, vol. 43, no. 13, pp. 2365-2374, 2000.

[27] C. Herman, and E. Kang, “Experimental visualization of temperature fields and study of heat transfer enhancement in oscillatory flow in a grooved channel,” *Heat Mass Transfer*, vol. 37, no. 1, pp. 87-99, 2001.

[28] D.X. Jin, Y.P. Lee, and D.Y. Lee, “Effects of the pulsating flow agitation on the heat transfer in a triangular grooved channel,” *Int J Heat Mass Transfer*, vol. 50, no. 15–16, pp. 3062-3071, 2007.

[29] D.X. Jin, Y.P. Lee, and D.Y. Lee, “Effects of the pulsating flow agitation on the heat transfer in a triangular grooved channel,” *Int J Heat Mass Transfer*, vol. 50, pp. 3062-3071, 2007.

[30] M. Jafari, M. Farhadi, and K. Sedighi, “Pulsating flow effects on convection heat transfer in a corrugated channel: A LBM approach,” *Int Commun Heat Mass Transfer*, vol. 45, pp. 146-154, 2013.

[31] F. Selimefendigil, and H.F. Oztop, “Forced convection and thermal predictions of pulsating nanofluid flow over a backward facing step with a corrugated bottom wall,” *Int J Heat Mass Transfer*, vol. 110, pp. 231-247, 2017.

[32] H. Huang, Y. Bian, Y. Liu, F. Zhang, H. Arima, and Y. Ikegami, “Numerical and experimental analysis of heat transfer enhancement and pressure drop characteristics of laminar pulsatile flow in grooved channel with different groove lengths,” *Appl Therm Eng*, vol. 137, pp. 632–643, 2018.

[33] N.F. Okechi, and S. Asghar, “Oscillatory flow in a corrugated curved channel,” *European Journal of Mechanics/B Fluids*, vol. 84, pp. 81-92, 2020.

[34] U. Akdag, S. Akcay, and D. Demiral, “Heat transfer enhancement with laminar pulsating

nanofluid flow in a wavy channel,” *Int Commun Heat Mass Transfer*, vol. 59, pp. 17–23, 2014.

[35] U. Akdag, S. Akcay, and D. Demiral, “Heat transfer enhancement with nanofluids under laminar pulsating flow in a trapezoidal-corrugated channel,” *Progress in Computational Fluid Dynamics*, vol. 17, no. 5, pp. 302-312, 2016.

[36] U. Akdag, S. Akcay, and D. Demiral, “Heat transfer in a triangular wavy channel with CuO-water nanofluids under pulsating flow,” *Thermal Science*, vol. 23, no. 1, pp. 191-205, 2019.

[37] J. Pan, Y. Bian, Y. Liu, F. Zhang, Y. Yang, and H. Arima, “Characteristics of flow behavior and heat transfer in the grooved channel for pulsatile flow with a reverse flow,” *Int J Heat and Mass Transfer*, vol. 147, no. 118932, 2020.

[38] N. Kurtulmus, and B. Sahin, “Experimental investigation of pulsating flow structures and heat transfer characteristics in sinusoidal channels,” *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 167, no. 105268, 2020.

[39] V.Q. Hoang, T.T. Hoang, C.T. Dinh, and F. Plourde, “Large eddy simulation of the turbulence heat and mass transfer of pulsating flow in a V-sharp corrugated channel,” *Int J Heat and Mass Transfer*, vol. 166, no. 120720, 2021.

[40] E. Aslan, M. Ozsaban, G. Ozçelik, and H.R. Guven, “A numerical analysis of convection heat transfer and friction factor for oscillating corrugated channel flows,” *Heat Transfer Engineering*, vol. 42, no. 3-4, pp. 181-190, 2021.

[41] ANSYS Inc. ANSYS Fluent user guide & theory guide- Release 15.0, USA, 2015.

[42] E. Canlı, A. Ates, and S. Bilir, "Derivation of dimensionless governing equations for axisymmetric incompressible turbulent flow heat transfer based on standard k-ε model", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 20, no. 6, pp. 1096-1111, 2020.

[43] K. Boukhadia, H. Ameer, D. Sahel, and M. Bozit, “Effect of the perforation design on the fluid flow and heat transfer characteristics of a plate fin heat exchanger,” *Int J Therm Sci*, vol 126, pp. 172-180, 2018.



