



e-ISSN: 2149-3367

e-ISSN: 2149-3367

CİLT / VOLUME: XXIII

SAYI / NUMBER: 2

NİSAN / APRIL 2023

FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

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

Afyon Kocatepe Üniversitesi FEN ve MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ

Afyon Kocatepe University
Journal of Science and
Engineering



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

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

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

*Afyon Kocatepe University
Journal of Science and Engineering*

Cilt / Volume 23
Sayı / Number 2

e – ISSN: 2149-3367

NİSAN 2023

APRIL 2023

Derginin Amacı ve İÇeriği

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

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, özgün bilimsel araştırmalar ile uygulama çalışmalarına yer veren bir dergidir. Dergide, fen ve mühendislik bilimlerinde yapılmış deneysel ve teorik ilerlemeleri içeren bilimsel ve özgün araştırma makalesi türündeki çalışmalara yer verilir.

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

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

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

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

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

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

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN VE MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ
Afyon Kocatepe University
Journal of Science and Engineering

İMTİYAZ SAHİBİ/OWNER

İbrahim EROL, Chemistry, Afyon Kocatepe University, (Turkey)
e-mail: ierol@aku.edu.tr

EDİTÖR / EDITOR-IN-CHIEF

Tamer BAYBURA, Survey Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)
e-mail: tbaybura@aku.edu.tr

YARDIMCI EDİTÖR/ ASSOCIATE EDITOR

Hakan ÖZTÜRK, Mathematics, Afyon Kocatepe University, (Turkey)
e-mail: hozturk@aku.edu.tr

ALAN EDİTÖRLERİ / EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ertuğrul ERGÜN, Internet and Information Technologies Management, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

e-mail: ertugrulergun@gmail.com, ertue@aku.edu.tr.

Fatih Onur HOCAOĞLU, Electrical Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

e-mail: fohocaoglu@gmail.com

Hüseyin Ali YALIM, Physics, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

e-mail: hayalim@aku.edu.tr

Hüseyin BAYRAKÇEKEN, Automotive Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

e-mail: bceken@aku.edu.tr

İbrahim Hakkı CİĞERCİ, Molecular Biology and Genetics, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

e-mail: cigerci@aku.edu.tr

İsmail DEMİR, Civil Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

e-mail: idemir@aku.edu.tr

İsmail Sedat BÜYÜKSAĞIŞ, Mining Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

e-mail: sbsagis@aku.edu.tr

İsmail ZORLUER, Civil Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

e-mail: izarluer@aku.edu.tr

Levent ÖZCAN, Biomedical Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

e-mail: leventozcan@aku.edu.tr

Mehmet ÇAKMAKKAYA, Automotive Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

e-mail: cakmakkaya@aku.edu.tr

Mehmet KAHRAMAN, Computer, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

e-mail: kahraman@aku.edu.tr

Mehmet ÖZKAN, Physics, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

e-mail: mozkan@aku.edu.tr

Meltem DİLEK, Chemical Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

e-mail: mdilek@aku.edu.tr

Muhammed YÜRÜSOY, Mechanical Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

e-mail: yurusoy@aku.edu.tr

Mustafa Kemal YILDIZ, Mathematics, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

e-mail: myildiz@aku.edu.tr

Mustafa Serhat BAŞPINAR, Metallurgy and Materials Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

e-mail: sbaspinar@aku.edu.tr

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

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

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

Ramazan ŞEVİK, Food Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)
e-mail: ramazansevik03@yahoo.com

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

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

ADRES/ADDRESS:

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Ahmet Necdet Sezer Kampusu, 03200, AFYONKARAHİSAR
Telefon: 444 03 03 / 1460-1470
Belgegeçer: 0 272 218 14 62
e-posta: fmbd@aku.edu.tr

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

FEN BİLİMLERİ / SCIENCE

BİYOLOJİ / BIOLOGY (10)

Araştırma Makalesi / Research Article Olea europaea L. yaprağından tam uzunlukta CBF1 transkripsiyon faktörünü kodlayan gen homologunun klonlanması Cloning the homologue of gene encoding full-length CBF1 transcription factor from Olea europaea L. leaves Şenay VURAL KORKUT, Munise YURTSEVER, Maide ŞEKER	021001 (292-299)
---	-------------------------

FİZİK / PHYSICS (11)

Araştırma Makalesi / Research Article Alkol-Su Karışımlarının Durulma Sürelerinin NMR Tekniği ile İncelenmesi Investigation of Relaxation Times of Alcohol-Water Mixtures by NMR Technique Cengiz OKAY	021101 (300-305)
Araştırma Makalesi / Research Article Ticari Anyon Değişirme Reçinesinin Cr(VI) Adsorpsiyon Performansı Cr(VI) Adsorption Performance of Commercial Anion Exchange Resin Faysal SELİMOĞLU	021102 (306-315)
Araştırma Makalesi / Research Article Müon-Proton Çarpıştırıcılarında Anormal Yüksüz Üçlü Ayar Bağlaşımının Araştırılması Investigation of Anomalous Neutral Triple Gauge Couplings at Muon-Proton Colliders Serdar SPOR	021103 (316-325)

KİMYA / CHEMISTRY (12)

Araştırma Makalesi / Research Article Acid Red 17, Acid Yellow 11, Direct Yellow 12, Direct Blue 86 ve Mordant Violet 40 boyaalarının karışımını içeren suyun arıtılması için gelişmiş oksidasyon işlemi Advanced oxidation process for treatment of water containing mixture of Acid Red 17, Acid Yellow 11, Direct Yellow 12, Direct Blue 86 and Mordant Violet 40 dyes Murat YILMAZ, Mohamed A. HASSAAN, Ahmed EL NEMR	021201 (326-335)
---	-------------------------

<p>Araştırma Makalesi / Research Article</p> <p>CdSeTe Kuantum Noktaları ile Bromo Krezol Mor Kombinasyonunun Spektrofotometrik Değerlendirmesi</p> <p>The Spectrophotometric Evaluation of Combination of CdSeTe Quantum Dots and Bromocresol Purple</p> <p>Tuna DEMİRCİ, Erdem ELİBOL</p>	<p>021202 (336-343)</p>
<p>Araştırma Makalesi / Research Article</p> <p>Kataranthus Gülü Yapraklarından İzole Edilen Anti-Kanser İlaç Vinblastin'in Kalem Grafit Elektrot Kullanılarak Elektroanalitik İncelenmesi Ve Miktar Tayini</p> <p>Electroanalytical Investigation And Quantification Of The Anti-Cancer Drug Vinblastine Isolated From The Petals Of Kataranthus Rose Using Pencil Graphite Electrode</p> <p>Günay ÖNAL</p>	<p>021203 (344-354)</p>

MATEMATİK & İSTATİSTİK / MATHEMATICS & STATISTICS (13)

<p>Araştırma Makalesi / Research Article</p> <p>Akışkanlar Dinamiğinde Oskolkov Denkleminin Tam Çözümleri</p> <p>Exact Solutions of the Oskolkov Equation in Fluid Dynamics</p> <p>Hülya DURUR</p>	<p>021301 (355-361)</p>
---	--------------------------------

MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ / ENGINEERING

BİLGİSAYAR & BİLİŞİM / COMPUTER & INFORMATICS (51)

<p>Araştırma Makalesi / Research Article</p> <p>Kalp Yetmezliği Hastalarının Sağ Kalım Tahmini: Sınıflandırmaya Dayalı Makine Öğrenmesi Algoritmalarının Bir Uygulaması</p> <p>Prediction of Survival of Heart Failure Patients: An Application of Classification-Based Machine Learning Algorithms</p> <p>Kemal KESKİN, Sinem BOZKURT KESER</p>	<p>025101 (362-369)</p>
<p>Araştırma Makalesi / Research Article</p> <p>Dengesiz Metin Sınıflandırmada Öznitelik Seçim Yöntemlerinin Etkililiği</p> <p>The Effectiveness of Feature Selection Methods for Imbalanced Text Classification</p> <p>Hande TİRYAKİ, Alper Kürşat UYSAL</p>	<p>025102 (370-379)</p>

Araştırma Makalesi / Research Article Dört Eksen Adım Motor Konum Denetimli Üretim Süreci Tasarımı: Deney Seti Donanımı, Yazılımı ve Uygulaması Four-Axis Stepper Motor Position Controlled Manufacturing Process Design: Hardware, Software and Application Burcu KESKİN, İlyas EMİNOĞLU	025201 (380-394)
---	-------------------------

Araştırma Makalesi / Research Article GNSS/Nivelman Verisiyle Yerel Jeoidin Modellenmesinde Polinomlarla Enterpolasyon ve En Küçük Kareler Destek Vektör Makineleri Yöntemlerinin Karşılaştırılması Comparison of Polynomial Interpolation and Least Squares Support Vector Machines Methods for Modelling Local Geoid using GNSS/Levelling Data Merve OCAK, Leyla ÇAKIR	025501 (395-401)
Araştırma Makalesi / Research Article Havran-Balıkesir Fay Zonu Üzerinde Jeodezik Çalışmalar: İlk Sonuçlar Geodetic Measurements on Havran-Balıkesir Fault Zone: First Results Eda Esmâ EYÜBAGİL, İbrahim TİRYAKİOĞLU, Halil İbrahim SOLAK, Hasan Hakan YAVAŞOĞLU, Cemal Özer YİĞİT, Bahadır AKTUĞ, Çağlar ÖZKAYMAK, Mehmet Ali UĞUR, Ece Bengünaz ÇAKANŞİMŞEK, Ertuğrul DEMİRELLİ	025502 (402-416)
Araştırma Makalesi / Research Article Veri Madenciliği Uygulamalarının Web Tabanlı Mekânsal Görsel Analitik Ortamda Sunumu: COVID-19 Aşı Tweet'leri Örneği Presentation of Data Mining Applications in Web Based Geovisual Analytical Environment: Example of COVID-19 Vaccine Tweets Burak ÇAĞLAR, Hüseyin Zahit SELVİ	025503 (417-426)
Araştırma Makalesi / Research Article İHA ile Derin Öğrenme Algoritmaları Kullanılarak Hasarlı Yapıların Tespit Edilmesi Detection of Damaged Structures Using Deep Learning Algorithms with UAV Erdem Emin MARAŞ, Halil İbrahim SARIYILDIZ	025504 (427-437)

Araştırma Makalesi / Research Article Farklı Oranlarda Geri Dönüşümlü Beton Agregaları Kullanılarak Üretilen Betonların Çevresel Etki Değerlendirmelerinin Yapılması Comparison of Environmental Impact Assessments of Concrete Produced Using Recycled Concrete Aggregates that Different Rates Muhammed ULUCAN, Kürşat Esat ALYAMAÇ	025601 (438-447)
Araştırma Makalesi / Research Article Tuzlu Su Etkisindeki Geomembranların Ara Yüzey Kayma Davranışlarının İncelenmesi Investigation of the Interface Shear Behavior of Geomembranes Under the Influence of Salt Water Hasan Fırat PULAT, İnci DEVELİOĞLU	025602 (448-458)

Araştırma Makalesi / Research Article Basıncılı Döküm Yöntemiyle Üretilmiş Mg-Cu Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi Investigation of mechanical properties of Mg-Cu alloys produced by pressure die casting method Hüseyin ŞEVİK, Güven YARKADAŞ	025701 (459-465)
Araştırma Makalesi / Research Article Ni ₂ VAl Bileşiğinin Mekanik, Elastik ve Termodinamik Özelliklerinin İncelenmesi Investigation of Mechanical, Elastic and Thermodynamic Properties of Ni ₂ VAl Compound Tahsin ÖZER, Nihat ARIKAN	025702 (466-473)
Araştırma Makalesi / Research Article Borlanmış DIN 1.2738 Kalıp Çeliğinin Yüzey Özelliklerinin ve Borlama Kinetiğinin İncelenmesi Investigation of Surface Properties and Boronizing Kinetics of Boronized DIN 1.2738 Mold Steel İlyas TÜRKMEN	025703 (474-486)

MADEN & JEOLJİ / MINES, & GEOLOGICAL (58)

Araştırma Makalesi / Research Article Türkiye Madencilik Sektörü İş Kazalarının Yoğunlaşma Analizleriyle Değerlendirilmesi Evaluation of Occupational Accident in the Turkish Mining Industry by Concentration Analysis Adnan KONUK, Sajaweddin SADİD	025801 (487-502)
---	-------------------------

MAKİNE , İMALAT & OTOMOTİV / MACHINERY, MANUFACTURING & AUTOMOTIVE (59)

Araştırma Makalesi / Research Article Araştırma Makalesi / Research Article Cam ve Karbon Elyaf lar ile Oluşturulan Karma Kompozitlerin Çekme Dayanımlarının Analitik ve Nümerik Araştırılması Analytical and Numerical Investigation of the Tensile Strength of Hybrid Composites Created with Glass and Carbon Fibers Mehmet Çağrı TÜZEMEN	025901 (503-511)
Araştırma Makalesi / Research Article Serbest Formlu İnce Cidarlı AA 5083-H111 Alaşımının Frezelenmesinde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkilerini Deneysel ve İstatiksel Değerlendirilmesi Experimental and Statistical Evaluation of the Effects of Cutting Parameters on Surface Roughness in Milling of Freeform Thin-Walled AA 5083-H111 Alloy Barış ÖZLÜ, Uğurcan ÇELİK, Halil DEMİR	025902 (512-522)

MÜHENDİSLİK DİĞER / OTHER ENGINEERING (72)

Araştırma Makalesi / Research Article Işık Yayan Diyot Dizisi ile Işık Mikroskopunda Faz-Kontrast Görüntüleme Phase-Contrast Imaging at Optical Microscope with a Light Emitting Diode Array Nur Efşan KÖKSAL, İlyas ÇANKAYA, Esra ŞENGÜN ERMEYDAN	027201 (523-531)
Araştırma Makalesi / Research Article Travma Sonrası Stres Bozukluğu (TSSB) Tedavisine Yönelik Moleküler Hedefler ve Yeniden Konumlandırılan İlaçlar Molecular Targets and Repositioned Drugs For the Treatment of Post Traumatic Stress Disorder (PTSD) Elif KUBAT ÖKTEM	027202 (532-546)

Cloning of full-length gene encoding homologue of CBF1 transcription factor from *Olea europaea L.* leaves

Munise YURTSEVER¹, Maide ŞEKER², Şenay VURAL KORKUT^{1*}

¹Department of Molecular Biology and Genetics, Faculty of Arts and Science, Yildiz Technical University, Istanbul, Turkey

²Department of Molecular Biology and Genetics, Faculty of Science, Gebze Technical University, Kocaeli, Turkey

e-mail: munise@yildiz.edu.tr

e-mail: maideseker@gmail.com

Corresponding author e-mail: skorkut@yildiz.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2446-9914>

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0013-2516>

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6260-0357>

Geliş Tarihi: 15.11. 2022

Kabul Tarihi: 12.03.2023

Abstract

One of the most prevalent environmental stresses that affects plants physically and physiologically is the low temperature. Since low temperature adversely affects plant productivity Researchers investigated the molecular processes that regulate the effects of cold stress on plants and discovered many cold responsive genes as well as the control mechanisms that regulate them. CBF/DREB (C repeat binding factor/dehydration response element binding factor) transcription factors induces the expression of corresponding genes in plants in response to abiotic stress conditions such as cold, drought and salinity. These transcription factors contribute to plant resistance to stress by activating genes in various pathways. Genes encoding CBF transcription factors were first discovered in *Arabidopsis thaliana* (L.). Later, Gene homologs were isolated and cloned from a variety of plants. They belong to the AP2/EREBP protein family. In the present study, the full-length cDNA encoding homologue of the transcription factor CBF1 was cloned from *Olea europaea L. cv. Gemlik* leaves. A 748 bp long cDNA encodes a hypothetical protein of 224 amino acids. BLAST analysis revealed that the CBF1 sequences of Gemlik cultivar and wild olive were nearly identical. A phylogenetic tree was built using *Olea europaea L. cv. Gemlik* CBF1 sequence.

Keywords

CBF/DREB; *Olea europaea L.*; Gene Cloning ; DNA Sequencing, Phylogenetic analysis

Olea europaea L. yaprağından CBF1 transkripsiyon faktörü homologunu kodlayan tam uzunluktaki genin klonlanması

Öz

Bitkileri fiziksel ve fizyolojik olarak etkileyen en yaygın çevresel streslerden biri düşük sıcaklıktır. Düşük sıcaklık bitki verimliliğini olumsuz etkilediğinden, araştırmacılar soğuk stresinin bitkiler üzerindeki etkilerini düzenleyen moleküler süreçleri araştırmışlar ve soğuğa duyarlı genlerle birlikte bunların kontrol mekanizmalarını da ortaya çıkarmışlardır. CBF/DREB (C tekrar bağlama faktörü/dehidrasyon yanıt elemanı bağlama faktörü) transkripsiyon faktörleri, bitkilerde soğuk, kuraklık ve tuzluluk gibi abiyotik stres koşullarına yanıt olarak ifade edilen genlerin ekspresyonunu indüklemektedir. Bu transkripsiyon faktörleri, çeşitli yollardaki genleri aktive ederek strese karşı bitki direncine katkıda bulunurlar. CBF transkripsiyon faktörlerini kodlayan genler ilk olarak *Arabidopsis thaliana*'da (L.) keşfedildi. Daha sonra çeşitli bitkilerden gen homologları klonlandı. CBF/DREB transkripsiyon faktörleri AP2/EREBP protein ailesi içinde yer alırlar. Bu çalışmada, transkripsiyon faktörü CBF1'in homologunu kodlayan tam uzunluktaki cDNA, *Olea europaea L. cv. Gemlik* yapraklarından klonlanmıştır. 748 bp uzunluğunda cDNA, 224 amino asitlik varsayımsal bir proteini kodlar. BLAST analizi, Gemlik çeşidinin ve yabani zeytinin CBF1 dizilerinin neredeyse aynı olduğunu ortaya çıkardı. *Olea europaea L. cv Gemlik CBF1* dizisi kullanılarak bir filogenetik ağaç oluşturuldu.

Anahtar kelimeler

CBF/DREB; *Olea europaea L.*; Gen Klonlama; DNA dizileme; Filogenetik analiz

1. Introduction

Low temperature causes several mechanical and physical damage to the plants and is one of the major stresses that limit plant growth, productivity, and dispersal (Boyer 1982, Mosa et al. 2017). Cold acclimation is a process by which plants increase their tolerance to low, non-freezing temperatures (Palva and Heino 1997). It causes some changes in gene expression levels. The best understood mechanism of cold acclimation to date is *CBF* (C-repeat binding factor) cold response pathway (Lissarre et al. 2010; Thomashow 2001). CBFs are transcription factors belonging to the AP2/ERF domain of the DNA-binding protein family (Riechmann and Meyerowitz 1998). These transcription factors bind cis-acting regulatory elements termed C repeats/dehydration response elements (CRT/DRE) (Baker et al. 1994; Stockinger et al. 1997). Many cold-responsive genes, such as *COR* (cold-regulated) (Zarka et al. 2003) and *LTI* (low temperature-induced) genes (Yamaguchi-Shinozaki and Shinozaki 1994) contain CRT/DRE elements in their promoter regions. *CBF* expression increases cold tolerance by inducing these genes (Gilmour et al. 1998, Jaglo-Ottosen et al. 1998, Liu et al. 1998). The first *CBF1* transcription factor was cloned from *Arabidopsis thaliana* with yeast hybrid method (Stockinger et al. 1997). In the following years *DREB1A*, *DREB1B*, and *DREB1C* genes were isolated from *Arabidopsis thaliana* which was grown under cold and drought stress. In this study, it was discovered that *DREB1B* clone identical to *CBF1* (Liu et al. 1998). The *CBF1*, *CBF2*, *CBF3* proteins are also named as *DREB1C*, *DREB1B*, and *DREB1A*, respectively (Stockinger et al. 2001). *CBF/DREB1* transcription factor homologues have also been identified in various plants such as wheat, tomato, maize, cotton, and tobacco. (Chen et al. 2008, Guo et al. 2011, Huang et al. 2007, Qin et al. 2004, Zhang et al. 2004). Although *CBF* sequences from different plants are similar in conserved regions, their full-length sequences differ significantly. (Agarwal et al. 2006, Mizoi et al. 2012, Shi et al. 2018). This feature of *CBF* encoding sequences makes their cloning challenging.

Cloning *CBF* genes, particularly in stress-tolerant crop species, will allow researchers to gain a better understanding of the molecular mechanisms behind abiotic stresses like cold, drought, and salinity. Additionally, increasing the expression of the stress-related genes in transgenic plants created utilizing *CBF* genes would aid in the development of plants that are resistant to stress in a variety of environmental conditions. In the present study, we cloned the *CBF1* coding sequence of *Olea europaea* L. var. *europaea* cv. Gemlik which has been exposed to cold stress.

2. 2. Materials and methods

2.1 Plant material and cold treatment

For adaptation, *Olea europaea* cv. Gemlik (olive) seedling was kept at 24 °C under 14-hours photoperiod for one week. For cold treatment, the plants were kept at 4 °C with a 12-hour photoperiod for 24 hours. Under cold stress, olive leaves were harvested at specific intervals of time. Control plants were maintained at 24°C under the 14 hours photoperiod.

2.2 RNA isolation, cDNA synthesis, and genomic DNA isolation

Total RNA was extracted from the leaves of control and cold-treated *Olea europaea* L. cv. Gemlik seedlings using TRIzol Reagent (Invitrogen, USA) according to the manufacturer's instructions. Genomic DNA and chemical residues were removed using mini-columns supplied in RNeasy Mini Kit (Qiagen, The Netherlands). First-strand cDNA synthesis was carried out according to iScript cDNA Synthesis Kit (Bio-Rad, USA) instructions using 3 µg of total RNA.

Genomic DNA was extracted from olive leaves using Plant DNA Preparation Kit (Jena Bioscience, Germany) according to the manufacturer's instructions.

2.3 Polymerase chain reactions (PCR)

Olea europaea L. *europaea* var. *syvestris* (wild olive) *CBF1* sequence (XM_023032549.1) was used for the design of gene-specific forward primer (*CBF.F*) 5'-TCAAGATTAATGGATATTTTC-3' and reverse primer (*CBF.R*) 5'-AGCACGGCTAAGAAGGAACCT-3'. PCR reaction was performed with Advantage 2

Polymerase Mix (Clontech, USA). PCR conditions were 2 min of initial denaturation at 95 °C followed by 35 cycles of 95 °C for 30 sec, 50 °C for 40 sec, 68 °C for 1 min, and a final extension at 68 °C for 5 min. The same conditions were applied for both cDNA and genomic DNA.

2.4 Cloning into *E. coli* and sequencing

PCR fragments were purified from agarose gel using the MEGAquick-spin™ Plus Total Fragment DNA Purification Kit (Intron Biotechnology, South Korea). T/A cloning of purified products was carried out with pGEM-T Easy Vector System (Promega, USA). Plasmids were transformed into the competent *E. coli* DH5α cells prepared according to Inoue ultra-competent cell protocol (Inoue et al. 1990). Colony PCR was used for selecting positive clones. To analyze PCR products, 1% agarose gel was prepared with 1xTBE Buffer and EtBr. λ PstI DNA ladder was loaded to first well as a molecular weight marker and samples were run at 70 V for 40 minutes. Plasmid DNA isolations were made from positive clones using High Pure Plasmid Isolation Kit from Roche. Since PGEM-T Easy Vector has EcoRI restriction sites surrounding the insert site, EcoRI restriction digestion was performed for insert control. Plasmid DNAs were sent for sequencing (Triogen Biotechnology, Türkiye).

2.5 Phylogenetic analysis

Homology analyses were performed with nBLAST and pBLAST tools (<https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>). The Protein sequences with high similarity were selected. MEGA 11 program was used to create a phylogenetic tree using the neighbor-joining (NJ) method with a bootstrap analysis of 1000. The amino acid sequence was translated from the nucleotide sequence with EMBOSS Transeq Tool and the BLAST analysis was performed. Homolog amino acid sequences were selected and aligned with the Multiple alignment tool.

3. Results

3.1 Cloning and sequence analysis

cDNA of *CBF* was cloned both using total RNA and genomic DNA isolated from leaves of olive

seedlings. Total RNA isolated from samples exposed to 4 hours of cold was used to synthesize first-strand cDNA. Gene-specific primers were designed using wild olive nucleotide sequence. RT-PCR and TA cloning method used for cloning. Vector sequences in raw sequence data was extracted using Chromas DNA sequencing software and 748 base pairs long cDNA nucleotide sequence was obtained by RT-PCR (Figure 1). For genomic DNA PCR, the same primers were used, and the amplified DNA fragment was 748 base pairs long (Figure 2). In the agarose gel images shown in Figures 1 and 2, the size of the digested fragment is approximately 800 base pairs. The fragment is cut from the PGEMT easy vector with the EcoRI enzyme, which explains why it is longer than the cDNA size in the results of the sequencing analysis. The vector sequences are introduced during this process.

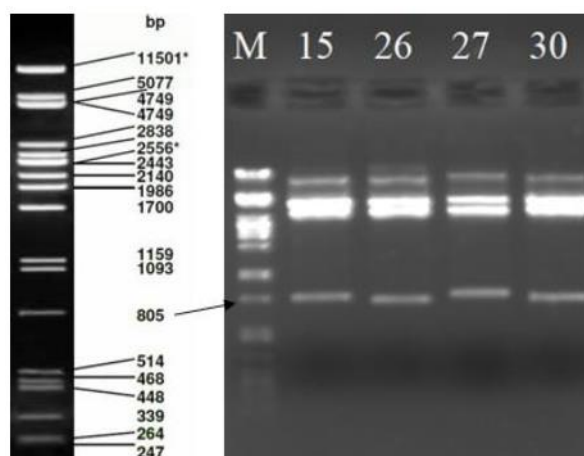


Figure 1. Plasmid insert control from cDNA clone by EcoRI digestion (M: Marker, 15-26-27-30 are different clones, we obtained our gene from 15. clone).

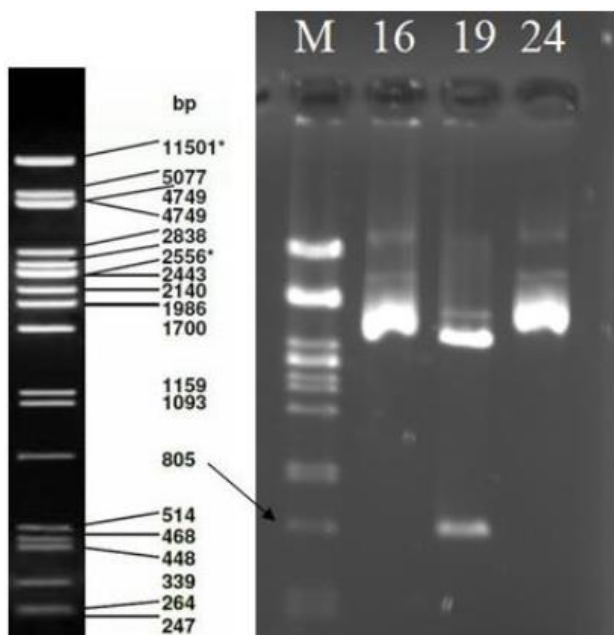


Figure 2. Plasmid insert control from genomic DNA clone by EcoRI digestion (M: Marker, 16-19-24 are different clones, we obtained our gene from 19. clone).

Alignment of these nucleotide sequences showed that there were no introns in the gene. The open reading frame encodes a 224-amino acid-long hypothetical protein (Figure 3). The molecular weight of the hypothetical protein was predicted as 24.7 kDa and its isoelectric point was predicted as 5.22 using EXPASY online tool. Conserved amino acid sequence of AP2 domain ranging from 70-127 had been shown in the alignment of plant CBF sequences (Figure 4). A 3D model of the domain was constructed with SWISS-MODEL online tool (Figure 5).

```

1 ATGGATATTTTCAACAAGTTCAACTCGGACCCAGTTTCTTGTGTG
  M D I F N K F N S D P V S C V
46 CAAGATTTCTCGTCCTTGACTGAAGCACCAGAGTCTTCATCTTTA
  Q D F S S L T E A P E S S S L
91 TCTGATAATAGCAATAGCGTTAAAAGAGCCACTTTTCTGATGAT
  S D N S N S V K R A T F S D D
136 GAAGTTTTGCTAGCTTCAAACAACCCGAAAAGCGTCCGGGAGG
  E V L L A S N N P K K R A G R
181 AAGAAATTCGCGGAGACGAGGCACCTGTATTATCGGGGAGTGAGG
  K K F R E T R H P V Y R G V R
226 CGGAGGAACTCTGGTAAGTGGGTGTGTGAAGTCAGAGAACCCAAC
  R R N S G K W V C E V R E P N
271 AAGAAGTCAAGAATCTGGCTGGGAACCTTTCGCCACAGCGGAAATG
  K K S R I W L G T F A T A E M
316 GCAGCGAGAGCTCACGACGTGGCGGCAATAGCGCTTCGCGGTAGG
  A A R A H D V A A I A L R G R
361 TCAGCGTGTTTAAACTTTGCTGATTGAGCTTGGAAAGCTACCGGTT
  S A C L N F A D S A W K L P V
406 CCGACCTCCACTGATGCTAAGGACATTCAGAAAAGCGGCAGCAGAA
  P T S T D A K D I Q K A A A E
451 GCGCCAAGGCCTTTGGGCAACCAAATTCGAGTCGGATGCGAGG
  A A K A F G Q P N S E S D A R
496 GAGGAAGCTACCGCTATATCGCAGGAAAATGTGTCCTTTTCCGAT
  E E A T A I S Q E N V S F S D
541 GAGGAGGATCTTTTCGGAATGCCTGGATTGATTGACAATATGGCT
  E E D L F G M P G L I D N M A
586 GAAGGGTTGATGCTACCTCCACCTTACTGCATGGACACTGATGTC
  E G L M L P P P Y C M D T D V
631 GTGGATGCATATGCTGACATGTCTTTATGGAGTTATCCATTTAA
  V D A Y A D M S L W S Y S I *
    
```

Figure 3. Full length CBF1 open reading frame.

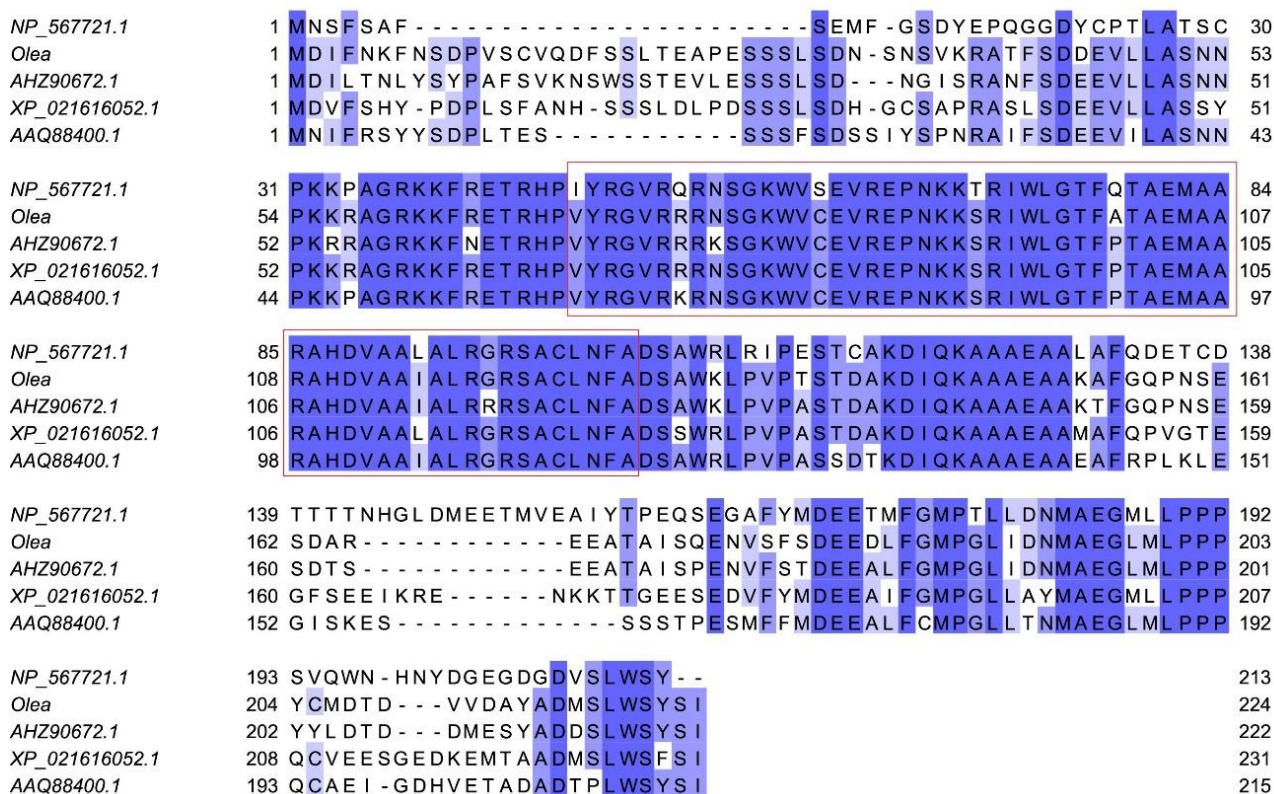


Figure 4. Multiple sequence alignment of CBF/DREB1 proteins. Conserved sequences are shown in blue, AP2 domains are boxed. NP_567721.1 *Arabidopsis thaliana* CBF/DREB1, *Olea europaea* L. var. *europaea* cv. Gemlik CBF1, AHZ90672.1 *Fraxinus mandshurica* CBF/DREB1, XP_021616052.1 *Manihot esculenta* DREB1A-like, AAQ88400.1 *Capsicum annuum* CaCBF1B.

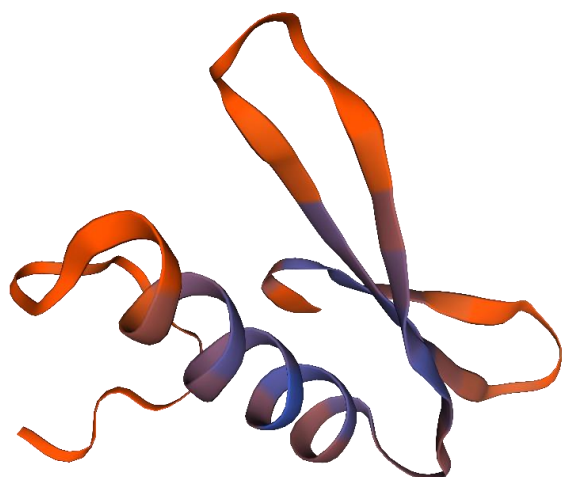


Figure 5. 3D Model of *Olea europaea* cv. Gemlik AP2 domain.

3.2 Phylogenetic analysis

nBLAST analysis revealed that *Olea europaea* cv. Gemlik CBF nucleotide sequence demonstrated 99.87% similarity to *Olea europaea* var. *sylvestris*

DREB1B, 86.83% similarity to *Fraxinus mandshurica* CBF/DREB1.

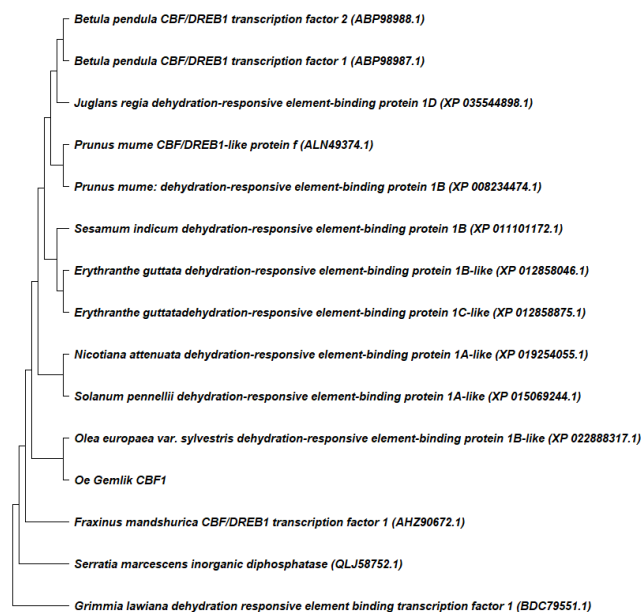


Figure 6. Phylogenetic tree for *Olea europaea* cv. Gemlik CBF1.

A phylogenetic tree was built using MEGA 11 (Figure 6). 14 different *CBFs* were selected according to similarity BLAST analysis and their amino acid sequences retrieved from using the NCBI database. *Grimmia lawiana* moss was used to root the tree. Expectedly *Olea europaea* var. *sylvestris* (wild olive) *CBF1* as the closest relative, showed 100% identity to the *Olea europaea* cv. Gemlik *CBF1* amino acid sequence. Olive *CBF1s* were clustered with *Fraxinus mandshurica* (Manchurian ash) *CBF/DREB1* which had 80.36% identity. Manchurian ash grows in cool-temperate forest ecosystems in East Asia and has excellent cold tolerance (Liang et al. 2019). *Nicotiana attenuata* (coyote tobacco), *Solanum habrochaites* (wild tomato) and *Solanum commersonii* (wild potato) *DREB* genes are clustered together with olive *CBF* with an identity of 73.26%, 72.40%, and 70.20%, respectively (Caffagni et al. 2014, Pino et al. 2013).

4. Discussion

CBF/DREB proteins are the most extensively studied transcription factors involved in the cold response pathway in plants. In this study, we aimed to clone the full-length *CBF1* gene from Gemlik cultivar of olive. Olive seedlings were exposed to cold stress for this purpose, and RNA was extracted from samples collected at various time points. When reverse transcription PCR products of the control RNAs were run on a gel, no band was visible. However, when RNA from plants exposed to 4-h cold stress was used in reverse transcriptase PCR, a band around 750 bp was observed. This demonstrates that cold stress induces *CBF* expression in *Olea europaea* leaves. Genomic DNA was also used to clone *CBF* for analyzing the existence of introns. Comparing two sequences with Clustal omega revealed there were no introns. This is the case for the vast majority of *CBF* genes that are currently known.

Base substitution, indels, and repeats were found to be abundant in the olive gene fragments *OeACP1*, *OeACP2*, *OeLUS*, and *OeSUT1*. These variations are important considering the roles of these genes in primary metabolic pathways (Cultrera et al. 2019). *Olea europaea* Gemlik *CBF* nucleotide sequence demonstrated 99.87% similarity to wild olive while the amino acid sequence demonstrates 100%

identity which indicates *CBF1* gene was conserved in wild and cultivated forms.

According to phylogenetic analysis Manchurian ash is the closest relative of olive *CBF1*. Manchurian ash is a native species in Northern Asia and can endure -40 °C. Other close relatives include coyote tobacco, wild tomato, and wild potato species. These wild species are thought of as gene sources for resistance phenotype.

Because *CBF* genes are involved in abiotic stress responses, the expression profile of the olive *CBF1* homologue in stress conditions can be investigated further using real-time PCR. Transient expression analysis can be performed in a model plant to investigate the effects of the gene in cold acclimation

Despite the fact that olive is not a cold-resistant species, study into the *CBF* transcription factors in this plant is crucial for comprehending how cold adaptation works and developing stress-resistant cultivars.

Acknowledgement

This work was supported by The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK), project no 1919B011703461.

5. References

- Agarwal PK, P Agarwal, MK Reddy, and SK Sopory, 2006. *Role of DREB transcription factors in abiotic and biotic stress tolerance in plants. Plant Cell Reports*, **25**, 1263-1274.
- Baker SS, KS Wilhelm, and MF Thomashow, 1994. *The 5'-region of Arabidopsis thaliana cor15a has cis-acting elements that confer cold-, drought- and ABA-regulated gene expression. Plant Molecular Biology*, **24**, 701-713.
- Boyer JS, 1982. *Plant productivity and environment. Science*, **218**(4571), 443-448.
- Caffagni A, N Pecchioni, E Francia, D Pagani, and J Milc, 2014. *Candidate gene expression profiling in two contrasting tomato cultivars under chilling stress. Biologia Plantarum*, **58**, 283-295.