[44] S. Akcay, “Numerical analysis of heat transfer improvement for pulsating flow in a periodic corrugated channel with discrete V-type winglets,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 134, no. 105991, 2022.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Utilization of FTIR Spectroscopic Method in Classification and Analysis of Mineral Samples Containing Sodium and Potassium

 Fahriye ÖĞÜT^{a,*},  Adnan KENAR^b

^a KİMYA Bölümü, FEN BİLİMLERİ Enstitüsü, Ankara Üniversitesi, Ankara, TÜRKİYE

^b KİMYA Bölümü, FEN Fakültesi, Ankara Üniversitesi, Ankara, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: fogut@ankara.edu.tr

DOI: <https://doi.org/10.29130/dubited.1292115>

ABSTRACT

Feldspar is used as an important raw material in the ceramic, porcelain, and glass industries and as a filling material in the welding electrode, rubber, plastic, and paint industries. The ratio of Na₂O (originated from Na-feldspar) and K₂O (originated from K-feldspar) in feldspar plays a decisive role in many issues, from melting points to usage areas. However, since Na-feldspar and K-feldspar have similar physicochemical properties, it is difficult to separate and analyze them from their natural mineral environment by traditional methods. For this reason, it has become necessary to choose a method that can be applied without separating feldspar species from each other and without damaging the sample. The ATR-FTIR method was preferred because of its ease of sample preparation, measurement without damaging the sample, and providing information about the functional groups and other components in the sample. In this study, using ATR-FTIR (attenuated total reflectance-fourier transform infrared) spectroscopy and multivariate statistical techniques, the percentages of Na₂O and K₂O in feldspar samples were analyzed in a natural matrix environment without any pretreatment, and Na-feldspar and K-feldspar samples were grouped.

Keywords: ATR-FTIR spectroscopy, multivariate analysis, chemometry, feldspar

Sodyum Ve Potasyum İçeren Maden Numunelerinin Sınıflandırılması ve Analizlerinde FTIR Spektroskopik Yöntemin Kullanılması

ÖZET

Feldispat, seramik, porselen ve cam sanayinde önemli bir hammadde olarak; kaynak elektrodu, kauçuk, plastik ve boya sanayinde dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Feldispatın içerdiği Na₂O (Na-feldispat kaynaklı) ve K₂O (K-feldispat kaynaklı) oranı, erime noktasından kullanım alanlarına kadar birçok konuda belirleyici rol oynamaktadır. Fakat Na-feldispat ve K-feldispat benzer fizikokimyasal özelliklere sahip olmaları nedeniyle buldukları doğal mineral ortamından geleneksel yöntemlerle ayrılıp analiz edilmesi güçtür. Bu nedenle feldispat türlerini birbirinden ayırmadan ve numuneye zarar vermeden uygulanabilecek bir yöntem seçilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. ATR-FTIR yöntemi örnek hazırlama kolaylığı, numuneye zarar vermeden ölçüm yapılabilmesi ve numunedeki fonksiyonel gruplar ve diğer bileşenler hakkında bilgi vermesi nedeniyle tercih edilmiştir. Bu çalışmada ATR-FTIR (Fourier dönüşümlü kızılötesi-azaltılmış toplam yansıma) spektroskopisi ve çok değişkenli

istatistiksel teknikler kullanılarak feldspat numunelerindeki Na₂O ve K₂O yüzdeleri hiçbir ön işlem uygulamadan, doğal ortamında analiz edilmiştir. Na-feldspat ve K-feldspat numuneleri sınıflandırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: ATR-FTIR spektroskopisi, çok değişkenli analiz, kemometri, feldspat

Geliş: 03/05/2023, Düzeltme: 28/09/2023, Kabul: 06/11/2023

I. INTRODUCTION

Feldspars are defined as alumina silicates, included in the silicates group, and they are rock minerals that make up 60% of the earth's crust [1], [2]. Feldspars are defined as albite (NaAlSi₃O₈), orthoclase/microcline (KAlSi₃O₈), and anorthite (CaAl₂Si₂O₈), depending on the Na, K, or Ca ratios they contain [3], [4].

Table 1. Chemical Composition of Some Pure Feldspar Minerals [1]

	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂
Albite	11.8	---	---	19.4	68.8
Orthoclase	---	10.9	---	18.4	69.7
Anorthite	---	---	20.1	28.6	43.3

Feldspar, which is an important industrial raw material, is mainly used in the ceramic, porcelain, and glass industries. Moreover, it is used in other sectors, including the paint, plastics, soft abrasives, polish, glaze, and soap industries [5].

The melting temperatures of feldspars are of great importance for the ceramic and glass industries. Although the exact melting points are given in the research, the presence of other feldspar species in the mixtures changes the melting temperatures. The melting temperatures of orthoclase, albite, and anorthite are, respectively, 1200, 1150 and 1500 °C [1].

The chemical compositions of feldspars, especially alkali (K₂O and Na₂O) and alumina contents (Al₂O₃), determine their quality [6]. While alumina increases the strength of glass and ceramic, its alkali content reduces the melting temperature and allows for a shorter firing or melting time. The Na-feldspar mineral (albite) is used as a source of alumina in glass production, while the K-feldspar mineral (microcline or orthoclase) is mostly used in porcelain and ceramic production [4].

Chemical methods such as optical microscopy, electron microscopy, atomic absorption spectroscopy (AAS), x-ray diffraction (XRD), fourier transform infrared spectroscopy (FTIR spectroscopy), raman spectroscopy, thermal analysis (DTA/TGA), and bulk chemistry analysis are employed to ascertain the mineral content of rocks [7]-[13].

The ATR-FTIR (attenuated total reflectance-fourier transform infrared) technique is particularly preferred since it solves key issues with infrared analysis like spectrum repeatability and sample preparation [14]. Obtaining fast results without damaging the sample has made the use of ATR-FTIR widespread [15]. On the other hand, Na-feldspar and K-feldspar spectra overlap in the samples examined and cannot be determined by classical methods. Therefore, it is important to determine both minerals together in the same environment. Recently, multivariate calibration techniques have been frequently used in the simultaneous determination of analytes in samples [16]-[21]. The most commonly used multivariate statistical methods are factor analysis (FA), principal component analysis

(PCA), discriminant analysis (DA), principal component regression (PCR), multiple linear regression (MLR), and partial least squares regression (PLS) [14].

In this study, it is aimed to develop a method for the determination of Na₂O and K₂O with the help of multivariate calibration methods by using ATR-FTIR spectra of various feldspar samples whose Na₂O and K₂O contents are known by analyzing them using classical methods.

II. MATERIALS AND METHODS

A. MATERIALS

A. 1. Instrumentation

A Shimadzu IRAffinity-1 FTIR spectrometer equipped with an ATR unit was used for IR spectra. The IR spectra of each sample were converted into a matrix by applying the code written in Octave 4.2.2, which is largely compatible with MATLAB. Multivariate analysis, calibration, and grouping were performed using the Unscrambler 10.4.1 software (CAMO Software AS, Norway).

A. 2. Reagent

ATR surface was cleaned using acetone to eliminate any contamination from the previous sample. A new background was recorded between each replicate, and the scans were run in triplicate.

A. 3. Samples

The feldspar samples used in this study were kindly obtained from Maden Tetkik Arama Enstitüsü (Mineral Research and Exploration General Directorate) in Türkiye with Na₂O and K₂O contents determined by the atomic spectroscopic method.

B. METHODS

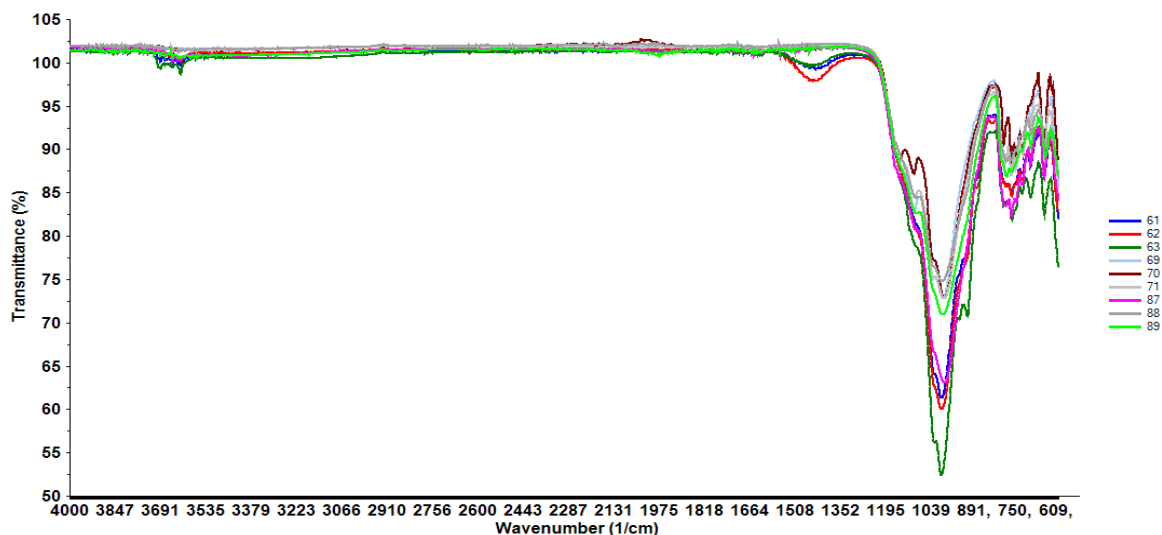
The IR spectra were taken from the feldspar mineral samples without any pretreatment, and the obtained data were converted into a matrix. Quantitative analysis and classification were made using this matrix and multivariate analysis methods in a computer environment.