- Chen JQ, XP Meng, Y Zhang, M Xia, and XP Wang, 2008. *Over-expression of OsDREB genes lead to enhanced drought tolerance in rice. Biotechnology Letters*, **30**, 2191–2198.
- Cultrera NGM, V Sarri, L Lucentini, M Ceccarelli, F Alagna, R Mariotti, S Mousavi, CG Ruiz, and L Baldoni, 2019. *High levels of variation within gene sequences of Olea europaea L. Frontiers in Plant Science*, **9**, 1–17.
- Gilmour SJ, DG Zarka, EJ Stockinger, MP Salazar, JM Houghton, and MF Thomashow, 1998. *Low temperature regulation of the Arabidopsis CBF family of AP2 transcriptional activators as an early step in cold-induced COR gene expression. The Plant Journal*, **16**, 433–442.
- Guo HM, ZC Li, H Zhang, YZ Xin, and HM Cheng, 2011. *Cloning of Cotton CBF Gene for Cold Tolerance and Its Expression in Transgenic Tobacco. Acta Agronomica Sinica*, **37**, 286–293.
- Huang B, LG Jin, and JY Liu, 2007. *Molecular cloning and functional characterization of a DREB1/CBF-like gene (GhDREB1L) from cotton. Science in China, Series C: Life Sciences*, **50**, 7–14.
- Inoue H, H Nojima, and H Okayama, 1990. *High efficiency transformation of Escherichia coli with plasmids. Gene*, **96**, 23–28.
- Jaglo-Ottosen KR, SJ Gilmour, DG Zarka, O Schabenberger, and MF Thomashow, 1998. *Arabidopsis CBF1 overexpression induces COR genes and enhances freezing tolerance. Science*, **280**, 104–106.
- Liang N, L Yu, C Liu, Z Wang, X Zhao, and Y Zhan, 2019. *Molecular cloning and expression under abiotic stresses and hormones of the ethylene response factor VII gene FmRAP2.12 from Fraxinus mandshurica. Journal of Forestry Research*, **30**, 1289–1300.
- Lissarre M, M Ohta, A Sato, and K Miura, 2010. *Cold-responsive gene regulation during cold acclimation in plants. Plant Signaling and Behavior. Landes Bioscience*, **5**, 948–952.
- Liu Q, M Kasuga, Y Sakuma, H Abe, S Miura, K Yamaguchi-Shinozaki, and K Shinozaki, 1998. *Two transcription factors, DREB1 and DREB2, with an EREBP/AP2 DNA binding domain separate two cellular signal transduction pathways in drought- and low-temperature-responsive gene expression, respectively, in Arabidopsis. Plant Cell*, **10**, 1391–1406.
- Mizoi J, K Shinozaki, and K Yamaguchi-Shinozaki, 2012. *AP2/ERF family transcription factors in plant abiotic stress responses. Biochimica et Biophysica Acta - Gene Regulatory Mechanisms*, **1819**, 86–96.
- Mosa KA, A. Ismail, and M Helmy, 2017. *Introduction to Plant Stresses. Springer*, 1–19.
- Palva ET and P Heino, 1997. *Molecular Mechanism of Plant Cold Acclimation and Freezing Tolerance. In Plant Cold Hardiness*, 3–14.
- Pino MT, A Ávila, A Molina, Z Jeknic, and THH Chen, 2013. *Enhanced in vitro drought tolerance of Solanum tuberosum and Solanum commersonii plants overexpressing the ScCBF1 gene. Ciencia e Investigacion Agraria*, **40**, 171–184.
- Qin F, Y Sakuma, J Li, Q Liu, YQ Li, K Shinozaki, and K Yamaguchi-Shinozaki, 2004. *Cloning and functional analysis of a novel DREB1/CBF transcription factor involved in cold-responsive gene expression in Zea mays L. Plant and Cell Physiology*, **45**, 1042–1052.
- Riechmann JL and EM Meyerowitz, 1998. *The AP2/EREBP family of plant transcription factors. Biological Chemistry. Biological Chemistry*, **379**, :633-46.
- Shi Y, Y Ding, and S Yang, 2018. *Molecular Regulation of CBF Signaling in Cold Acclimation. Trends in Plant Science*, **23**, 623–637.
- Stockinger EJ, SJ Gilmour, and MF Thomashow, 1997. *Arabidopsis thaliana CBF1 encodes an AP2 domain-containing transcriptional activator that binds to the C-repeat/DRE, a cis-acting DNA regulatory element that stimulates transcription in response to low temperature and water deficit. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **94**, 1035–1040.
- Stockinger EJ, Y Mao, MK Regier, SJ Triezenberg, and MF Thomashow, 2001. *Transcriptional adaptor and histone acetyltransferase proteins in Arabidopsis and their interactions with CBF1, a transcriptional activator involved in cold-regulated gene expression. Nucleic Acids Research*, **29**, 1524–1533.

-
- Thomashow MF, 2001. *So what's new in the field of plant cold acclimation? Lots!* *Plant Physiology*, **125**, 89–93.
- Yamaguchi-Shinozaki K and K Shinozaki, 1994. *A novel cis-acting element in an Arabidopsis gene is involved in responsiveness to drought, low-temperature, or high-salt stress.* *Plant Cell*, **6**, 251–264.
- Zarka DG, JT Vogel, D Cook, and MF Thomashow, 2003. *Cold Induction of Arabidopsis CBF Genes Involves Multiple ICE (Inducer of CBF Expression) Promoter Elements and a Cold-Regulatory Circuit That Is Desensitized by Low Temperature.* *Plant Physiology*, **133**, 910–918.
- Zhang X, SG Fowler, H Cheng, Y Lou, SY Rhee, EJ Stockinger, and MF Thomashow, 2004. *Freezing-sensitive tomato has a functional CBF cold response pathway, but a CBF regulon that differs from that of freezing-tolerant Arabidopsis.* *Plant Journal*, **39**, 905–919.

Investigation of Relaxation Times of Alcohol-Water Mixtures by Time Domain NMR Technique

Cengiz OKAY¹

¹Department of Physics, Faculty of Science, Marmara University, İstanbul, Turkey

Sorumlu yazar e-posta: cokay@marmara.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-9609-2912>

Geliş Tarihi: 02.08.2022

Kabul Tarihi: 02.04.2023

Abstract

Nuclear magnetic resonance (NMR) is important technique to probe the molecular dynamics of alcohol-water mixtures by measuring their spin-lattice (T_1) and the spin-spin relaxation time (T_2). In this work, we used two different proton NMR devices to measure relaxation times: Bruker Minispec mq-20 time-domain NMR and 42MHz Magritek Spinsolve high-resolution NMR. T_1 and T_2 of the ethanol-water and methanol-water mixtures measured for changing concentrations from pure water to pure alcohol. The results obtained by both devices are similar with each other. The minimal values of both relaxation parameters are observed at volume fractions of ethanol-water and methanol-water mixtures 43% and 44%, respectively

Keywords

NMR; Spin-spin relaxation time; Spin-lattice relaxation time; Alcohol-water mixtures

Alkol-Su Karışımlarının Durulma Sürelerinin Zaman Boyutlu NMR Tekniği ile İncelenmesi

Öz

Nükleer manyetik rezonans (NMR), spin örgü (T_1) ve spin-spin (T_2) durulma zamanları ölçümleri sayesinde alkol-su karışımlarının moleküler dinamiği konusunda önemli bilgiler vermesinden dolayı önemli bir tekniktir. Bu çalışmada, durulma sürelerini ölçmek için iki farklı proton NMR cihazı kullanılmıştır: Bruker Minispec mq-20 zaman boyutlu NMR ve yüksek çözünürlüklü 42MHz'lik Magritek Spinsolve NMR. Etanol-su ve metanol-su karışımlarının T_1 ve T_2 değerleri, saf sudan saf alkole kadar değişen konsantrasyonlarda ölçülmüştür. Her iki cihaz tarafından elde edilen sonucun birbiriyle aynı eğilimde olduğu açıkça görülmektedir. Elde edilen etanol-su ve metanol-su karışımlarının hacimsel oranları sırasıyla 43% ve 44% olduğunda her iki tip durulma zamanlarında minimum gözlemlenmektedir.

Anahtar Kelimeler

NMR; Spin-spin durulma süresi; Spin-örgü durulma süresi; Alkol-su karışımları

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Introduction

Ethanol and other alcohols as well as their water mixture aqueous are used in many industrial applications. The most common alcohols used dissolved in water at room temperature are ethanol and methanol. Important property of alcohols is heterogeneity due to formation of alcohol-alcohol, water-water or alcohol-water clusters (Hayashi et al. 1990), (Nishikawa et al. 1993), (Tanaka et al. 1985), (Zhao et al. 2012). Alcohol-water mixtures have been investigated by molecular dynamics simulations (MDS), X-ray scattering, Infra-Red (IR), nuclear magnetic resonance (NMR) technique (Benmore et al. 2000), (Chizhik et al. 2016). It is very important both for safety (Rameev et al. 2012) and

for industrial applications (Jora et al. 2017), (Yoshida et al. 2006) to detect and distinguish various liquid substances and their mixtures (for example, alcohol-water mixtures). The NMR has many subtypes such as High Field Liquid (HF-NMR), Solid State (ss-NMR), Zero Field NMR, Earth Field NMR, Time Domain NMR (NMR Relaxometry). It is one of the most reliable method to determine all kinds of chemical structures of samples especially in liquids. Even though NMR spectroscopy knowing as high field (HF) NMR is very sensitive method for analyzing chemical structures, it needs to cryogenic system because containing of superconducting magnet system. In this case NMR spectroscopy is overpriced and difficult to use in practical application. On the

contrary, since TD-NMR is based on permanent magnet technology, it does not need a cryogenic system. Than it is cost-effective, easy to use and portable, it might be more preferable for quality control and security applications. Materials can be analyzed by measuring the relaxation times of samples instead of NMR spectrum in TD-NMR method. In TD-NMR method, two main parameters called as spin-spin (transverse, T_2) and spin-lattice (longitudinal, T_1) are measured. As it is known, the nuclear spins exposing to static magnetic field (B_0) localize in different energy level and the total magnetization (M) occur in the nucleus. Than, transitions consist between the energy levels by applied variable magnetic (RF) field (B_1). After the termination of B_1 , the nuclear spins try to come back to their previous positions. Therefore, to achieving thermal equilibrium, they transfer the energy to their surrounding spins and lattice. The time passing to transfer the energy to the neighbor spins is called as T_2 , and time passing to transfer the energy to the lattice is called as T_1 . Hence, each material has different relaxation times. Thus, it is a very important issue to conduct effective screening and analysis of various liquids according to TD-NMR parameters which are spin-lattice (T_1) and spin-spin relaxation time (T_2).

The transversal magnetization decay (M_{xy}) and the longitudinal magnetization decay (M_z) are given by equation-1 and 2.

$$M_{xy}(t) = M(0)e^{\left(-\frac{t}{T_2}\right)} \quad (1)$$

$$M_z(t) = M(0)[1 - 2e^{\left(-\frac{t}{T_1}\right)}] \quad (2)$$

Here $M_{xy}(t)$ and $M_z(t)$ are magnetization amplitude and $M(0)$ is initial magnetization amplitude.

In this study, T_1 and T_2 relaxation times of ethanol-water and methanol-water mixtures have been measured by using two different commercial devices (Bruker Minispec mq20 (20MHz) and Magritek Spinsolve 42MHz) and consistency of the results have been compared to emphasize the availability of TD-NMR methods in security application.

2. Material and Method

2.1. Experimental Procedures

Methanol and ethanol liquids have been provided from Sigma-Aldrich® (%99). Ethanol-water and methanol-water mixtures have been prepared by using deionized water (Milli-Q, 18.2 M Ω) with

different molar fractions and stored at room temperature. A set of samples with various alcohol concentration of alcohol-water mixtures have been measured by using of two types of commercial devices (**Figure 1-2**).



Figure 1. Photo of Bruker Minispec mq20 TD-NMR device(20MHz)



Figure 2. Photo of Magritek Spinsolve NMR spectrometer (42MHz)

The samples have been placed in the tubes of 10 mm diameter for Bruker Minispec mq20 TD-NMR and 5 mm diameter for Magritek Spinsolve NMR device. Before each measurement, the samples have been placed in the NMR device for at least 10 minutes to keep the thermal equilibrium. T_2 relaxation time has been measured with use of Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG) pulse sequence. T_1 relaxation time have been obtained using inversion recovery (IR) protocol.

3. Results and Discussion

The measurement parameters (number of scans) for these commercial devices are 4 and 2 for CPMG (T_2) and IR (T_1) sequences, respectively. T_1 and T_2 relaxation curves of each samples have been showed in **Figure 3** (only Magritek Spinsolve NMR device). To calculate the T_1 and T_2 values, the exponential fitting has been applied to relaxation time curves of each samples and the T_1 and T_2 versus

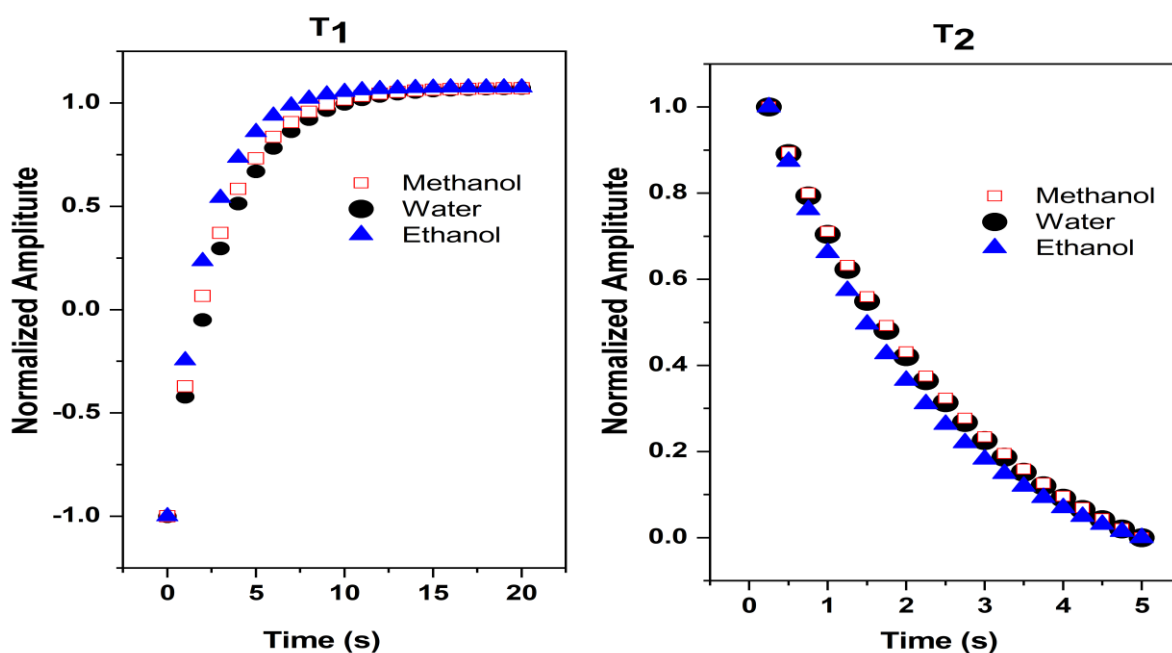


Figure 3. Spin-lattice (T_1) and spin-spin relaxation times (T_2) spectra for pure water, methanol and ethanol.

To reduce the signal to noise ratio, the CPMG and IR measurement protocols have been replicated three times for each samples and the average of these three relaxation times curve have been obtained. The relaxation delay between these measurements was chosen to be approximately 5 times longer than the observed values of T_1 and T_2 to be sure that samples have fully relaxed between the measurements. In this manner, the signal intensity curves for CPMG and inversion recovery measurements the T_1 and T_2 parameters have been obtained. It should be note that various echo-times have been tested to check the effect of self-diffusion. For minimization of contribution of the diffusion term, the echo-time was fixed to be 0.5 ms.

alcohol concentration percentages graphs have been demonstrated in **Figure 4**. According to results, for all substance the T_1 values are always somewhat larger than the T_2 ones, as expected for liquids. As mentioned in the previous section, the origin of relaxation times is related with transferring of the energy between spin-lattice for T_1 and spin-spin for T_2 . Because, the space between the spin lattice is higher that the space between two spins, it is expected that the T_1 should be longer than T_2 . Consequently, the measurement completed in this study are consistent with the theory (Jiang et al. 2017), (Jora et al. 2017).

The trends observed in the T_1 and T_2 values for various concentrations of water-methanol and water-ethanol mixtures are similar. It is obvious that the results obtained by both commercial devices are in agreement with each other. The maximal difference, observed at high alcohol concentrations, does not exceed 7%. The differences are obviously related to various operating frequencies of these

devices. The operating frequency of the Magritek Spinsolve high-resolution NMR device is 42MHz, which is two times bigger than that of the Bruker Minispec mq-20 (20MHz).

$$\frac{1}{T_{2eff}} = \frac{1}{T_2} + \frac{1}{3}\gamma^2 G^2 D\tau^2 \quad (3)$$

It is known that the relaxation time of materials under the inhomogeneous magnetic field is defined as (Bloch, 1946).

Magritek Spinsolve devices 145ppm and 36ppm, respectively. As a result of these values, the inhomogeneity of the Magritek Spinsolve device is much better with respect to the Bruker Minispec TD NMR. The cases which have been explained above shows that the different relaxation times which have been measured for different devices.

As we mentioned above, the trend in the dependence of relaxation times vs concentration is very similar for both types of alcohols. The only

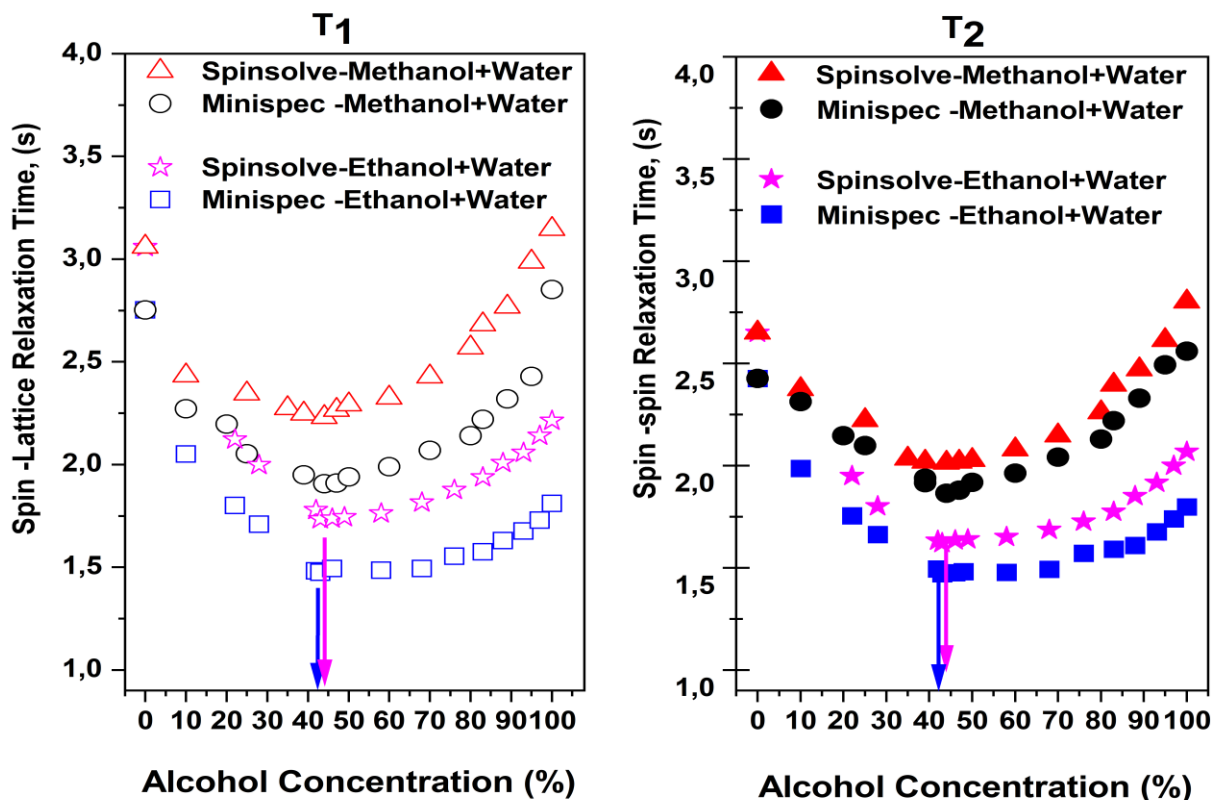


Figure 4. Spin-lattice and spin-spin relaxation times for alcohol-water mixture.

Where in T_{2eff} is characteristic spin-spin relaxation time under the CPMG pulse sequence, G is magnetic field gradient, D is diffusion coefficient, γ is the gyromagnetic ratio of proton and τ is echo time. To obtain the inhomogeneity-the magnetic field gradient (G) following procedure have been used: (a) pure alcohol, (b) T_2 values for different τ , (c) T_2 versus τ^2 graph, (d) slope of this graph, (e) $\gamma=267 \times 10^6 \text{ s}^{-1}\text{T}^{-1}$ and $D=0.85 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}$ (Vitalij, 1995a) [Vitalij, 1995]. According to our calculations by using equation 3 contribution of field non-uniformity in T_{2eff} is negligibly small for two devices. The magnetic field gradient (G) have been calculated (equation 3) for Bruker Minispec and

difference is turnover (breaking) points in T_1 and T_2 values. Arrows are given as references to mark special volume (breaking) points in T_1 and T_2 values. Arrows are given as references to mark special volume concentrations: %43 for ethanol, %44 for methanol. In the molar fractions of ethanol and methanol-water mixtures, these values correspond to $x_{et} \approx 0.20$ and $x_{met} \approx 0.26$, respectively. This breaking point is related to the change in the transition structure of alcohol-water clusters. It also depends on the formation of hydrogen bonds between water-alcohol molecules. This clumping phenomenon affects both rotational and translational motion of water and molecules. A several research group (Burikov et al. 2010), (Matsugami et al. 2016), (Nasten, 1972), (Takamuku

et al. 2001), (Takamuku et al. 2004) have investigated the hydrogen-bonding properties of alcohol-water system by using various techniques. Based on literature data we explained the observed concentration dependence in the following manner. It is known that the molecules of a pure water even in liquid state prefer a tetrahedral arrangement, i.e., in average, neighbor molecules oriented to each other in such manner that they form for some time the tetrahedral water clusters (in a near range). Adding alcohol in a small amount does not affect this dynamic arrangement initially, but further increase of alcohol concentration starts to alter the near-range arrangement of water molecules. In the middle concentration range, tetrahedral-like arrangement is broken (at volume concentrations of %43 for ethanol and %44 for methanol), because alcohol-water clusters rather than water-water clusters are formed in the mixtures. This results in slower molecular dynamics and shortening the T_1 and T_2 values. Further rising the alcohol concentration beyond of turnover concentrations results in a decrease of the ratio of alcohol-water clusters and increase of the number of chain-like clusters of alcohols molecules with higher T_1 and T_2 values (Burikov et al. 2010), (Takamuku et al. 2004).

4. Conclusion

In this study, two commercial NMR devices, Bruker Minispec mq series 20MHz TD-NMR and Magritek Spinsolve 42MHz NMR device have been used to measure the spin-lattice and spin-spin relaxation times of ethanol-water and methanol-water mixtures. The consistency in the results obtained using various devices have been observed. The same trend in the concentration dependence of the relaxation times have observed for both type of alcohols. Firstly, both T_1 and T_2 decrease with increase of concentration toward to turnover points. After that both T_1 and T_2 values increase at higher alcohol fractions towards to pure alcohol liquid. Inhomogeneity-the magnetic field gradient (G) of the Magritek Spinsolve NMR has been obtained better than the Bruker Minispec device. And also, values of the T_1 and T_2 for the Magritek Spinsolve NMR has been observed longer than the Bruker Minispec device. The qualitative explanation of the observed behavior is presented.

5. References

Benmore, C. J., Loh, Y. L. (2000). The structure of liquid ethanol: A neutron diffraction and

molecular dynamics study. *Journal of Chemical Physics*, **112** (13), 5877–5883. <https://doi.org/10.1063/1.481160>

Bloch, F. (1946). Nuclear induction. *Physical Review*, **70** (7–8), 460–474. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.70.460>

Burikov, S., Dolenko, T., Patsaeva, S., Starokurov, Y., Yuzhakov, V. (2010). Raman and IR spectroscopy research on hydrogen bonding in water-ethanol systems. *Molecular Physics*, **108** (18), 2427–2436. <https://doi.org/10.1080/00268976.2010.516277>

Chizhik, V. I., Egorov, A. V., Pavlova, M. S., Egorova, M. I., Donets, A. V. (2016). Structure of hydration shell of calcium cation by NMR relaxation, Car-Parrinello molecular dynamics and quantum-chemical calculations. *Journal of Molecular Liquids*, **224**, 730–736. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.10.035>

Hayashi, H., Nishikawa, K., Iijima, T. (1990). Small-angle X-ray scattering study of fluctuations in 1-propanol-water and 2-propanol-water systems. *Journal of Physical Chemistry*, **94** (21), 8334–8338. <https://doi.org/10.1021/j100384a062>

Jiang, Y., Ma, D., Keenan, K. E., Stupic, K. F., Gulani, V., Griswold, M. A. (2017). Repeatability of magnetic resonance fingerprinting T_1 and T_2 estimates assessed using the ISMRM/NIST MRI system phantom. *Magnetic Resonance in Medicine*, **78** (4), 1452–1457. <https://doi.org/10.1002/mrm.26509>

Jora, M. Z., Cardoso, M. V. C., Sabadini, E. (2017). Correlation between viscosity, diffusion coefficient and spin-spin relaxation rate in ^1H NMR of water-alcohols solutions. *Journal of Molecular Liquids*, **238**, 341–346. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.05.006>

Matsugami, M., Yamamoto, R., Kumai, T., Tanaka,

- M., Umecky, T., Takamuku, T. (2016). Hydrogen bonding in ethanol-water and trifluoroethanol-water mixtures studied by NMR and molecular dynamics simulation. *Journal of Molecular Liquids*, **217**(D), 3–11. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2015.06.050>
- Nasten, A. H. (1972). Liquid water: Atom pair correlation functions from neutron and X-ray diffraction. *The Journal of Chemical Physics*, **56** (11), 5681–5687. <https://doi.org/10.1063/1.1677087>
- Nishikawa, K., Iijima, T. (1993). Small-angle X-ray scattering study of fluctuations in ethanol and water mixtures. *Journal of Physical Chemistry*, **97** (41), 10824–10828. <https://doi.org/10.1021/j100143a049>
- Rameev, B. Z., Mozhukhin, G. V., Khusnutdinov, R. R., Aktas, B., Konov, A. B., Gabidullin, D. D., Krylatyh, N. A., Fattakhov, Y. V., Salikhov, K. M. (2012). Novel approaches in nuclear magnetic/quadrupole resonance techniques for explosives detection. *Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XVII*, **8357**(985005), 83570Z. <https://doi.org/10.1117/12.923625>
- Takamuku, T., Maruyama, H., Watanabe, K., Yamaguchi, T. (2004). Structure of 1-propanol-water mixtures investigated by large-angle X-ray scattering technique. *Journal of Solution Chemistry*, **33** (6–7), 641–660. <https://doi.org/10.1023/B:JOSL.0000043631.21673.8b>
- Takamuku, T., Yamaguchi, A., Matsuo, D., Tabata, M., Kumamoto, M., Nishimoto, J., Yoshida, K., Yamaguchi, T., Nagao, M., Otomo, T., Adachi, T. (2001). Large-angle X-ray scattering and small-angle neutron scattering study on phase separation of acetonitrile-water mixtures by addition of NaCl. *Journal of Physical Chemistry B*, **105** (26), 6236–6245. <https://doi.org/10.1021/jp003011n>
- Tanaka, H., Nakanishi, K., Touhara, H. (1985). Computer experiments on aqueous solutions. VII. Potential energy function for urea dimer and molecular dynamics calculation of 8 mol % aqueous solution of urea. *The Journal of Chemical Physics*, **82**(11), 5184–5191. <https://doi.org/10.1063/1.448643>
- Vitalij, I Volkov , Svetlana A. Korotchkova , Haruhiko O, Qunhui Gut (1995). Science Self-Diffusion, Self-Diffusion of Water-Ethanol Mixtures in Polyacrylic Acid- Polysulfone Composite Membranes obtained by pulsed-field gradient nuclear magnetic resonance spectroscopy. *Journal of Membrane Science* **100**, 273-286.
- Yoshida, K., Kitajo, A., Yamaguchi, T. (2006). 17O NMR relaxation study of dynamics of water molecules in aqueous mixtures of methanol, ethanol, and 1-propanol over a temperature range of 283-403 K. *Journal of Molecular Liquids*, **125** (2–3), 158–163. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2005.11.009>
- Zhao, L. J., Xiao, H. S. (2012). Aqueous solutions of lower alcohols investigated by pyrene fluorescence spectroscopy. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **88**, 111–115. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2011.12.009>

Cr(VI) Adsorption Performance of Commercial Anion Exchange ResinFaysal SELİMOĞLU^{1,*}¹ Necmettin Erbakan University, Faculty of Science, Department of Biotechnology, Konya*Corresponding author e-mail: fselimoglu@erbakan.edu.tr, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3798-9054>

Geliş Tarihi: 25.12.2022

Kabul Tarihi: 14.04.2023

Abstract

Chromium (VI) batch system sorption from aqueous solutions by use of commercial Eichrom 1x4 anion exchange resin was studied at varying pH, temperature, and contact time, adsorbent dosage, desorption study, and starting Cr (VI) concentration. The ideal pH range for Cr (VI) sorption via anion exchange resin (AER) was found as 2.0-6.0. The kinetic of Cr (VI) sorption by resin came after the second-order kinetic model. The greatest chromium sorption emerged at 10 min for AER. The sorption isotherms were investigated with Langmuir, Freundlich and Redlich-Peterson models. The optimum isothermal model for chromium sorption via AER was the Langmuir isotherm. Moreover, the sorption thermodynamic parameters like entropy change (ΔS°), free energy change (ΔG°), and enthalpy change (ΔH°) were also investigated. A rise in the temperature has resulted in a rise of the equilibrium constant (Kc) value for the Cr (VI) sorption by AER.

Keywords

Anion exchange resin;
Batch sorption;
Hexavalent chromium;
Langmuir isotherm

Ticari Anyon Değişirme Reçinesinin Cr(VI) Adsorpsiyon Performansı**Öz**

Ticari Eichrom 1x4 anyon değişim reçinesi kullanılarak sulu çözeltilerden krom (VI) kesikli sistem sorpsiyonu, değişen pH, sıcaklık ve temas süresi, adsorban dozajı, desorpsiyon çalışması ve başlangıç Cr (VI) konsantrasyonunda incelenmiştir. Anyon değiştirici reçine (AER) yoluyla Cr (VI) sorpsiyonu için ideal pH aralığı 2,0-6,0 olarak bulundu. Reçine tarafından Cr (VI) emiliminin kinetiği, ikinci dereceden kinetik modelden sonra geldi. AER için en büyük krom sorpsiyonu 10 dakikada ortaya çıkmıştır. Langmuir, Freundlich ve Redlich-Peterson modelleri ile sorpsiyon izotermi incelenmiştir. AER yoluyla krom sorpsiyonu için optimum izotermal model Langmuir izotermidir. Ayrıca entropi değişimi (ΔS°), serbest enerji değişimi (ΔG°) ve entalpi değişimi (ΔH°) gibi sorpsiyon termodinamik parametreleri de incelenmiştir. Sıcaklıktaki bir artış, AER tarafından Cr(VI) sorpsiyonu için denge sabiti (Kc) değerinin yükselmesine neden olmuştur.

Anahtar kelimeler

Anyon değişim reçinesi;
Toplu sorpsiyon;
Altı değerlikli krom;
Langmuir izotermi

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Introduction

The widespread usage of chromium (Cr) in many practical applications such as dyeing, metallurgical processes, the production of stainless steel, etc., has resulted in the discharge of Cr into the environment and pollution of the natural world. The presence of chromium compounds in the wastewater caused by these industries has transformed into a considerable concern because of its harmful effects on human health and as well as other living beings. Chromium, like HCrO_4^- , $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$, and CrO_4^{2-} , is extremely poisonous to plants and animals due to oxidation (ASDTR 2000, Zhao *et al* 1998., Edebalı *et*

al. 2010). The maximum chromium (VI) pollutant level for drinking water is 0.05 mgL^{-1} (US EPA 1990). The limit value for chromium release into the inner surface of water bodies is 0.1 mgL^{-1} . Hence, the elimination of chromium from water bodies is of vital importance to the environment. The different methodologies (i.e., ion exchange (Gode *et al.* 2005), solvent extraction (Venkateswaran *et al.* 2004) nondispersive solvent extraction (Alonso *et al.* 1999) membrane-based methods (Hafiane *et al.* 2000, Cengeloğlu *et al.* 2003, Tor *et al* 2004, Yılmaz *et al* 2008, Palanivelu *et al.* 2004, Aslan *et al.* 2010) and adsorption (Hayashi *et al.* 2021, Kobya *et al.*

2004, Khezami *et al.* 2005) have been reported for recovery or chromium (VI) elimination from the aqueous solutions. Nevertheless, these methods except ion exchange have significant back draws, including needs for costly materials, deficient metal removal, high energy needs, and production of toxic slush (Dragan *et al.* 2008). Ion exchange resins were employed to dispose of Cr(VI) from water. The essential benefit of employing these resins is owing to their superior ion exchange rate, high ion exchange capacity, and high mechanical and chemical stability (Pehlivan and Çetin 2009). Edebalı *et al.* reported chromium (VI) disposal from an aqueous solution via two resins, Amberlite IRA96 and Dowex 1x8 (3). Korngold *et al.* used Amberlite 416, and Purolite A420 that the strongly basic anion exchange resins for selective elimination of chromium from tap water (Korngold *et al.* 2003). Rengaraj *et al.* evaluated some ion exchange resins such as 1200H, 1500H, and IRN97H, to remove chromium compounds from an aqueous solution (Rengaraj *et al.* 2003). Zhao *et al.* also indicated a novel anion exchanger, named polymeric ligand exchanger, was of superior chromate selectivity at neutral to alkaline pH (Zaho *et al.* 1998). The main purpose of this research was to examine the equilibrium and kinetic parameters of Eichrom 1x4 anion exchange resin containing quaternary amine group for the Cr(VI) disposal from the aqueous solution. Contact time, temperature, pH, amount of resin and starting Cr(VI) concentration parameters that affect the adsorption were examined and the results were discussed.

2. Experimental Section

2.1 Materials

The Eichrom 1x4 anion exchange resin employed in this study was purchased from Eichrom Technologies Inc. (Illinois, USA). The main physicochemical properties of the resin is given in Table 1. Chromium stock solutions were prepared by dissolving K₂CrO₄ in ultrapure water (UPW). All the chemicals used were of analytical grade and were purchased from Merck Co. UPW was used to prepare all solutions for the experiments.

Table 1. Properties and speciations of Eichrom anion exchange resin

	Eichrom anion exchange resin
Type	Strong base anion exchanger
Matrix	Styrene-divinyl benzene polymeric beads
Chemical functional group	Quaternary amine
Ionic form as shipped	Cl ⁻
Moisture holding capacity	55–63%
Total exchange capacity	1.0 meq/g
Stability (at pH range)	0-14

2.2. Batch sorption studies.

The chromium (VI) solution was prepared from K₂CrO₄ by dilution of the stock solution at the requested concentrations. The solution pH was set at the required value using 0.1 M NaOH or HCl solutions and determined with an ion meter. Experiments was performed by the batch sorption technique by shaking the resin in 20 mL chromium (VI) solutions at 225 rpm and 20±1 °C. Finally, the solution was filtered.

The effects of contact time (0-250 min), starting Cr(VI) concentration (5-1000 mgL⁻¹), the level of adsorbent (1.5-10 gL⁻¹) and temperature (20-70 °C) was also investigated for Eichrom AER. The amount of chromium (VI) sorbed was obtained by Eq. 1.

$$q = \frac{(C_o - C_e) \times V}{m} \quad (1)$$

Where q, chromium (VI) sorbed (mgg⁻¹); C_o, starting concentration of chromium (VI) (mgL⁻¹); C_e, chromium (VI) concentration in solution at equilibrium (mgL⁻¹); V, volume of solution (L); m, resin dose (g). Concentrations of chromium (VI) were determined using ContrAA 300® Analytik Jena atomic absorption spectrometer in an acetylene torch.

3. Results and Discussions

3.1 Effect of AER pH

Chromium ions are present in diverse anionic forms such as Cr₂O₇²⁻, HCrO₄⁴⁻, CrO₄²⁻ and, HCr₂O₇⁻ in aquatic solution, depending on the concentration and pH. CrO₄²⁻ anion prevails in basic or lightly acidic solution. Additionally, Cr₂O₇²⁻ transforms to HCrO₄⁴⁻ anion in acidic a solution when the chromium

concentration exceeds about 1000 mgL^{-1} (Pehlivan *et al.* 2008). Thus, in this research, chromium (VI) ions will be present as HCrO_4^- in the aquatic solution due to the studied Cr(VI) starting concentrations being $\leq 1000 \text{ mgL}^{-1}$. Anion exchangers and ions can interact in solutions in two basic ways. The most comprehensive approach requires ion exchange or metal ions chelation. Above mentioned mutual effects are studied based on the resin structure concerning existing functional groups (Liu *et al.* 1999). In addition, the exchanger surface would be encircled with the hydrogen ions, which would improve the chromium (VI) interaction with the binding sites of the sorbent through superior attractive forces at low pH.

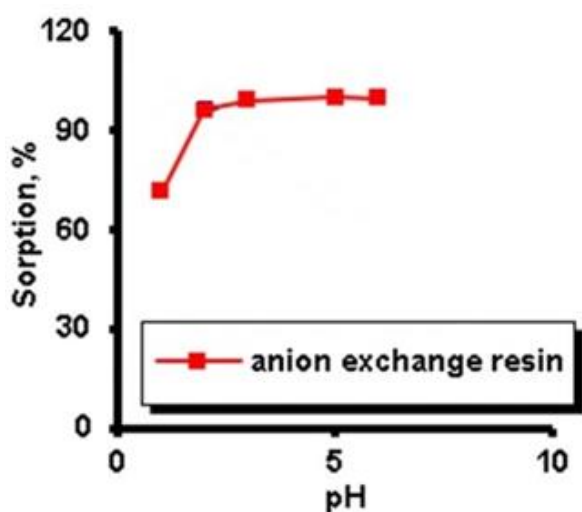
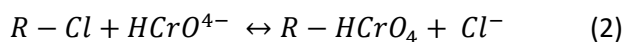


Fig. 1. The effect of pH on chromium (VI) sorption via Eichrom anion exchange resin (chromium (VI) starting concentration: 25 mgL^{-1} ; the amount of resin: 5 gL^{-1} ; contact time: 1 h; shaking speed: 225 rpm temperature: $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$).



When the solution pH decreases, particularly at $\text{pH} \leq 2.0$, the reaction in Equation 2 shifts to the left since the pK_a of the carboxyl group is 1.8 (Park and Na 2006, Huang *et al.* 2009, Zhang *et al.* 2008, Cangeloglu *et al.* 2006). Hence, at a pH range of 2.0-8.0, a possible repulsive force between the deprotonated carboxyl group and HCrO_4^- decreased the sorption. Thus, optimal pH ranges for effective Cr(VI) sorption with Eichrom anion exchange resin 2.0-6.0.

3.2. Effect of Contact Time

The disposal of Cr(VI) via anion exchange resin depending on contact time is presented in Fig. 2. Sorption equilibrium was reached in 10 min for anion exchange resin.

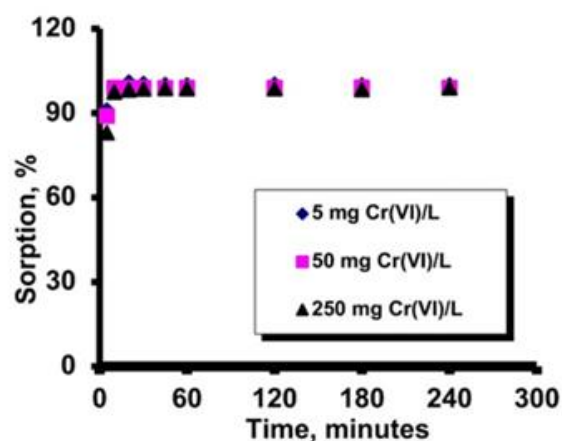


Fig. 2. Effect of contact time on the chromium (VI) sorption by Eichrom anion exchange resin and (starting concentration of Cr(VI): 5, 50, and 250 mgL^{-1} ; the amount of resin: 5 gL^{-1} ; solution pH: 1.0 for fiber, shaking speed: 225 rpm, temperature: $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$)

According to the literature (Brassi *et al.* 1999), the concentration of chemical functional groups on the adsorbent surface allows the rate estimation of the chemisorption through the pseudo-second-order kinetic model. The experimental data were used for the pseudo-second-order kinetic model obtained by Eq. 3 (Ho *et al.* 1999).

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{(k_2 \times q_e^2)} + \frac{t}{q_e} \quad (3)$$

Where q_e and q_t are the amounts of chromium (VI) sorbed (mg g^{-1}) at equilibrium and at time t (min), respectively, k_2 is the rate constant of chemisorption pseudo-second-order ($\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$). The rate constant (k_2) and the theoretical equilibrium sorption capacities, q_e , were determined from the slope and intercept of the linear plots of the pseudo-second-order kinetic model and are given in Table 2 for the present study. Coefficients of determination (R^2) and the theoretical and experimental q_e values indicate that the chromium (VI) sorption via anion exchange resin and fibers follows second-order reaction kinetic

Table 2. The rate constant values of the pseudo-second-order kinetic model for AER.

	Eichrom anion exchange resin		
	5 mgL ⁻¹	50 mgL ⁻¹	250 mgL ⁻¹
q_e (calculated) (mgg ⁻¹)	1.040	10.309	51.546
q_e (experimental) (mgg ⁻¹)	1.105	10.551	52.280
k_2 [g/(mg. min)]	17.829	0.753	0.058
R^2	1.000	1.000	0.999

3.3 Models of Sorption Isotherm

The sorption isotherm studies are crucial in terms of design objectives. Hence, experimental data were investigated with widely known adsorption isotherms. Langmuir isotherms (given as Eq. 4 (Langmuir 1916)), the single-layer adsorption surfaces and presumes adsorption occurs on a uniform surface structure of the adsorbent.

$$q_e = \frac{Q_o \times b \times C_e}{(1 + b \times C_e)} \quad (4)$$

The linear form of the Langmuir isotherm may be given as Eq. 5;

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q_o \times b} + \frac{C_e}{q_e} \quad (5)$$

Where C_e is the concentration of chromium (VI) ion (mgL⁻¹) at equilibrium, Q_o is the single-layer capacity of the adsorbent (mgg⁻¹) and b is the Langmuir sorption constant (Lmg⁻¹). The plot of C_e/q_e versus C_e shows a straight-line Fig. 3 a, b and Q_o and b can be obtained by the slope and intercept of the plot, respectively.

The Freundlich equation (given as Eq. 6 (Freundlich 1907)) is reproduced for modeling multilayer sorption and sorption on non-uniform surfaces.

$$q_e = k \times C_e^{1/n} \quad (6)$$

The linear form of the Freundlich equation may be presented as Eq. 7;

$$\log q_e = \log k + \left(\frac{1}{n}\right) \times \log C_e \quad (7)$$

The plotting of the log q_e versus log C_e shows a straight-line according to Eq.6 (Fig. 3c, d). n and k were obtained by the slope and the intercept of this straight-line, respectively. Where k is an approximate sign of adsorption capacity [(mgg⁻¹). (mgL⁻¹)^{-1/n}], C_e is the equilibrium concentration (mgL⁻¹),

1), and n is an empirical parameter. The Redlich–Peterson equation is given by the following Eq. 8 (Tor *et al.* 2006):

$$q_e = \frac{K_R \times C_e}{(1 + a_R \times C_e^\beta)} \quad (8)$$

Where, K_R is Redlich–Peterson isothermal constant (Lmg⁻¹), a_R is also a constant (Lmg⁻¹)^β and β is the exponent between 0 and 1.

The Redlich–Peterson isotherm is close to the Freundlich isotherm for high concentrations and the Langmuir equation for low concentrations. This isotherm model shows not only a linear concentration dependence in the numerator but also an exponential function in the denominator. Additionally, this model can provide an experimental isotherm combining three parameters. Thus, it may be implemented in uniform or non-uniform systems owing to its sophistication (Marcu *et al.* 2021).

While Eq. 8 reduces to the Langmuir equation for the β value of 1, it reduces to Henry's equation for the β value of 0. The Redlich–Peterson equation (Eq. 9) can be transformed into a linear form by the following:

$$\ln\left[\left(\frac{K_R \times C_e}{q_e}\right) - 1\right] = \ln a_R + \beta \times \ln C_e \quad (9)$$

For the Redlich–Peterson isotherm, the values of the constants were calculated from the intercept and slope (Fig. 3 (d) and (e)) of the linear form of the isotherm (Eq. 9). The isotherm constants and coefficients of determination (R^2) values for were presented in Table 3. For the comparison of R^2 values, it may be determined that Cr(VI) sorption by anion exchange resin may be preferably defined by Langmuir isotherm. Our findings may be deduced

from the value of β (0.820) given in Table 3, which is close to unity.

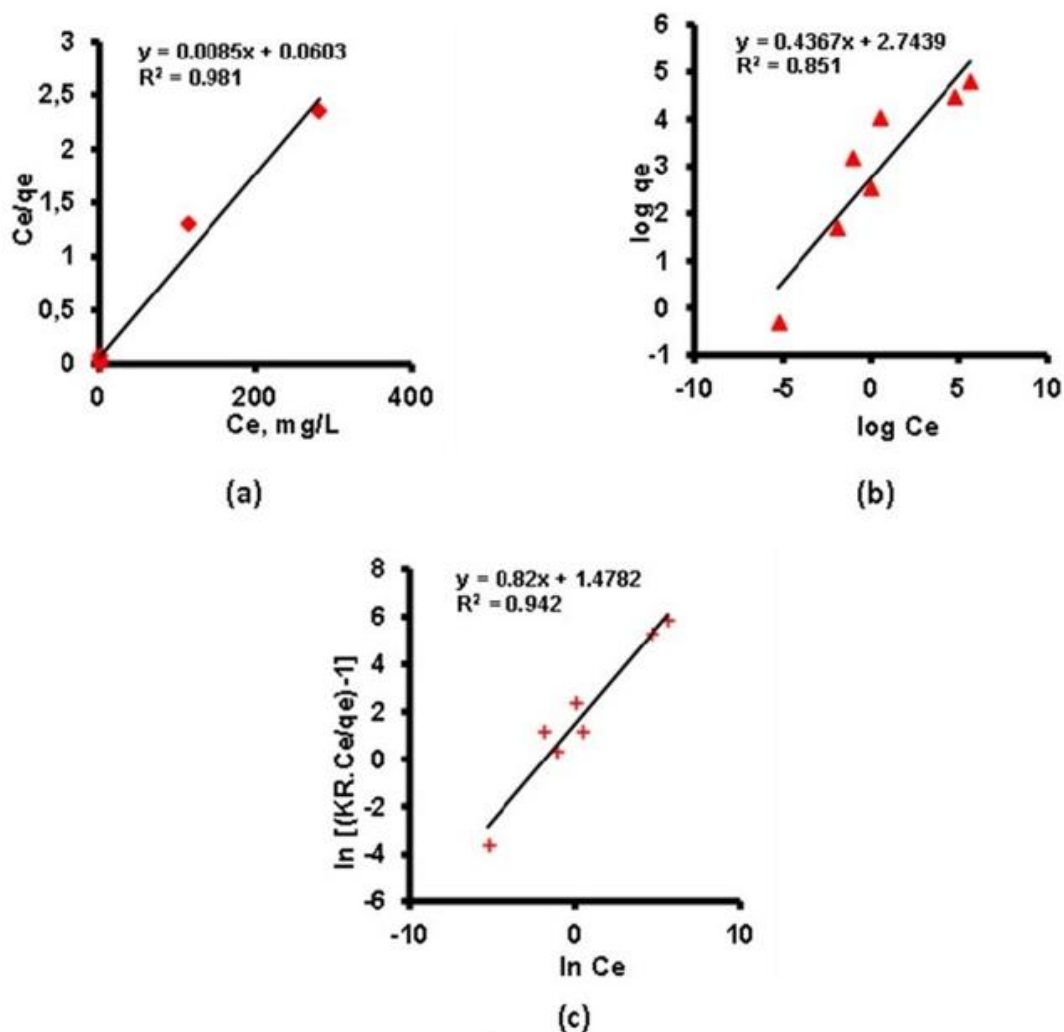


Fig.3. The Langmuir isotherm for anion exchange resin (a), The Freundlich isotherm for resin (b), The Redlich-Peterson isotherm for resin (c) (amount of resin and fiber: 5 gL^{-1} , respectively, solution pH: 1.0 resin, contact time: 1 h, shaking speed: 225 rpm, temperature: $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$).

Table 3. The parameters of isotherm models for the Cr(VI) sorption from aquatic solution by Eichrom anion exchange resin and FIBAN AK-22-1 anion exchange fiber.

Isotherm model	Eichrom anion exchange resin
Langmuir model	
Q_0 , (mgg^{-1})	117.647
b , (Lmg^{-1})	0.141
R^2	0.981
Freundlich model	
k , [$(\text{mgg}^{-1}) \cdot (\text{mgL}^{-1})^{-1/n}$]	554.498
n	2.290
R^2	0.851
Redlich-Peterson model	
K_R , (Lmg^{-1})	148.993
a_R , (Lmg^{-1}) ^{β}	4.406
β	0.820
R^2	0.942

3.4. Effect of Adsorbent Doses

The percentages of Cr(VI) sorption with various amounts of anion exchange resin is given in Fig. 4. An increase in the adsorbent dose, increases the percentage disposal of the adsorbate. This is consistent with the hypothesis that lower q values are produced by higher adsorbent dosages. Functional group concentrations on the resins related to the amount of these adsorbent through surface site density (Redlich *et al.* 1959, Sujana *et al.* 1998). However, q decreased as the unit of q is mg Cr(VI) per gram of resin.

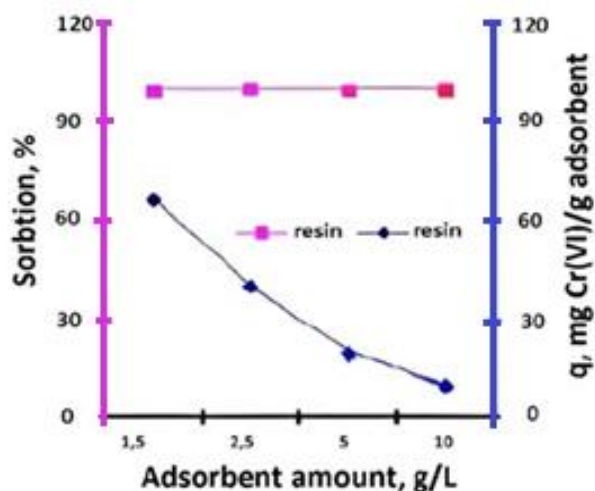


Fig.4. Variation of chromium (VI) sorption with the amount of anion exchange resin (concentration of chromium (VI): 100 mgL⁻¹, contact time: 1 h, solution pH: 1.0 for resin, shaking speed: 225 rpm, temperature: 20±1 °C).

3.5. Effect of Temperature

Calculation of free energy change (ΔG°), enthalpy change (ΔH°), and entropy change (ΔS°) parameters can be carried out by the following equations.

$$K_c = \frac{C_{Ae}}{C_e} \quad (10)$$

$$\Delta G^\circ = -R \times T \times \ln K_c \quad (10)$$

$$\log K_c = \left[\frac{\Delta S^\circ}{2,303 \times R} \right] - \left[\frac{\Delta H^\circ}{2,303 \times R \times T} \right] \quad (11)$$

Where K_c is the equilibrium constant obtained from the equilibrium concentrations ratio of the metal ions on the ion exchanger and in the solution (Gode *et al.* 2005). C_{Ae} is the solid phase concentration at equilibrium (mgL⁻¹) and C_e is the equilibrium

concentration in solution (mgL⁻¹). ΔG° , ΔS° , and ΔH° are defined as changes in free energy, entropy, and enthalpy, respectively. Mixture temperatures ranged from 20 to 70 °C. Free energy (ΔG°) can be calculated by Eq.10. Entropy (ΔS°) and enthalpy (ΔH°) can be obtained by the plot of $\log K_c$ versus $1/T$ by Eq.11 (Fig. 5). Thermodynamic parameters were presented in Table 4.

The positive ΔH° values for anion exchange resin indicate that the endothermic reaction occurred as seen in Table 4. The positive ΔS° values were randomly proposed at the ion exchanger solution interface over the chromium (VI) sorption on the resin. The negative ΔG° values indicated that the sorption processes via anion exchange resin occurred spontaneously. Besides, a decrease in ΔG° values with an increase in temperature demonstrated the sorption through resin was more natural at higher temperatures.

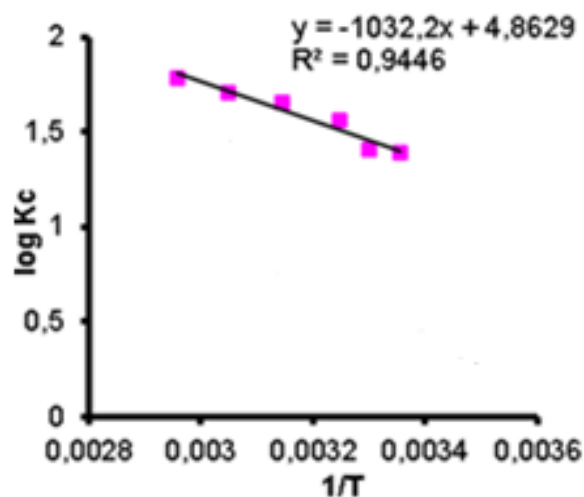


Fig.5. Equilibrium constants of chromium (VI) on anion exchange resin as a function of temperature.

Table 4. Thermodynamic parameters for the adsorption of Cr(VI) on Eichrom anion exchange resin.

	Eichrom anion exchange resin		
	ΔG° (J mol ⁻¹)	ΔH° (J mol ⁻¹)	ΔS° (J kmol ⁻¹)
T=298 K	-7920.60		
T=303 K	-8020.69		
T=308 K	-8922.68	19764.87	93.12
T=318 K	-9436.12		
T=328 K	-9756.42		
T=338 K	-10191.73		

3.6. Chromate Desorption Experiment

NaOH solution was used to carry out the chromate's desorption. Desorption study was carried out by taking hourly measurements of chromate desorption with 2 M NaOH solution under optimum conditions. In addition, the regenerated adsorbents kept their original capacity of around 80%.

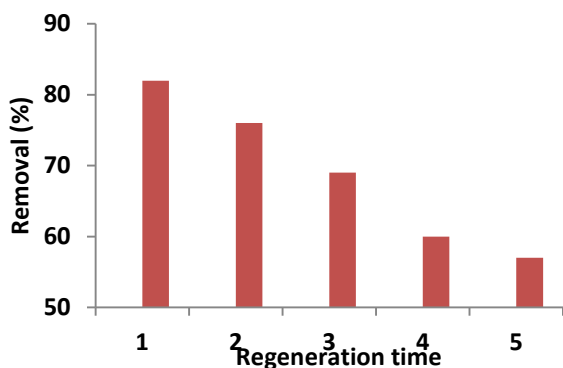


Fig. 6. Regeneration of adsorbent by 2M NaOH (concentration of chromium (VI): 100 mgL⁻¹, contact time: 5 h, solution pH: 1.0 resin, shaking speed: 225 rpm, temperature: 20±1 °C)

4. Conclusion

The present study demonstrated that Eichrom anion exchange resin have a remarkable sorption ability for Cr(VI) ions. Optimum pH ranges for ion exchange were 2.0-6.0 for anion exchange resin. The Cr(VI) adsorption reached equilibrium at 10 min for anion exchange resin. The kinetic of Cr(VI) sorption by resin came after the second-order kinetic model. The data for the sorption on the resin was better described by Langmuir isotherm. As a result, Eichrom anion exchange resin may be employed for successful uptake of Cr(VI) from water samples. The equilibrium sorption level for both anion exchange resin increased with increasing temperature.

5. Conflict of Interest

The author declares that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

6. Acknowledgments

The author thanks Necmettin Erbakan University for its generous support.

7. References

- Abdel-Azzem, M., Yousef, U.S., Ragab, A.Z.-E., 2010. A new modified electrode based on electrochemical oxidation of 1-amino-5,6,7,8-tetrahydronaphthalene in acetonitrile, *Electrochimica Acta*, **55**, 1509-1518. DOI:10.1016/j.electacta.2009.09.04
- Alonso, A.I., Galán B., González, M., Ortiz, I. 1999. Experimental and theoretical analysis of a nondispersive solvent extraction pilot plant for the removal of Cr (VI) from a galvanic process wastewaters. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **38**,1666-1675. DOI:10.1021/ie980288p
- Altundas, R., Demir, Ü., Ekinci, D., Horasan, N., 2000. The electrochemical oxidation of 2-amino-3-cyano-4-phenylthiophene: evidence for a new class of photoluminescent material. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **484**, 101-106. DOI:10.1016/S0022-0728(00)00036-X
- Amiri, M., Bélanger, D., Donzel, N., Shul, G., 2021 Aqueous electrochemical energy storage system based on phenanthroline- and anthraquinone-modified carbon electrodes. *Electrochimica Acta*, **390**, 138862. DOI:10.1016/j.electacta.2021.138862
- Arslan, G., Edebali, S., Pehlivan, E., 2010. Physical and chemical factors affecting the adsorption of Cr (VI) via humic acids extracted from brown coals. *Desalination*, **255**, 223-231. DOI:org/10.1016/j.desal.2010.01.006
- Atmaca, U., Ekinci, D., Kudas, Z., Saruhan, T., Celik, M., 2020. Electrocatalytic Reduction of Oxygen at Glassy Carbon Electrodes Coated with Diazonium-derived Porphyrin/Metalloporphyrin Films. *Electroanalysis*, **32**, 6, 1379-1390. DOI:10.1002/elan.201900707
- ATSDR, 2000, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Division of Toxicology/Toxicology Information Branch (ATSDR), Toxicological profile for chromium, ATSDR, Atlanta, USA, 1–157.
- Aurelia, M., Mariana, C., Maria, C., 1989. Glucose sensor: polypyrrole-glucose oxidase electrode in the presence of p-benzoquinone. *Electrochimica Acta*, **37**, 11, 1987–1992.

- Barassi, G., Valdés, A., Araneda, C., Basualto, C., Sapag, J., Tapia, C., & Valenzuela, F., 2009. Cr (VI) sorption behavior from aqueous solutions onto polymeric microcapsules containing a long-chain quaternary ammonium salt: kinetics and thermodynamics analysis. *Journal of hazardous materials*, **172**, 262-268. DOI:10.1016/j.jhazmat.2009.06.167
- Barrière, F., & Downard, A. J., 2008. Covalent modification of graphitic carbon substrates by non-electrochemical methods. *Journal of Solid-State Electrochemistry*, **12**, 1231-1244. DOI:10.1007/s10008-008-0526-2
- Cengeloğlu Y., Tor A., Kir E., Ersöz M., 2003. Transport of hexavalent chromium through anion-exchange membranes. *Desalination*, **154**, 239-246. DOI:10.1016/S0011-9164(03)80039-5
- Chen, H., Ju, H., Sun, H., 1996. Properties of poly- β -aminoanthraquinone modified carbon fiber electrode as a basis for hemoglobin biosensors. *Analytica Chimica Acta*, **327**, 125-132. DOI:10.1016/0003-2670(96)00067-0
- Dalkıran, B. & Kaçar, C., 2020. Amin Fonksiyonlu Karbon Nanotüp, Kalay Oksit Nanopartikül ve Diamin Oksidaz Temelli Triptamin Biyosensörü. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, **8**, 631-641. DOI:10.29130/dubited.602777
- Demir, U., Ekinci, D., Pak, F., Tümer, F., 2007. A Mechanistic and Characteristic Investigation of Electrooxidation of 2-Amino-3-cyano-4-methylthiophene. *Macromolecular Chemistry and Physics*, **208**, 2367-2374. DOI:10.1002/macp.200700276
- Demir, Ü., Ekinci, D., Tümer, F., 2004. Mechanistic study of the oxidation of 2-amino-3-cyano-4-naphthylthiophene by cyclic voltammetry and UV-Vis-NIR absorption spectroscopy. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **562**, 167-172. DOI:10.1016/j.jelechem.2003.09.002
- Diao, F., Jansen, U. C., Qvortrup, K., Tanner, D., Ulstrup, J., Yan, X., Xiao, X., 2021. Surface-confined redox-active monolayers of a multifunctional anthraquinone derivative on nanoporous and single-crystal gold electrodes. *Electrochemistry Communications*, **124**, 106962. DOI:10.1016/j.elecom.2021.106962
- Diaz, A. F., Logan, J. A., 1980. Electroactive polyaniline films, *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*, **111**, 111-114
- Dragan, S., M. Dînu, V., Vlad C.D., 2003. Ion-exchange resins. II. Acrylamide crosslinked copolymers as precursors for some ion exchangers. *Journal of applied polymer science*, **89**, 2701-2707. DOI:org/10.1002/app.12393
- Edebalı, S., Pehlivan, E., 2010. Evaluation of Amberlite IRA96 and Dowex 1 \times 8 ion-exchange resins for the removal of Cr (VI) from aqueous solution. *Chemical Engineering Journal*, **161**, 161-166. DOI:10.1016/j.cej.2010.04.059
- Ekinci, D., Turhan, F., Pak, F., Kudaş, Z., Yeşildağ, A., 2012. Electrochemical synthesis and characterization of poly (9-benzylfluorene). *Polymer bulletin*, **68**, 1677-1687. DOI:10.1007/s00289-011-0667-9
- Ekinci, D., Ünal, Ö.F., Yeşildağ, A., 2018. Synthesis of gold nanoparticles on diazonium generated heteroaryl films and their electrocatalytic activities. *Electrochimica Acta*, **290**, 474-486. DOI:10.1016/j.electacta.2018.09.083
- Freundlich, H., 1907. *Über die adsorption in lösungen. Zeitschrift für physikalische Chemie*, **57**, 385-470. DOI:10.1515/zpch-1907-5723
- Genies, E.M., Marchesiello, M., 1992. Glucose sensor: polypyrrole-glucose oxidase electrode in the presence of p-benzoquinone. *Electrochimica Acta*, **37**, 1987-1992. DOI:org/10.1016/0013-4686(92)87113-E
- Gode, F., Pehlivan, E., 2005. Removal of Cr (VI) from aqueous solution by two Lewatit-anion exchange resins. *Journal of Hazardous Materials*, **B119**, 175-182. DOI:10.1016/j.jhazmat.2004.12.004
- Gryko, D., Kadish, K. M., Rybicka-Jasińska, K., Shan, W., Zawada, K., 2016. Porphyrins as photoredox catalysts: Experimental and theoretical studies. *Journal of the American Chemical Society*, **138**, 15451-15458. DOI:org/10.1021/jacs.6b09036
- Gu, X., Li, X., Wu, S., Shi, J., Jiang, G., & Tian, S., 2016. A sensitive hydrazine hydrate sensor based on a mercaptomethyl-terminated trinuclear Ni (II) complex modified gold electrode. *Rsc Advances*, **6**, 8070-8078. DOI:10.1039/C5RA23809A

- Guilard, R., Smith, K. M., Kadish, K., 2000. *The Porphyrin Handbook*, **3**. Elsevier. *Separation and Purification Technology*, **33**, 179-187. DOI:org/10.1016/S1383-5866(03)00006-6
- Hafiane, A., Lemordant, D., Dhahbi, M., 2000. Removal of hexavalent chromium by nanofiltration. *Desalination*, **130**, 305-312. DOI:10.1016/S0011-9164(00)00094-1
- Langmuir, I., 1916. The constitution and fundamental properties of solids and liquids. Part I. Solids. *Journal Of the American Chemical Society*, **38**, 2221-2295. DOI:10.1021/ja02268a002
- Hayashi, N., Matsumura D., Hoshina, H., Ueki, Y., Tsuji, T., Chen, J., Seko, N., 2021. Chromium (VI) adsorption–reduction using a fibrous amidoxime-grafted adsorbent. *Separation and Purification Technology*, **277**, 119536. DOI:10.1016/j.seppur.2021.119536
- Laviron, E.J.J. 1979. General expression of the linear potential sweep voltammogram in the case of diffusionless electrochemical systems. *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*, **101**, 19-28.
- Ho, Y-S., Mckay, G., 1999. Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*, **34**, 451-465. DOI:10.1016/S0032-9592(98)00112-5
- Liu, R., Tang, H., Zhang, B., 1999. Removal of Cu (II), Zn (II), Cd (III) and Hg (II) from waste water by poly (acrylamino-phosphonic)-type chelating fiber. *Chemosphere*, **38**, 3169-3179. DOI:10.1016/S0045-6535(98)00506-2
- Hossain, M.S., Tryk, D., Yeager, E., 1989. The electrochemistry of graphite and modified graphite surfaces: the reduction of O₂. *Electrochimica Acta*, **34**, 1733-1737. DOI:org/10.1016/0013-4686(89)85057-1
- Li, X., Sun, H., Sun, X., 2021. Polysulfone grafted with anthraquinone-hydroanthraquinone redox as a flexible membrane electrode for aqueous batteries. *Polymer*, **234**, 124245
- Huang, L., Ou Z., Boving, T. B., Tyson J., Xing B., 2009. Sorption of copper by chemically modified aspen wood fibers. *Chemosphere*, **76**, 1056-1061. DOI:10.1016/j.chemosphere.2009.04.030
- Marcu, C., Varodi, C., Balla, A., 2021. Adsorption Kinetics of Chromium (VI) from Aqueous Solution Using an Anion Exchange Resin. *Analytical Letters*, **1-2**, 54. DOI:10.1080/00032719.2020.1731523
- Jin, M., Liu, Y., Zhang, X., Wang, J., Zhang, S., Wang, G., Zhang, Y., Yin, H., Zhang, H., Zhao, H., 2021. Selective electrocatalytic hydrogenation of nitrobenzene over copper-platinum alloying catalysts. Experimental and theoretical studies., *Applied Catalysis B: Environmental*, **298**, 120545. DOI:10.1016/j.apcatb.2021.120545
- Park, H-J., Na C-K., 2006. Preparation of anion exchanger by amination of acrylic acid grafted polypropylene nonwoven fiber and its ion-exchange property. *Journal of Colloid and Interface Science*, **301**, 46-54. DOI:10.1016/j.jcis.2006.05.003
- Khezami, L., Capart, R., 2005. Removal of chromium (VI) from aqueous solution by activated carbons: kinetic and equilibrium studies. *Journal of hazardous materials*, **123**, 223-231. DOI:10.1016/j.jhazmat.2005.04.012
- Pehlivan, E., Çetin, S., 2009. Sorption of Cr (VI) ions on two Lewatit-anion exchange resins and their quantitative determination using UV-visible spectrophotometer. *Journal of Hazardous Materials*, **163**, 448-453. DOI:10.1016/j.jhazmat.2008.06.115
- Kitani, A., Yano, J., Kunai, A., Sasaki, K., 1987. A conducting polymer derived from para-aminodiphenylamine *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*, **221**, 69-82. DOI:org/10.1016/0022-0728(87)80246-2
- Pournaghi-Azar, M.H., Sabzi, R., 2003. Electrochemical characteristics of a cobalt pentacyanonitrosylferrate film on a modified glassy carbon electrode and its catalytic effect on the electrooxidation of hydrazine. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **543**, 115-125. DOI:org/10.1016/S0022-0728(02)01480-8
- Kobyas, M., 2004. Adsorption, kinetic and equilibrium studies of Cr (VI) by hazelnut shell activated carbon. *Adsorption Science & Technology*, **22**, 51-64. DOI:10.1260/026361704323150999
- Redlich, O. J. D. L., Peterson D. L., 1959. A useful adsorption isotherm. *Journal of physical chemistry*, **63**, 1024. DOI:org/10.1021/j150576a611
- Korngold, E., Belayev, N., Aronov, L., 2003. Removal of chromates from drinking water by anion exchangers.

- Rengaraj, S., Joo, C. K., Kim, Y., Yi J., 2003. Kinetics of removal of chromium from water and electronic process wastewater by ion exchange resins: 1200H, 1500H and IRN97H. *Journal of hazardous materials.*, **B10** 2257–275. DOI:10.1016/S0304-3894(03)00209-7
- Sereno, L., Silber, J.J., Vettorazzi, N., 1981. Anodic oxidation of 1-naphthylamine in acetonitrile. *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry* **125**, 459-475
- Sujana, M. G., Thaku, R. S. r, Rao, S. B., 1998. Removal of fluoride from aqueous solution by using alum sludge. *Journal of Colloid and Interface Science.* DOI:10.1006/jcis.1998.5611
- Tor, A., 2006. Removal of fluoride from an aqueous solution by using montmorillonite. *Desalination.*, **201**, 267–276. DOI:10.1016/j.jhazmat.2006.04.063
- Tor, A., Büyükerkek T., Çengelolu, Y., Ersöz, M., 2005. Simultaneous recovery of Cr (III) and Cr (VI) from the aqueous phase with ion-exchange membranes. *Desalination.*, **171**, 233-241. DOI:10.1016/j.desal.2004.02.106
- Tor, A., Cengelolu, Y., 2006. Removal of congo red from aqueous solution by adsorption onto acid activated red mud. *Journal of hazardous materials.*, **B138**, 409–415. DOI:10.1016/j.jhazmat.2006.04.063
- US EPA, 1990. Environmental Protection Agency, Environmental Pollution Control Alternatives, EPA/625/5-90/025, EPA/625/4-89/023, Cincinnati, US.
- Venkateswaran, P., Palanivelu, K., 2004. Solvent extraction of hexavalent chromium with tetrabutyl ammonium bromide from aqueous solution. *Separation and purification technology.*, **40**, 279-284. DOI:10.1016/j.seppur.2004.03.005
- Venkateswaran, P., Palanivelu, K., 2005. Studies on recovery of hexavalent chromium from plating wastewater by supported liquid membrane using tri-n-butyl phosphate as carrier. *Hydrometallurgy.*, **78**, 107-115. DOI:10.1016/j.hydromet.2004.10.021
- Yılmaz A., 2008. Kinetic analysis of chromium (VI) ions transport through a bulk liquid membrane containing p-tert-butylcalix [4] arene dioxaocetylamide derivative. *Separation and Purification Technology.*, **59**, 1-8. DOI: 10.1016/j.seppur.2007.05.017
- Zhang, Q., Zhang, S., Chen, S., Li, P., Qin T., Yuan, S., 2008. Preparation and characterization of a strong basic anion exchanger by radiation-induced grafting of styrene onto poly (tetrafluoroethylene) fiber. *Journal of colloid and interface science.*, **322**, 421–428. DOI:10.1016/j.jcis.2008.03.049
- Zhao, D., Sengupta, A.K., Stewart, L., 1998. Selective removal of Cr (VI) oxyanions with a new anion exchanger. *Industrial & engineering chemistry research.*, **37**, 4383–4387. DOI:10.1021/ie980227r
- Zhao, M., Huang L., Arulmani, S.R.B., Yan J., Wu L., Tao W., Zhang H. and Xiao T., 2022. Adsorption of Different Pollutants by Using Microplastic with Different Influencing Factors and Mechanisms in Wastewater: A Review, *Nanomaterials*, **12-13**, 2256. DOI:10.3390/nano1213225

Müon-Proton Çarpıştırıcılarında Anormal Yüksüz Üçlü Ayar Bağlaşımlarının Araştırılması

Serdar SPOR¹¹Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Ahmet Erdoğan Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Görüntüleme Teknikleri Programı, Zonguldak.e-posta: serdar.spor@beun.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-3263-9258>

Geliş Tarihi: 022.10.2022 Kabul Tarihi: 09.04.2023

Öz

Anahtar kelimeler

Elektrozayıf Etkileşim; Standart Model Ötesi Modeller; Müon-Proton Çarpıştırıcısı; Anormal Yüksüz Üçlü Ayar Bağlaşımları.

Sekiz boyutlu operatörlere karşılık gelen anormal $ZZ\gamma$, $Z\gamma\gamma$ ve ZZZ yüksüz üçlü ayar bağlaşımları, 24.5 TeV kütle merkezi enerjili FCC- μp ve 20.2 TeV kütle merkezi enerjili SPPC- μp müon-proton çarpıştırıcılarında $\mu^- p \rightarrow Zq\mu^- \rightarrow \nu\bar{\nu}q\mu^-$ süreci ile araştırılmıştır. Analizde sürecin son durumuna uygulanan kesilimler ile sinyal-arka plan oranı artırılmıştır. FCC- μp ve SPPC- μp çarpıştırıcılarında sırasıyla $\mathcal{L}_{\text{int}} = 5$ ve 42.8 fb^{-1} ışınluluk ile anormal bağlaşım limitleri, %95 Güvenilirlik Düzeyinde (C.L.) sistematik belirsizlikler %0, %3 ve %5 ile elde edilmiştir. FCC- μp ve SPPC- μp çarpıştırıcılarında sistematik belirsizlik olmaksızın anormal C_{BB}/Λ^4 , C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 , $C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$ bağlaşımlarının limitleri, sırasıyla $[-0.11923; 0.11967] \text{ TeV}^{-4}$, $[-0.33825; 0.33851] \text{ TeV}^{-4}$, $[-0.38075; 0.38190] \text{ TeV}^{-4}$, $[-0.21641; 0.21808] \text{ TeV}^{-4}$ ve $[-0.10842; 0.10602] \text{ TeV}^{-4}$, $[-0.29781; 0.29689] \text{ TeV}^{-4}$, $[-0.33817; 0.33843] \text{ TeV}^{-4}$, $[-0.18948; 0.19214] \text{ TeV}^{-4}$ olarak bulunmuştur ve limitlerin duyarlılıkları karşılaştırılmıştır.

Investigation of Anomalous Neutral Triple Gauge Couplings at Muon-Proton Colliders

Abstract

Keywords

Electroweak Interaction; Models Beyond the Standard Model; Muon-Proton Collider; Anomalous Neutral Triple Gauge Couplings.

Anomalous $ZZ\gamma$, $Z\gamma\gamma$ and ZZZ neutral triple gauge couplings corresponding to dimension-eight operators are investigated by the process $\mu^- p \rightarrow Zq\mu^- \rightarrow \nu\bar{\nu}q\mu^-$ at muon-proton colliders as the FCC- μp with 24.5 TeV center-of-mass energy and the SPPC- μp with 20.2 TeV center-of-mass energy. In the analysis, the signal-to-background ratio is increased with the applied cuts to the final state of the process. Limits of anomalous coupling with integrated luminosities of $\mathcal{L}_{\text{int}} = 5$ and 42.8 fb^{-1} , respectively, at FCC- μp and SPPC- μp colliders are obtained with systematic uncertainties of 0%, 3%, and 5% at 95% Confidence Level (C.L.). The limits of anomalous C_{BB}/Λ^4 , C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 , $C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$ couplings without systematic uncertainty at FCC- μp and SPPC- μp colliders are $[-0.11923; 0.11967] \text{ TeV}^{-4}$, $[-0.33825; 0.33851] \text{ TeV}^{-4}$, $[-0.38075; 0.38190] \text{ TeV}^{-4}$, $[-0.21641; 0.21808] \text{ TeV}^{-4}$ and $[-0.10842; 0.10602] \text{ TeV}^{-4}$, $[-0.29781; 0.29689] \text{ TeV}^{-4}$, $[-0.33817; 0.33843] \text{ TeV}^{-4}$, $[-0.18948; 0.19214] \text{ TeV}^{-4}$ and the sensitivities of the limits are compared.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Standart Model (SM), mevcut çarpıştırıcı deneylerinin ulaşılabilir enerji limitlerinde parçacık fiziğini tanımlamada başarılı bir teoridir. Bununla birlikte, sıfır olmayan nötrino kütleleri, güçlü CP problemi ve evrendeki madde-antimadde asimetrisi gibi bazı cevaplanmamış sorunları açıklığa kavuşturmak için SM'nin genişletilmesi gerekmektedir.

Ayar bozonu kendi kendine etkileşimleri, SM'nin Abelyen olmayan $SU(2)_L \times U(1)_Y$ ayar teorisi ile tanımlanır. Bu etkileşimler, üçlü ayar bozonu bağlaşımları olan WWV , $ZV\gamma$, ve ZZV ($V = \gamma, Z$) ile tanımlanabilir (Baur and Rainwater 2000). Ancak, foton ve Z bozonu içeren bağlaşımlar, SM'de ağaç mertebesinde bulunmamaktadırlar, çünkü Z bozonunun elektrik yükü yoktur. SM'de $ZZ\gamma$, $Z\gamma\gamma$ ve ZZZ üçlü etkileşmelerin olmaması nedeniyle, bu köşelerin varlığında SM tahmininden sapma, yeni

fizik için hassas bir kanıttır. Literatürde, ee (Ananthanarayan *et al.* 2014, Atağ and Şahin 2004, Ellis *et al.* 2020, Ots *et al.* 2006, Rahaman and Singh 2017, Spor *et al.* 2022), pp (Biekötter *et al.* 2021, Hernández-Juárez *et al.* 2021, Rahaman and Singh 2019, Senol *et al.* 2018, Senol *et al.* 2020, Yılmaz *et al.* 2020) ve $\mu\mu$ (Senol *et al.* 2022, Spor and Köksal 2022, Spor 2022) çarpıştırıcılarında anormal yüksüz üçlü ayar bağlaşım (aNTGC) etkileşimleri farklı üretim süreçleri ile geniş çapta araştırılmıştır.

Bu çalışmada, aNTGC'nin SM ötesindeki yeni fiziğin araştırılmasında benzersiz bir öneme sahip olduğu ve gelecek çarpıştırıcı çalışmaları içerisinde müon-proton çarpıştırıcılarının etkileyici bir potansiyele sahip olduğu ortaya konulmaktadır.

2. Materyal ve Metot

2.1 Müon-proton çarpıştırıcısı

Çeşitli çarpışma türlerini ele alan hızlandırıcı fiziği çalışmaları, parçacık fiziğindeki yeni fizik araştırmalarına önemli katkılar sağlamaktadır. Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (LHC), yeni parçacıkları ve etkileşimleri keşfetmek için yüksek potansiyelli bir hadron çarpıştırıcısıdır. Bununla birlikte, proton demetlerinin çarpışmasından sonra saçılan çok sayıda jet, karmaşık arka planlara veya gürültülere neden olduğundan, aranan sinyalleri algılamak için LHC'de kesin ölçümler yapmak zorlaşmaktadır. Şimdiye kadar yapılmış en güçlü ve en büyük dairesel proton-proton çarpıştırıcısı olan LHC, gelişen hızlandırıcı teknolojisi ile kademeli olarak geliştirilecektir. SM'nin ötesindeki yeni fizik arayışı, lepton-hadron çarpıştırıcılarını parçacık fiziğinin geleceğinde önemli bir potansiyel aday haline getirmektedir. LHC sonrası süreçte, ilk olarak, LHC'nin ana tüneline teğet olarak inşa edilecek bir elektron halkası ile Büyük Hadron elektron Çarpıştırıcısına (LHeC) dönüştürülmesi ve LHeC programının tamamlanmasının ardından, elektron halkasının müon halkasıyla değiştirilmesiyle LHC- μp adında yeni lepton-hadron çarpıştırıcısı olarak çalıştırılması planlanmaktadır. Öte yandan, Gelecek Dairesel Çarpıştırıcısı (FCC), LHC sonrası dönem için CERN'de dairesel bir çarpıştırıcı olarak kabul edilmektedir. FCC projesinde, ilk adım, gelecekteki

bir ee çarpıştırıcısının tasarımını içerirken, pp , ep , $\mu\mu$ ve μp çarpıştırıcılarının eklenmesi de düşünülmektedir (Abada *et al.* 2019a). FCC-hh, 100 TeV kütle merkezi enerjisi ile gelecekteki bir pp çarpıştırıcısı olarak planlanmıştır (Abada *et al.* 2019b). FCC'ye teğet bir müon halkası eklenerek müon çarpıştırıcısının oluşturulması, yüksek proton enerjisinin kullanılmasını sağlayacaktır. Böylece, μp çarpıştırıcıları ile yüksek kütle merkezi enerjisinde lepton-hadron çarpışmalarını araştırmak için bir fırsat sağlanacaktır (Caliskan *et al.* 2017). Çinli bilim adamları, FCC projesine paralel olarak 70 TeV kütle merkezi enerjisine sahip Süper Proton Proton Çarpıştırıcısı (SPPC) adlı bir pp çarpıştırıcı tasarladılar. SPPC çarpıştırıcısından önce, geleceğin ee çarpıştırıcısı olan Dairesel Elektron Pozitron Çarpıştırıcısı (CEPC), aynı tüneli kullanan ilk aşama olarak tasarlanmıştır. CEPC/SPPC projesinde $\mu\mu$, μp ve ep çarpışmaları da FCC projesinde olduğu gibi daha sonraki yıllarda gerçekleştirilecektir (The CEPC Study Group 2018).

Bu çalışmada, yüksek kütle merkezi enerjisi ve yüksek ışınlılık değerlerine sahip olan FCC- μp ve SPPC- μp çarpıştırıcıları ele alınmıştır. FCC- μp çarpıştırıcı için $E_\mu = 3$ TeV, $E_p = 50$ TeV, $\mathcal{L}_{\text{int}} = 5$ fb⁻¹ (Acar *et al.* 2018) ve SPPC- μp çarpıştırıcı için $E_\mu = 1.5$ TeV, $E_p = 68$ TeV, $\mathcal{L}_{\text{int}} = 42.8$ fb⁻¹ (Caliskan 2019, Spor *et al.* 2020) değerleri kullanılmıştır.