III. RESULTS AND DISCUSSION

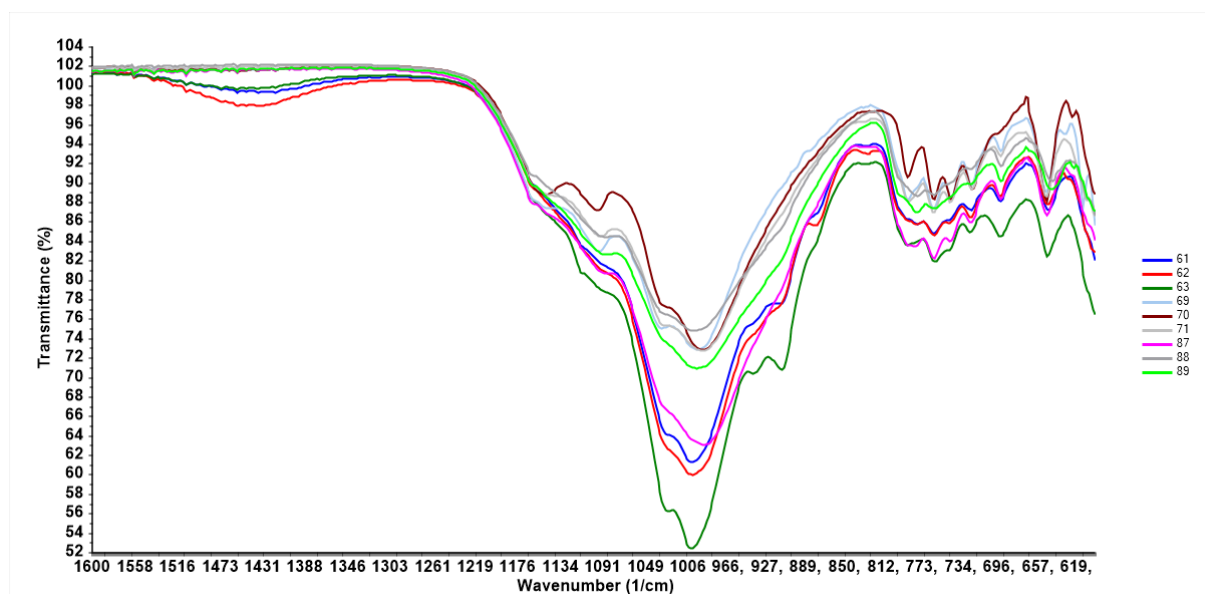
A. EXPERIMENTAL STUDIES

A. 1. Spectroscopic Data

In order to ensure the accuracy and reproducibility of the spectral data, the IR spectra of all mineral samples were taken in triplicate. These data were converted into a matrix using the code written in the Octave 4.2.2 program.



(a)



(b)

Figure 1. (a) In the wavenumber region of 4000-600 (b) In the wavenumber region of 1600-600, the ATR-FTIR spectra of mineral samples used in the calibration set (62, 63, 69, 70, 87, 88) and the estimation set (61, 71, 89)

Looking at the literature survey [22], [23], and [24], the sharp peak at 1000 cm^{-1} , moderate peaks in the range of $600\text{-}650\text{ cm}^{-1}$, $1100\text{-}1200\text{ cm}^{-1}$, and $700\text{-}800\text{ cm}^{-1}$, and low peaks at 1440 cm^{-1} , as shown in Figure 1, are characteristic peaks for feldspars (albite, orthoclase/microcline, and anorthite). However, unlike the other two, the IR spectra of anorthite have fewer peaks that are broader in the literature survey [22], [23], and [24]. The absence of the above-mentioned broader peaks in Figure 1 indicates that anorthite is not present in our samples.

In this figure, it is seen that the most important peak is in the $880\text{-}1300\text{ cm}^{-1}$ wavelength range. The peaks observed around 1000 cm^{-1} are due to the interaction of Si-O-Si and Si-O-Al [25]. The peak at 1002 cm^{-1} shows asymmetric stretching vibrations of Si-O-Si bands. The symmetrical stresses of these bands are observed at 795 cm^{-1} . The absorption bands at 1435 cm^{-1} and 780 cm^{-1} indicate, respectively,

the presence of calcite, and quartz [26], [27]. When we examined the IR spectra of the samples, we determined that they were albite and microcline/orthoclase.

In order to evaluate the differences in mineral content of feldspar samples as a whole, the PCA method was used for qualitative analysis and classification, which is one of the multivariate calibration methods, and the PLS method was used for quantitative analysis. For this purpose, the Unscramler program was used.

A. 2. Grouping Samples

The classification of groups belonging to albite and orthoclase samples was carried out by the PCA method. For samples containing albite and albite+orthoclase, the grouping process was successful in the wave number range of 1420-1470 cm^{-1} .