2.2 Anormal yüksüz üçlü ayar bağlaşımları

aNTGC etkileşimlerindeki yeni fizik etkileri yüksek boyutlu operatörlerle modellenen bağımsız bir şekilde Etkin Alan Teorisi (EFT) ile araştırılmıştır. SM etkileşimlerini ve aNTGC'yi tanımlayan sekiz boyutlu operatörleri içeren EFT'nin etkin Lagranjyeni yazılabilir (Degrande 2014):

$$\mathcal{L}^{NTGC} = \mathcal{L}_{SM} + \sum_i \frac{C_i}{\Lambda^4} (\mathcal{O}_i + \mathcal{O}_i^\dagger) \quad (1)$$

burada Λ yeni fizik ölçeğidir ve i indeksi aşağıda verilen dört operatörü etiketlemektedir:

$$\mathcal{O}_{\bar{B}W} = iH^\dagger \bar{B}_{\mu\nu} W^{\mu\rho} \{D_\rho, D^\nu\} H, \quad (2)$$

$$\mathcal{O}_{BW} = iH^\dagger B_{\mu\nu} W^{\mu\rho} \{D_\rho, D^\nu\} H, \quad (3)$$

$$\mathcal{O}_{WW} = iH^\dagger W_{\mu\nu} W^{\mu\rho} \{D_\rho, D^\nu\} H, \quad (4)$$

$$\mathcal{O}_{BB} = iH^\dagger B_{\mu\nu} B^{\mu\rho} \{D_\rho, D^\nu\} H. \quad (5)$$

Burada $B_{\mu\nu}$ ve $W_{\mu\nu}$ alan kuvvet tensörleridir ve D_μ kovaryant türevdir. İlk operatör CP-çifttir ve son üç operatör CP-tekter. Operatörlerin tanımlanmasında kullanılan ifadeler aşağıda verilmiştir:

$$B_{\mu\nu} = (\partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu), \quad (6)$$

$$W_{\mu\nu} = \sigma^i (\partial_\mu W_\nu^i - \partial_\nu W_\mu^i + g\epsilon_{ijk} W_\mu^j W_\nu^k), \quad (7)$$

$$D_\mu \equiv \partial_\mu - i\frac{g'}{2} B_\mu Y - ig_W W_\mu^i \sigma^i. \quad (8)$$

Yeni fizik enerji ölçeği yüksek olduğunda, $Zj\mu$ son durumunun üretiminde en büyük yeni fizik katkısı, SM ile sekiz boyutlu operatörler arasındaki girişimden gelmektedir. Altı boyutlu operatörlerin ağaç mertebesinde aNTGC üzerinde herhangi bir etkisi yoktur, ancak tek-döngüde aNTGC üzerinde $\alpha\hat{s}/4\pi\Lambda^2$ mertebeli bir etki oluşmaktadır. Ağaç mertebesinde sekiz boyutlu operatörlerin katkıları $v^2\hat{s}/\Lambda^4$ mertebesinde. Sonuç olarak, sekiz boyutlu operatörlerin katkısı, $\Lambda \lesssim \sqrt{4\pi\hat{s}/\alpha}$ ile tek-döngüde altı boyutlu operatörün katkısından daha baskındır (Degrande 2014).

Altı boyutlu ve sekiz boyutlu operatörlere sahip aNTGC için etkin Lagranjiyen verilmiştir (Gounaris *et al.* 2000):

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{aNTGC}^{dim-6,8} = \frac{g_e}{m_Z^2} & \left[-[f_4^\gamma (\partial_\mu F^{\mu\beta}) \right. \\ & + f_4^Z (\partial_\mu Z^{\mu\beta})] Z_\alpha (\partial^\alpha Z_\beta) \\ & + [f_5^\gamma (\partial^\sigma F_{\sigma\mu}) \\ & + f_5^Z (\partial^\sigma Z_{\sigma\mu})] \tilde{Z}^{\mu\beta} Z_\beta \\ & - [h_1^\gamma (\partial^\sigma F_{\sigma\mu}) \\ & + h_1^Z (\partial^\sigma Z_{\sigma\mu})] Z_\beta F^{\mu\beta} \\ & - [h_3^\gamma (\partial_\sigma F^{\sigma\rho}) \\ & + h_3^Z (\partial_\sigma Z^{\sigma\rho})] Z^\alpha \tilde{F}_{\rho\alpha} \\ & - \left\{ \frac{h_2^\gamma}{m_Z^2} [\partial_\alpha \partial_\beta \partial^\rho F_{\rho\mu}] \right. \\ & + \frac{h_2^Z}{m_Z^2} [\partial_\alpha \partial_\beta (\square \\ & + m_Z^2) Z_\mu] \left. \right\} Z^\alpha F^{\mu\beta} \\ & + \left\{ \frac{h_4^\gamma}{2m_Z^2} [\square \partial^\sigma F^{\rho\alpha}] \right. \\ & + \frac{h_4^Z}{2m_Z^2} [(\square \\ & + m_Z^2) \partial^\sigma Z^{\rho\alpha}] \left. \right\} Z_\sigma \tilde{F}_{\rho\alpha} \end{aligned} \quad (9)$$

burada alan kuvvet tensörü $Z_{\mu\nu} = \partial_\mu Z_\nu - \partial_\nu Z_\mu$ ile $\tilde{Z}_{\mu\nu} = 1/2\epsilon_{\mu\nu\rho\sigma} Z^{\rho\sigma}$ ($\epsilon^{0123} = +1$) olarak verilmiştir ve benzer durum elektromanyetik alan tensörü $F_{\mu\nu}$ için de geçerlidir. Bununla birlikte, f_4^V , h_1^V , h_2^V , CP-ihlal eden üç bağlaşımdır, f_5^V , h_3^V , h_4^V ise CP-koruyan üç bağlaşımdır ($V = \gamma, Z$). SM'de ağaç mertebesinde, tüm bağlaşımlar sıfırdır. Lagranjiyede, h_2^V ve h_4^V bağlaşımları sekiz boyutludur ve diğer dört bağlaşım ise altı boyutludur.

Denklem (9)'deki etkin Lagranjiyen bağlaşımları, $SU(2)_L \times U(1)_Y$ grubu ayar değişmezliği altında Denklem (2)-(5)'teki operatörlerin bağlaşımları ile ilişkilidir (Rahaman 2020). ZZV bağlaşımı için iki kabuk üstü Z bozonu ve bir kabuk dışı $V = \gamma$ veya Z bozonu ile CP-koruyan anormal bağlaşımlar aşağıda yazılmıştır (Degrande 2014):

$$f_5^Z = 0, \quad (10)$$

$$f_5^\gamma = \frac{v^2 m_Z^2 C_{\bar{B}W}}{4c_\omega s_\omega \Lambda^4} \quad (11)$$

ve CP-ihlal eden anormal bağlaşımlar:

$$f_4^Z = \frac{m_Z^2 v^2}{2c_\omega s_\omega} \left(c_\omega^2 \frac{C_{WW}}{\Lambda^4} + 2c_\omega s_\omega \frac{C_{BW}}{\Lambda^4} + 4s_\omega^2 \frac{C_{BB}}{\Lambda^4} \right), \quad (12)$$

$$f_4^Y = -\frac{m_Z^2 v^2}{4c_\omega s_\omega} \left(-c_\omega s_\omega \frac{C_{WW}}{\Lambda^4} + \frac{C_{BW}}{\Lambda^4} (c_\omega^2 - s_\omega^2) + 4c_\omega s_\omega \frac{C_{BB}}{\Lambda^4} \right). \quad (13)$$

$Z\gamma V$ bağlaşımı için bir kabuk üstü Z bozonu, bir kabuk üstü foton ve bir kabuk dışı $V = \gamma$ veya Z bozonu ile CP-koruyan anormal bağlaşımlar aşağıda yazılmıştır (Degrande 2014):

$$h_3^Z = \frac{v^2 m_Z^2}{4c_\omega s_\omega} \frac{C_{\bar{B}W}}{\Lambda^4}, \quad (14)$$

$$h_4^Z = h_3^Y = h_4^Y = 0 \quad (15)$$

ve CP-ihlal eden anormal bağlaşımlar:

$$h_1^Z = \frac{m_Z^2 v^2}{4c_\omega s_\omega} \left(-c_\omega s_\omega \frac{C_{WW}}{\Lambda^4} + \frac{C_{BW}}{\Lambda^4} (c_\omega^2 - s_\omega^2) + 4c_\omega s_\omega \frac{C_{BB}}{\Lambda^4} \right), \quad (16)$$

$$h_2^Z = h_2^Y = 0, \quad (17)$$

$$h_1^Y = -\frac{m_Z^2 v^2}{4c_\omega s_\omega} \left(s_\omega^2 \frac{C_{WW}}{\Lambda^4} - 2c_\omega s_\omega \frac{C_{BW}}{\Lambda^4} + 4c_\omega^2 \frac{C_{BB}}{\Lambda^4} \right). \quad (18)$$

Denklem (11)-(14),(16),(18)'de C_{BB}/Λ^4 , C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 ve $C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$ bağlaşımları, sekiz boyutlu aNTGC'yi tanımlar: CP-koruyan $C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$ ve CP-ihlal eden C_{BB}/Λ^4 , C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 bağlaşımlardır. Sekiz boyutlu bu bağlaşımlar üzerine en son deneysel sınırlar, CERN LHC'de 36.1 fb^{-1} ışınllık ile 13

TeV kütle merkezi enerjisinde nötrino bozunumunu içeren $pp \rightarrow Z\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}\gamma$ süreciyle belirlenmiştir (Aaboud et al. 2018). Bu çalışmadaki, %95 Güvenilirlik Düzeyi (C.L.) deneysel sınırları şu şekilde verilmiştir:

$$-0.24 \text{ TeV}^{-4} < \frac{C_{BB}}{\Lambda^4} < 0.24 \text{ TeV}^{-4} \quad (19)$$

$$-0.65 \text{ TeV}^{-4} < \frac{C_{BW}}{\Lambda^4} < 0.64 \text{ TeV}^{-4} \quad (20)$$

$$-2.3 \text{ TeV}^{-4} < \frac{C_{WW}}{\Lambda^4} < 2.3 \text{ TeV}^{-4} \quad (21)$$

$$-1.1 \text{ TeV}^{-4} < \frac{C_{\bar{B}W}}{\Lambda^4} < 1.1 \text{ TeV}^{-4} \quad (22)$$

2.3 Anormal yüksüz üçlü ayar bağlaşımlarında duyarlılıklar

%95 C.L. anormal C_{BB}/Λ^4 , C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 , $C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$ bağlaşım limitlerinin duyarlılıklarını araştırmak için sistematik hatalar içeren bir χ^2 testi kullanıldı. χ^2 testi şu şekilde tanımlanır:

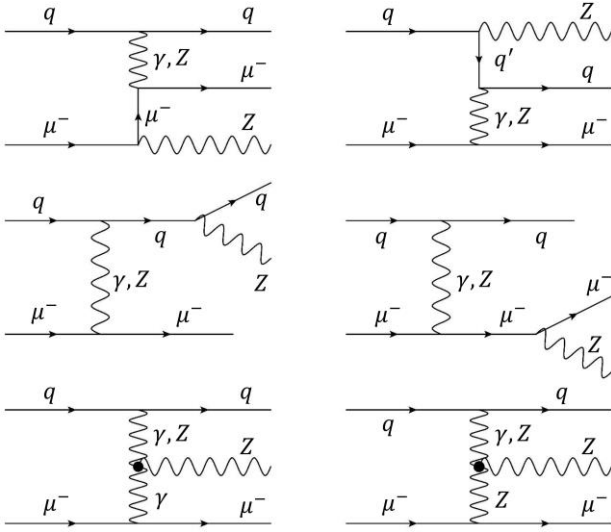
$$\chi^2 = \left(\frac{\sigma_{B_{SM}} - \sigma_{NP}}{\sigma_{B_{SM}} \sqrt{(\delta_{st})^2 + (\delta_{sys})^2}} \right)^2 \quad (23)$$

burada $\sigma_{B_{SM}}$ yalnızca SM arka planının tesir kesitidir ve σ_{NP} ise SM'nin ötesindeki yeni fiziğin ve SM arka planının toplam tesir kesitidir. $\delta_{st} = 1/\sqrt{N_{B_{SM}}}$ ve δ_{sys} sırasıyla istatistiksel hata ve sistematik hatadır. SM arka planının olay sayısı $N_{B_{SM}} = \mathcal{L}_{int} \times \sigma_{B_{SM}}$ olarak tanımlanır, burada \mathcal{L}_{int} ışınllıktır. Sistematik belirsizlikler, birçok nedenden (Khoraiuli 2008) dolayı χ^2 testinin istatistiksel analizine dahil edilmiştir. Bu çalışmanın analizinde %0, %3 ve %5'lik sistematik belirsizlikler tartışılmıştır.

3. Bulgular

$\mu^- p \rightarrow Zq\mu^-$ süreci için Feynman diyagramları Şekil 1'de verilmiştir. Burada, üstten ilk dört Feynman diyagramı SM katkılarını içerirken en alttaki iki Feynman diyagramı ise anormal $ZZ\gamma$, $Z\gamma\gamma$ ve ZZZ

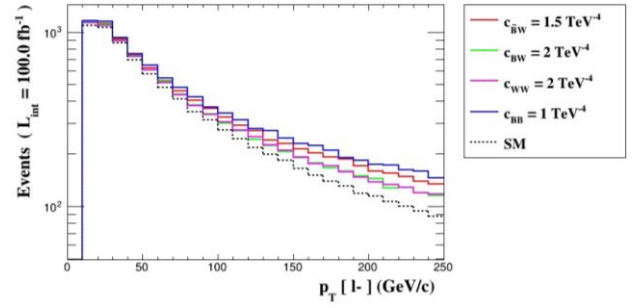
köşeleri ile SM'nin ötesindeki yeni fizik katkılarını içerir.



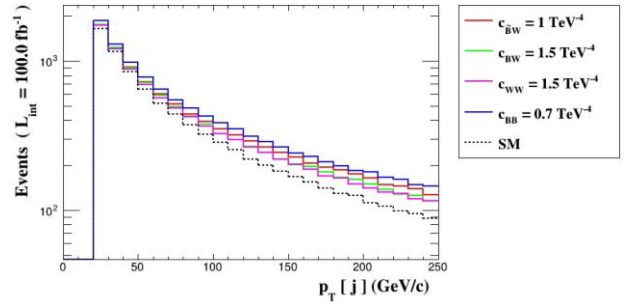
Şekil 1. $\mu^- p \rightarrow Z q \mu^-$ sürecinin Feynman diyagramları.

Bu çalışmada, Z bozonu nötrino çiftine bozundurularak üretim sürecindeki $\nu\bar{\nu}q\mu^-$ son durumu tartışılmaktadır. Z bozonunun nötrinolara bozunmasını içeren süreçler, hadronlara veya yüklü leptonlara bozunmasını içeren süreçlere göre birçok avantaja sahiptir. Hadron kanalının son durumunda, çok sayıda jet arka planı olması nedeniyle temiz veriler elde edilemez. Ayrıca nötrino çifti bozunmasının yüklü leptonlardan daha yüksek bir Z bozonu dallanma oranına sahip olması, duyarlılığın yüksek olduğu daha enerjik bölgede inceleme olanağı sağlar.

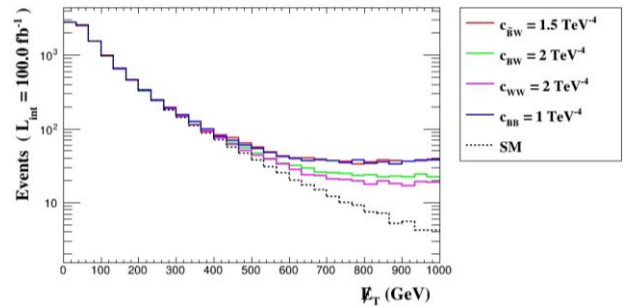
Tüm sinyal ve SM arka plan olayları, her biri için 500k olay sayısı ile MadGraph5_aMC@NLO (Alwall *et al.* 2008) programı kullanılarak hesaplanmıştır. Sinyali ilgili arka planlardan ayırt etmek için bazı kinematik kesilimler uygulamak gerekir ve uygun kesilimler seçildikten sonra ilgili arka plan bastırılır. Uygun kesilimler için, $\mu^- p \rightarrow Z q \mu^- \rightarrow \nu\bar{\nu}q\mu^-$ işleminin son durumundan yola çıkarak yüklü lepton enine momentumu p_T^ℓ , jet enine momentumu p_T^j ve enine kayıp enerjisi E_T kullanabiliriz.



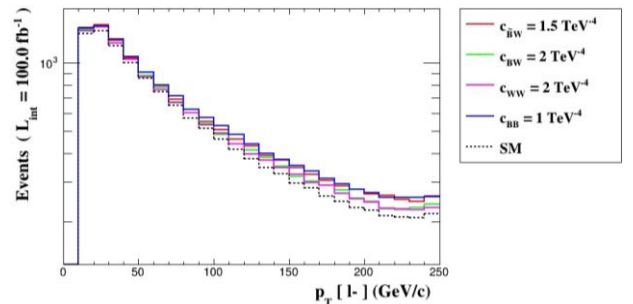
Şekil 2. FCC- μp çarpıştırıcısında sinyal ($C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$, C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 , C_{BB}/Λ^4) ve SM arka planı için yüklü lepton enine momentumu p_T^ℓ dağılımı.



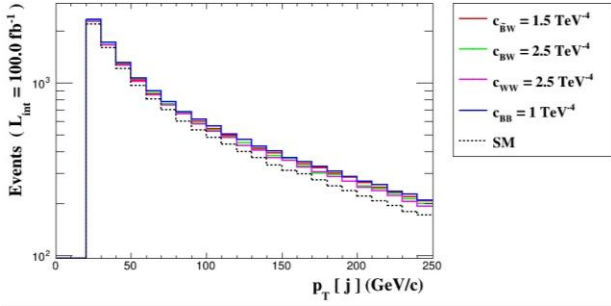
Şekil 3. FCC- μp çarpıştırıcısında sinyal ($C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$, C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 , C_{BB}/Λ^4) ve SM arka planı için jet enine momentumu p_T^j dağılımı.



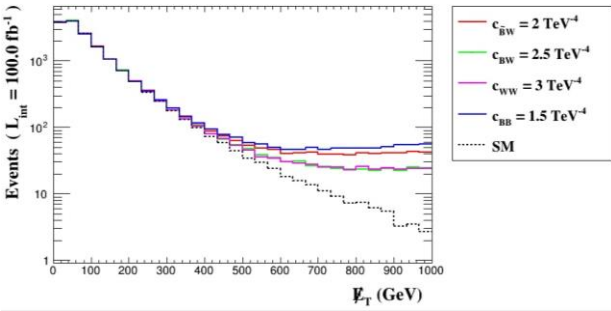
Şekil 4. FCC- μp çarpıştırıcısında sinyal ($C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$, C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 , C_{BB}/Λ^4) ve SM arka planı için enine kayıp enerji E_T dağılımı.



Şekil 5. SPPC- μp çarpıştırıcısında sinyal ($C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$, C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 , C_{BB}/Λ^4) ve SM arka planı için yüklü lepton enine momentumu p_T^ℓ dağılımı.



Şekil 6. SPPC- μp çarpıştırıcısında sinyal ($C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$, C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 , C_{BB}/Λ^4) ve SM arka planı için jet enine momentumu p_T^j dağılımı.



Şekil 7. SPPC- μp çarpıştırıcısında sinyal ($C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$, C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 , C_{BB}/Λ^4) ve SM arka planı için enine kayıp enerji E_T dağılımı.

Bu çalışmada tüm bağlaşımlar için sinyali SM arka plandan ayırt etmek için kullanılan p_T^ℓ , p_T^j ve E_T kesilimlerinin kinematik dağılımları, FCC- μp çarpıştırıcısı için Şekil 2-4'de ve SPPC- μp çarpıştırıcısı için ise Şekil 5-7'de gösterilmektedir. Şekil 2-7'deki p_T^ℓ , p_T^j ve E_T kesilimlerin dağılımlarında sinyal ve SM arka planın ayrıştığı ve sapmaya uğradığı seviyelerin her iki çarpıştırıcı için de yaklaşık olarak benzer olduğu görülmektedir. Bu nedenle, sinyalin SM arka plandan saptığı bölgeleri dikkate alarak her iki çarpıştırıcı için ortak kinematik kesilimler $p_T^\ell > 20$ GeV, $p_T^j > 30$ GeV ve $E_T > 300$ GeV olarak belirlendi ve "seçilen kesilim" olarak etiketlendiler. Ayrıca, "temel kesilim" ile etiketlenen aşağıdaki kesilimler, hem sinyal hem de SM arka plan süreçleri için minimum kesilim olarak belirlenmiştir: $|\eta^\ell| < 2.5$, $|\eta^j| < 5.0$, $p_T^\ell > 10$ GeV, $p_T^j > 20$ GeV ve $\Delta R_{\min}^{\ell j} > 0.4$.

Her bir bağlaşımın ayrı ayrı 1 TeV^{-4} ve diğer bağlaşımların sıfıra eşit olduğu düşünülen sinyallerin ve SM arka planının temel kesilimden ve seçilen

kesilimden sonra meydana gelen etkilerini incelemek için FCC- μp ve SPPC- μp çarpıştırıcısında tesir kesitleri, sırasıyla Çizelge 1-2'de verilmiştir.

Çizelge 1. FCC- μp çarpıştırıcısında sinyallerin ve arka planın temel ve seçilen kesilime göre tesir kesitleri.

Sinyaller	Temel kesilim	Seçilen kesilim		
	ile tesir kesiti	S_1/B_1	ile tesir kesiti	
	S_1 (pb)	S_2 (pb)	S_2/B_2	
$C_{BB}/\Lambda^4=1 \text{ TeV}^{-4}$	0.27301	2.606	0.17117	23.257
$C_{BW}/\Lambda^4=1 \text{ TeV}^{-4}$	0.12577	1.200	0.02801	3.806
$C_{WW}/\Lambda^4=1 \text{ TeV}^{-4}$	0.12098	1.155	0.02369	3.219
$C_{\bar{B}W}/\Lambda^4=1 \text{ TeV}^{-4}$	0.15618	1.491	0.05755	7.819
Arka plan	B_1 (pb)	B_2 (pb)		
SM	0.10477	0.00736		

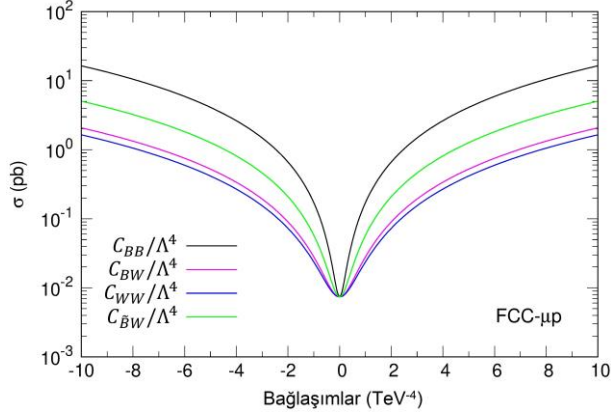
Çizelge 2. SPPC- μp çarpıştırıcısında sinyallerin ve arka planın temel ve seçilen kesilime göre tesir kesitleri.

Sinyaller	Temel kesilim	Seçilen kesilim		
	ile tesir kesiti	S_1/B_1	ile tesir kesiti	
	S_1 (pb)	S_2 (pb)	S_2/B_2	
$C_{BB}/\Lambda^4=1 \text{ TeV}^{-4}$	0.23151	1.478	0.08075	10.406
$C_{BW}/\Lambda^4=1 \text{ TeV}^{-4}$	0.16492	1.053	0.01715	2.210
$C_{WW}/\Lambda^4=1 \text{ TeV}^{-4}$	0.16256	1.038	0.01503	1.937
$C_{\bar{B}W}/\Lambda^4=1 \text{ TeV}^{-4}$	0.17868	1.141	0.03067	3.952
Arka plan	B_1 (pb)	B_2 (pb)		
SM	0.15661	0.00776		

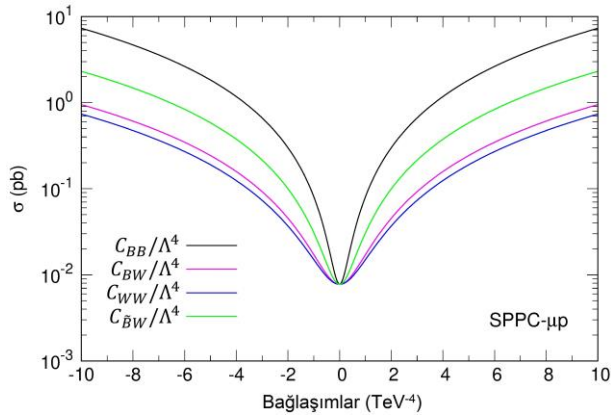
S_1 ve S_2 sinyalleri, sırasıyla temel ve seçilen kesilimin uygulanması sonucunda elde edilen tesir kesitlerini belirtirken B_1 ve B_2 ise sırasıyla temel ve seçilen kesilimin uygulanması sonucunda elde edilen SM arka planının tesir kesitlerini göstermektedir. S_1/B_1 ve S_2/B_2 oranları incelenirse; C_{BB}/Λ^4 , C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 , $C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$ sinyalleri için Çizelge 1'deki FCC- μp çarpıştırıcısında sırasıyla 8.9, 3.2, 2.8, 5.2 kat ve Çizelge 2'deki SPPC- μp çarpıştırıcısında ise sırasıyla 7.0, 2.1, 1.9, 3.5 kat sinyal-arka plan oranının arttığı görülmektedir. Böylece seçilen kesimler ile birlikte SM arka planının baskılandığı ve dolayısıyla sinyallerin çok daha belirgin duruma geldiği sonucuna varılmaktadır.

Anormal bağlaşımların değerlerine göre $\mu^- p \rightarrow Z q \mu^- \rightarrow \nu \bar{\nu} q \mu^-$ sürecinin toplam tesir kesitleri, FCC- μp ve SPPC- μp çarpıştırıcısı için sırasıyla Şekil 8-9'de sunulmaktadır. Anormal C_{BB}/Λ^4 , C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 , $C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$ bağlaşım fonksiyonlarından birine karşılık gelen toplam tesir kesiti, diğer üç bağlaşımın sıfıra sabitlenmesi ile incelenmiştir. Bu toplam tesir kesitlerinin analizinde seçilen kesilim uygulanmıştır. FCC- μp çarpıştırıcısının kütle merkezi

enerjisi, SPPC- μp çarpıştırıcısınınkinden daha yüksektir ve bu nedenle müon-proton çarpıştırıcısının kütle merkezi enerjisi arttıkça her bir anormal eşleşmenin toplam tesir kesitinin de arttığı görülmektedir.



Şekil 8. FCC- μp çarpıştırıcısı için anormal bağlaşımların bir fonksiyonu olarak $\mu^- p \rightarrow Z q \mu^- \rightarrow \nu \bar{\nu} q \mu^-$ sürecinin toplam tesir kesiti.



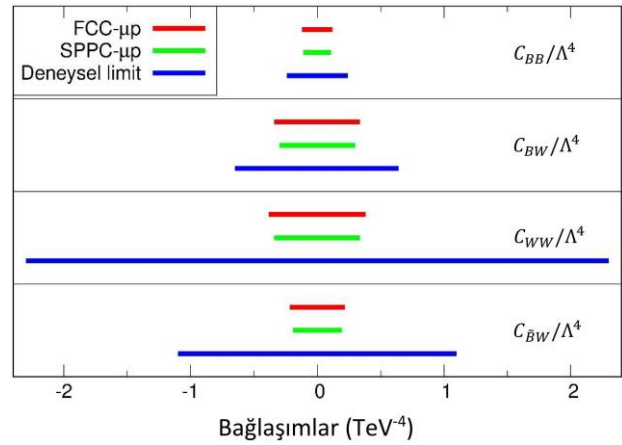
Şekil 9. SPPC- μp çarpıştırıcısı için anormal bağlaşımların bir fonksiyonu olarak $\mu^- p \rightarrow Z q \mu^- \rightarrow \nu \bar{\nu} q \mu^-$ sürecinin toplam tesir kesiti.

FCC- μp ve SPPC- μp çarpıştırıcısında $\mu^- p \rightarrow Z q \mu^- \rightarrow \nu \bar{\nu} q \mu^-$ sürecinde anormal C_{BB}/Λ^4 , C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 , $C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$ bağlaşımlarının %95 C.L. limitleri, sistematik hatalar %0, %3 ve %5 ile Çizelge 3'de incelenmiştir. Limitler, müon-proton çarpıştırıcısının kütle merkezi enerjileri ve ışınlıkları kullanılarak seçilen kesilimin uygulanmasıyla belirlenmiştir.

Çizelge 3. FCC- μp ve SPPC- μp çarpıştırıcısında anormal bağlaşımların %0, %3 ve %5 sistematik hatalar ile %95 C.L. limitleri.

Bağlaşımlar (TeV ⁻⁴)	δ_{sys}	FCC- μp	SPPC- μp
C_{BB}/Λ^4	0%	-0.11923; 0.11967	-0.10842; 0.10602
	3%	-0.12018; 0.12061	-0.11573; 0.11333
	5%	-0.12181; 0.12224	-0.12606; 0.12366
C_{BW}/Λ^4	0%	-0.33825; 0.33851	-0.29781; 0.29689
	3%	-0.34099; 0.34125	-0.31782; 0.31689
	5%	-0.34571; 0.34596	-0.34614; 0.34521
C_{WW}/Λ^4	0%	-0.38075; 0.38190	-0.33817; 0.33843
	3%	-0.38386; 0.38502	-0.36101; 0.36127
	5%	-0.38922; 0.39038	-0.39331; 0.39357
$C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$	0%	-0.21641; 0.21808	-0.18948; 0.19214
	3%	-0.21818; 0.21985	-0.20245; 0.20511
	5%	-0.22123; 0.22290	-0.22079; 0.22344

FCC- μp ve SPPC- μp müon-proton çarpıştırıcısındaki anormal bağlaşım limitlerinin duyarlılıklarının Denklem (19)-(22)'deki deneysel limitlerin duyarlılıkları ile farklılıklarını kolayca karşılaştırmak için, Şekil 10'de seçilmiş kesilimlerde sistematik hatasız olan %95 C.L. limitleri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 10. $\mu^- p \rightarrow Z q \mu^- \rightarrow \nu \bar{\nu} q \mu^-$ süreci boyunca anormal bağlaşımlar için FCC- μp ve SPPC- μp çarpıştırıcılarındaki limitler ile deneysel limitlerin duyarlılıklarının karşılaştırılması.

Her iki müon-proton çarpıştırıcısından elde edilen anormal C_{BB}/Λ^4 , C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 , $C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$ bağlaşım limitlerinin deneysel limitlerden daha duyarlı olduğu görülmektedir. Aynı zamanda FCC- μp çarpıştırıcısının kütle merkezi enerjisi, SPPC- μp çarpıştırıcısınınkinden daha yüksek olmasına rağmen ışınlılığın daha düşük olması nedeniyle her bir bağlaşım için SPPC- μp çarpıştırıcısındaki limitlerin duyarlılıkları FCC- μp çarpıştırıcısınınkinden daha duyarlıdır.

4. Tartışma ve Sonuç

FCC- μp ve SPPC- μp çarpıştırıcılarında $\mu^- p \rightarrow Zq\mu^- \rightarrow v\bar{v}q\mu^-$ süreci, $ZZ\gamma$, $Z\gamma\gamma$ ve ZZZ köşelerinde aNTGC'yi araştırmak için tercih edilmiştir. Analizde, sinyali ve SM arka planı ayırmak için "seçilen kesilim" isimli kesimler uygulanmıştır. Seçilen kesimlerle birlikte sinyal-arka plan oranının arttığı sonucuna varılmıştır. Anormal bağlaşımlar için sürecin toplam tesir kesitleri, iki çarpıştırıcı için de sunulmaktadır. Bu çalışmada anormal C_{BB}/Λ^4 , C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 , $C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$ bağlaşım %95 C.L. limitleri elde edilerek gösterilmiştir. Limitler, farklı kütle merkezi enerjileri ve ışınılıkları olan müon-proton çarpıştırıcılarında %0, %3 ve %5 sistematik belirsizlikler için hesaplanmıştır.

Çalışmanın en dikkat çekici noktası ise FCC- μp ve SPPC- μp çarpıştırıcısındaki $\mu^- p \rightarrow Zq\mu^- \rightarrow v\bar{v}q\mu^-$ süreciyle anormal bağlaşım limitlerinin Denklem (19)-(22)'de verilen deneysel limitlerle karşılaştırılmasıdır. Anormal C_{BB}/Λ^4 , C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 , $C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$ bağlaşım limitlerinin duyarlılıkları, deneysel limitlerin duyarlılıklarından sırasıyla FCC- μp çarpıştırıcısında yaklaşık 2.0, 1.9, 6.0, 5.1 kat ve SPPC- μp çarpıştırıcısında yaklaşık 2.2, 2.2, 6.8, 5.8 kat daha hassastır.

HL-LHC çarpıştırıcısında $pp \rightarrow v\bar{v}\gamma$ (Senol *et al.* 2020), CLIC çarpıştırıcısında $e^- e^+ \rightarrow Z\gamma \rightarrow v\bar{v}\gamma$ (Spor *et al.* 2022) ve müon çarpıştırıcısında $\mu^- \mu^+ \rightarrow Z\gamma \rightarrow v\bar{v}\gamma$ (Senol *et al.* 2022) süreçleri yoluyla anormal C_{BB}/Λ^4 , C_{BW}/Λ^4 , C_{WW}/Λ^4 , $C_{\bar{B}W}/\Lambda^4$ bağlaşım limitlerinin duyarlılıkları üzerine çeşitli fenomenolojik araştırmalar yapılmıştır. Çizelge 3'de verilen FCC- μp çarpıştırıcısı için anormal bağlaşım limitlerimiz yaklaşık 1.4-2.8 kat ve SPPC- μp çarpıştırıcısı için anormal bağlaşım limitlerimiz ise yaklaşık 1.6-3.2 kat arasında HL-LHC çarpıştırıcısındaki anormal bağlaşım limitlerinden daha hassastır. Öte yandan, CLIC çarpıştırıcısındaki çalışmanın, FCC- μp çarpıştırıcısına göre yaklaşık 3.3-7.4 kat ve SPPC- μp çarpıştırıcısına göre ise yaklaşık 2.9-6.7 kat arasında ve ayrıca müon çarpıştırıcısındaki çalışmanın ise, FCC- μp çarpıştırıcısına göre yaklaşık 1.7-4.8 kat ve SPPC- μp çarpıştırıcısına göre ise yaklaşık 1.5-4.3 kat arasında

sonuçlarımızdan daha duyarlı oldukları belirlenmiştir.

Literatürde daha önceden müon-proton çarpıştırıcılarında aNTGC çalışmasının hiç yapılmamış olması, bu makaleye ayrı bir önem katmaktadır. Deneysel limitlerden daha hassas duyarlılığa sahip limitlerin bulunması, FCC- μp ve SPPC- μp müon-proton çarpıştırıcılarının LHC sonrası gelecekteki çarpıştırıcı çalışmalarında etkileyici bir potansiyele sahip olduklarını göstermektedir.

Teşekkür

Bu araştırmada yer alan kısmi nümerik hesaplamalar TÜBİTAK ULAKBİM, Yüksek Başarım ve Grid Hesaplama Merkezi'nde (TRUBA kaynaklarında) gerçekleştirilmiştir.

5. Kaynaklar

- Aaboud, M., et. al. (ATLAS Collaboration), 2018. Measurement of the $Z\gamma \rightarrow v\bar{v}\gamma$ production cross section in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector and limits on anomalous triple gauge-boson couplings. *Journal of High Energy Physics*, **12**, 010.
- Abada, A., et. al. (FCC Collaboration), 2019a. FCC-ee: The Lepton Collider. *The European Physical Journal Special Topics*, **228**, 261-623.
- Abada, A., et. al. (FCC Collaboration), 2019b. FCC-hh: The Hadron Collider. *The European Physical Journal Special Topics*, **228**, 755-1107.
- Acar, Y.C., Kaya, U., and Oner, B.B., 2018. Resonant production of color octet muons at Future Circular Collider-based muon-proton colliders. *Chinese Physics C*, **42**, 083108.
- Alwall, J., Frederix, R., Frixione, S., Hirschi, V., Maltoni, F., Mattelaer, O., Shao, H.S., Stelzer, T., Torrielli, P., and Zaro, M., 2008. The automated computation of tree-level and next-to-leading order differential cross sections, and their matching to parton shower simulations. *Journal of High Energy Physics*, **07**, 079.
- Ananthanarayan, B., Lahiri, J., Patra, M., and Rindani, S.D., 2014. New physics in $e^+e^- \rightarrow Z\gamma$ at the ILC with polarized beams: explorations beyond conventional

- anomalous triple gauge boson couplings. *Journal of High Energy Physics*, **08**, 124.
- Atağ, S., and Şahin, İ., 2004. ZZ γ and Z $\gamma\gamma$ couplings at linear e⁺e⁻ collider energies with the effects of Z polarization and initial state radiation. *Physical Review D*, **70**, 053014.
- Baur, U., and Rainwater, D., 2000. Probing neutral gauge boson self-interactions in ZZ production at hadron colliders. *Physics Review D*, **62**, 113011.
- Biekötter, A., Gregg, P., Krauss, F., and Schönherr, M., 2021. Constraining CP violating operators in charged and neutral triple gauge couplings. *Physics Letters B*, **817**, 136311.
- Caliskan, A., Kara, S.O., and Ozansoy, A., 2017. Excited Muon Searches at the FCC-Based Muon-Hadron Colliders. *Advances in High Physics*, **2017**, 1540243.
- Caliskan, A., 2019. Search for excited muons at the future SPPC-based muon-proton colliders. *Acta Physica Polonica B*, **50**, 1409.
- Degrande, C., 2014. A basis of dimension-eight operators for anomalous neutral triple gauge boson interactions. *Journal of High Energy Physics*, **02**, 101.
- Ellis, J., Ge, S.F., He H.J., and Xiao, R.Q., 2020. Probing the scale of new physics in the ZZ γ coupling at e⁺e⁻ colliders. *Chinese Physics C*, **44**, 063106.
- Gounaris, G.J., Layssac, J., and Renard, F.M., 2000. Signatures of the anomalous Z γ and ZZ production at lepton and hadron colliders. *Physical Review D*, **61**, 073013.
- Hernández-Juárez, A.I., Moyotl, A., and Tavares-Velasco, G., 2021. Contributions to ZZV* (V= γ ,Z,Z') couplings from CP violating flavor changing couplings. *The European Physical Journal C*, **81**, 304.
- Khoriali, G., 2008. Study of systematic uncertainties of single top production at ATLAS. *Nuovo Cimento B*, **123**, 1327-1330.
- Ots, I., Uiho, H., Liivat, H., Loide, R.K., and Saar, R., 2006. Possible anomalous ZZ γ and Z $\gamma\gamma$ couplings and Z boson spin orientation in e⁺e⁻ \rightarrow Z γ : The role of transverse polarization. *Nuclear Physics B*, **740**, 212-221.
- Rahaman, R., and Singh, R.K., 2017. On the choice of beam polarization in e⁺e⁻ \rightarrow ZZ/Z γ and anomalous triple gauge-boson couplings. *The European Physical Journal C*, **77**, 521.
- Rahaman, R., and Singh, R.K., 2019. Anomalous triple gauge boson couplings in ZZ production at the LHC and the role of Z boson polarizations. *Nuclear Physics B*, **948**, 114754.
- Rahaman, R., 2020. Study of anomalous gauge boson self-couplings and the role of spin-1 polarizations. PhD thesis, Indian Institute of Science Education and Research, Kolkata, 199.
- Senol, A., Denizli, H., Yilmaz, A., Cakir, I.T., Oyulmaz, K.Y., Karadeniz, O., and Cakir, O., 2018. Probing the effects of dimension-eight operators describing anomalous neutral triple gauge boson interactions at FCC-hh. *Nuclear Physics B*, **935**, 365-376.
- Senol, A., Denizli, H., Yilmaz, A., Cakir, I.T., and Cakir, O., 2020. The projections on ZZ γ and Z $\gamma\gamma$ couplings via $\bar{\nu}\nu\gamma$ production in HL-LHC and HE-LHC. *Physics Letters B*, **802**, 135255.
- Senol, A., Spor, S., Gurkanli, E., Cetinkaya, V., Denizli, H., and Köksal, M., 2022. Model-independent study on the anomalous ZZ γ and Z $\gamma\gamma$ couplings at the future muon collider. *The European Physical Journal Plus*, **137**, 1354.
- Spor, S., Billur, A.A., and Köksal, M., 2020. Model independent study for the anomalous W⁺W⁻ γ couplings at the future lepton-hadron colliders. *The European Physical Journal Plus*, **135**, 683.
- Spor, S., and Köksal, M., 2022. Investigation of anomalous triple gauge couplings in $\mu\gamma$ collision at multi-TeV muon colliders. *arXiv:2201.00787 [hep-ph]*.
- Spor, S., Gurkanli, E., and Köksal, M., 2022. Search for the anomalous ZZ γ and Z $\gamma\gamma$ couplings via $\nu\nu\gamma$ production at the CLIC. *Nuclear Physics B*, **979**, 115785.
- Spor, S., 2022. Probe of the anomalous neutral triple gauge couplings in photon-induced collision at future muon colliders. *arXiv:2207.11585 [hep-ph]*.

The CEPC Study Group, 2018. CEPC Conceptual Design Report: Volume 2 - Physics & Detector. *arXiv:1811.10545 [hep-ex]*.

Yılmaz, A., Senol, A., Denizli, H., Cakir, I.T., and Cakir, O., 2020. Sensitivity on anomalous neutral triple gauge couplings via ZZ production at FCC-hh. *The European Physical Journal C*, **80**, 173.

AKÜ FEMÜBİD 23 (2023) 021201 (326-335)

AKU J. Sci. Eng. 23 (2023) 021201 (326-335)

DOI: 10.35414/akufemubid.1170648

Araştırma Makalesi / Research Article

Acid Red 17, Acid Yellow 11, Direct Yellow 12, Direct Blue 86 ve Mordant Violet 40 Boyalarının Karışımını İçeren Suyun Arıtılması İçin Gelişmiş Oksidasyon İşlemi

Mohamed A. HASSAAN¹, Murat YILMAZ^{2*}, Ahmed EL NEMR¹¹ Environmental Division, National Institute of Oceanography and Fisheries (NIOF), Kayet Bey, El-Anfoushy, Alexandria, Egypt² Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Osmaniye Korkut Ata University, 80000, Osmaniye, Türkiye

Corresponding author; e-mail: muratyilmaz@osmaniye.edu.tr

ahmedmoustafaelnemr@yahoo.com

mhss95@mail.com

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-6465-6960>ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-2373-5846>ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8513-5304>

Geliş tarihi: 03.09.2022 Kabul tarihi: 20.03.2023

Anahtar kelimeler

Acid Red 17;
Acid Yellow 11;
Direct Yellow 12;
Direct Blue 86;
Mordant Violet 40;
İleri oksidasyon

Öz

Boyaların atık sudan uzaklaştırılması hem çevre hem de üreticiler için tekstil endüstrisindeki en büyük sorunlardan biridir. Bu makale, beş farklı boya (Asit Kırmızısı 17, Asit Sarısı 11, Doğrudan Sarı 12, Doğrudan Mavi 86 ve Mordan Menekşe 40) içeren sentetik atık su karışımını arıtmak için ultraviyole (UV) ile birlikte ozon (O₃) ve O₃ uygulama olasılığı farklı kromofor ve ankray gruplarına sahip boyaların renk giderme etkinliği için incelemiştir. Temas süresi, optimum çalışma koşullarını elde etmek için UV ile kombine O₃ veya O₃ akışı altında bir kesikli reaktörde incelenmiştir. Sonuçlar, O₃ uygulamasının UV destekli ozonlamadan daha etkili olduğunu göstermiştir. Bu karışımdaki her bir boyanın ileri oksidasyonu, aynı boyanın çözelti içinde ayrı ayrı çıkarılmasıyla karşılaştırıldı. Sonuçlar, boyayı karışımdan ve su çözeltisindeki tek boyayı çıkarmak için gereken sürede yalnızca küçük bir fark olduğunu kanıtlamıştır.

Advanced oxidation process for treatment of water containing mixture of Acid Red 17, Acid Yellow 11, Direct Yellow 12, Direct Blue 86 and Mordant Violet 40 dyes

Keywords

Acid Red 17;
Acid Yellow 11;
Direct Yellow 12;
Direct Blue 86;
Mordant Violet 40;
Advanced oxidation

Abstract

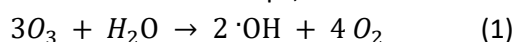
The removal of dyes from wastewater is one of the biggest problems in the textile industry for both environment and manufacturers. This study examined the possibility of applying ozone (O₃) and O₃ in combination with ultraviolet (UV) to treat a mixture of synthetic wastewater containing five different dyes (Acid Red 17, Acid Yellow 11, Direct Yellow 12, Direct Blue 86 and Mordant Violet 40) for the decolorization efficiency of dyes with different chromophore and anchor groups. The contact time was studied in a batch reactor under the flow of O₃ or O₃ combined with UV to achieve optimal operating conditions. The results showed that the application of O₃ was more effective than UV-assisted ozonation. The advanced oxidation of each dye in this mixture was compared with the removal of the same dye in the solution separately. The results proved that there is only a slight difference in the time required to remove the dye from the mixture and the single dye in the water solution.

1. Introduction

The textile industry is one of the most important industries in Egypt, considering the number of companies, local production costs and export costs. On the other hand, such an industry is considered a major contributor to pollution, currents, and especially wet processes that use hazardous chemicals in that industry. About 31 public sector employees and 3000 private sector companies and joint ventures are affiliated with the Egyptian textile industry (Sultan 2002, EPAP 2003, El Nemr 2012a). Most of the synthetic dyes used in the industry are distributed in different sectors such as textile dyes (60%), paper (10%) and plastics (10%) (Slokar and Majcen Le Marechal 1998, Oneill *et al.* 1999, Robinson *et al.* 2001, Guivarch *et al.* 2003, Sun and Yang 2003).

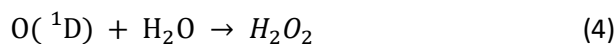
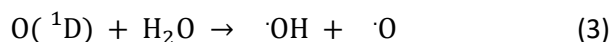
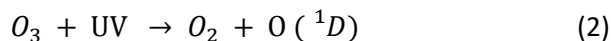
The presence of organic pollutants such as dyes, pesticides and surfactants in the environment poses a major threat to freshwater and marine environments, as they are carcinogenic and non-biodegradable (Mahmoodi and Arami 2010, Salem *et al.* 2013, 2014a, b, Amini *et al.* 2011, Ragab *et al.* 2016, El Nemr *et al.* 2016a, b, Asiri *et al.* 2020). Different methods have been used in the treatment of wastewater such as adsorption, advanced oxidation and photodegradation (El Nemr 2007, 2009, 2012b, El Nemr *et al.* 2010, Hassaan *et al.* 2017a, b, Helmy *et al.* 2018, Alghamd *et al.* 2019, El-Nemr *et al.* 2020a, b, Hassaan *et al.* 2020).

The reaction of ozone with wastewater compounds is in two different ways. These are either by direct molecular or indirect radical chain reactions (Glaze *et al.* 1987, Steahlin and Hoigne 1982, Arslan and Balcioglu 2000, Hassaan *et al.* 2016, 2017a). The reaction mechanisms of Ozone occurring at alkaline pH are listed below in five steps;



The following equations (Eq. 2 to 5) have been suggested for UV-assisted ozonation treatments (Hassaan *et al.* 2017b, Hassaan and El Nemr 2017, El Nemr *et al.* 2017, 2018). The presence of different oxidizing agents in the removal of dyes from

wastewater can create a synergistic effect and increase the removal.



Pathogen-containing organic and inorganic compounds in wastewater react with ozone gas given to the water. The first reaction occurs with ozone with chromophore group dyes, where ozone reacts with organic compounds at the double bonds of nitrogen, carbon (N=N, C=C) and aromatic rings (Wijannarong *et al.* 2013). Textile effluents contain various dyes, so it is very important to remove the dye mixture using different new methods instead of a single dye solution removal with the existing methods. To the best of our knowledge, few studies have been reported on the degradation of a synthetic mixture of dyes using an advanced oxidation process (Wijannarong *et al.* 2013, Sancar and Balci 2013, Gupta *et al.* 2015). Therefore, this study aims to examine the effectiveness of O₃ and UV/O₃ application techniques for the removal of the synthetic dyes mixture. The effect of ozone and ozone + UV was studied at the initial dyes mixture pH 7. The second aim of this research work is to propose a simple technique to monitor the decay of the color during the reaction of ozone with a mixture of dyes.

2. Materials and Methods

A mixture of the five dyes was used without further purification. A stock solution of 1000 mg/L of each dye was prepared using double distilled water. By diluting this solution, working aqueous solutions (100 mg/L) of each dye were prepared. In this study, absorbance measurements were performed in a UV-VIS spectrophotometer (Analyticjena Spekol 1300 UV-VIS spectrophotometer (model no. 45600-02, Cole Parmer Instrument Co., USA)) to determine the dye concentrations of 5 different dyes (Fig. 1.) at the maximum wavelengths shown in Table 1. The

decolorization effect of the color removal rate was calculated as:

$$\text{Color removal efficiency \%} = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100 \quad (6)$$

Where A_0 and A_t are the initial and quantified absorbances of the samples at different time intervals.

Table 1: The maximum wavelength (λ_{max}) of some dyes that used in this study.

Dye	λ_{max}	M.W.	M.F.
A.R.17	518 nm	502.43	$\text{C}_{20}\text{H}_{12}\text{N}_2\text{Na}_2\text{O}_7\text{S}_2$
A.Y.11	407 nm	380.35	$\text{C}_{16}\text{H}_{13}\text{N}_4\text{NaO}_4\text{S}$
D.Y.12	389 nm	680.66	$\text{C}_{30}\text{H}_{26}\text{N}_4\text{Na}_2\text{O}_8\text{S}_2$
D.B.86	594 nm	780.17	$\text{C}_{32}\text{H}_{14}\text{CuN}_8\text{Na}_2\text{O}_6\text{S}_2$
M.V.40	510 nm	400.77	$\text{C}_{16}\text{H}_{10}\text{ClN}_2\text{NaO}_5\text{S}$

A cylindrical 200 mL glass reactor was used in the ozonation process (Fig. 2). The ozone generator was connected to reaction vessels with Teflon tubing. A fresh dye sample (200 mL) was used in each study due to the small reactor volume. The ozone fed to the system was carried out with an ozone generator (model N 1668A, power 18 W, volume AC 220 V/50 Hz) with a flow rate of 500 mg O_3/h . The ozone leaving the reactor was captured in two consecutive bubblers with potassium iodine (KI) (2%) aqueous solution (Hassaan *et al.* 2017a,b). In addition, further tests were performed utilizing the AOPs (O_3/UV), therefore a Horizontal Clean Bench/Laminar Flow Cabinet (Bw-LFH1300) with a power of 30 W and a UV low-pressure mercury lamp (254 nm) was used. The pH measurements were made using a pH meter from JENCO Electronics, LTD (model 6173, serial number JC 05345).

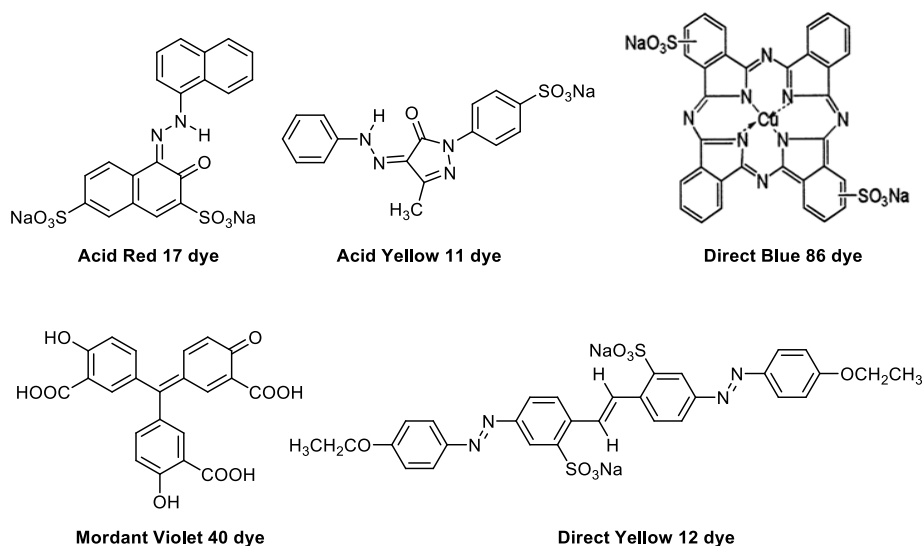


Fig. 1. Structure of Acid Red 17 dye, Acid Yellow 11 dye, Direct Blue 86 dye, Mordant violet 40 dye, and Direct Yellow 12 dye.

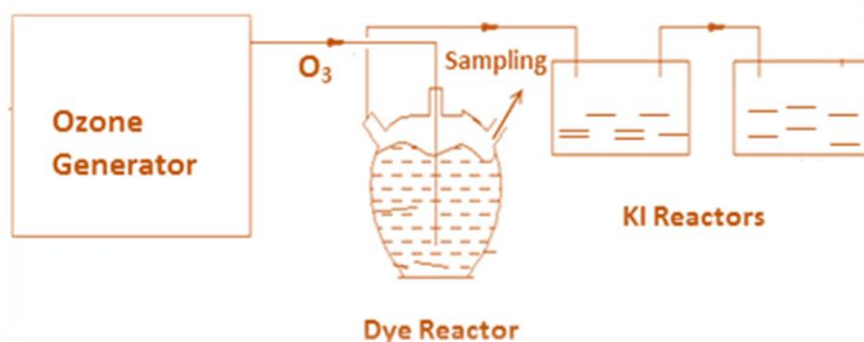


Fig. 2. Design of the ozonation experiment.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Different standard curves

Figure 3 shows the standard curve for the five different dyes in the mixture and single water solution at appropriate λ_{max} for each dye.

3.2. Effect of Ozone

Figure 4 shows the dye removal efficiency of the

dye mixture of the 5 studied dyes. The color removal efficiency for the studied dyes (Acid Red 17, Acid Yellow 11, Direct Yellow 12, Direct Blue 86, and Mordant Violet 40) with an initial concentration of 100 mg/L were 99.8, 98.9, 98.9, 100 and 99.8% at 180, 210, 240, 180, and 180 minutes, respectively for O₃ only.

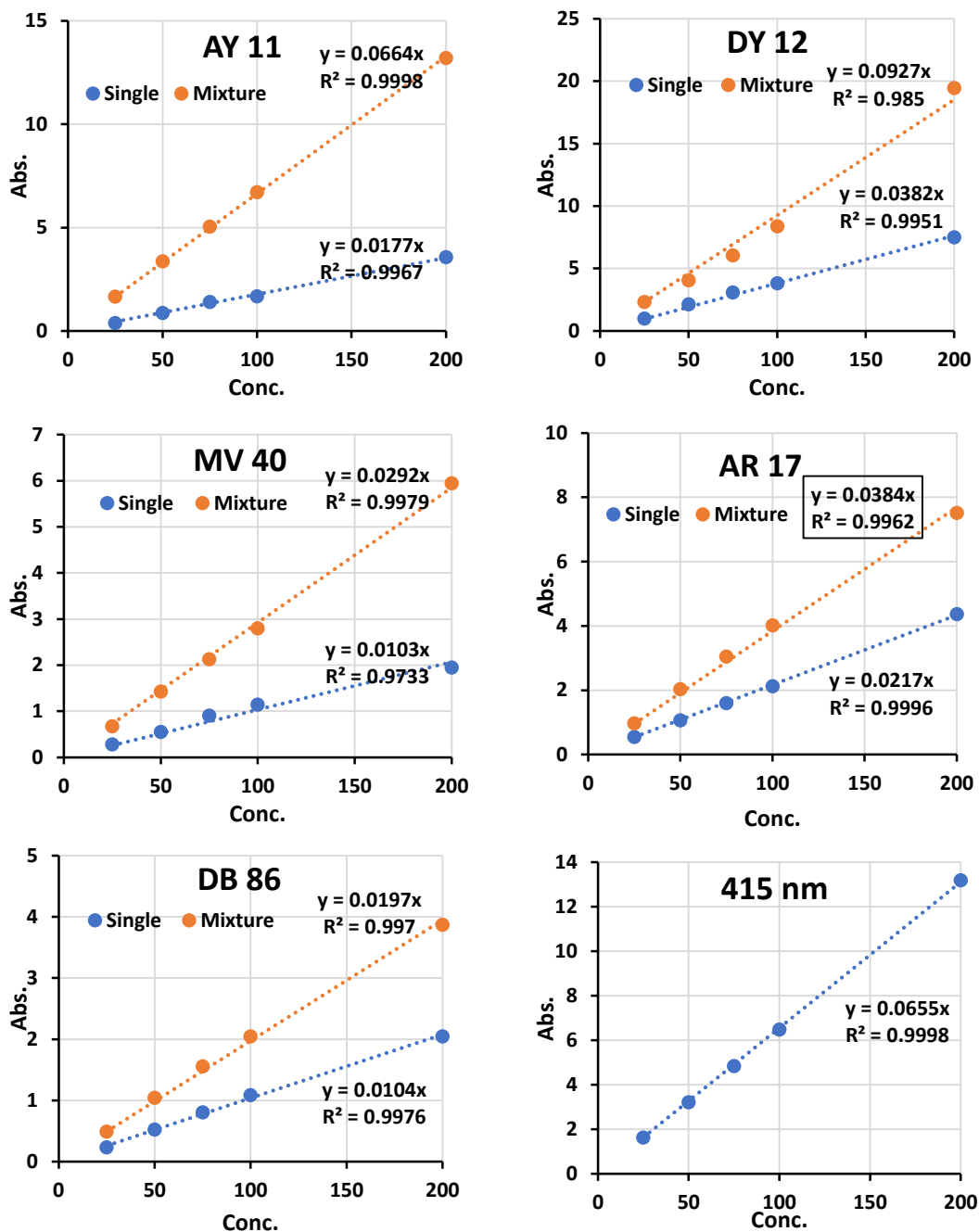


Fig. 3. Standard curves of the single and mixture dyes.

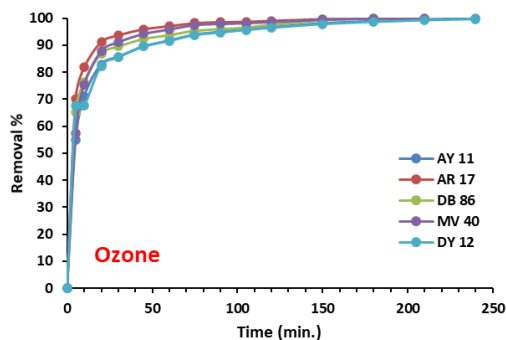


Fig. 4. Effect of ozone on dyes mixture (Solution volume = 200 mL, O₃ = 500 mg/h, initial solution pH (6-7), 100 mg/L dye concentration and different λ_{max}).

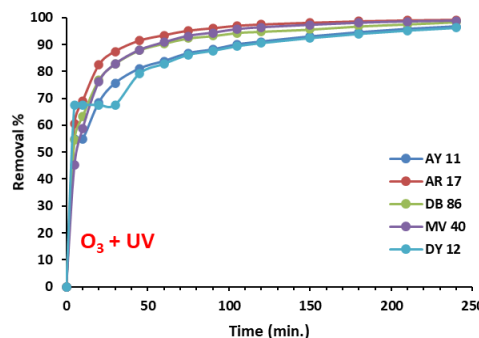


Fig. 5. Effect of advanced oxidation processes (O₃ + UV) on Dyes mixture (Solution volume = 200 mL, O₃ = 500 mg/h, initial solution pH (6-7), 100 mg/L dye concentration and different λ_{max}).

3.3. Effect of Ozone + UV

Fig. 5 shows the color removal efficiency of the 5 studied dyes mixtures. The color removal efficiency for the studied dyes (Acid Red 17, Acid Yellow 11, Direct Yellow 12, Direct Blue 86 and Mordant Violet 40) with an initial concentration of 100, mg/L were 98.4, 92.6, 88.4, 98 and 98.3 %, respectively, after 240 minutes contact time of UV assisted O₃ treatment.

Fig. 6 shows the color of the five studied dyes and the color removal of the dyes mixture after 180 minutes of contact time. The studies showed that the AY11 and DY12 were more resistant to the advanced oxidation process than the other three dyes MV 40, AR 17 and DB 86 dyes.

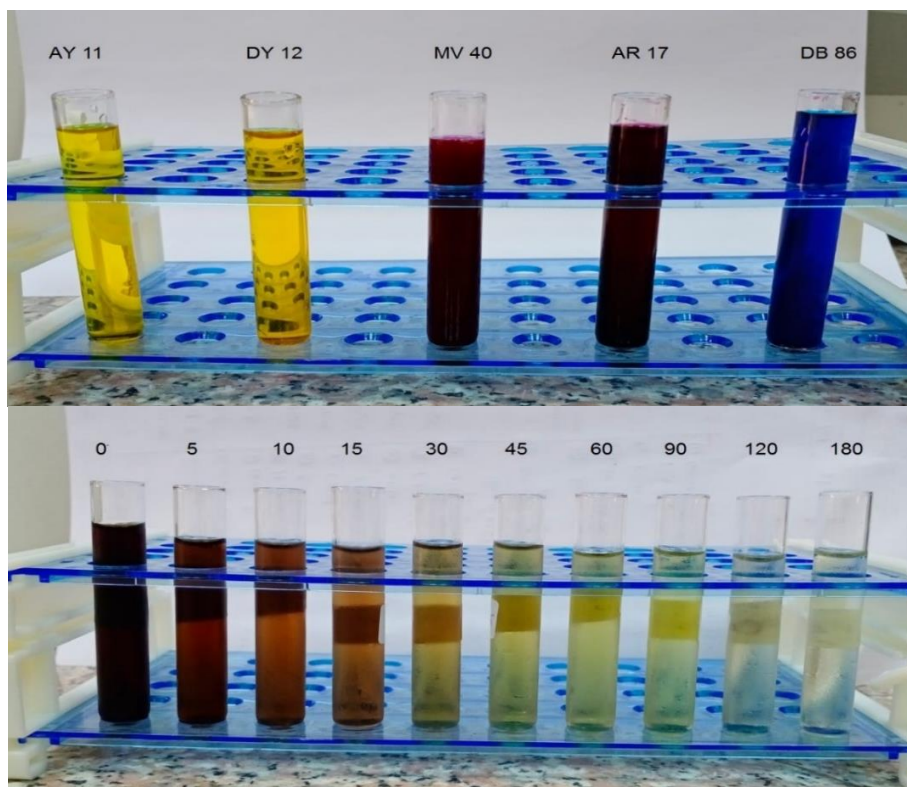


Fig. 6. Coloring the five studied dyes and removing color from the mixture of pigments with a time of up to 180 minutes from the time of contact.

3.4. Absorbance measurement at different λ_{max} for mixture and single dyes

Fig. 7 shows the effect of O_3 and UV + O_3 on the degradation of the dyes mixture. Fig. 7a shows the effect of ozonation and advanced oxidation processes (AOP) on the decolorization of Acid Yellow 11 (AY11). (O_3 = 500 mg/h, solution volume = 200 mL, initial mixture solution pH (6-7), initial single solution pH (9), 100 mg/L dye concentration and λ_{max} = 407 nm).

Fig. 7b shows the effect of ozonation and AOP on the decolorization of Acid Red 17 (AR17). (O_3 = 500 mg/h, solution volume = 200 mL, initial mixture solution pH (6-7), initial single solution pH (11), 100 mg/L dye concentration and λ_{max} = 518 nm). Fig. 7c shows the effect of ozonation and AOP on the decolorization of Direct Blue 86 (DB86). (O_3 = 500 mg/h, solution volume = 200 mL, initial mixture solution pH (6-7), initial single solution pH (11), 100 mg/L dye concentration and λ_{max} = 594 nm)

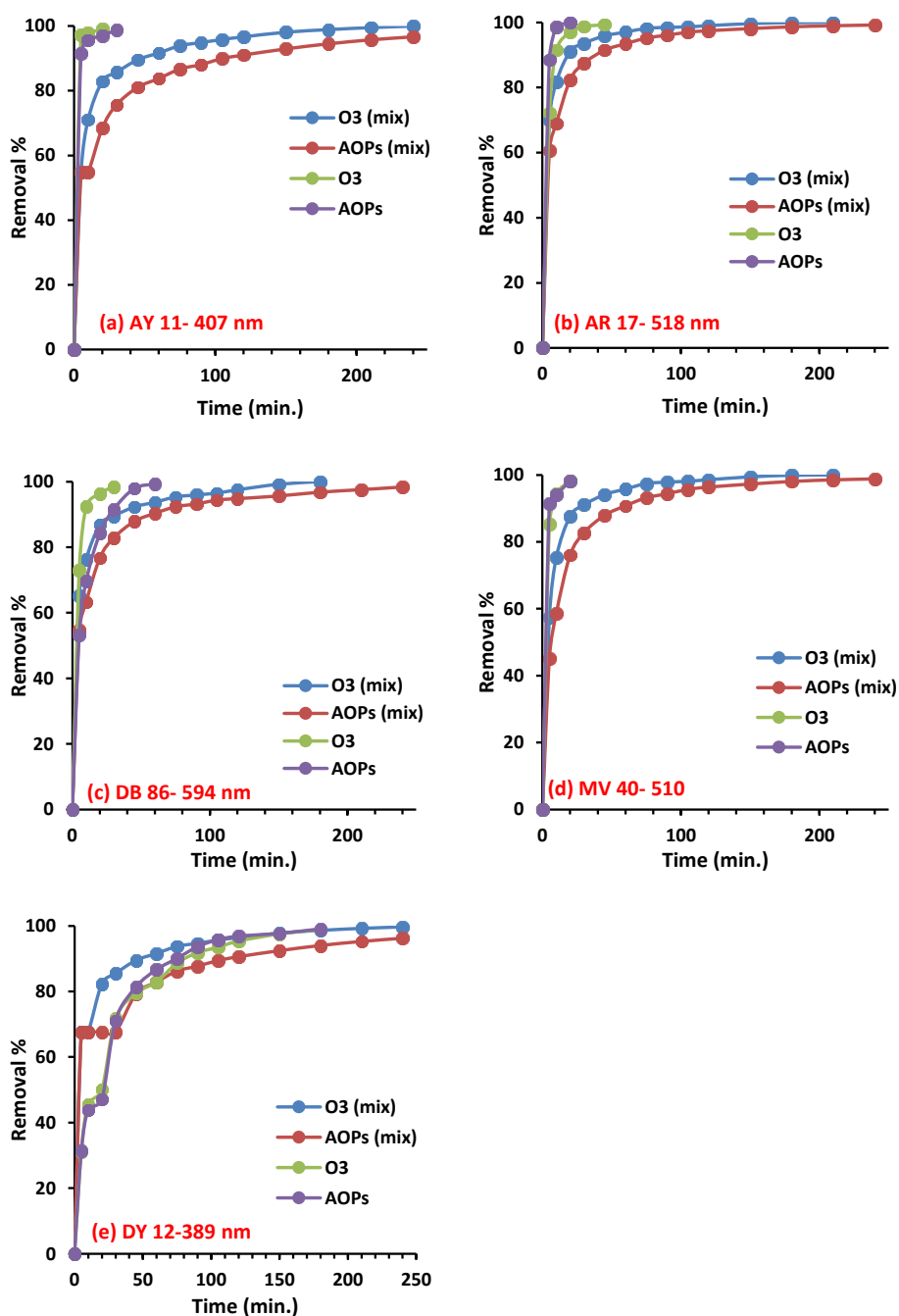


Fig. 7. The effect of O_3 and UV + O_3 on the degradation of dyes mixture.

Fig. 7d shows the effect of ozonation and AOP on the decolorization of Mordant Violet 40 (MV40). (O_3 = 500 mg/h, solution volume = 200 mL, initial mixture solution pH (6-7), initial single solution pH (9), 100 mg/L dye concentration and λ_{max} = 510 nm). Fig. 7e shows the effect of ozonation and AOP on the decolorization of Direct yellow 12 (DY12). (O_3 = 500 mg/h, solution volume = 200 mL, initial mixture solution pH (6-7), initial single solution pH (9), 100 mg/L dye concentration and λ_{max} = 389 nm). It is clear from the above-mentioned Fig. 7 for the dyes mixture that ozone is very effective in the removal of the color even in the dyes mixture and ozone alone is more effective than AOPs. The advanced oxidation processes (AOPs) showed that as the amount of dye increases, many different intermediates are formed during the degradation of the parent dye, which can interfere with the oxidation process. Such suppression would be more obvious in the existence of an increased amount of degradation intermediates formed at heightened dye concentration (Song *et al.* 2008). Therefore, full-color removal will take longer for dyes with higher initial dye concentrations. Another reason for this finding may be related to the structure of the dyes as mentioned by Hassaan *et al.* (2017a, b) in MV40, AY11 and DB 86 dyes degradation, the temperature that has a significant effect on the half-life of ozone. The reason why ozone decomposes rapidly in water is that its half-life is much shorter than in air (Hassaan *et al.* 2017a, b, El Nemr *et al.* 2020). Depending on the increase in temperature, the solubility of ozone decreases and becomes less stable. But the reaction speed increases by a factor of 2 to 3 per 10 °C. In principle, ozone dissolved in water cannot be used at temperatures above 40 °C, since the half-life of ozone is very short at this temperature (Hassaan *et al.* 2017a, b). In addition, the half-life of ozone decreases from 20 minutes at 20°C to 15 minutes at 25°C. This may explain why the O_3 time is shorter than O_3 + UV, and also the rate of decomposition of O_3 into hydroxyl radicals decreases due to the temperature increase from 22 to 27 C during treatment using O_3 + UV, as in MV40 and DB 86 degradation of dyes. Another significant reason is also the pH of the experiment, pH 7, which

is not high enough to stimulate O_3 decomposition or generate hydroxyl radicals, compared to that of the previously treated dyes, where the pH was 11, as in AR 17 dye and O_3 alone was lower than the UV-assisted O_3 . It is also known that ozone stability is affected by the existence of salts, temperature and pH as reported by Mallevalle (1982).

Conclusion

The intention of this research was to be carried out with the nature of wastewater for dyeing factories and to simulate a mixture of dyes as close as possible to reality. Also, the other purpose of this study was to present a pattern to measure the disappearance of the color of the different dyes within a mixture of a group of dyes whose mixing leads to the formation of an unknown color. In order to simulate the closest class of liquid waste from textile dyeing factories five dyes of different types and colors were mixed (Acid Red 17, Acid Yellow 11, Direct Yellow 12, Direct Blue 86 and Mordant Violet 40 dyes). According to the results derived from the experimental study, it can be conveniently said that the ozone treatment was a very suitable method for removing the dyes from the reactive dyeing wastewater. When the experimental parameters were reviewed, ozone time was one of the highly efficient factors examined in the study. Discoloration efficiencies and rates of 20 to 180 minutes can be requested as sufficient time to eliminate all pigment types in the mixture consisting of five pigments of different colors and types. The study showed that using ozone alone gave better results than using ozone, along with ultraviolet rays. However, in general, 20 minutes was sufficient for the decolorization process for most colors and especially for the darker colors, depending on the type of dye and the percentage of dye flow. Critically, the decolorization efficiency differed depending on the chromophore group, the anchor group of the dyes, and the amount of dye (%) in the flux. As it is known, the reaction between ozone and the dyes took place in the chromophoric group of the dyes. This condition made the dye color and effluent content more important concerning the reactive dye. As the amount of dye in the effluent

increases, color removal becomes more difficult. In summary, the use of ozone has been a very effective means of preventing pollution from dyed effluents from textile mills, especially dye houses.

Acknowledgements

The authors would like to thank financial support from Science and Technological Development Fund (STDF) of Egypt (Project No. CB-4874, CB-22816 and IG-34795).

4. References

- Alghamdi, M.M., El-Zahhar, A.A., Idris, A.M., Said, T.O., Sahlabji, T. and El Nemr, A., 2019. Synthesis, Characterization and Application of a New Polymeric-Clay-Magnetite Composite Resin for Water Softening. *Separation and Purification Technology*, **224**, 356–365.
- Amini, M., Arami, M., Mahmoodi, N.M. and Akbari, A., 2011. Dye removal from colored textile wastewater using acrylic grafted nanomembrane. *Desalination*, **267**, 107–113.
- Arslan, I. and Balcioglu, I.A., 2000. Effect of common reactive dye auxiliaries on the ozonation of dyehouse effluents containing vinylsulphone and aminochlorotriazine dyes. *Desalination*, **130**, 61-71.
- Asiri, H.F.M., Idris, A.M., Said, T.O., Sahlabji, T., Alghamdi, M.M., El-Zahhar, A.A. and El Nemr, A., 2020. Monitoring and health risk assessment of some pesticides and organic pollutants in fruit and vegetables consumed in Asir Region, Saudi Arabia. *Fresenius Environmental Bulletin*, **29** (1), 615-625.
- El Nemr A., 2012a. Textiles: Types, Uses and Production Methods. Nova Science Publishers, Inc. Hauppauge New York. El Nemr A. (Editor), Hard cover [ISBN: 978-1-62100-239-0], e-book [ISBN: 978-1-62100-284-0], 621pp.
- El Nemr, A., 2007. Pomegranate husk as an adsorbent in the removal of toxic chromium from wastewater. *Chemistry and Ecology*, **23**(5), 409-425.
- El Nemr, A., 2009. Potential of pomegranate husk carbon for Cr(VI) removal from wastewater: kinetic and isotherm studies. *Journal of Hazardous Materials*, **161**, 132-141.
- El Nemr, A., 2012b. Non-Conventional textile waste water treatment. Nova Science Publishers, Inc. Hauppauge New York. El Nemr, A. (Editor), [Hard cover ISBN: 978-1-62100-079-2, e-book ISBN: 978-1-62100-228-4] 267pp.
- El Nemr, A., El-Said, G.F. and Khaled, A. 2016. Risk assessment of Organochlorines in molluscs from the Mediterranean and Red Sea coasts (Egypt). *Water Environment Research*, **88** (4), 325-337.
- El Nemr, A., El-Sikaily, A., Khaled, A., 2010. Modeling of adsorption isotherms of Methylene Blue onto rice husk activated carbon. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, **36** (3), 403-425.
- El Nemr, A., Hassaan, M.A., and Madkour, F.F., 2017. HPLC-MS/MS Mechanistic study of Direct Yellow 12 degradation using Ultraviolet assisted ozone process. *Journal of Water and Environmental Nanotechnology*, **3** (1), 1-11.
- El Nemr, A., Hassaan, M.A. and Madkour, F.F., 2018. Advanced oxidation process (AOP) for detoxification of acid red 17 dye solution and degradation mechanism, *Environmental processes*, **5**, 95-113.
- El Nemr, A., Hassaan, M.A., Madkour, F.F., Idris, A.M., Said, T.O., Sahlabji, T., Alghamdi, M.M. and El-Zahhar, A.A., 2020. Advanced oxidation of AY-11 Dye Effluent: Detoxification and Degradation Mechanism. *Toxin Reviews*. **40** (4), 1472–1480
- El Nemr, A., Moneer, A.A., Ragab, S. and El Sikaily, A., 2016. Distribution and sources of *n*-alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons in Shellfish of the Egyptian Red Sea coast. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, **42**, 121-131.
- El-Nemr, M.A., Abdelmonem, N.M., Ismail, I.M.A., Ragab, S. and El Nemr, A 2020a. The efficient removal of the hazardous Azo Dye Acid Orange 7 from water using modified biochar from Pea peels. *Desalination and Water Treatment*, **203**, 327–355.

- El-Nemr, M.A., Abdelmonem, N.M., Ismail, I.M.A., Ragab, S. and El Nemr, A., 2020b. Removal of Acid Yellow 11 Dye using novel modified biochar derived from Watermelon Peels. *Desalination and Water Treatment*, **203**, 403–431.
- EPAP, 2003. The Egyptian Pollution Abatement Project (EPAP) and Egyptian Environmental Affairs Agency (EEAA) 2003, (Self-Monitoring Manual for textile industry report), 76pp.
- Glaze, W.H., Kang, J.W. and Chapin, D.H., 1987. The chemistry of water treatment processes involving ozone, hydrogen peroxide and UV-radiation. *Ozone: Science & Engineering*, **9**, 335–352.
- Guivarch, E., Trevin, S. and Lahitte, C., 2003. Degradation of azo dyes in water by electro-fenton process, *Environmental Chemistry Letters*, **1**, 38-42.
- Gupta, V.K., Khamparia, S., Tyagi, I., Jaspal, D. and Malviya A., 2015. Decolorization of mixture of dyes: A critical review. *Global Journal of Environmental Science and Management*, **1** (1), 71-94.
- Hassaan, M.A. and El Nemr A., 2017. Advanced Oxidation Processes for Textile Wastewater Treatment. *International Journal of Photochemistry and Photobiology*, **2** (3), 85-93.
- Hassaan, M.A., El Nemr, A. and Madkour, F.F., 2017a. Testing the Advanced Oxidation Processes on the Degradation of Direct Blue 86 Dye in Wastewater. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, **43**, 11–19.
- Hassaan, M.A., El Nemr, A. and Madkour, F.F., 2016. Application of Ozonation and UV assisted Ozonation for Decolorization of Direct Yellow 50 in Sea water. *The Pharmaceutical and Chemical Journal*, **3** (2), 131-138.
- Hassaan, M.A., El Nemr, A. and Madkour, F.F., 2017b. Advanced Oxidation Processes of Mordant Violet 40 Dye in Freshwater and Seawater. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, **43**, 1–9.
- Hassaan, M.A., Elkatory, M.R., Ali, R.M. and El Nemr, A., 2020. Photocatalytic degradation of reactive black 5 using photo-Fenton and ZnO nanoparticles under ultraviolet light irradiation. *Egyptian Journal of Chemistry*, **63** (4), 17-18.
- Helmy, E.T., El Nemr, A., Mousa, M., Arafa, E. and Eldafrawy, S., 2018. Photocatalytic degradation of organic dyes pollutants in the industrial textile wastewater by using synthesized TiO₂, C-doped TiO₂, S-doped TiO₂ and C,S co-doped TiO₂ nanoparticles. *Journal of Water and Environmental Nanotechnology*, **3** (2), 116-127.
- Mahmoodi, N.M. and Arami, M., 2010. Immobilized titania nanophotocatalysis: degradation, modeling and toxicity reduction of agricultural pollutants. *Journal of Alloys and Compounds*, **506**, 155–159.
- Mallevalle, J., 1982. Ozonation Manual for Water and Wastewater Treatment, John Wiley and Sons, New York, vol. **53**.
- Oneill, C., Hawkes, F.R., Hawkes, D.L., Lourenco, N.D., Pinheiro, H.M. and Dele, W., 1999. Colour in textile effluents-source, measurement, discharge consents and simulation: a review, *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, **74**, 1009-1018.
- Ragab, S., El Sikaily, A. and El Nemr, A., 2016. Concentrations and Sources of Pesticides and PCBs in Surficial Sediments of the Red Sea Coast, *Egyptian Journal of Aquatic Research*, **42**, 365–374.
- Robinson, T., Macmullan, G., Marchant, R. and Nigam, P., 2001. Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with proposed alternative, *Bioresource Technology*, **77**, 247-255.
- Salem, D.M.S., Khaled, A. and El Nemr, A., 2013. Assessment of pesticides and polychlorinated biphenyls (PCBs) in sediments of the Egyptian Mediterranean Coast. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, **39** (2), 141-152.
- Salem, D.M.S.A., El Sikaily, A. and El Nemr, A., 2014a. Organochlorines and their risk in marine shellfish collected from the Mediterranean coast, *Egyptian Journal of Aquatic Research*, **40**, 93–101.

- Salem, D.M.S.A., Morsy, F.A.-E.M., El Nemr, A., El-Sikaily, A. and Khaled, A., 2014. The monitoring and risk assessment of aliphatic and aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediments of the Red Sea, Egypt. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, **40**, 333–348.
- Sancar, B. and Balci, O., 2013. Decolorization of different reactive dye wastewaters by O₃ and O₃/ultrasound alternatives depending on different working parameters. *Textile Research Journal*, **83**, 574-590.
- Slokar, Y.M. and Majcen Le Marechal, A., 1998. Methods of decoloration of textile wastewaters. *Dyes Pigments*. **37**: 335–356.
- Song, S., Xu, X., Xu, L., He, Z., Ying, H., Chen, J. and Yan, B., 2008. Mineralization of CI reactive yellow 145 in aqueous solution by ultraviolet-enhanced ozonation, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **47**, 1386-1391.
- Steahlin, J. and Hoigne, J., 1982. Decomposition of Ozone in Water: Rate of Initiation by Hydroxide Ions and Hydrogen Peroxide. *Environmental Science & Technology*, **16**, 676-681.
- Sultan, M., 2002. Self-Monitoring Manual for textile industry Faculty of Engineering, Alexandria University, 30pp.
https://r.search.yahoo.com/_ylt=AwrJ61Xp3aBgVRMAPBdXNyoA;_ylu=Y29sbwNiZjEEcG9zAzIEdnRpZAMEc2VjA3Ny/RV=2/RE=1621184105/RO=10/RU=http%3a%2f%2fdspace.daffodilvarsity.edu.bd%3a8080%2fbitstream%2fhandle%2f123456789%2f3050%2fP12483%2520%252817%2525%2529.pdf%3fsequence%3d1%26isAllowed%3dy/RK=2/RS=b8Ez8FWwMN.bGhyFlkyrpHM9qc0-
- Sun, Q. and Yang, L., 2003. The adsorption of basic dyes from aqueous solution on modified peat-resin particle. *Water Research*, **37**, 1535- 1544.
- Wijannarong, S., Aroonsrimorakot, S., Thavipoke, P. and Sangjan, S., 2013. Removal of Reactive Dyes from Textile Dyeing Industrial Effluent by Ozonation Process. *APCBEE Procedia*, **5**, 279-282.