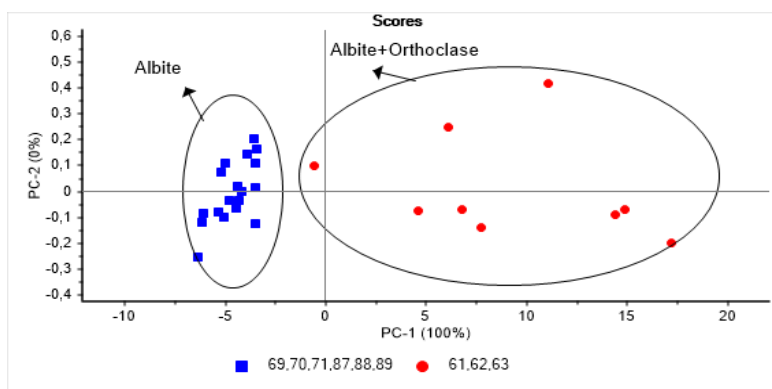


Figure 2. PCA score (1420-1470 cm^{-1}) plot of albite and albite+orthoclase mineral samples

Figure 2 shows the score plot of the PCA model. PC1 (99,99%) and PC2 (0,01%) explain one hundred percent of the total variance.

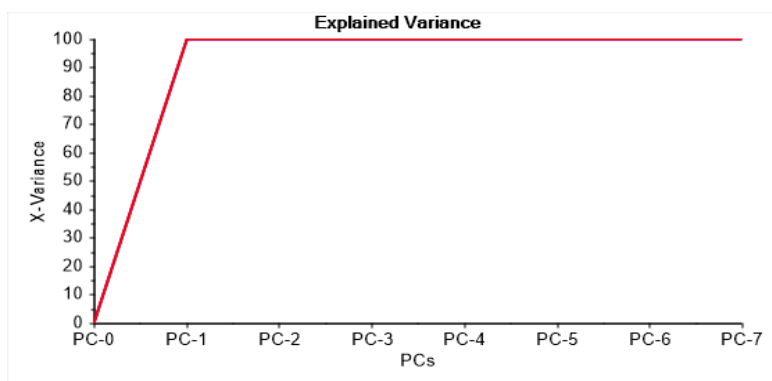


Figure 3. PCA (1420-1470 cm^{-1}) explained variance plot

In Figure 3, it is seen that the calibration and validation values in the first principal component are close to 100% and parallel to each other. The first principal component (PC1) explains about one hundred percent of the variance.

A. 3. Quantitative determination of Na_2O and K_2O with spectroscopic methods and PLS modeling

The data collected from the FTIR spectra were randomly divided into two sets: a calibration set and a prediction set to be used in the development of calibration and prediction models. Six of the samples

(62, 63, 69, 70, 87, and 88) were used for the calibration set, and the calibration graph was drawn. Three of the samples (61, 71, and 89) were used as the estimation set, and quantitative analysis was performed. The cross-validation method was applied to the calibration set.

Table 2. Samples used for the calibration set

Sample Number	Percentage of Na ₂ O in the sample (taken from MTA)	Percentage of K ₂ O in the sample (taken from MTA)
62	2.60	3.50
63	2.90	3.60
69	5.60	0.15
70	8.50	0.33
87	4.40	0.55
88	4.80	0.25

Table 3. PLS Model Performance using ATR-FTIR

	Spectral Region	Spectrum Derivative	Calibration				Validation			
			RMSEC	Slope	Offset	R-square	RMSEV	Slope	Offset	R-square
ATR	All (600-4000 cm ⁻¹)	Normal	0.2526	0.9833	0.0801	0.9833	0.5622	0.9217	0.3200	0.9262
		Faktor 4								
FTIR	(880-1300 cm ⁻¹)	Normal	0.1733	0.9921	0.0377	0.9921	0.3263	1.0051	0.0452	0.9751
		Faktor 5								
	(600-880 cm ⁻¹)	Normal	0.1939	0.9901	0.0472	0.9901	0.4383	0.9396	0.2855	0.9551
		Faktor 6								

RMSEC: Root mean square error of calibration

RMSEV: Root mean square error of cross-validation

ATR-FTIR: Attenuated total reflectance-Fourier transform infrared

In order to determine the Na₂O and K₂O ratios in the feldspar content, three calibration models were developed with the PLS algorithm using the normal ATR-FTIR technique and different spectral regions. To see if the model performed better and if any appreciable reductions in errors could be obtained, various spectral regions were used. The importance of choosing the optimum wavelength range in the relevant literature is emphasized in terms of important points such as eliminating non-correlated components and improving the predictive ability of the established models [28]. The statistical results for three PLS calibration models based on different spectral regions are shown in Table 3. Considering the spectral regions, it was shown that the PLS model using the spectral range (880-1300cm⁻¹) has the best results, with the highest R-square of 0.9921, the lowest REMSEC of 0.1733, and the lowest REMSEV of 0.3263. R² values close to 1 and error values as small as possible were taken into account to select the best calibration model and strong prediction [29].

The predicted residual error sum of squares (PRESS) and factor number of each model were determined by the software.