CdSeTe Kuantum Noktaları ile Bromo Krezol Mor Kombinasyonunun Spektrofotometrik Değerlendirmesi

Tuna DEMİRCİ^{1*}, Erdem ELİBOL²

¹ Duzce University, Scientific and Technological Research on Application and Research Center, Duzce, Turkey,

² Duzce University, Faculty of Engineering, Department of Electrical Electronics Engineering, Duzce, Turkey,

* Corresponding author's e-mail address: tunademirci@duzce.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8933-4944>
e-mail address: erdemelibol@duzce.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0328-5534>

Geliş Tarihi: 09.06.2022

Kabul Tarihi: 30.03.2023

Öz

Anahtar kelimeler
Nanoteknoloji; CdSeTe
Kuantum Noktaları;
Brom Krezol Moru;
Hibrit Yapı, Emisyon;
Absorpsiyon

Kuantum noktalar (QDs) sahip oldukları benzersiz optik ve elektronik özellikleri ile son yıllarda birçok farklı teknolojik alanda popüler hale gelmişlerdir. Bu durum QD'lar ile organik bileşiklerin etkileşimine olan ilgiyi arttırmaktadır. Bu çalışmada bu ilgiye temel alarak, CdSeTe QD'lar ile Brom Krezol Moru (BCP) kloroform içerisinde oda sıcaklığının da etkileşimini ve CdSeTe QDs/BCP yapısının spektroskopik olarak karakterizasyonu açıklamayı amaçlamıştır. Bu amaç doğrultusunda CdSeTe QDs/ BCP oluşumunun etkileşimleri spektroskopik olarak Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), absorpsiyon ve emisyon üzerinden karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. BCP'nin CdSeTe QD'lar ile hibritleşmesiyle QDs'nin luminesans pikinde 19 kat azalma tespit edilmiştir. Bununla birlikte Brom Krezol Moru (BCP) ile hibritleşen CdSeTe QD'lar BCP'nin soğurma özelliğini 112.8 katına kadar arttırmıştır.

Spectrophotometric Evaluation of Combination of CdSeTe Quantum Dots and Bromocresol Purple

Abstract

Keywords
Nanotechnology;
CdSeTe QDs;
Bromocresol purple;
Hybrid associate;
Emission; Absorption;

Quantum dots (QD) have been used in many different technological fields in recent years with their unique optical and electronic features. This increases the relevance to hybrid structures compatible with QDs. In this study, CdSeTe QDs and Bromocresol Purple (BCP) hybridized in chloroform in a very short time of room temperature and CdSeTe QD / BCP hybrid structures were created. The interactions of synthesized CdSeTe QD / BCP hybrid structures were examined by FT-IR and absorbance and emission characterization studies were carried out. A 19-fold reduction in the luminescence peak of QD was detected by hybridizing BCP with CdSeTe QDs. However, CdSeTe QDs hybridized to BCP increased the absorbance property of BCP up to 112.8 times.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Son yüzyılda teknolojinin gelişmesiyle birlikte kuantum noktaları (QDs) birçok araştırmanın temelinde çok önemli bir odak noktası haline gelmeye başlamış ve farklı teknolojik uygulamalarda araştırmalar yapılmıştır. Bu durum onun kullanım alanları her geçen gün arttırmaktadır. Kuantum noktalarının kullanım alanlarından bazıları örnek vermek gerekirse, Sensör (Chien *et al.* 2011, Lesiak *et al.* 2019) ve elektro-optik cihazlar (Gupta *et al.* 2013, Klude *et al.* 2002) olarak rahatlıkla sıralanabilir. Bunun dışında özellikle tıp alanında

hem seçici ligand tespiti hem de biyolojik görüntüleme QD'lerin kapsamlı çalışmaları bulunmaktadır (Algar *et al.* 2010, Jamieson *et al.* 2007).

Yüksek floresanlı nano boyutlu yarı iletken QDs'lerin kristal yapısı temel olarak II-IV ve I-III-V yapısını temel olarak elementlerden oluşur. Literatürde en yaygın olarak kullanılan QDs'ler esas olarak kadmiyum ve Tellür/Selenyum bileşimlerinden oluşmaktadır. Kadmiyum içeren QDs'lerin benzersiz özelliklerle, istenen absorpsiyon ve emisyon özellikleri ile sentezlenebilmeleri, gelecekte hastalık tedavisi ve

biyo-görüntüleme alanlarında kullanımlarının yaygınlaşabileceğini öngörülmektedir (Kang *et al.* 2016, Razmi *et al.* 2013).

Bromo Krezol moru, triaril boya ailesine ait bir türdür. Bu tür boyalar genel olarak albümin analizinde (Hill *et al.* 1983), pH belirteci (Yao *et al.* 2001), enoksasin doz ayarının belirlenmesinde (Süslü vd. 2002) ve ölümcül toksin aktivitelerinin belirlenmesinde (Kurzweilová *et al.* 1993) kullanılır. Ayrıca mikrobiyolojide bir laktik asit bakterisinin izolasyonu ve tayini için ölü hücrelerin boyanmasında yararlanılmaktadır (Dumas *et al.* 2010).

İnorganik QDs'ler ile organik boyaların karıştırılmasıyla elde edilen hibrit bileşenlerinin optik özellikleri üzerine çalışmalar artmaya başlamıştır. Hibrit yapılarda, organik boya ve inorganik QD'ler arasındaki bağlantı, esas olarak elektron transferi veya konjuge yapılar ile sağlanabildiği ortaya konulmuştur (Cao *et al.* 2016, Resch-Genger *et al.* 2008). Bu çalışmaların en umut verici yönlerinden biri, hibrit ortaklar olarak QDs-organik molekül olan etkileşimdir. Bu etkileşim, QDs'den organik bileşiğe, floresan rezonans enerji transfer mekanizması (FRET) aracılığıyla yeni bir hibrit ortak yaratır ve bir moleküle uyarma enerjisi aktararak sentez gerçekleşir (Shi *et al.* 2007, Snee *et al.* 2006). QDs yapılarının boyutları, iyi bir FRET için gerekli olan donör (QD) lüminesans bantlarının ve alıcı organik molekülün emici bantlarının örtüşmesi en önemli koşuldur. Diğer bir deyişle, yüksek enerji transfer verimliliği için en etkili olacak doğrudan iletim modelini oluşturur. Ancak bu duruma ilişkin çalışmaların sayısı oldukça yetersizdir (Schmelz *et al.* 2001).

Bu çalışmada literatürde ilk kez CdSeTe QDs/BCP ortak ilişkilendirmesi ve yapının incelenmesi için çalışılmıştır. Farklı QDs ve BCP derişimleri ile elde edilen hibrit ortaklığın spektroskopik yöntemler ile analizi yapıldı. Yani hibrit ortaklığın ilk olarak absorbans ve emisyon karakterizasyonları incelenmiştir. Ayrıca, hibrit birlikteliği oluşturan QDs ve BCP'nin molekülerinin birbiri ile ilişkilerini anlamak için FT-IR çalışması gerçekleştirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

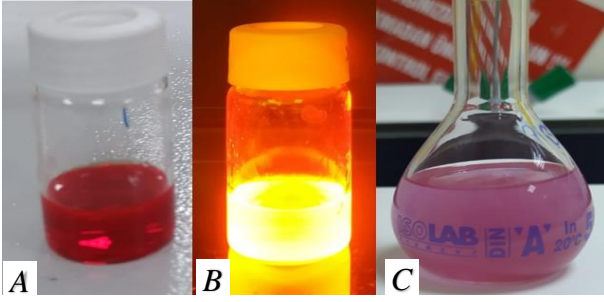
Sentezlenen CdSeTe QDs, BCP ve CdSeTe QDs/BCP hibrit ilişkisinin absorpsiyonu UV-1800 Shimadzu UV Spektrometresi kullanılarak analiz edildi. Analiz tarama aralığı 300-800 nm olarak ayarlandı. CdSeTe QDs/BCP hibrit ortak bileşiklerinin soğurma spektrumu, Tablo 1'de sergilenen çeşitli konsantrasyon bileşimleri ile çalışıldı. Emisyon analizi için FLS 1000 Edinburgh Instruments kullanıldı. Hibrit ilişki taramaları için 300-800 nm aralığında, 380 nm uyarma dalga boyu kullanılarak emisyon spektrumu çekildi. CdSeTe QDs ve Bromo Krezol moru için Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) spektrumları, ATR eklentili Shimadzu IR Prestige 21 spektrometresi ile 64 tarama üzerinden, 400-4000 nm arasında yapıldı. CdSeTe QDs metal içeriği Perkin Elmer Avio 200 ICP-OES ile analiz edildi.

Trioktilfosfin (TOP, %90), Bromo Krezol Moru (BCP, %99), Kadmiyum oksit (CdO, %99), 1-Oktadesen teknik sınıf (ODE, %90), selenyum tozu (Se, %99), 1-tetradesil fosforik asit (TDPA, %99), tellür tozu (Te, %99), Trioktilfosfin oksit (TOPO, %99) sigma aldrichden temin edilmiştir.

2.1 Sentez

Çalışmamızda, CdSeTe QDs'ler Debnath ve arkadaşları (Debnath *et al.* 2016) tarafından önerilen temel yöntem üzerinden bazı küçük değişiklikler yapılarak gerçekleştirildi. Üç boyunlu reaksiyon balonunda hazırlanan CdSeTe QDs sentezi, için kadmiyum, TOP-Se ve TOP-Te öncülleri hazırlanmıştır. İlk olarak, TOP-Se için Se (0.057 g, 0.75 mmol), ODE (3.75 ml) ve TOP (1.71 ml) karıştırıldı. Aynı zaman aralığında İkinci kısımda, TOP-Te'yi hazırlamak için Te (0.033 g, 0.255 mmol), ODE (3, 75 ml) ve TOP (1, 2 ml) ayrı bir reaksiyon balonunda hazırlandı. Bu iki karışım kademeli olarak ısıtıldı. Sıcaklık işlemi tamamlanırken kadmiyum öncüsü CdO (0.039g, 0.285 mmol), ODE (7.5ml), TOPO (3g, 6, 30 mmol) ve TDPA (0.225g, 0.81mmol) karıştırıldı. Çözelti 300°C'ye ısıtıldı. Bu karışıma sıcaklık 260°C'de sabit tutularak TOP-Se ve TOP-Te ilave edilerek 4 dakika karıştırmaya devam edildi ve soğutuldu. CdSeTe QDs'ler metanol ile yıkanarak santrifüjlendi ve kullanım için kloroform içinde saklandı. Floresan ışığı ve gün ışığında CdSeTe

QDs'lerin görüntüleri sırasıyla Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Güneş ışığı altında CdSeTe QDs (a), floresan ışığı altında CdSeTe QDs (b), kloroformda BCP çözeltisi (c).

CdSeTe QDs/BCP Hibrit Sentezi: Bromo Krezol Moru 0.270 g (0.005 mmol) ana stok olarak alınmış ve 50.0 ml kloroform ile tamamlanmıştır. Hazırlanan stok çözeltisi, Şekil 1c'de gösterilen pembe bir görünüm sergiledi. Bromo Krezol mor içeren pembe solüsyon, farklı konsantrasyonlarda 100 µl CdSeTe QDs ana stok solüsyonu ile karıştırıldı. Tüm Karışım, oda sıcaklığında 30 dakika boyunca karıştırılarak sentezlendi. Organik boyanın son konsantrasyonu yaklaşık 1.0×10^{-4} M olarak kullanılmıştır. CdSeTe QDs solüsyon konsantrasyonu İndüktif Eşleşmiş Plazma-Optik Emisyon Spektrometresi (ICP-OES) analizi ile hesaplanmış ve CdSeTe QDs konsantrasyonu 2.0×10^{-6} M olarak gösterildi.

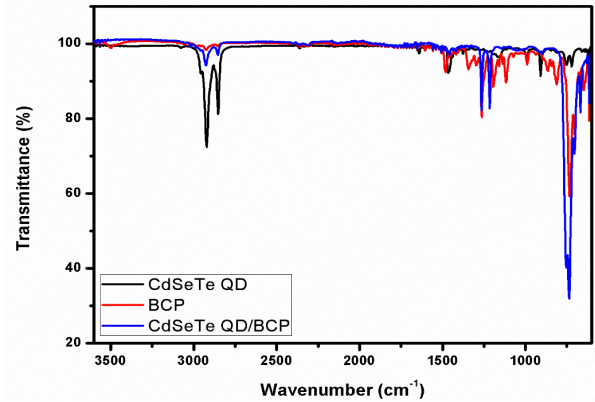
Çizelge 1. CdSeTeQDs:BCP hibrit karışım oranı ve derişimleri

QDs:BCP Oran	CdSeTe QDs Derişim (M)	BCP Derişim (M)	QDs:BCP Oran	CdSeTe QDs Derişim (M)	BCP Derişim (M)
0:1	-	1.0×10^{-4}	1:0	4.0×10^{-6}	-
0.5:1	2.0×10^{-6}	1.0×10^{-4}	1:0.25	4.0×10^{-6}	2.5×10^{-5}
1:1	4.0×10^{-6}	1.0×10^{-4}	1:0.5	4.0×10^{-6}	5.0×10^{-5}
2:1	8.0×10^{-6}	1.0×10^{-4}	1:1	4.0×10^{-6}	1.0×10^{-4}
3:1	16.0×10^{-6}	1.0×10^{-4}	1:2	4.0×10^{-6}	2.0×10^{-4}
4:1	64.0×10^{-6}	1.0×10^{-4}	1:3	4.0×10^{-6}	3.0×10^{-4}

3. Sonuç ve Tartışma

Şekil 2'de gösterilen FTIR sonuçları ilk olarak Bromo Krezol moru ile CdSeTe QDs'lerin yapılarını ve bunların etkileşimlerini değerlendirmek için

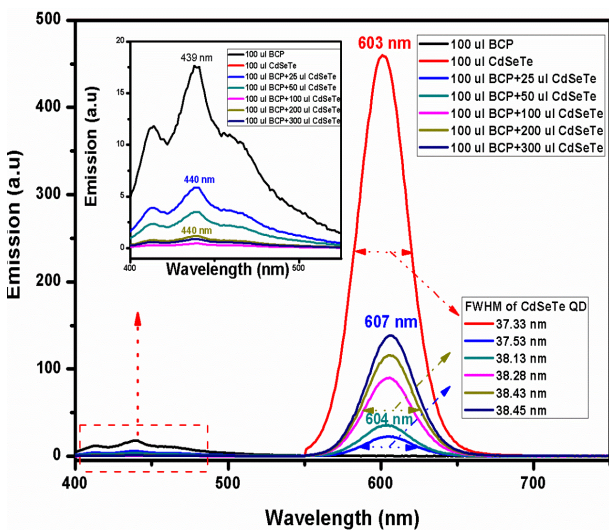
incelenmiştir. BCP'nin FTIR spektrumunda O-H gerilme ve burkulma zirveleri ve brom-karbon titreşimleri gözlemlendi. CdSeTe QDs ve BCP organik molekülü arasında hibridizasyon gerçekleşmiştir. Yeni yapının çekilen spektruma bakıldığında CdSeTe QDs'nin yüzeyindeki hidroksilin Cd^{2+} iyonları ile etkileşerek yapıya girdiğini gösterir. CdSeTe QDs/BCP'nin yapısının metilen (CH) kayma titreşimi, 1290 cm^{-1} 'de C-H salınımı ve çekme titreşimi ile ilişkilidir. Ayrıca yapıdaki brom ile CdSeTe QD'lerin en dış çekirdeğindeki Cd^{2+} 'lerin arasında 750 cm^{-1} ve 755 cm^{-1} 'de ki pik değişimi ile yapıldığı doğruladı. 1225 cm^{-1} civarında yükselen piklerin CdSeTe QDs yapısının Bromo Krezol mor yapısındaki S-O gerilme titreşimi ve S=O simetrik gerilme titreşimleri arttığı gözlemlendi. Bu tahminler, hibrit ortağın etkileşimini açıklanması yardımcı oldu. (Elibol vd. 2021).



Şekil 2. CdSeTe QDs:BCP (1:1) hibrit yapının FT-IR spektrumu.

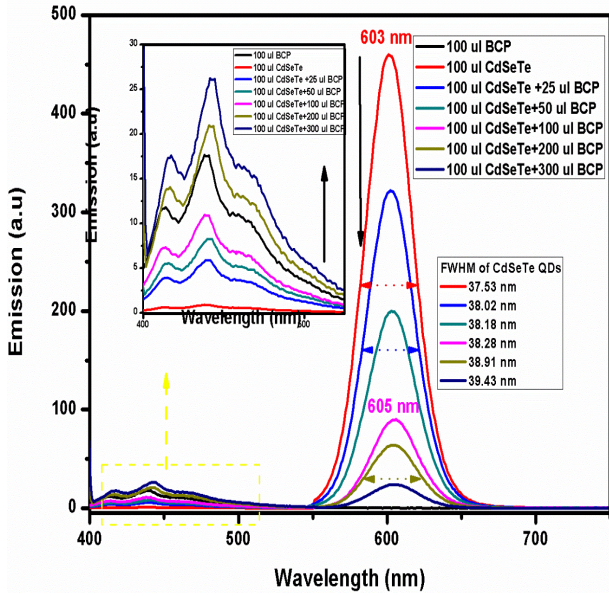
Emisyon karakterizasyonları ise iki aşama olarak incelenmiştir. İlk aşamada, CdSeTe QDs/BCP hibrit ilişkisinde organik boya (BCP) konsantrasyonu sabit tutulur ve CdSeTe QDs konsantrasyonu ise artırılır. Bu şekilde hibrit ilişkide QDs miktarındaki artışın emisyon karakterizasyonları üzerindeki etkileri incelenmiştir. İkinci aşamada ise, bu sefer, BCP miktarı artırılırken hibrit ortaktaki QDs'lerin konsantrasyonu sabit tutuldu. Böylece bileşenlerin karışım oranları daha farklı ölçekte değerlendirilirken QDs/BCP doyma noktalarının belirlenmesi sağlandı. Bu nedenle öncelikle BCP boya konsantrasyonunun sabit tutulduğu hibrit ortakların emisyon karakterizasyon analizleri yapılmıştır. CdSeTe QDs/BCP yapısının emisyon sonuçları Şekil 3'te verilmiştir. Çalışmada

sentezlenen CdSeTe QDs ve BCP boyalarının karışım sağlanmadan emisyonları ölçülmüştür. Emisyon karakterizasyon sonuçları, QDs'lerin emisyon tepe noktalarının 603 nm' de olduğunu, BCP'nin emisyon tepe noktasının ise 439 nm' de belirlenmiştir. Ek olarak, aynı derişimdeki CdSeTe QDs'lerin BCP'ye kıyasla çok yüksek floresans sergilediği bulundu. QDs'lerin yüksek floresans özellikleri sergiledikleri zaten literatürde bilinmektedir (Elibol 2020). Çalışmanın 100 µl BCP'ye 25 µl-300 µl CdSeTe QDs'nin eklendiği kısım olarak incelendiğinde; literatüre göre CdSeTe QDs'lerin piklerinde eklenen QDs miktarıyla orantılı bir artış tespit edildi (Amelia *et al.* 2012). Kloroformda 603 nm'lik bir tepe yayan CdSeTe QDs'ler, BCP ile karıştırıldı ve emisyon tepe noktalarında kırmızıya kayma gözlemlendi. En belirgin olarak ise 100 µl BCP / 300 µl CdSeTe QDs hibrit ortaklarının emisyon zirveleri yaklaşık 4 nm kırmızıya kaymıştır. Benzer şekilde, QDs'lerin BCP ile karıştırılması nedeniyle, ortak yapıda 603 nm'de pikin FWHM değerinde bir artış tespit edildi (Elibol ve Tutkun 2019). Bu boyut dağılımında değişiklikler olduğunu gösterir ve FT-IR analizi ile elde edilen sonuçlarla uyumludur. Emisyon incelemesinde BCP kaynaklı pikler dikkate alındığında; QDs miktarındaki artış, tepe noktasının 1 nm kadar kırmızıya kaymasına neden oldu. Ancak, pik uzunluklarında artan QD ile minimal artışlar gözlemlendi (Rakovich *et al.* 2010).



Şekil 3. BCP konsantrasyonunun sabit olduğu farklı QD/BCP oranlarında onarılan hibrit ortaklar için emisyon spektrumları.

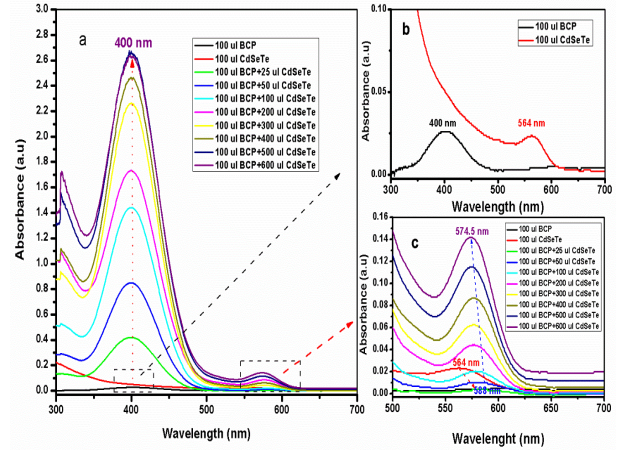
Emisyon karakterizasyon ölçümlerinin ikinci aşamasında ise, bu sefer BCP miktarı artırılırken hibrit ortaktaki CdSeTe QDs'lerin miktarı sabit tutuldu. Sabit miktarda QDs ile hazırlanan hibrit ortak için emisyon spektrumları Şekil 4'te gösterilmektedir. CdSeTe QDs ve BCP'nin kloroformdaki emisyon zirveleri de bu grafikte sırasıyla 603 nm ve 410 nm olarak gösterilmektedir. CdSeTe QDs / BCP hibrit ilişkisine eklenen BCP miktarındaki artışla birlikte, CdSeTe QDs'nin emisyon zirvesinde de bir miktar kırmızıya kayma tespit edildi. Ayrıca BCP miktarındaki artışla birlikte QDs'nin emisyon tepe noktasının FWHM değeri önemli ölçüde artmıştır. Böylece 37.53 nm olan FWHM miktarı 300 µl BCP ilavesiyle 39.43 nm'ye genişlemiştir. Şekil 3 ve Şekil 4'teki FWHM değerleri karşılaştırıldığında, hibrit ilişkide QDs miktarındaki azalmanın FWHM miktarında bir artışa neden olduğu açıkça görülmektedir. Bu, düşük QDs konsantrasyonunun BCP ile daha fazla etkileşime girdiğini gösterir. Buna karşılık, Şekil 4'te elde edilen en temel sonuç, BCP miktarındaki bir artışla CdSeTe QDs'nin lüminesansında meydana gelen söndürmedir. CdSeTe QDs'nin lüminesans, 300 µl BCP ilavesiyle 19 kat azaldı. Bu, QDs'nin hibrit ortakta donör rolünü üstlendiğinin bir göstergesidir (Clapp *et al.* 2004). Benzer şekilde, 410 nm'de BCP'nin tepe uzunluğundaki BCP miktarındaki artışla orantılı olarak bir artış gözlemlendi. Bu, CdSeTe QDs / BCP hibrit ilişkilendirmesinde, BCP'nin lüminesans özelliğinin arttığını ve BCP'nin bariz bir alıcı olarak çalıştığını göstermektedir (Rakovich *et al.* 2010). Literatürde lüminesansın sönmenin iki ana nedeni vardır. Bunlar Forster rezonans enerji transferi (FRET) veya yük transferidir. CdSeTe QDs / BCP hibrit ilişkisinde durum, QDs'nin lüminesansının azalması, ancak BCP'nin parlaklığının artması FRET mekanizmasının varlığını gösterir (Smirnov *et al.* 2018).



Şekil 4. CdSeTe QD konsantrasyonunun sabit olduğu farklı CdSeTe QDs/BCP oranlarında hazırlanan hibrit ortaklar için emisyon spektrumları.

Çalışmanın bu aşamasında, CdSeTe QDs/BCP hibrit ortaklarının soğurma (absorpsiyon) özellikleri incelenmiştir. Soğurma çalışması emisyon karakterizasyonunda olduğu gibi iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birincil olarak absorpsiyon çalışmalarında hibrit ilişkideki BCP miktarı sabit tutulurken, CdSeTe QDs'lerin konsantrasyonları artırılır. Elde edilen soğurma spektrumları Şekil 5'de verilmiştir. Hibrit yapının oluşumunda kullanılan CdSeTe QDs'lerin başlangıç spektrumunda bilindiği gibi absorpsiyon piki 564 nm olarak bulunmuştur. Diğer bir giriş maddesi olan Bromo Krezol Mor için soğurma 400 nm olarak belirlendi. Hibridizasyon işleminden sonra alınan soğurma spektrumları dikkate alındığında, BCP pikleri önemli ölçüde artmıştır (Şekil 5a). BCP'nin kloroformdaki soğurma pik uzunluğu 0.025 iken, soğurma piki CdSeTe QDs'lerin eklenmesiyle 107.2 kat artarak 2.68'e yükselmiştir. BCP'nin 400 nm zirvesindeki artış devam etti ve 100 µl BCP'ye 400 µl CdSeTe QDs eklenene kadar maksimuma ulaştı. 500 µl CdSeTe QDs'nin eklenmesi, doymuş hibrit ilişkisinde kayda değerden daha fazla artışa neden olmadı. Şekil 5b'de görüldüğü gibi, kloroformdaki CdSeTe QDs'nin soğurma zirvesi 564 nm'de görüldü (Elibol 2020). CdSeTe QDs'nin BCP'ye eklenmesiyle, soğurma piki önce kırmızıya kaymıştır (Şekil 5c). Ancak, hibrit

ilişkiye eklenen QDs miktarının artmasıyla, soğurma pikinde tekrar maviye kayma gözlemlendi. Emici pik boyutları, beklendiği gibi artan QDs konsantrasyonu ile artmıştır. QDs'nin soğurma zirvesinde meydana gelen bu kaymaların küçük boyutunun, temel kimyada hiçbir değişiklik olmamasına rağmen, BCP ile elektrokimyasal etkileşimlerden kaynaklandığı düşünülmektedir (Rakovich *et al.* 2010).

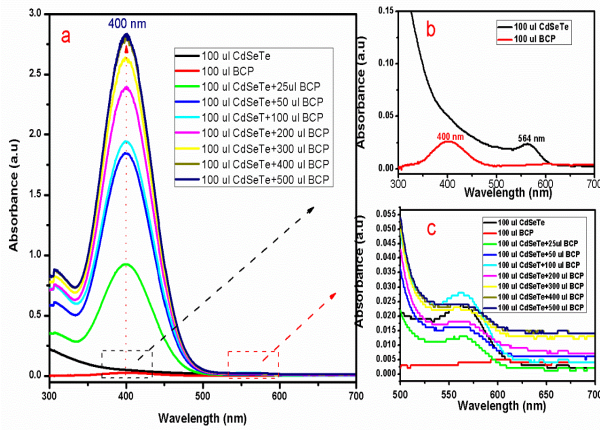


Şekil 5. CdSeTe QDs'nin soğurma spektrumları: (BCP konsantrasyonunun sabit)

Çalışmanın ikinci adımında, CdSeTe QDs'lerin konsantrasyonu sabit tutulmuştur. Bromo krezol mor boya oranları değiştirilerek incelenmiştir. CdSeTe QD/BCP Hibrit ilişkisinin soğurma spektrumları Şekil 6'de verilmiştir. Başlangıç malzemelerinin emicileri şekilde çok küçük olduğundan, değerler grafikte ayrı olarak gösterilmiştir (Şekil 6b ve Şekil 6c). Şekil 6 incelendiğinde QDs'ye ait karakteristik pikin 564 nm'de yer aldığı görülmektedir. Hibrit ortaktaki BCP miktarı artırıldığında, BCP'nin soğurma tepesi uzunluğu doğru orantılı olarak artmaya başlamıştır. BCP'nin soğurma pik uzunluğu başlangıçta 0.025 iken, hibrit ortaktaki BCP miktarındaki artış, soğurma pik boyutunda artmaya başlamıştır. Öyle ki sadece 25 µl BCP ve 100 µl CdSeTe QD karıştırılarak soğurma piki 32.4 kat artarak 0.81'e kadar çıkmıştır. En fazla ise soğurma tepesi yüksekliği 1.78'e yükseltildi. 100 µl CdSeTe QDs'lere eklenen BCP miktarı 400 µl iken, BCP'nin 400 nm'de soğurma zirvesinin uzunluğu 2.82'ye yükseldi. Bu durumda soğurma pikindeki artış 112.8 kattır. Bu artışın nedeninin, BCP yapısındaki Br ile etkileşiminden kaynaklandığı düşünülmektedir. Örnek olarak

kuantum noktalarının çeşitli halojenler ile etkileşiminden kaynaklanan verim artışları örnek olarak gösterilebilir.

iki aşamalı çalışmanın toplam verileri incelendiğinde literatürde olduğu gibi soğurma artışı sonucuna ulaşılmıştır (Orlova *et al.* 2008). CdSeTe QDs'ler ve BCP boyalarının etkileşiminde önemli bir artış gözlemlendi Şekil 6'de görüldüğü gibi, BCP miktarındaki artış, CdSeTe QDs'lerin soğurma zirvesinde herhangi bir değişikliğe neden olmadı.



Şekil 6. CdSeTe QD konsantrasyonunun sabit olduğu CdSeTe QD/ BCP farklı oranlarının absorbans spektrumları.

4. Tartışma ve Sonuç

Çalışmada literatürde ilk kez CdSeTe QD/BCP hibrit ilişkisinin spektroskopik analizi yapılmıştır. Hibrit ortaklar oluşturulurken sırasıyla CdSeTe QDs konsantrasyonları ve BCP konsantrasyonları sabit tutulmuş ve diğer bileşenin artışının absorbans ve emisyon karakterizasyonu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma ile iki ana sonuca varılmıştır; CdSeTe QDs / BCP'de etkili olan FRET mekanizması ve CdSeTe QDs'nin eklenmesi ile BCP'nin absorbans zirvesindeki muazzam artış sonuç olarak ortaya çıkmıştır. Ek olarak, BCP'nin eklenmesi, CdSeTe QDs'lerin lüminesansında sönmeye neden olmuş ve lüminesans zirvesini 19 kata kadar azaldığı gözlemlenmiştir. Bu, bu hibrit ortak yapının özellikle biyosensör ve güneş enerjisi sistemlerinde kullanılabilirliğini öngörülmektedir. Öte yandan, BCP'ye eklenen CdSeTe QDs'ler, BCP'nin absorbans zirvesini 112.8 kat artırır. Bu da ana kullanım alanı olan giyim sektöründe boyama kalitesi ve anti

bakteriyel özelliklerini kullanarak yeni tip kumaş boyaları yaratmayı vaat etmektedir.

5. Kaynaklar

- Algar, W. R., Tavares, A. J., & Krull, U. J., 2010. Beyond labels: A review of the application of quantum dots as integrated components of assays, bioprobes, and biosensors utilizing optical transduction. *Analytica Chimica Acta*, **673**, 1–25.
- Amelia, M., Lincheneau, C., Silvi, S., and Credi, A., 2012. Electrochemical properties of CdSe and CdTe quantum dots. *Chemical Society Reviews*, **41**, 5728.
- Cao, S., and Yu, J., 2016. Carbon-based H₂-production photocatalytic materials. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, **27**, 72–99.
- Chien, Y.-H., Huang, C.-C., Wang, S.-W., and Yeh, C.-S., 2011. Synthesis of nanoparticles: sunlight formation of gold nanodecahedra for ultra-sensitive lead-ion detection. *Green Chemistry*, **13**(5), 1162. <https://doi.org/10.1039/c0gc00915f>
- Clapp, A. R., Medintz, I. L., Mauro, J. M., Fisher, B. R., Bawendi, M. G., and Mattoussi, H., 2004. Fluorescence Resonance Energy Transfer Between Quantum Dot Donors and Dye-Labeled Protein Acceptors. *Journal of the American Chemical Society*, **126**(1), 301–310.
- Colpini, L. M. S., Alves, H. J., Santos, O. A. A. Dos, and Costa, C. M. M., 2008. Discoloration and degradation of textile dye aqueous solutions with titanium oxide catalysts obtained by the sol-gel method. *Dyes and Pigments*, **76**(2), 525–529.
- Debnath, T., Maiti, S., and Ghosh, H. N., 2016. Unusually Slow Electron Cooling to Charge-Transfer State in Gradient CdTeSe Alloy Nanocrystals Mediated through Mn Atom. *Journal of Physical Chemistry Letters*, **7**, 1359–1367
- Dumas, E., Gao, C., Suffern, D., Bradforth, S. E., Dimitrijevic, N. M., and Nadeau, J. L., 2010. Interfacial Charge Transfer between CdTe Quantum Dots and Gram Negative Vs Gram Positive Bacteria. *Environmental Science & Technology*, **44**(4), 1464–1470.

- Elibol, E., 2020. Synthesis of near unity photoluminescence CdSeTe alloyed Quantum Dots. *Journal of Alloys and Compounds*, **817**, 152726.
- Elibol, E., and Demirci, T., 2020. An Investigation The Spectroscopic Characterization Of Alloy Cdsete Quantumdots/ Bromophenol Blue Hybrid Associates. *Sakarya University Journal of Science*, **25**, 200-211.
- Elibol, E., and Tutkun, N., 2019. Improving CdTe QDSSC's performance by Cannula synthesis method of CdTe QD. *Materials Science in Semiconductor Processing*, **93**, 304–316.
- Gupta, S. K., Singh, D. P., Tripathi, P. K., Manohar, R., Varia, M., Sagar, L. K., and Kumar, S., 2013. CdSe quantum dot-dispersed DOBAMBC: an electro-optical study. *Liquid Crystals*, **40(4)**, 528-533.
- Hill, P. G., and Wells, T. N. C., 1983. Bromocresol Purple and the Measurement of Albumin: Falsely High Plasma Albumin Concentrations Eliminated by Increased Reagent Ionic Strength. *Annals of Clinical Biochemistry: An International Journal of Biochemistry and Laboratory Medicine*, **20(5)**, 264-270.
- Jamieson, T., Bakhshi, R., Petrova, D., Pocock, R., Imani, M., and Seifalian, A. M., 2007. Biological applications of quantum dots. *Biomaterials*, **28(31)**, 4717-4732.
- Kang, T., Um, K., Park, J., Chang, H., Lee, D. C., Kim, C.-K., and Lee, K., 2016. Minimizing the fluorescence quenching caused by uncontrolled aggregation of CdSe/CdS core/shell quantum dots for biosensor applications. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **222**, 871-878.
- Klude, M., Passow, T., Heinke, H., and Hommel, D., 2002. Electro-Optical Characterization of CdSe Quantum Dot Laser Diodes. *Physica Status Solidi (B)*, **229**, 1029-1032.
- Kurzweilová, H., and Sigler, K., 1993. Fluorescent staining with bromocresol purple: A rapid method for determining yeast cell dead count developed as an assay of killer toxin activity. *Yeast*, **9**, 1207-1211.
- Lesiak, A., Drzozga, K., Cabaj, J., Bański, M., Malecha, K., and Podhorodecki, A., 2019. Optical Sensors Based on II-VI Quantum Dots. *Nanomaterials*, **9**, 192.
- Orlova, A. O., Maslov, V. G., Baranov, A. V., Gounko, I., and Byrne, S., 2008. Spectral-luminescence study of the formation of QD-sulfophthalocyanine molecule complexes in an aqueous solution. *Optics and Spectroscopy*, **105**, 726-731.
- Rakovich, A., Rakovich, T., Kelly, V., Lesnyak, V., Eychmüller, A., Rakovich, Y. P., and Donegan, J. F., 2010. Photosensitizer Methylene Blue-Semiconductor Nanocrystals Hybrid System for Photodynamic Therapy. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, **10(4)**, 2656-2662.
- Razmi, H., and Mohammad-Rezaei, R., 2013. Graphene quantum dots as a new substrate for immobilization and direct electrochemistry of glucose oxidase: Application to sensitive glucose determination. *Biosensors and Bioelectronics*, **41**, 498-504.
- Resch-Genger, U., Grabolle, M., Cavaliere-Jaricot, S., Nitschke, R., and Nann, T., 2008. Quantum dots versus organic dyes as fluorescent labels. *Nature Methods*, **5(9)**, 763-775.
- Schmelz, O., Mews, A., Basché, T., Herrmann, A., and Müllen, K., 2001. Supramolecular Complexes from CdSe Nanocrystals and Organic Fluorophors. *Langmuir*, **17**, 2861-2865.
- Shi, L., Rosenzweig, N., & Rosenzweig, Z., 2007. Luminescent Quantum Dots Fluorescence Resonance Energy Transfer-Based Probes for Enzymatic Activity and Enzyme Inhibitors. *Analytical Chemistry*, **79**, 208-214.
- Smirnov, M. S., Ovchinnikov, O. V., Taidakov, I. V., Ambrozevich, S. A., Vitukhnovskii, A. G., Zvyagin, A. I., and Uskov, G. K., 2018. Luminescent Properties of Hybrid Nanostructures Based on Quantum Dots of CdS, Europium 1,3-Diketonate, and Methylene Blue Molecules. *Optics and Spectroscopy*, **125**, 249-255.
- Snee, P. T., Somers, R. C., Nair, G., Zimmer, J. P., Bawendi, M. G., and Nocera, D. G., 2006. A Ratiometric CdSe/ZnS Nanocrystal pH Sensor. *Journal of the American Chemical Society*, **128**, 13320-13321.
- Süslü, İ., and Tamer, A., 2002. Spectrophotometric determination of enoxacin as ion-pairs with bromophenol blue and bromocresol purple in bulk

and pharmaceutical dosage form. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, **29**, 545-554.

Yao, W., and Byrne, R. H., 2001. Spectrophotometric Determination of Freshwater pH Using Bromocresol Purple and Phenol Red. *Environmental Science & Technology*, **35**, 1197-1201.

Anti-Kanser İlaç Vinblastin'in Kalem Grafit Elektrot Yüzeyinde Elektrokimyasal Özelliklerinin İncelenmesi Ve Miktar Tayini

Günay ÖNAL

Batman Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, Batman

e-posta: gunayturmus@hotmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7595-9417>

Geliş Tarihi: 09.10.2022

Kabul Tarihi: 19.04.2023

Öz

Anahtar kelimeler

Vinblastin;
Kalem Grafit Elektrot;
Voltametri;
Flakon, idrar

Kanser kemoterapisinde kullanılan vinblastin (VNB) antineoplastik bir ilaçtır. Sunulan bu çalışmada, VNB'nin elektrokimyasal özellikleri tek kullanımlık kalem grafit (PG) elektrot ile geniş bir pH aralığında ve farklı destek elektrolitler "Britton-Robinson (0.04 M BR, pH 2.0-12.0), fosfat (0.04 M PBS, pH 2.0, 3.0, 4.0, 7.4) ve asetat (0.04 M ABS, pH 4.8) içinde döngüsel voltametri "CV" ve Kare Dalga Voltametri "SWV" teknikleriyle incelenmiştir. VNB, +0.993 V gerilim ve 3.844 µA akım değerinde BR (pH 2.0) içinde CV ile tersinmez bir yükseltgenme piki vermiştir. SWV tekniği ile anodik akım sinyali, BR (pH 2.0) içerisinde 11 nM ile 495 nM arasında derişim ile doğrusal bir korelasyon gösterdi " $I_p (\mu A) = 0.0087 C (nM) - 0.3448 (r = 0.993, n = 12)$ ". 11 nM derişim seviyesinde, 2.4 nM gözlenebilir sınırı (LOD) ve % 2.93 görelî standart sapma hesaplandı. Önerilen yöntemin analitik uygulaması ilaç ve idrar örneklerinde pratik edilmiş ve geri kazanımlarla gösterilmiştir.