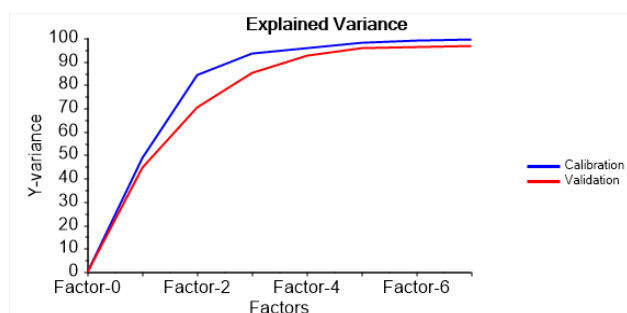


Figure 4. PLS (880-1300 cm^{-1}) explained variance plot

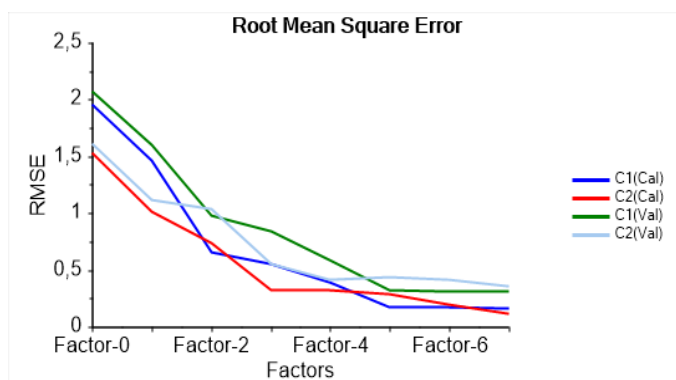


Figure 5. PLS (880-1300 cm^{-1}) root mean square error plot

The aim was to determine the factor value where the calibration and validation plots of the developed pls model were closest to each other and to the 100% value in Figure 4. It was necessary to determine the factor value where the root mean square error of calibration and validation in the pls model developed were closest to each other and to the 0% value in Figure 5. It was seen that REMSEC and REMSEV values continue to near 0% in Factor 5.

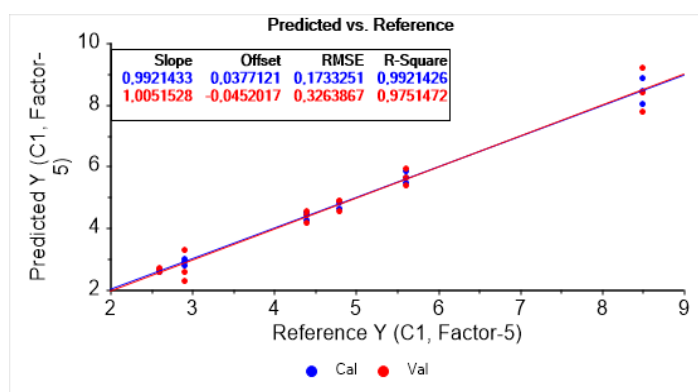


Figure 6. Calibration and validation plot for Na_2O (R^2 0,9921)

Figure 6 shows the plot of predicted and reference values for the best PLS model for Na_2O .

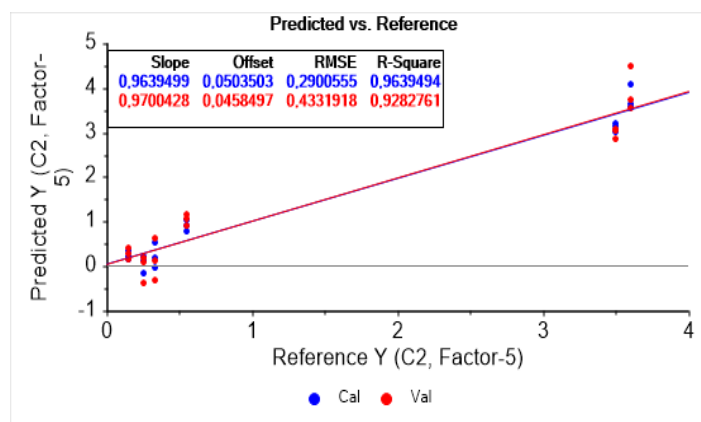


Figure 7. Calibration and validation plot for K_2O (R^2 0,9639)

Figure 7 shows the plot of predicted and reference values for the best PLS model for K_2O .

Table 4. Samples used for the test set

Faktor 5	Results obtained by PLS (880-1300cm ⁻¹)		Results taken from MTA	
	Method			
Sample Number	Na ₂ O percentage	K ₂ O percentage	Na ₂ O percentage	K ₂ O percentage
61	3.077	2.934	2.60	4.00
61	2.901	3.077	2.60	4.00
61	2.734	3.004	2.60	4.00
71	5.359	0.720	5.00	0.42
71	5.650	0.273	5.00	0.42
71	5.590	0.422	5.00	0.42
89	4.831	0.038	4.80	0.25
89	4.799	0.053	4.80	0.25
89	4.844	0.090	4.80	0.25

Table 5. Paired sample t-test for difference in concentration between sample parameters

Parameter	Mean±Std. Error	N	Standard Deviation	d.f.	t _{calculated}	t _{critical} (p=0.05)	Rmks
Na ₂ O %	0.287±0.147	3	0.254	2	1.96	4.30	NS
K ₂ O %	0.378±0.316	3	0.548	2	1.19	4.30	NS

N: Number of sample d.f.: degrees of freedom p: probability level Rmks: Remarks S: Significant
NS: Not Significant t: test statistic

Samples numbered 61, 71, and 89 were used for the calculations in Table 5. The results of the analysis show that the parameters have a low standard deviation. They show no significant variation from the results of the paired sample student t-test for the samples shown in Table 5. These parameters have their calculated values ($t_{\text{calculated}}$) lower than the table values at $P \leq 0.05$. For this reason, there is no significant difference between the results at the 95% confidence interval, according to the null hypothesis.

IV. CONCLUSION

In this study, feldspar minerals were grouped using the ATR-FTIR spectroscopic method together with the chemometric method, and the percentages of Na₂O and K₂O were determined quantitatively. The PCA multivariate analysis technique used for grouping was successful with the normal ATR-FTIR spectrum in the spectral range of 1420-1470 cm⁻¹. For quantitative analysis, samples were randomly divided into two sets. Six of the samples (62, 63, 69, 70, 87, and 88) were used for the calibration set, and the calibration graph was drawn. Three of the samples (61, 71, and 89) were used as the test set, and quantitative analysis was performed. The cross-validation method was applied to the calibration set by the software. Moreover, the PLS multivariate regression technique was applied to the normal ATR-FTIR spectrums at different wavelengths, for example, 4000-600, 1300-880, and 880-600 cm⁻¹, and the result with the highest R square value (close to 1) and minimum error values was found at the 880-1300 wavelength in Table 3. When the PLS (880-1300 cm⁻¹) explained variance plot and PLS (880-1300 cm⁻¹) root mean square error plot were evaluated, factor 5 was reached. The results obtained were quite close to the values previously determined by the atomic spectroscopic method in Table 4. When they were compared with the paired sample t-test, there was no significant difference. In this way, the predictive capacity of the calibration was checked with the analysis of the test set. The developed method can be used as an alternative to standard methods because it is fast, low-cost, and prevents time loss.

V. REFERENCES

- [1] Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü. (2020, 07 Ağustos). *Feldispat (Feldspat)* [Çevrimiçi]. Erişim:<https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/feldispat>.
- [2] R. Bolger, "Feldspar and Nepheline Syenite Turkish Delight in Export Sales," *Industrial Minerals*, No.332, pp. 25-45, 1995.
- [3] İ. Bayraktar, S. Ersayın, Ö.Y. Gülsoy, "Upgrading Titanium Bearing Na-Feldspar by Flotation Using Sulphonates, Succinamate and Soaps of Vegetable Oils," *Minerals Engineering*, vol.1, no.12, pp. 1363-1374, 1997.
- [4] D. Kalyon, Ö. Gülsoy, "Feldispat Kuvars Ayırımında Hidroflorik Asit Kullanılmayan Flotasyon Yöntemlerinin Karşılaştırılması," *Yerbilimleri (Earth Sciences)*, c.26, s.1, ss. 49-59, 2005.
- [5] S. Kulaksız, Y. Özçelik, "Türkiye ve Dünyada Feldspat Üretimi-Fiyat Değişimi ve Politikası," 2. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, Türkiye, 1997, ss. 40-50.
- [6] İ. Gülgönül, M.S. Çelik, "Sodyum ve potasyum feldispatların seçimli ayırımında NaCl'nin etki mekanizması," *itüdergisi/d mühendislik*, c.4, s.4, ss.62-72, 2005.
- [7] H. Kodama, et al, "Quantification of crystalline and noncrystalline material in ground kaolinite by X-ray powder diffraction, infrared, solid-state nuclear magnetic resonance, and chemical-dissolution analyses," *Clays and Clay Minerals*, vol.37, no.4, pp.364-370, 1989.
- [8] S. J. Chipera and D. L. Bish, "Baseline studies of the clay minerals society source clays: Powder X-ray diffraction analyses," *Clays and Clay Minerals*, vol.49, no.5, pp.398-409, 2001.
- [9] J. Srodon, "Quantitative mineralogy of sedimentary rocks with emphasis on clays and with applications to K-Ar dating," *Mineralogical Magazine*, vol.66, no.5, pp.677-687, 2002.
- [10] J. Vogt, et al, "Investigation of the clay fraction <math><2\mu\text{m}</math> of the clay minerals society reference clays," *Clays and Clay Minerals*, vol.50, no.3, pp.388-400, 2002.
- [11] L. Vaculíková, "New possibilities of identification of clay minerals and micas in sedimentary rocks using infrared spectroscopy with Fourier transformation," *Final Report of Post-Doc Project of Czech Science Foundation*, Ostrava, Czech, 2006.
- [12] G. Akar Şen, H. Yılmaz, "Feldispat cevheri karakterizasyonunda flotasyon yönteminin önemi," *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c.24, s.4, ss.359-372, 2022.
- [13] A. Geçer, A. Büyükkutku, M. Karadavut, "ATR-FTIR Analizini Kullanarak Kumtaşı-Şeyl Rezervuarının Hidrokarbon Doğunluğunun Belirlenmesi ve Kumtaşı Rezervuarı Üzerine Kil Etkisi, Trakya Havzası," 69. *Türkiye Jeoloji Kurultayı*, Ankara, Türkiye, 2016, ss. 556-557.
- [14] M. Ritz, L. Vaculikova, E. Plevova, "Application of infrared spectroscopy and chemometric methods to identification of selected minerals," *Acta Geodyn. Geomater.*, Vol.8, No.1(161), pp.47-58, 2011.
- [15] S. Y. Lin, S. L. Wang, "Advances in simultaneous DSC-FTIR microspectroscopy for rapid solid-state chemical stability studies: Some dipeptide drugs as examples," *Adv Drug Delivery Rev.*, vol.64, no.2012, pp.461-478, 2011.
- [16] X. Zhu, L. Chen, J. Pumpanen, M. Keinanen, H. Laudon, A. Ojala, M. Palviainen, M. Kiirikki,