Investigation and Quantification of Electrochemical Properties of the Anti-Cancer Drug Vinblastine on the Pencil Graphite Electrode Surface

Abstract

Keywords

Vinblastine;
Pencil Graphite
Electrode;
Voltammetry;
Vial, urine

Vinblastine (VNB) is an antineoplastic drug used in cancer chemotherapy. In this presented study, the electrochemical properties of VNB were investigated in a wide pH range with disposable pencil graphite (PG) electrode and different supporting electrolytes "Britton-Robinson (0.04 M BR, pH 2.0-12.0), phosphate (0.04 M PBS, pH) 2.0, 3.0, 4.0, 7.4) and acetate (0.04 M ABS, pH 4.8) were studied by cyclic voltammetry "CV" and Square Wave Voltammetry "SWV" techniques. VNB gave an irreversible oxidation peak with CV in BR (pH 2.0) at +0.993 V potential and 3.844 µA current. With the SWV technique, the anodic current signal showed a linear correlation with the concentration between 11 nM and 495 nM in BR (pH 2.0) " $I_p (\mu A) = 0.0087 C (nM) - 0.3448 (r = 0.993, n = 12)$ ". At a concentration level of 11 nM, a limit of detection (LOD) of 2.4 nM and a relative standard deviation of 2.93% were calculated. The analytical application of the proposed method has been practiced in drug and urine samples and demonstrated with recoveries.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Vinblastin, kanser kemoterapisinde kullanılan bir vinka alkaloididir. Vinka-alkaloidler, mitoz sırasında beta-tubuline bağlanarak mikrotübül fonksiyonunu bozarak hücre ölümüne neden olurlar ve ayrıca anjiyogenezini inhibe edebilirler (Kavallaris *et al.* 2008, Pasquier and Kavallaris, 2008, Gan and Kavallaris, 2008). Klinik pratikte vinka-alkaloidleri 1960'lı yıllardan beri kullanılmaktadır ve

farmakokinetik özelliklerine olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Genel olarak vinka-alkaloidler, Hodgkin hastalığı, Kaposi sarkomu, küçük hücreli olmayan akciğer kanseri, meme kanseri, mesane kanseri, lenfomalar ve lösemi dahil olmak üzere çok çeşitli kemoterapide kullanılırlar (Owellen *et al.* 1977).

Teknolojideki gelişmelerin giderek analitik yöntemlerin gelişimine katkı sağladığı bilinmektedir. Biyolojik matrikslerde VNB'nin tayini için kullanılan

farklı analitik yöntemlerden bazıları şunlardır: akış enjeksiyonlu elektrosprey iyonlaşma kütle spektrometresi (Favretto *et al.* 2001), yüksek performanslı sıvı kromatografisi-kütle spektrometresi (Stokvis *et al.* 2005), kapiler elektroforez-kütle spektrometresi (Chen *et al.* 2011), sıvı kromatografisi-yüksek çözünürlüklü kütle spektrometresi (Kosjek *et al.* 2013), elektrosprey iyonlaştırma tandem kütle spektrometresi ile birleştirilmiş sıvı kromatografisi (Gao *et al.* 2014), sıvı kromatografisi-atmosferik basınç kimyasal iyonlaşma-kütle spektrometresi (Achanta *et al.* 2013), yüksek performanslı sıvı kromatografisi-elektrosprey iyonizasyon-tandem kütle spektrometresi (Lin *et al.* 2014).

Yukarıda verilen bu yöntemler bilim insanları tarafından kabul edilmekle birlikte; toksik çözeltilerin kullanımı, zaman alan öğütme ve numune ön işleme, maliyet ve deneyimli analistlere sahip olma dezavantajlarıdır.

Günümüzde voltametrik yöntemler diğer analitik yöntemlere alternatif olarak tercih edilmektedir. Voltametri; düşük maliyet, kısa analiz süresi, küçük analitik hacim, yüksek duyarlılık, seçicilik, elektro-aktif bileşiklerin analizi, örneklerin kolay hazırlanabilirliği faydalarındandır (Brainina, 2001; Farghaly *et al.* 2014).

Voltametrik yöntemde elektrot seçimi; yöntemin doğruluğunu, kesinliğini, seçiciliğini ve duyarlılığını etkiler. Çalışma elektrodu seçiminde; analitin redoks davranışı, analizin yapıldığı gerilim çalışma aralığı ve bu aralıktaki artık akım, çalışma elektrotun elektriksel iletkenliği, elektrot yüzeyinin tekrarlanabilirliği, mekanik özellikleri, ekonomik olması, uygulanabilirliği gibi kriterler ve toksisite dikkate alınmalıdır (Özkan *et al.* 2015).

Bu çalışmada karbon bazlı katı elektrotlardan biri olan tek kullanımlık grafit kalem uçlu çalışma elektrodu kullanılmıştır. Elektrokimyasal analizde karbon bazlı katı elektrotlar: geniş çalışma gerilim aralığı, düşük artık akım, yüksek duyarlılık, kimyasal inertlik ve zengin yüzey kimyası nedeniyle tercih edilmektedir. Bununla birlikte, bu elektrotlarla çalışırken, bazı moleküllerin anodik oksidasyon ürünleri elektrot çalışma yüzeyinde istenmeyen bir

ince film tabakası oluşturduğundan analitik sinyal azalır, bu nedenle tekrarlanabilir sonuçlar elde edilemez. Kalem uçlu grafit elektrotlar, ekonomik ve pratik kullanımının yanı sıra tek kullanımlık olmaları nedeniyle diğer karbon bazlı elektrotlara alternatif olarak çalışmalarda yerini almıştır (Bond *et al.* 1997, Özcan *et al.* 2018, Arvas *et al.* 2018).

PG çalışma elektrodu; yüksek elektrokimyasal reaktivite, mekanik dayanıklılık, hazırlık kolaylığı, düşük maliyetli ve teknolojik özelliklere sahiptir. Aynı zamanda elektrotun herhangi bir toksik kimyasal ve reaktife maruz kalmaması da önemlidir (Wang ve Kawde, 2001, Wang *et al.* 2000, Bond *et al.* 1997).

Bilim insanlarının yıllar içinde PG elektrotu farklı alanlarda kullandıkları görülmüştür (Altunkaynak *et al.* 2021, Altunkaynak *et al.* 2020, Levent and Onal 2018, Levent *et al.* 2009, Ly *et al.* 2004, Wang *et al.* 2000).

Literatürler incelendiğinde, VNB 'nin farklı voltametrik teknikler ve farklı çalışma elektrotları ile ilgili bilimsel çalışmaları sayıca sınırlıdır (Çizelge 1).

Çalışmamızda VNB analizinde SWV tekniği ve toksik olmayan tek kullanımlık ekonomik PG elektrot kullanılmıştır.

Çizelge 1. Farklı elektrokimyasal teknikler ile yapılmış VNB ile ilgili çalışmalar

Teknik	Elektrot	LOD	Referans
DPV	CPE	0.04 mM	Rusling et al. 1984
DPP	.	-	Temizer, 1986
CV, DPV	GCE	-	Brett et al. 1994
DPV	CPE	0.04 mM	Haque ve Saba 2009
EIS	AuNPs/GCE	0.084 nM	Haghshenas et al. 2017

DPV: Diferansiyel puls voltametri, DPP : Diferansiyel puls polarografi, CV : Dönüşümlü voltametri , NPV : Normal puls voltametri, EIS : Elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS), CPE: Karbon pasta elektrot , GCE : Camsı karbon elektrot, Pt : Platin , AuNPs/GCE : Altın nano partikül / camsı karbon elektrot, LOD : Tespit limiti.

2. Malzemeler ve yöntemler

2.1 Analizör ve elektrotlar

Bir potansiyostat/galvanostat (Autolab PGSTAT128N EcoChemie, The Netherlands) üzerinde CV ve SWV çalışmaları yapıldı. Ticari yazılım Nova 1.11 sürüm kullanıldı. Elektrokimyasal ölçümler için, "Ag/AgCl (MF 2052, BAS 3 M KCl)" referans elektrot, "platin tel (MF 1032, BAS)" yardımcı elektrot ve "PG " çalışma elektrotu kullanıldı. BASİ C-3 hücre standı olarak üç elektrotlu bir giriş sistemi ve 10 mililitrelik bir deney hücresi (pyrex®, MR 1208, BAS) kullanıldı. Çözeltilerin pH ayarlamaları cam elektrotlu "thermo scientific orion 3 star" pH metre ile yapıldı.

2.1.1 Kalem ucu grafit çalışma elektrotunun hazırlık aşaması

PG çalışma elektrotuna uygun grafit kalem (Rotring) ve grafit kalem ucu (Model Tombo 0.5/2B, Japan) kırtasiyeden satın alındı. Her ölçüm için yeni bir kalem ucu kullanıldı. Elektrot, Wang ve arkadaşlarının önerdiği tekniğe uygun olarak tasarlandı. Rotring kalemin dış metal kulpu ve uç kısmındaki metal kısım bakır tel ile sarılarak elektriksel iletkenliği sağlandı. 60 mm uzunluğunda ve 0.5 mm çapında olan grafit kalem ucu, 15 mm boyutu dışarıda kalacak şekilde işaretlendi ve grafit kalem içerisine yerleştirildi. Kalem ucunun 12 mm 'lik kısmı, 10 ml 'lik voltametrik deney hücresindeki analiz çözeltisine daldırıldı. PG elektroduna tekrarlanabilir ve duyarlı sinyaller elde etmek için aktivasyon işlemi gerçekleştirildi. Deneylerden önce seçilen destek elektrolitinde PG elektrot yüzeyine (elektrot ön-işlemi) +1.5 V gerilim 60 s sürede uygulandı (Wang *et al.* 2000).

2.2 Kimyasallar

VNB standardı [vinblastin sülfat tuzu, (V1377), C₄₆H₅₈N₄O₉] Sigma-Aldrich'den, VNB flakonu (1 mg / 1 mL, VINKO) eczaneden satın alındı. Kullanılan diğer kimyasallar ve çözücüler analitik reaktif sınıfındaydı ve saflaştırılmadan doğrudan kullanıldı. Dimetilsülfoksit çözücüsü ile 1.1x10⁻³ M VNB stok çözeltisi hazırlandı. Çeşitli derişimlerde standart çözeltilerin hazırlanmasında stok çözeltiler kullanıldı. Elektrokimyasal ölçümler için destek elektrolit olarak; ABS (pH 4.8), PBS (pH 3.0, 4.0, 7.4) ve BR (pH 2.0-12.0) tampon çözeltileri kullanıldı. Tampon

çözeltilerin istenilen pH değerine ayarlanması 5.0 M NaOH ve 5.0 M HCl ile yapıldı. Deneysel çalışmalar oda sıcaklığında ultra saf su kullanılarak gerçekleştirildi. Hazırlanan çözeltiler +4 °C 'de buzdolabında saklandı.

2.3 Analiz prosedürü

VNB 'nin elektrokimyasal davranışının araştırılması için PG elektrot kullanılarak yapılan ön çalışmalarda CV tekniği uygulandı. Analizlerden önce, PG elektrodu, temiz ve tekrarlanabilir bir elektrot yüzeyi elde etmek için, destek elektrolitinde +1.50 V gerilim ve 60 s sürede işleme tabi tutuldu. Elektroanalitik yöntem geliştirme aşamasında, çalışılacak voltametrik yöntemin optimizasyonu için; BR, PBS ve ABS destek elektrolitleri ve pH, elektrot temizleme yönteminde yer alan biriktirme gerilimi ve süresi, SWV yöntemi parametrelerinin elektrot üzerindeki etkisi, kalibrasyon eğrisi oluşturma, tekrarlanabilirlik çalışmaları ve analitik uygulama yapılmıştır. Tüm ölçümler 10-mL 'lik voltametrik deney hücresinde laboratuvar sıcaklığında (25 ± 5°C) 3 kez tekrarlanmak şartıyla gerçekleştirildi.

2.4 Örnek hazırlama

2.4.1 Farmasötik örneklerin hazırlanması

Yöntemin ticari ilaç formuna uygulamasında eczaneden satın alınan VINKO flakonu (1 mg / 1 mL) kullanıldı. Her flakon 1 mL 'de 1 mg VNB 'ye eşdeğer 1.14342 mg vinblastin sülfat içerir. Optimum koşullar için seçilen destek elektroliti içeren (BR, pH 2.0) voltametrik hücreye flakon içeriğinden µL düzeyinde ilaveler yapıldı. Numune solüsyonu doğrudan analiz edildi ve kalibrasyon yöntemi ile miktarı belirlendi.

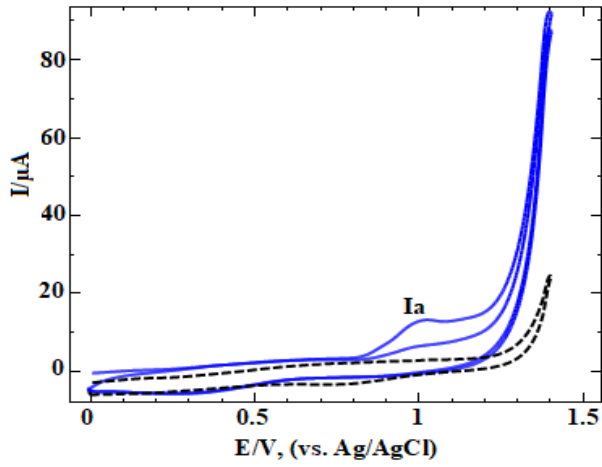
2.4.2 İdrar örneği hazırlama

İdrar örnekleri, sigara ve ilaç kullanmayan gönüllü e r k e k donörlerden aç karnına ve deneylerden hemen önce alındı. 5 mL idrar örneği, 10 mL'lik örnek tüpünde eşit hacimde asetonitril ile karıştırılarak vorteks karıştırıcıda 1 dakika işlemde geçirildi ve ardından 5000 rpm'de 5 dakika santrifüjlendi. Üst tabakadan alınan örneğin 50 µL'si deney hücresinde destek elektrolit ile karıştırıldı. Daha sonra küçük hacimlerde VNB standart çözeltisinden eklendi ve hemen analiz edildi.

3. Bulgular

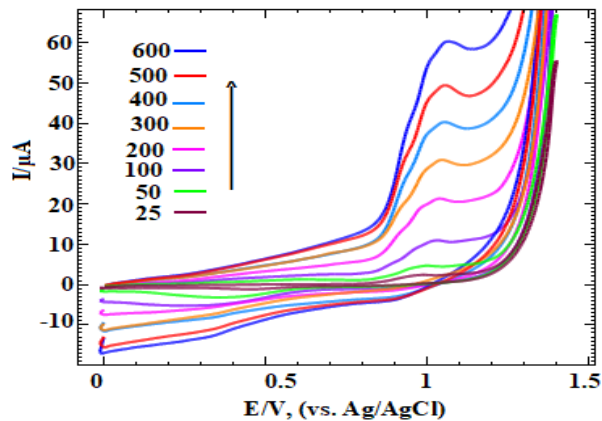
3.1 PG elektrot üzerinde Vinblastin'in voltametrik davranışı

PG elektrot yüzeyindeki elektrokimyasal davranışın incelenmesinde, VNB (5.5×10^{-5} M) 'nin iki döngülü voltamogramları 100 mVs^{-1} tarama hızı ve (0.0 V)-(+1.5 V) gerilim çalışma aralığında destek elektrolitinde (BR, pH 2.0) kaydedildi (Şekil 1). Destek elektroliti ve VNB (5.5×10^{-5} M) içeren çözeltinin eğrileri karşılaştırıldığında, VNB yaklaşık +0.993 V (3.844 μA) değerinde tersinmez bir anodik yükseltgenme piki (I_a) verdi (Şekil 1).



Şekil 1. 5.5×10^{-5} M Vinblastin 'in BR (pH 2.0) içinde iki döngülü voltamogramı. Tarama hızı (100 mVs^{-1}). Destek elektroliti: Kesikli çizgili.

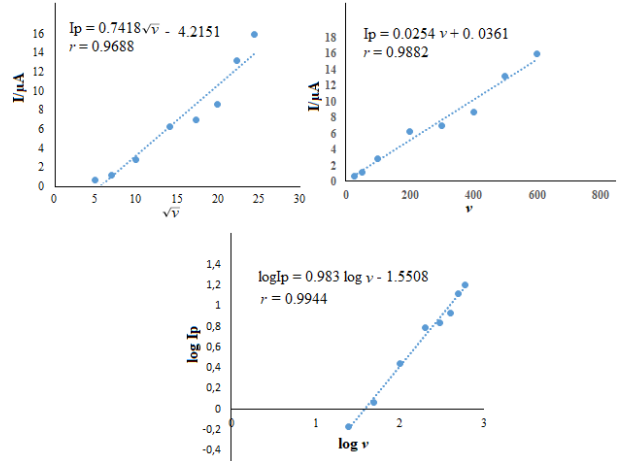
5.5×10^{-5} M VNB'nin anodik yükseltgenmesi üzerindeki tarama hızının pik gerilimlerinin ve akımlarının etkisini incelemek için; VNB'nin CV 'leri $25-600 \text{ mVs}^{-1}$ gerilim tarama hızı aralığında destek elektrolitte (BR, pH 2.0) kaydedildi. VNB bulguları incelendiğinde; gerilimin $25-600 \text{ mVs}^{-1}$ aralığında pozitif gerilimlere doğru kaydığı gözlemlendi (Şekil 2).



Şekil 2. $25-600 \text{ mVs}^{-1}$ tarama hızlarında BR (pH 2.0)'de

elde edilen 5.5×10^{-5} M Vinblastin 'in döngülü voltamogramları.

Şekil 2 'de verilen ilgili voltamogramlardan a ki bulgular yardımıyla belirlenen gerilim tarama hızı ile pik akımı (v) / (I_p) arasındaki ilişki elde edilen I_p / v ; I_p / v ; ve $\log I_p / \log v$ grafikleri Şekil 3 'te gösterilmektedir.



Şekil 3. 5.5×10^{-5} M Vinblastin 'in BR (pH 2.0) içinde pik akımı - $25-600 \text{ mVs}^{-1}$ gerilim tarama hız grafikleri. Elektrot, PG

Gerilim tarama hızı ile pik akımı arasında $25-600 \text{ mVs}^{-1}$ aralığındaki doğrusallık denklemleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

$$I_p (\mu\text{A}) = 0.7418 \sqrt{v} (\text{mV s}^{-1}) - 4.2151, r = 0.9688 \quad (1)$$

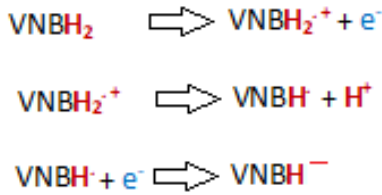
$$I_p (\mu\text{A}) = 0.0254 v (\text{mV s}^{-1}) + 0.0361, r = 0.9882 \quad (2)$$

$$\log I_p (\mu\text{A}) = 0.983 \log v - 1.5508, r = 0.9944 \quad (3)$$

VNB (5.5×10^{-5} M)'nin $25-600 \text{ mV s}^{-1}$ gerilim tarama hızları aralığında yükseltgenme pik gerilimi ve pik akım şiddeti üzerindeki etkisini incelemek için destek elektrolit (BR, pH 2.0) içinde döngülü voltamogramları kaydedildi (Şekil 2). Yükseltgenme pik akımı şiddeti ile gerilim tarama hızı arasında doğrusal bir ilişki olduğu görüldü ($I_p (\mu\text{A}) = 0.0254 v (\text{mV s}^{-1}) + 0.0361, r = 0.9882$). Tarama hızının logaritması ($\log v$) ile yükseltgenme pik akımının logaritması ($\log I_p$) arasındaki ilişki " $\log I_p (\mu\text{A}) = 0.983 \log v - 1.5508, r = 0.9944$ " elde edilen eğim 0.5 ile 1 arasındadır, bu da VNB 'nin elektrokimyasal yükseltgenme tepkimesinin adsorpsiyon kontrollü olduğunu gösterir. İlgili grafik Şekil 3 'de gösterilmektedir.

Tersinmez bir elektrot işlemi için E_p ile $\log v$ arasındaki ilişki şu şekildedir: $E_p = E^0 + (2.303RT /$

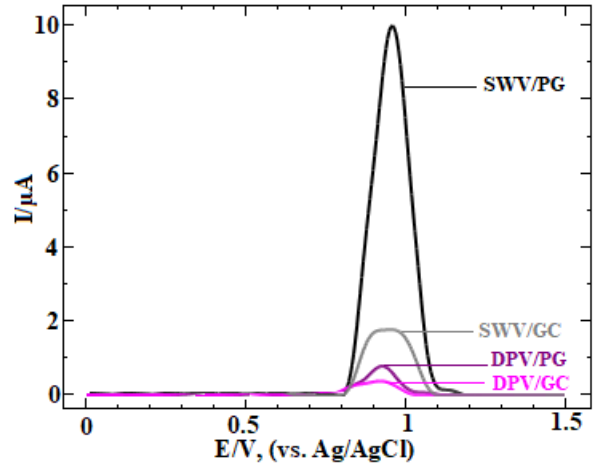
$\alpha nF) \log (RTk^0 / \alpha nF) + (2.303RT / \alpha nF) \log v$ (Laviron, 1979). ilişkide bulunan " α " yük aktarım katsayısı ve " n " redoks tepkimesinde transfer edilen elektron sayısıdır. $R = 8.314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$, $T = 298 \text{ K}$ ve $F = 96480 \text{ C mol}^{-1}$ bilinen sabitlerdir. $E_p/\log v$ ilişkisinden elde edilen bağıntıdan " $E_p (V) = 0.0595 \log v (\text{mVs}^{-1}) + 0.8851 (r = 0.9860)$ " eğim değeri 0.0595 bulunmuştur. " $\alpha.n$ " değeri denklemden 0.991 olarak hesaplanmıştır. Tersinmez elektrot olayında $\alpha = 0.5$ olarak kabul edilebileceğinden $n = 1.98 (\approx 2)$ değeri elde edildi. Bu değere göre, PG elektrot yüzeyinde tersinmez olarak yürüyen VNB bileşiğinin yükseltgenme işlemi sırasında mol başına 2 elektron aktarıldığını gösterir. Bulduğumuz bu sonucun Haque ve Saba'nın 2009 yılında yaptığı çalışmayla uyumlu olduğu görülmüştür. Elde edilen verilere dayanarak, VNB 'nin olası yükseltgenme mekanizması Şekil 4' te gösterilmiştir.



Şekil 4. Vinblastin için önerilen oksidasyon mekanizmasının şeması (Haque ve Saba 2009).

3.2 Teknik ve çalışma elektrodu seçimi

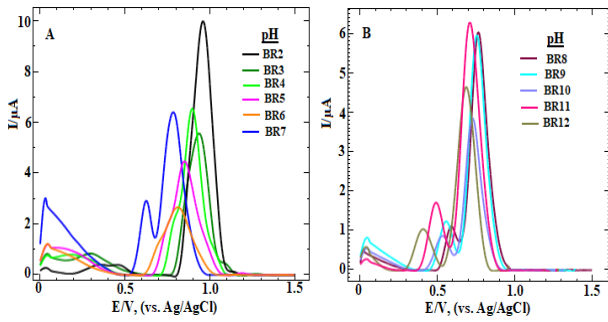
$1.1 \times 10^{-5} \text{ M}$ VNB 'nin PG ve GC elektrotlar üzerinde voltamogramları, SWV ve DPV teknikleri kullanılarak BR (pH 2.0) içinde kaydedilmiştir. Elde edilen voltamogramlar değerlendirildiğinde SWV tekniği ve PG elektrot ile elde edilen pikin VNB 'nin anodik yükseltgenmesinde daha duyarlı olduğu görülmüştür (Şekil 5).



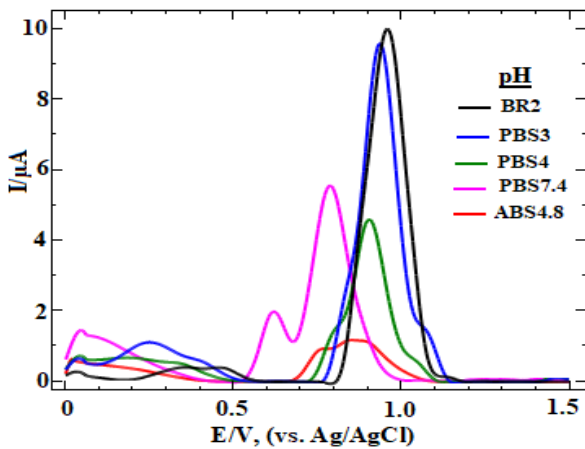
Şekil 5. $1.1 \times 10^{-5} \text{ M}$ Vinblastin 'in BR (pH 2.0) içinde PG ve GC elektrotları kullanılarak elde edilen SWV ve DPV eğrileri. Biriktirme süresi 60 s; biriktirme gerilimi, 0.0 V. SW değişkenleri: frekans, 50 Hz; adım gerilimi, 14 mV; amplitüd, 40 mV.

3.3 pH'nin Etkisi

VNB ($1.1 \times 10^{-5} \text{ M}$)'nin PG elektrot yüzeyindeki voltametrik davranışı farklı destek elektrolitlerinde ve farklı pH değerlerinde SW-AdSV tekniği kullanılarak incelenmiştir. ABS (pH 4.8), PBS (pH 3.0, 4.0, 7.4) ve BR (pH 2.0 - 12.0) destek elektrolitlerinde hazırlanan VNB 'nin (+0.0 V) - (+1.5 V) gerilim aralığında (açık devrede 60 s biriktirilmiş) elde edilen SW voltamogramlarına pH'nin etkisi Şekil 6 A-B ve Şekil 7'de gösterilmiştir. Şekil 6 A-B 'de görüldüğü gibi BR destek elektrolitlerinde pH değeri arttıkça VNB 'nin yükseltgenme pik noktaları daha negatif gerilim bölgesine doğru kaymıştır. Nötral ve bazik pH değerlerinde pik akım şiddeti azalmıştır. Ayrıca, nötral ve bazik pH 'larda BR (pH 7.0 - 12.0) ortamında VNB bileşiğinde iki yükseltgenme basamağı ve BR (pH 2.0 - 6.0) ortamında ise bir yükseltgenme basamağı gözlemlendi. Şekil 7 incelendiğinde, PBS ortamında asidik pH (3.0, 4.0) ve bazik pH (7.4) değerlerinde VNB 'nin yükseltgenme pikinin negatif gerilim bölgesine doğru kaydığı ve pik akım şiddetinin azaldığı gözlemlendi. Aynı zamanda VNB bazik pH (7.4) değerinde iki yükseltgenme basamağı vermiştir. ABS pH (4.8) ortamında ise diğer destek elektrolitlere göre daha düşük pik akım ve gerilim değerinde bir voltamogram elde edilmiştir. Şekil 6A-B ve şekil 7 'den elde edilen veriler değerlendirildiğinde; ortamda gözlenen yüksek pik ve bu pik akım nedeniyle çalışma ortamı olarak BR (pH 2.0) seçilmiştir.

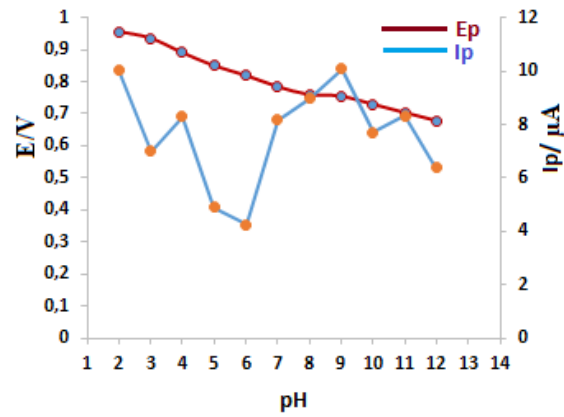


Şekil 6. 1.1×10^{-5} M Vinblastin 'in BR içindeki voltamogramları (A) pH 2.0 - 7.0. (B) pH 8.0 - 12.0. Yöntem, SW-AdSV; Elektrot, PG; Biriktirme süresi 60 s; biriktirme gerilimi, 0.0 V. SW değişkenleri: frekans, 50 Hz; adım gerilimi, 14 mV; amplitüd, 40 mV.



Şekil 7. 1.1×10^{-5} M Vinblastin 'in farklı tampon ortamlarındaki voltamogramları: BR (pH 2.0), PBS (pH 3.0, pH 4.0, pH 7.4) ve ABS (pH 4.8). Yöntem, SW-AdSV; Elektrot, PG; Biriktirme süresi 60 s; biriktirme gerilimi, 0.0 V. SW değişkenleri: frekans, 50 Hz; adım gerilimi, 14 mV; amplitüd, 40 mV.

SW-AdSV tekniği kullanılarak VNB (1.1×10^{-5} M) 'nin pik gerilimi (E_p) ve pik akımı (I_p) ile pH arasındaki ilişkisi incelenmiştir. BR (pH 2-12) ortamlarında pH- E_p ve pH- I_p grafikleri Şekil 8 'de gösterilmektedir. pH ve pik gerilimi arasındaki ilişki incelendiğinde; pik geriliminin pH arttıkça negatif değerlere kaydığı görülmektedir. Pik geriliminin negatife kayması, yükseltgenmenin kolaylaştırıldığını gösterir. pH ile pik akımı (I_p) arasındaki ilişki incelendiğinde maksimum pik akımı pH 2.0 'da elde edilmiştir.



Şekil 8. 1.1×10^{-5} M Vinblastin 'in BR içinde farklı pH değerlerinde (pH 2.0 - 12.0) pik gerilimi (E_p) ve pik akımı (I_p) üzerine pH etkisi. Yöntem, SW-AdSV; Elektrot, PG; Biriktirme süresi 60 s; biriktirme gerilimi, 0.0 V. SW değişkenleri: frekans, 50 Hz; adım gerilimi, 14 mV; amplitüd, 40 mV.

VNB 'nin pH- E_p ilişkisi incelendiğinde E_p (mV) = $-0.0277 \text{ pH} + 0.9998$, $r = 0.989$ denkleminde pH (2.0 – 12.0) aralığında tek eğimli bir bölge görülmektedir. Denklemden elde edilen -27.7 mV eğim değerinin yaklaşık olarak 59 mV Nerst denleminin değerinin yarısına eşit olması, elektrot mekanizmasındaki elektron sayısının proton sayısının iki katına eşit olduğunu gösterir. Şekil 4 'de görüldüğü gibi keskin pik ve yüksek pik akımı sonucu çalışma ortamı olarak BR pH 2.0 seçilmiştir.

3.4 Biriktirme koşullarının etkisi

BR (pH 2.0) destek elektrolitinde biriktirme süresi ve gerilim (t_{acc} ; E_{acc}) koşullarının, PG elektrot yüzeyinde VNB (5.5×10^{-6} M) 'nin adsorptif özellikleri üzerindeki etkileri araştırıldı (şekiller verilmedi). Analitik sinyal üzerinde t_{acc} etkisi, E_{acc} değeri 0.0 V 'da sabit tutularak 30 s -210 s aralığında incelenmiştir. VNB 'nin yükseltgenme pik sinyali 30 s ve 60 s 'de düzenli olarak artarken, 60 s 'den sonra 90 s ve 120 s 'de düzenli azalma gözlenirken 150 s 'de tekrar artıp 180 s ve 210 s 'de azalmıştır. Bu sonuç, elektrot yüzeyinin analite doymuş olduğunu gösterir. Optimum biriktirme süresi 60 s olarak belirlenmiştir. Analiz, (0.0 V) – (+0.8 V) aralığında ve 60 s biriktirme süresinde sıyırma pik akım / gerilim ilişkisi seçilerek gerçekleştirildi. 0.0 V - 0.7 V aralığında yükseltgenme pik sinyalinde düzenli bir azalma gözlemlendi. 0.8 V değerinde ise sapma şeklinde artış gözlemlendi. Biriktirme gerilimi 0.0 V olarak çalışma için belirlenmiştir. Pik geriliminin artmasıyla

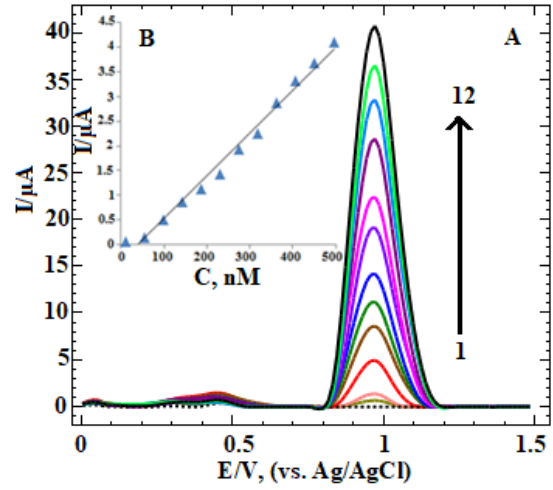
pik akımının azaldığı da gözlemlendi. Sonuç olarak, biriktirme süresi / biriktirme gerilimi (60 s / 0.0 V) seçilerek analitik çalışmalar yapılmıştır.

3.5 SWV Değişkenlerin Etkisi

VNB (5.5×10^{-6} M)'nin cihaz değişkenlerini belirlemek için BR (pH 2.0) destek elektrolitinde 0.0 V 'da 60 s süreyle biriktirme uygulandı ve SW değişkenlerinden sırasıyla gerilim adımı (1-24 mV), kare- dalga amplitüd ($\Delta E_s = \Delta E_{sw} = 10-70$ mV] ve kare-dalga frekansının ($f = 10-70$ Hz) sıyırma etkisi üzerindeki etkisi araştırıldı. SWV tekniğinin hızı; adım gerilimi, puls amplitüdü ve frekans değerleri ile ilişkilidir. İki değişken sabit tutularak diğer değişken değerlerinin voltamogramları elde edildi. (Şekiller verilmedi). Gerilim tarama hızındaki artışa bağlı olarak, $f = 50$ Hz ve $\Delta E_s = 14$ mV değerine kadar olan artış, pik akımı değerlerinde artışa neden olmuştur. Bu değerlerden sonra akım değerlerinin düşmesi ile $f = 60-70$ Hz ve $\Delta E_s = 18-24$ mV değerlerinde zemin çizgisi bozulması ve pik genişlemesi gözlenmiştir. Puls amplitüd değeri analitik sinyal ile ilişkili olduğundan, pik yükseklikleri $\Delta E_{sw} = 40$ mV 'a kadar artmış, 50-60 mV'da azalmış ve 70 mV değerinde azalma ile birlikte sapma gözlenmiştir. En iyi SWV değişkenleri olarak; $f = 50$ Hz, $\Delta E_s = 14$ mV ve $\Delta E_{sw} = 40$ mV elde edilmiştir. Çalışmanın bundan sonraki bölümünde bu değerler kullanılmıştır.

3.6 Analitik Uygulama

Optimum çalışma koşullarında VNB derişiminin pik akım üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla, VNB standart çözeltilerinin PG elektrot üzerinde BR (pH 2.0) ortamında 11 nM – 495 nM derişim aralığında voltamogramları ve bunların kalibrasyon eğri grafiği oluşturulmuştur (Şekil 9A-B).



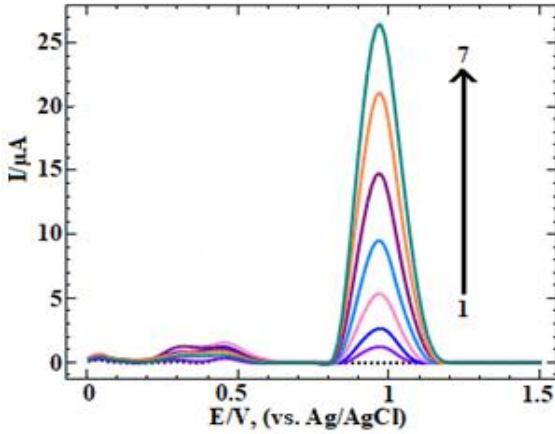
Şekil 9. (A) Vinblastin 'in (11 nM - 495 nM) BR (pH 2.0) içinde elde edilen voltamogramları (1) 11; (2) 55; (3) 99; (4) 143; (5) 187; (6) 231; (7) 275; (8) 319; (9) 363; (10) 407; (11) 451; (12) 495 nM. Kesikli çizgili, destek elektrolit ve **(B)** Pik akımı - derişim kalibrasyon eğrisi. Yöntem, SW-AdSV; gerilim tarama hızı, 100 mV s⁻¹; Elektrot, PG; Biriktirme süresi 60 s; biriktirme gerilimi, 0.0 V. SW değişkenleri: frekans, 50 Hz; adım gerilimi, 14 mV; amplitüd, 40 mV.

+0.97 V gerilimde VNB derişimi arttıkça (11 nM – 495 nM aralığında) pik akımlarının arttığı gözlemlendi. Pik akım kalibrasyon grafiğinden elde edilen denklemden " $I_p (\mu A) = 0.0087 C (nM) - 0.3448$, $r = 0.993$ ($n=12$)" kalibrasyon eğrisinin doğrusallık korelasyon katsayısı $r = 0.993$ olarak bulundu. Metodun analitik duyarlılığı, LOD = 3 s/m (gözlemlenebilirlik sınırı) ve LOQ = 10 s/m (tayin alt sınırı) denklemden hesaplandı. Denklemdaki "s", destek elektrolitinin zemin çizgisinde okunabilen en küçük yedi sinyal gürültüsünün standart sapmasıdır ve "m" kalibrasyon eğrisinin eğimidir. Hesaplamalar sonucunda LOD = 2.4 nM olarak bulundu. Geliştirilen yöntemin tekrarlanabilirlik düzeyini belirlemek için 200 nM derişiminde çözeltiler hazırlanmış ve günde 9 kez sıyırma voltamogramları alınmıştır. Bu voltamogramların yükseltgenme pik akım ve gerilim değerleri kaydedilmiş ve bulunan değerler gün içi kesinlik olarak değerlendirilmiştir. Bu verilere göre yükseltgenme pik akım ve gerilim % BSS değerleri sırasıyla % 1.25 ve % 0.45 olarak bulunmuştur.

3.7 Gerçek örnek analizi

3.7.1 Farmasötik çözeltiler

Ticari ilaç formuna uygulama sürecinde kullanılan VNB enjekte edilebilir solüsyon (VİNKO, 1 mg / 1 mL) eczaneden temin edildi. Hazırlanan flakon çözeltilerinin (Bölüm 2.4) voltamogramları, standart maddeler için hazırlanan koşullar altında alınmıştır (Şekil 10).



Şekil 10. VNB içeren VİNKO flakonun (0.5 nM - 495 nM) BR (pH 2.0) içinde elde edilen voltamogramları (1) 5; (2) 11; (3) 22; (4) 33; (5) 44; (6) 55; (7) 66 nM. Kesikli çizgili, destek elektrolit. Elektrot, PG; Biriktirme süresi 60 s; biriktirme gerilimi, 0.0 V. SW değişkenleri: frekans, 50 Hz; adım gerilimi, 14 mV; amplitüd, 40 mV.

Standart VNB 'nin voltamogramları (Şekil 9) flakon analizinin voltamogramları (Şekil 10) ile karşılaştırıldı, voltamogramların uyumlu olduğu görüldü. İlgili kalibrasyon denklemindeki yükseltgenme pik akım değerleri değiştirilerek flakonlardaki VNB miktarı hesaplandı ve elde edilen değer gerçek değerle karşılaştırıldı. Önerilen yöntemin kesinliğini ve doğruluğunu kontrol etmek için geri kazanım çalışmaları yapılmıştır. Aynı flakon çözeltisine standart VNB çözeltisi art arda eklenerek voltamogramlar tekrar alındı. Pik akımları hem orjinal flakon çözeltisinde hem de ardışık ilavelerden sonra ölçülmüştür. Flakon çözelti örneğine ilave edilen saf maddenin ne kadarının belirlenebileceği hesaplandı. Çizelge 2 'de voltametrik yöntemle yapılan analiz sonuçları değerlendirildiğinde; bağıl standart sapma (BSS) % 2.93 ve ortalama geri kazanım % 99.6 'dır.

Çizelge 2. Vinblastin içeren VİNKO flakonlarında elde edilen analiz verileri

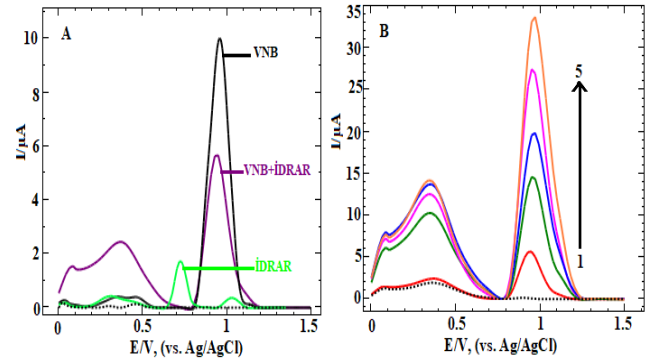
Numune	Eklenen* (nM)	Bulunan* (nM)	Geri Kazanım (%)**±% BSS
1	11	10.45	95 ±2.85
2	22	21.34	97 ±2.79
3	33	34.32	104±3.01
4	44	46.64	106±2.94
5	55	52.80	96±3.08

*1mg / 1ml flakon

**Sonuçlar 3 analizin ortalamasıdır.

3.7.2 İdrar örnekleri

VNB tayini için PG elektrodu kullanılarak geliştirilen voltametrik yöntem, idrar gibi karmaşık matris ortamlarında incelenmiştir. İdrar örneklerinde ürik asit voltamogramları 0.6 V - 1.0 V aralığında gözlemlendi. VNB BR (pH 2.0) ortamında 0.956 gerilim değerinde pik verdiği için PG elektrot ile geliştirilen SW-AdSV yönteminin idrar örneklerine uygulanacağı görülmüştür (Şekil 11A).