K. Neitola, F. Berninger, "Assessment of a portable UV-Vis spectrophotometer's performance for stream water DOC and Fe content monitoring in remote areas," *Talanta*, vol.224, no.121919, pp.1-8, 2021.

[17] G. Pekcan Ertokuş, M. Bineci Doğan, "Simultaneous Determination of Binary Drug Components in Pharmaceutical Formulations with Chemometric Methods," *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol.10, no.2, pp.1171-1179, 2020.

[18] A. M. Garcia Rodriguez, A. Garcia de Torres, J. M. Cano Pavon, C. Bosch Ojeda, "Simultaneous determination of iron, cobalt, nickel and copper by UV-visible spectrophotometry with multivariate calibration," *Talanta*, vol.47, no.2, pp.463-470, 1998.

[19] E. Dinç, Ö. Üstündağ, "A New Application of Chemometric Techniques to HPLC Data for the Simultaneous Analysis of a Two-Component Mixture," *Journal of Liquid Chromatography & Related Technologies*, vol.28, no.14, pp.2179-2194, 2005.

[20] H. Bekiroğlu Ataş, A. Kenar, M. Taştekin, "An electronic tongue for simultaneous determination of Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ and NH₄⁺ in water samples by multivariate calibration methods," *Talanta*, vol.217, no.121110, pp.1-12, 2020.

[21] A.Kaba, A. H. Aktaş, "Çeşitli ligandları kullanarak Fe³⁺, Al³⁺ ve Cu²⁺ nin bir arada spektrofotometrik tayinleri için yöntem geliştirilmesi ve elde edilen verilerin en küçük kareler kalibrasyon yöntemi (PLS) ve temel bileşen regresyon (PCR) yöntemi ile değerlendirilmesi," *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c.18, s.1, ss.71-79. (2014).

[22] M. Origlieri. (2023, January 22). *Albite* [Online]. Available: <https://rruff.info/Albite/R050253>

[23] University of Arizona Mineral Museum. (2023, January 22). *Microcline* [Online]. Available: <https://rruff.info/Microcline/R040154>

[24] University of Arizona Mineral Museum. (2023, January 22). *Anorthite* [Online]. Available: <https://rruff.info/Anorthite/R060082>

[25] C. Ferone, B. Liguori, I. Capasso, F. Colangelo, R. Cioffi, E. Cappelletto, R. Di Maggio, "Thermally treated clay sediments as geopolymer source material," *Applied Clay Science*, vol.107, no.C, pp.195-204, 2015.

[26] O. Özbay, "Malkara (Tekirdağ) Yöresindeki Kömüraltı Killerinin Mineralojik-Jeokimyasal İncelemesi," Yüksek lisans tezi, Jeoloji Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, Türkiye, 2014.

[27] J. D. Russell and A. R. Fraser, *Clay Mineralogy: Spectroscopic and Chemical Determinative Methods*, 1st edition, London, U.K.: Chapman and Hall, 1994, ch. 2, pp.11-67.

[28] J. Burger and A. Gowen, Data handling in hyperspectral image analysis," *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol.108, no.1, pp.13-22, 2011.

[29] İ. Tarhan, M.R. Bakır, O. Kalkan, H. Kara, "Multivariate modeling for quantifying adulteration of sunflower oil with low level of safflower oil using ATR-FTIR, UV-visible, and fluorescence spectroscopies: A comparative approach," *Food Analytical Methods*, vol.14, no.2, pp.361-371, 2021.