Şekil 11. (A) Vinblastin 'in (1.1×10^{-5} M) BR (pH 2.0) içinde idrar ortamında elde edilen voltamogramları. (B) Standart katma yöntemi ile elde edilen idrar örneğinin voltamogramları (1) 11; (2) 22; (3) 33; (4) 44; (5) 55 nM. Kesikli çizgili, destek elektrolit, Yöntem, SW-AdSV. Elektrot, PG; Biriktirme süresi 60 s; biriktirme gerilimi, 0.0 V. SW değişkenleri: frekans, 50 Hz; adım gerilimi, 14 mV; amplitüd, 40 mV.

Sağlıklı bir erkek gönüllüden idrar örnekleri alındı. İdrar örneğine $50 \mu\text{g mL}^{-1}$ nihai derişimi ile uygun miktarda stok VNB çözeltisi eklendi ve aynı idrar örneğiyle 10 mL 'ye tamamlanacak şekilde 4.95 mL asetonitril eklendi. Numune tüpleri 5000 devirde 10 dakika santrifüjlendi. Aynı prosedür, analit içermeyen idrar örneği (kör) ile tekrarlandı. 50 μL idrar örneği BR (pH 2.0) destek elektrolitine eklendikten sonra, VNB çözeltisinden: 11; 22; 33; 44;

55 nM eklemelerle standart ekleme yöntemi yapıldı (Şekil 11B). VNB 'nin standart ilavelerinden sonra pik akımındaki artış nedeniyle, yaklaşık +0.95 V 'da okunan yükseltgenme pik noktasının VNB yükseltgenmesinden kaynaklandığı sonucuna varılabilir. Şekil 11A 'da verilen grafikte yaklaşık +0.75 V 'ta görülen sinyalin idrar örneklerindeki ürik asitten yaklaşık +0.95 V 'ta görülen sinyalin ise VNB sinyali olduğu anlaşılmaktadır. Derişim - pik akım değerleri grafiğinden (şekil 11 B) elde edilen doğrusal ilişkiyi kullanarak [$I_p (\mu A) = 5.4658 C (\mu g mL^{-1}) + 2.1398 r = 0.8841$] % geri kazanım ve % BSS analiz verileri Çizelge 3 'de gösterilmektedir.

Çizelge 3. Vinblastin içeren idrar örneklerinde elde edilen analiz verileri

Numune	Eklenen* (nM)	Bulunan* (nM)	Geri Kazanım (%) \pm % BSS
1	11	11.86	107.84 \pm 3,85
2	22	22.93	104.26 \pm 2,42
3	33	33.61	101.85 \pm 1,85
4	44	43.40	98.65 \pm 1,26
5	55	55.91	101.66 \pm 1,57

*Sonuçlar 3 analizinin ortalamasıdır

3.8. Seçicilik çalışması

Geliştirilen voltametrik yöntemin seçicilik çalışması VNB (1.1×10^{-5} M) çözeltisinde girişim yapabilecek maddeler üzerinde analiz edilmiştir. Bu amaçla; adrenalin, noradrenalin, testesteron, progesteron, dopamin, askorbik asit, ürik asit gibi biyomoleküller ve Na^{+1} , Mg^{+2} , Ca^{+2} , Fe^{+2} , Ni^{+2} , Zn^{+2} , Se^{+2} , Pb^{+2} gibi bazı iyonlar optimum koşullarda VNB içeren çözeltiye 10 kat ilave edilerek incelenmiştir. Tolerans sınırı, girişim türlerinin maksimum konsantrasyonu olarak alındı ve \pm % 5 'lik bir % RSD ile değerlendirildi (çizelge 4). Yukarıda verilen biyomolekül ve iyonların ürik asit dışında diğerleriyle girişim yaptığı için bu koşullar altında aynı anda analiz edilemediği görülmüştür.

Çizelge 4. VNB (1.1×10^{-5} M) 'nin PG elektrot ile elde edilen girişim verileri

Madde	Tolerans seviyesi oranı (yabancı madde, VNB)	\pm % hata
Na^{+}	10:1	6.19
Mg^{2+}	10:1	5.06
Ca^{2+}	10:1	16.01
Fe^{2+}	10:1	9.29
Se^{4+}	10:1	4.53
Ni^{2+}	10:1	15.29
Zn^{2+}	10:1	10.54
Pb^{2+}	10:1	2.84
Adrenalin	10:1	7.98
Noradrenalin	10:1	4.35
Testesteron	10:1	7.35
Progesteron	10:1	5.08
Dopamin	10:1	5.04
Askorbik asit	10:1	9.52
Ürik asit	10:1	14.9

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, VNB 'nin elektrokimyasal özellikleri ilk kez PG elektrot ile incelendi ve miktar tayini için SW-AdSV yöntemi geliştirildi. Geliştirilen teknikte; uygulanabilirlik, duyarlılık, doğruluk, seçicilik ve tekrarlanabilirlik bulgularla gösterildi. VNB tayinine yönelik kaynakçada yer alan diğer elektrokimyasal yöntemlerle karşılaştırıldığında (Çizelge 1) PG çalışma elektrotunun daha duyarlı olduğu görüldü (LOD = 2.4 nM). Sadece modifiye elektrot ($AuNPs/GCE$) kullanılarak yapılan çalışmanın (Haghshenas *et al.* 2017) LOD değeri (Çizelge 1) daha düşük olmasına rağmen, ilgili çalışmada çalışma elektrotuna modifikasyon işlemi uygulanmıştır. Geliştirilen bu voltametrik teknikte kullanılan PG elektrotun düşük maliyetli ve modifikasyon işlemi yapılmamış olması ayrıca toksik olmaması çalışmanın özgünlüğünü ortaya koymaktadır. Geliştirilmiş elektroanalitik teknik; herhangi bir önderiştirme işlemi gerektirmeden hızlı olması, duyarlılık açısından yüksek güvenilirlik, az miktarda numune ile çalışabilmesi ve zaman alıcı ayırma işlemlerine ihtiyaç duymadan analiz yapılabilmesinin yanı sıra literatürdeki diğer kromatografik ve spektroskopik yöntemlere alternatif olabilir.

5. Kaynaklar

- Achanta, S, Ngo, M, Veitenheimer, A, Maxwell, LK, Wagner, JR, 2013. Simultaneous quantification of vinblastine and desacetylvinblastine concentrations in canine plasma and urine samples using LC–APCI–MS/MS. *Journal of Chromatography B*, **913**, 147-154.
- Altunkaynak, Y., Yavuz, Ö., Levent, A, 2020. New voltammetric strategy for determination and electrochemical behaviors of metformin by pencil graphite electrode in the NaOH. *journal indian chemical society*, **97**, 1-13.
- Altunkaynak, Y, Yavuz, Ö, Levent, A, 2021. Firstly electrochemical examination of vildagliptin at disposable graphite sensor: Sensitive determination in drugs and human urine by square-wave voltammetry. *Microchemical Journal*, **170**, 106653.
- Arvas, M.B, Gürsu, H, Gençten, M, Sahin, Y, 2018. Electrochemical formation of molybdenum phosphate on a pencil graphite electrode and its potential application for the detection of phosphate ions. *Analytical Methods*, **10**, 4282-4291.
- Bond, A.M, Mahon, P.J, Schiewe, J, Vicente-Beckett, V, 1997. An inexpensive and renewable pencil electrode for use in field-based stripping voltammetry. *Analytica Chimica Acta*, **345**, 67-74.
- Brainina, K.Z, 2001. Electroanalysis: From laboratory to field versions. *Journal of Analytical Chemistry*, **56**, 303-312.
- Brett, A.M.O, Grazina, M.M.M, Macedo, T.R.A, Raimundo, D, 1994. Anodic behavior of some vinca alkaloids with cytostatic activity: effect of pH. *Electroanalysis*, **6**, 57-61.
- Chen, Q, Li, N, Zhang, W, Chen, J, Chen Z, 2011. Simultaneous determination of vinblastine and its monomeric precursors vindoline and catharanthine in *Catharanthus roseus* by capillary electrophoresis–mass spectrometry. *Journal of Separation Science*, **34**, 2885–92
- Farghaly, O.A, Abdel Hameed, R.S, Abu-Nawwas, A.H, 2014. Analytical Application Using Modern Electrochemical Techniques, *Internal Journal of Electrochemical Science*, **9**, 3287-3318
- Favretto, D, Piovan, A, Filippini, R, Caniato, R, 2001. Monitoring the production yields of vincristine and vinblastine in *Catharanthus roseus* from somatic embryogenesis. Semiquantitative determination by flow-injection electrospray ionization mass spectrometry. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, **15**, 364–369
- Gan, P.P, Kavallaris, M, 2008. Tubulin-targeted drug action: Functional significance of class II and class IV β tubulin in Vinca alkaloid sensitivity. *Cancer Research*, **68**, 9817–9824
- Gao, S, Zhou, J, Zhang, F, Miao, H, Yun, Y, Feng, J, Tao, X, Chen, W, 2014. Rapid and sensitive liquid chromatography coupled with electrospray ionization tandem mass spectrometry method for the analysis of paclitaxel, docetaxel, vinblastine, and vinorelbine in human plasma. *Therapeutic drug monitoring*, **36**, 394–400.
- Haghshenas, E, Madrakian, T, Afkhami, A, Nabiabad, H.S, 2017. A label-free electrochemical biosensor based on tubulin immobilized on gold nanoparticle/glassy carbon electrode for the determination of vinblastine. *Analytical bioanalytical chemistry*, **409**, 5269–5278.
- Haque, IU, Saba, H, 2009. Voltammetry of an Anti-Cancer Drug. *Electrochemical Society Transactions*, **16**, 3-23.
- Kavallaris, M, Annereau, JP, Barret, JM, 2008. Potential mechanisms of resistance to microtubule inhibitors. *Seminars in Oncology*, **35**, 22-27.
- Kosjek, T, Dolinšek, T, Gramec, D, Heath, E, Strojjan, P, Serša, G, Čemažar, M, 2013. Determination of vinblastine in tumour tissue with liquid chromatography–high resolution mass spectrometry. *Talanta*, **116**, 887-893.
- Laviron, E, 1979. The use of linear potential sweep voltammetry and of ac voltammetry for the study of the surface electrochemical reaction of strongly adsorbed systems and of redox modified electrodes. *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*, **100**, 263-270.
- Levent, A, Yardim, Y, Senturk, Z, 2009. Voltammetric behavior of nicotine at pencil graphite electrode and its enhancement determination in the presence of anionic surfactant. *Electrochimica Acta*, **55**, 190-195.

-
- Levent, A, Onal, G, 2018. Application of a pencil graphite electrode for voltammetric simultaneous determination of ascorbic acid, norepinephrine, and uric acid in real samples. *Turkish Journal of Chemistry*, **42**, 460 – 471.
- Lin, Z, Qing-Hui, G.A.I, Yuan-Gang, Z.U, Lei, Y.A.N.G, Yu-Liang, M.A, Yang, L.I.U, 2014. Simultaneous quantitative determination of five alkaloids in *Catharanthus roseus* by HPLC-ESI-MS/MS. *Chinese journal of natural medicines*, **12**, 786–793.
- Ly, SY, Jung, YS, Kim, M.H, Han, I.K, Jung, W.W, Kim, H.S, 2004. Determination of caffeine using a simple graphite pencil electrode with square-wave anodic stripping voltammetry. *Microchimica Acta*, **146**, 207-213
- Özcan, A, Gürbüz, M, Özcan, A.A, 2018. Preparation of a disposable and low-cost electrochemical sensor for prothiam detection based on over-oxidized poly(thiophene) modified pencil graphite electrode. *Talanta*, **187**, 125-132.
- Özkan, SA, Kauffmann, JM, Zuman, P, 2015. *Electroanalysis in biomedical and pharmaceutical Sciences: voltammetry, amperometry, biosensors, Applications*. Springer.
- Owells, R.J, Donigian, D.W, Hartke, C.A, Hains, F.O, 1977. Correlation of biologic data with physico-chemical properties among the Vinca alkaloids and their congeners. *Biochemical pharmacology*, **26**, 1213-1219.
- Pasquier, E, Kavallaris, M, 2008. Microtubules: a dynamic target in cancer therapy. *International Union of Biochemistry and Molecular Biology Life*, **60**, 165–170
- Rusling, JF, Scheer, BJ, Haque, IU, 1984. Voltammetric oxidation of vinblastine and related compounds. *Analytica Chimica Acta*, **158**, 23-32.
- Stokvis, E, Rosing, H, Beijnen, J.H. 2005. Liquid chromatography-mass spectrometry for the quantitative bioanalysis of anticancer drugs. *Mass spectrometry reviews*, **24**, 887–917.
- Temizer, A, 1986. Electroanalytical determination of vinca alkaloids used in cancer chemotherapy. *Talanta*, **33**, 791-794.
- Wang, J, Kawde, A.N, Sahlin, E, 2000. Renewable pencil electrodes for highly sensitive stripping potentiometric measurements of DNA and RNA. *Analyst*, **125**, 5-7.
- Wang, J, Kawde, A.N, 2001. Pencil-based renewable biosensor for label-free electrochemical detection of DNA hybridization. *Analytica Chimica Acta*, **431**, 219-224.

Exact Solutions of the Oskolkov Equation in Fluid Dynamics

Hülya DURUR¹

¹Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Ardahan University, Ardahan, 75000, Turkey.

Corresponding Author e-posta: hulyadurur@ardahan.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9297-6873>

Geliş Tarihi: 20.05.2022

Kabul Tarihi: 02.03.2023

Abstract

Keywords

Sub equation method;
Oskolkov equation;
Nonlinear partial
differential equation;
Exact solution

Traveling wave solutions of the Oskolkov equation, which is a model describing the dynamics of an incompressible visco-elastic Kelvin-Voigt fluid, are investigated in this study. Complex trigonometric and complex hyperbolic solutions of Oskolkov equation are obtained using the sub equation method. In these obtained solutions, graphs are presented by assigning special values to the parameters. The presented graphics are drawn with a computer package program. Implemented method is powerful and an effective method to achieve the exact solutions of nonlinear partial differential equations (NPDEs).

Akışkanlar Dinamiğinde Oskolkov Denklemine Tam Çözümleri

Öz

Anahtar Kelimeler
Alt denklem metodu;
Oskolkov denklemi;
Lineer olmayan kısmi
diferansiyel denklem;
Tam çözüm

Bu çalışmada, sıkıştırılmaz bir visko-elastik Kelvin-Voigt akışkanının dinamiklerini tanımlayan bir model olan Oskolkov denkleminin gezici dalga çözümleri araştırıldı. Alt denklem yöntemini kullanarak Oskolkov denkleminin karmaşık trigonometrik ve karmaşık hiperbolik çözümleri elde edildi. Bu elde edilen çözümlerde parametrelere özel değerler atanarak grafikler sunuldu. Sunulan grafikler bir bilgisayar paket programı ile çizildi. Uygulanan yöntem, lineer olmayan kısmi diferansiyel denklemlerin tam çözümlerini üretmek için güçlü ve etkili bir yöntemdir.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Introduction

Mathematical models, called NPDEs include plasma physics, chemistry, quantum mechanics, hydrodynamic molecular biology, nonlinear optics, sheet water wave, biological science, optical fibers, etc. as seen in various fields of nonlinear science. Investigating NPDEs provides a clearer understanding of complex events. Recently, today by experts from around the world drew attention to several new mathematical models used to describe real-world problems.

In that sense, some methods are new direct algebraic method Kurt *et al.* (2020), Extended trial equation method Gurefe *et al.* (2013), simplest equation method Chen and Jiang (2018), modified Kudryashov method Yokus *et al.* (2021), functional

variable method Liu and Chen (2013), Hirota bilinear method Zhang *et al.* (2021), modified $(1/G')$ -expansion method (Yokus *et al.* 2022, Duran *et al.* 2021), first integral method Raslan (2008), modified expansion method Duran and Kaya (2021), the Laplace method Akgül and Modanlı (2022), (G'/G) -expansion method (Zayed and Gepreel 2009).

The Oskolkov equation appears in various study, such as exact solutions of the Oskolkov equation have been presented by using the modified (G'/G) -method Alam *et al.* (2022), Ghanbari has been obtained exact solutions for two Oskolkov-type equations Ghanbari (2021), analytical solutions have been obtained by aid of the modified simple equation method for Oskolkov equation Roshid and Roshid (2018), Thabet *et al.* have been presented

exact solutions for Oskolkov equations with exponential rational function method Thabet *et al.* (2022), a set of shock wave solutions for generalised Oskolkov equation is obtained using the unified method Ak *et al.* (2018), Gözükızıl and Akçağıl have been attained the analytical solutions for the Oskolkov equation via tanh-coth method (Gözükızıl and Akçağıl 2013).

The goal of this study is to use the sub equation method to determine the traveling wave solution of the (1+1)-D Oskolkov equation. The Oskolkov equation can be shown in the form of

$$u_t - \beta u_{xxt} - \alpha u_{xx} + uu_x = 0. \tag{1}$$

Here α, β are constants and u is a function of x and t . The solution of the Oskolkov equation with the sub equation method is not available in the literature. In this study, different solutions of the Oskolkov equation from the literature are presented using the sub equation method.

The outline of this article is as follows: in Section 2 introduces the sub-equation method for differential equations. In Section 3, traveling wave solutions of (1+1) dimensional Oskolkov equation are generated using the sub-equation method. Some of the important results of the article are presented in Section 4.

2. Sub Equation Method

Consider the following general form of a NPDE with u as the dependent variable and x, t as the independent variables Duran *et al.* (2021),

$$P\left(u, \frac{\partial u}{\partial t}, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \dots\right) = 0. \tag{2}$$

By applying the traditional wave conversion

$$u = u(x, t) = u(\xi), \quad \xi = x - ct, c \neq 0, \tag{3}$$

c is the velocity of the wave and a constant.

Equation (2) converts into ODE

$$T(u, u', u'', \dots) = 0. \tag{4}$$

It is assumed that the solution of equation (4) has the form

$$u(\xi) = \sum_{i=0}^n a_i G^i(\xi), \quad a_n \neq 0, \tag{5}$$

here $a_i, (i = (0, 1, \dots, n))$ are constants to be determined. n denotes a constant to be found by using the balancing process Equation (4) and

$G = G(\xi)$ gratifies the ODE below

$$G'(\xi) = \mu + (G(\xi))^2 = 0, \quad \mu \in R. \tag{6}$$

Some specific solutions for equation (6) are presented in the formulas below,

$$G(\xi) = \begin{cases} -\sqrt{-\mu} \tanh(\sqrt{-\mu}\xi), & \mu < 0, \\ -\sqrt{-\mu} \coth(\sqrt{-\mu}\xi), & \mu < 0, \\ \sqrt{\mu} \tan(\sqrt{\mu}\xi), & \mu > 0, \\ -\sqrt{\mu} \cot(\sqrt{\mu}\xi), & \mu > 0, \\ \frac{-1}{\xi+r}, & r \text{ is constant, } \mu = 0. \end{cases} \tag{7}$$

Equations (5) and (6) are substituted into equation (4) and the $G^i(\xi)$ coefficients are equal to zero. A nonlinear algebraic system is produced by this procedure $a_i, i = (0, 1, \dots, n)$. Finally, constants are determined by solving nonlinear algebraic equations. Replacing attained constants from nonlinear algebraic system equation (6) into equation (5) via a solution of equation (7). This provides the exact solutions for equation (2).

One of the significant advantages of the method is that it produces three different types of traveling wave solutions: trigonometric, hyperbolic and rational forms. These solutions are in Eq. (7) formats. At the same time, classical wave solution is applied in this method and the balancing term is used. Also, its difference from other methods: in the sub-equation method, base equation is an ordinary differential equation, and since the base equations in the expansion methods are different, they have different properties from the solutions produced by other methods.

3. The solutions of Oskolkov Equation

Considering Oskolkov equation (1) and using transformation $u = u(x, t) = u(\xi)$, $\xi = x - ct$, $c \neq 0$, we obtain

$$-cu' + \beta cu''' - \alpha u'' + uu' = 0. \tag{8}$$

Considering the Eq. (8), we get the balancing term $n = 2$ and taking into account the series given in equation (5),

$$u(\xi) = a_0 + a_1(G(\xi)) + a_2(G(\xi))^2. \tag{9}$$

Here $a_1 \neq 0$ or $a_2 \neq 0$. If we substitute the equation (9) in the equation (8) and necessary adjustments are made. Thus, we may write equation system as:

$$\begin{aligned} G(\xi)^0: & -c\mu a_1 + 2c\beta\mu^2 a_1 = 0, \\ G(\xi)^1: & -2\alpha\mu a_1 + \mu a_1^2 - 2c\mu a_2 + 16c\beta\mu^2 a_2 + 2\mu a_0 a_2 = 0, \\ G(\xi)^2: & -ca_1 + 8c\beta\mu a_1 + a_0 a_1 - 8\alpha\mu a_2 + 3\mu a_1 a_2 = 0, \\ G(\xi)^3: & -2\alpha a_1 + a_1^2 - 2ca_2 + 40c\beta\mu a_2 + 2a_0 a_2 + 2\mu a_2^2 = 0, \\ G(\xi)^4: & 6c\beta a_1 - 6\alpha a_2 + 3a_1 a_2 = 0, \\ G(\xi)^5: & 24c\beta a_2 + 2a_2^2 = 0. \end{aligned} \tag{10}$$

α, β, μ, c and a_0, a_1, a_2 constants are attained from equation (10) the system via a package program.

Case 1. If $\mu < 0$,

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{5a_2}{12a_0}, \quad a_1 = 2i\sqrt{\frac{6}{5}}\sqrt{a_0}\sqrt{a_2}, \quad \mu = \frac{6a_0}{5a_2}, \\ c &= -\frac{a_0}{5}, \quad \alpha = i\sqrt{\frac{5}{6}}\sqrt{a_0}\sqrt{a_2}, \end{aligned} \tag{11}$$

replacing values equation (11) into equation (9) and we get complex hyperbolic solution for equation (1):

$$u_1(x, t) = a_0 - \frac{12}{5}i\sqrt{a_0}\sqrt{-\frac{a_0}{a_2}}\sqrt{a_2}\tanh\left[\sqrt{\frac{6}{5}}\left(x + \frac{ta_0}{5}\right)\sqrt{-\frac{a_0}{a_2}}\right] - \frac{6}{5}a_0\tanh\left[\sqrt{\frac{6}{5}}\left(x + \frac{ta_0}{5}\right)\sqrt{-\frac{a_0}{a_2}}\right]^2. \tag{12}$$

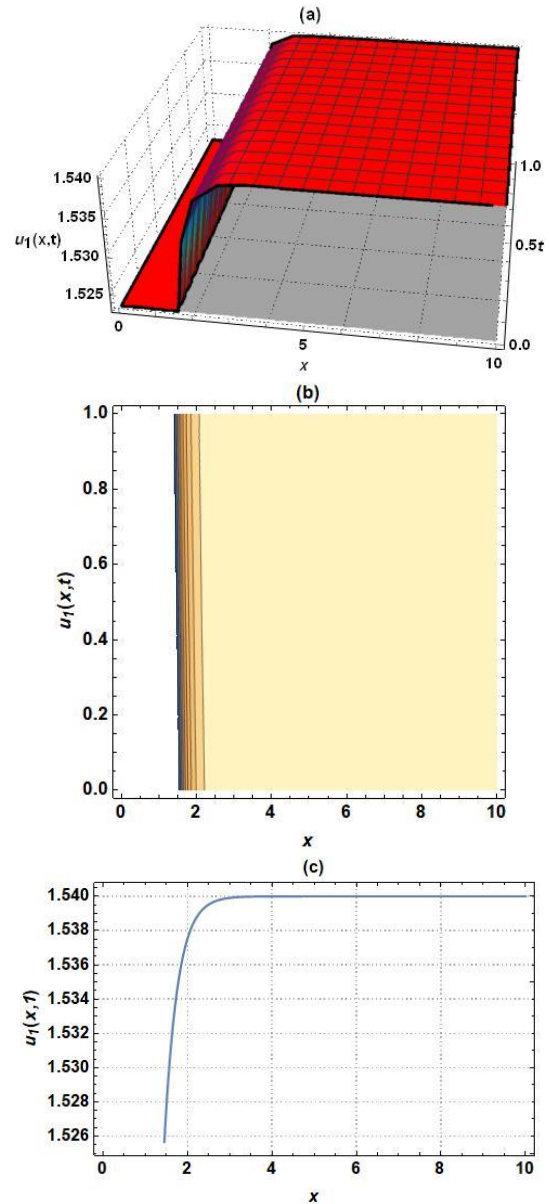


Figure 1. 3D, contour, and 2D graphs of in the $u_1(x, t)$ obtained of the equation (1) for $\mu = -0.7, a_2 = -1.2, a_0 = 0.7$.

If $a_2 < 0$ and $\frac{a_0}{a_2} < 0$ are selected, our complex-valued traveling wave solution turns into a real-valued form. Similar situations can be encountered in other cases.

Case 2. If $\mu < 0$,

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{5a_2}{12a_0}, \quad a_1 = 2i\sqrt{\frac{6}{5}}\sqrt{a_0}\sqrt{a_2}, \quad \mu = \frac{6a_0}{5a_2}, \\ c &= -\frac{a_0}{5}, \quad \alpha = i\sqrt{\frac{5}{6}}\sqrt{a_0}\sqrt{a_2}, \end{aligned} \tag{13}$$

replacing values equation (13) into equation (9), we attain complex hyperbolic solution for equation (1):

$$u_2(x, t) = a_0 - \frac{6}{5} \coth\left[\sqrt{\frac{6}{5}}\left(x + \frac{ta_0}{5}\right)\sqrt{-\frac{a_0}{a_2}}\right] a_0 - \frac{12}{5} i \coth\left[\sqrt{\frac{6}{5}}\left(x + \frac{ta_0}{5}\right)\sqrt{-\frac{a_0}{a_2}}\right] \sqrt{a_0} \sqrt{-\frac{a_0}{a_2}} \sqrt{a_2}. \quad (14)$$

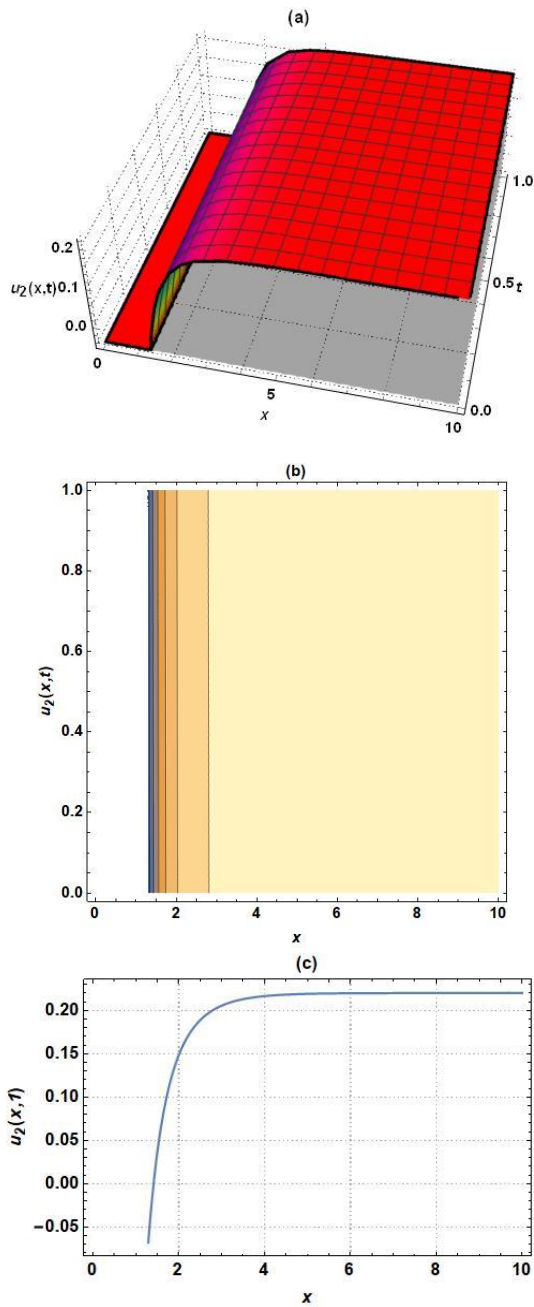


Figure 2. 3D, contour, and 2D graphs of the $u_2(x, t)$ obtained of the equation (1) for $\mu = -0.1, a_2 = -1.2, a_0 = 0.1$.

Case 3. If $\mu > 0$,

$$\beta = \frac{5a_2}{12a_0}, \quad a_1 = 2i\sqrt{\frac{6}{5}}\sqrt{a_0}\sqrt{a_2}, \quad \mu = \frac{6a_0}{5a_2},$$

$$c = -\frac{a_0}{5}, \quad \alpha = i\sqrt{\frac{5}{6}}\sqrt{a_0}\sqrt{a_2}, \quad (15)$$

replacing values equation (15) into equation (9), we get complex trigonometric solutions for equation (1):

$$u_3(x, t) = a_0 + \frac{12}{5} i \sqrt{a_0} \sqrt{\frac{a_0}{a_2}} \sqrt{a_2} \tan\left[\sqrt{\frac{6}{5}}\left(x + \frac{ta_0}{5}\right)\sqrt{\frac{a_0}{a_2}}\right] + \frac{6}{5} a_0 \tan\left[\sqrt{\frac{6}{5}}\left(x + \frac{ta_0}{5}\right)\sqrt{\frac{a_0}{a_2}}\right]^2. \quad (16)$$

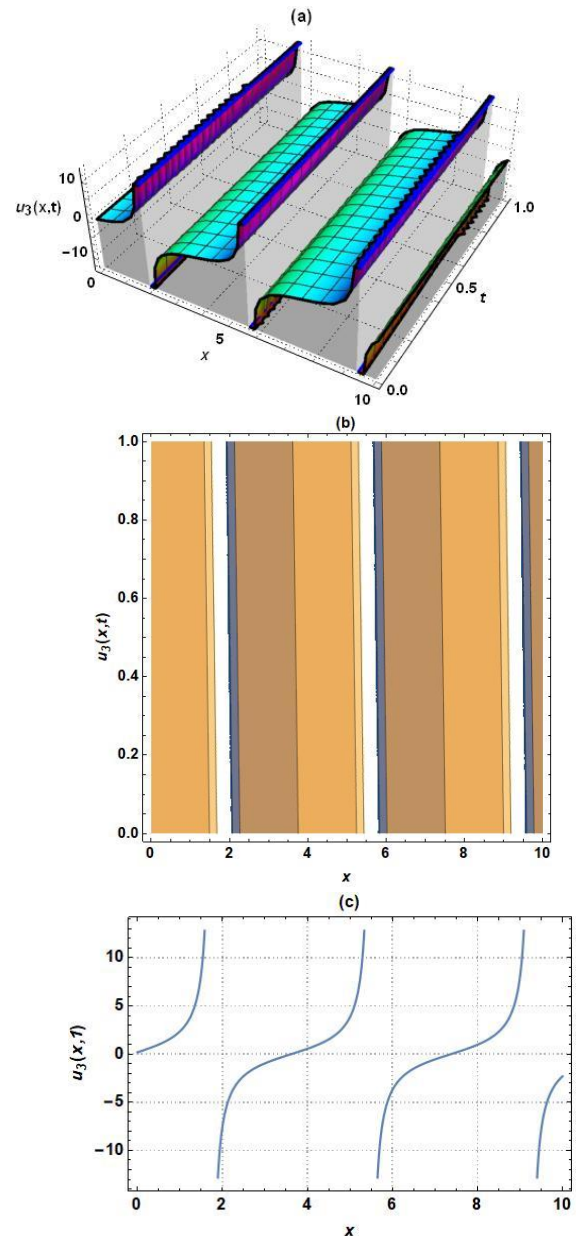


Figure 3. 3D, contour, and 2D graphs of the $u_3(x, t)$ obtained of the equation (1) for $\mu = 0.7, a_2 = 1.2, a_0 = 0.7$.

Case 4. If $\mu > 0$,

$$\beta = \frac{5a_2}{12a_0}, \quad a_1 = 2i\sqrt{\frac{6}{5}}\sqrt{a_0}\sqrt{a_2}, \quad \mu = \frac{6a_0}{5a_2},$$

$$c = -\frac{a_0}{5}, \quad \alpha = i\sqrt{\frac{5}{6}}\sqrt{a_0}\sqrt{a_2}, \quad (17)$$

replacing values equation (17) into equation (9), we get complex trigonometric solutions for equation (1):

$$u_4(x, t) = a_0 + \frac{6}{5} \cot\left[\sqrt{\frac{6}{5}}\left(x + \frac{ta_0}{5}\right)\sqrt{\frac{a_0}{a_2}}\right]^2 a_0 - \frac{12}{5} i \cot\left[\sqrt{\frac{6}{5}}\left(x + \frac{ta_0}{5}\right)\sqrt{\frac{a_0}{a_2}}\right] \sqrt{a_0} \sqrt{\frac{a_0}{a_2}}$$

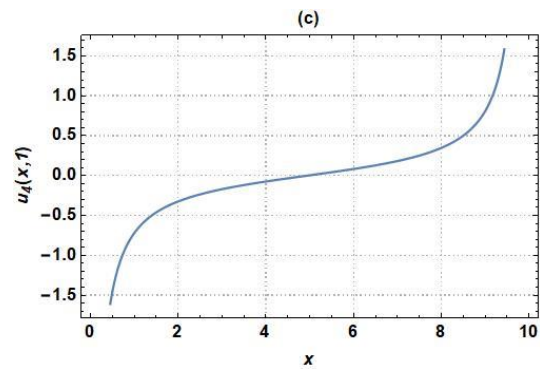
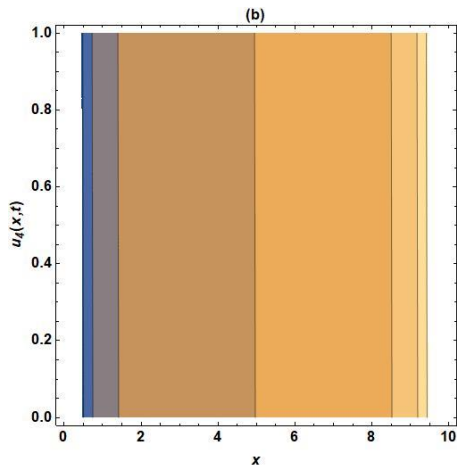
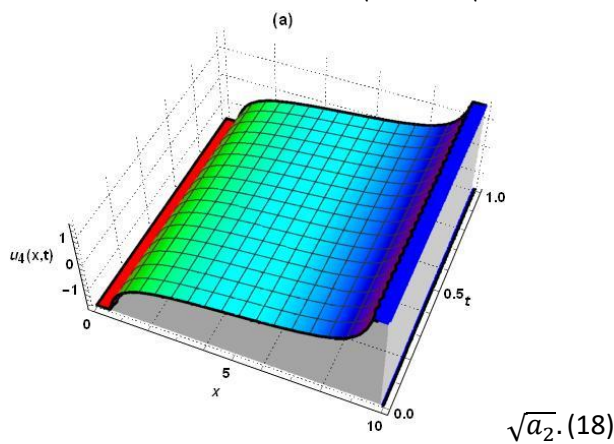


Figure 4. 3D, contour, and 2D graphs of the $u_4(x, t)$ obtained of the equation (1) for $\mu = 0.1, a_2 = 1.2, a_0 = 0.1$.

Case 5. If $\mu = 0$,

$$\beta = \frac{5a_2}{12a_0}, \quad a_1 = 2i\sqrt{\frac{6}{5}}\sqrt{a_0}\sqrt{a_2}, \quad \mu = \frac{6a_0}{5a_2},$$

$$c = -\frac{a_0}{5}, \quad \alpha = i\sqrt{\frac{5}{6}}\sqrt{a_0}\sqrt{a_2}, \quad (19)$$

For an algebraic solution to exist, $\mu = 0$ had to be. μ is not zero so algebraic solution cannot be written.

4. Conclusion

In the literature, different types of solutions of the Oskolkov equation have been presented with the help of different methods. For example; Ghanbari has been presented the exponential and hyperbolic type solutions of the Oskolkov equation (Ghanbari 2021). Alam *et al.* have been presented kinkwave, periodic respiratory waves, cuspwave and periodic wave solutions in their studies (Alam *et al.* 2022). Roshid and Bashar have been presented on kinky periodic wave and breather wave (Roshid and Bashar 2019).

In this study, solutions of Oskolkov equation in complex hyperbolic and complex trigonometric form are produced. In the solutions obtained, the 3D, contour and 2D graphs are presented by giving special values to the parameters. The results attained here show that sub equation method is reliable, powerful and can be used to process other NPDEs. In addition, in this study, a computer

package program was used for graphs and calculations.

5. References

- Akgül, A., and Modanli, M., 2022. On Solutions of Fractional Telegraph Model With Mittag–Leffler Kernel. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, **17**(2).
- Ak, T., Aydemir, T., Saha, A., and Kara, A. H., 2018. Propagation of nonlinear shock waves for the generalised Oskolkov equation and its dynamic motions in the presence of an external periodic perturbation. *Pramana*, **90**(6), 1-16.
- Alam, M. N., Islam, S., İlhan, O. A., and Bulut, H., 2022. Some new results of nonlinear model arising in incompressible visco-elastic Kelvin–Voigt fluid. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 1–16.
- Chen, C., and Jiang, Y. L., 2018. Simplest equation method for some time-fractional partial differential equations with conformable derivative. *Computers & Mathematics with Applications*, **75**(8), 2978-2988.
- Duran, S., and Kaya, D., 2021. Breaking analysis of solitary waves for the shallow water wave system in fluid dynamics. *The European Physical Journal Plus*, **136**(9), 1-12.
- Duran, S., Yokuş, A., Durur, H., and Kaya, D., 2021. Refraction simulation of internal solitary waves for the fractional Benjamin–Ono equation in fluid dynamics. *Modern Physics Letters B*, **35**(26), 2150363.
- Duran, S., Yokuş, A., and Durur, H., 2021. Surface wave behavior and refraction simulation on the ocean for the fractional Ostrovsky–Benjamin–Bona–Mahony equation. *Modern Physics Letters B*, **35**(31), 2150477.
- Ghanbari, B., 2021. New analytical solutions for the oskolkov-type equations in fluid dynamics via a modified methodology. *Results in Physics*, **28**, 104610.
- Gözükızıl, Ö. F., & Akçağıl, Ş. (2013). The tanh-coth method for some nonlinear pseudoparabolic equations with exact solutions. *Advances in Difference Equations*, **2013**(1), 1-18.
- Gurefe, Y., Misirli, E., Sonmezoglu, A., and Ekici, M., 2013. Extended trial equation method to generalized nonlinear partial differential equations. *Applied Mathematics and Computation*, **219**(10), 5253-5260.
- Kurt, A., Tozar, A., and Tasbozan, O., 2020. Applying the new extended direct algebraic method to solve the equation of obliquely interacting waves in shallow waters. *Journal of Ocean University of China*, **19**(4), 772-780.
- Liu, W., and Chen, K., 2013. The functional variable method for finding exact solutions of some nonlinear time-fractional differential equations. *Pramana*, **81**(3), 377-384.
- Roshid, M., & Bashar, H. (2019). Breather wave and kinky periodic wave solutions of one-dimensional Oskolkov equation. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, **6**(3), 460-466.
- Raslan, K. R., 2008. The first integral method for solving some important nonlinear partial differential equations. *Nonlinear Dynamics*, **53**(4), 281-286.
- Roshid, M. M., and Roshid, H. O., 2018. Exact and explicit traveling wave solutions to two nonlinear evolution equations which describe incompressible viscoelastic Kelvin-Voigt fluid. *Heliyon*, **4**(8), e00756.
- Thabet, H., Kendre, S., & Peters, J. (2022). Advances in solving conformable nonlinear partial differential equations and new exact wave solutions for Oskolkov-type equations. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, **45**(5), 2658-2673.
- Yokuş, A., Durur, H., Duran, S., and Islam, M., 2022. Ample felicitous wave structures for fractional foam drainage equation modeling for fluid-flow mechanism. *Computational and Applied Mathematics*, **41**(4), 1-13.
- Yokuş, A., Durur, H., and Duran, S., 2021. Simulation and refraction event of complex hyperbolic type solitary wave in plasma and optical fiber for the perturbed Chen-Lee-Liu equation. *Optical and Quantum Electronics*, **53**(7), 1-17.
- Zayed, E. M. E., and Gepreel, K. A., 2009. The (G'/G)-expansion method for finding traveling wave solutions of nonlinear partial differential equations in

mathematical physics. *Journal of Mathematical Physics*, **50(1)**, 013502.

Zhang, Z., Li, B., Chen, J., and Guo, Q., 2021. Construction of higher-order smooth positons and breather positons via Hirota's bilinear method. *Nonlinear Dynamics*, **105(3)**, 2611-2618.

Kalp Yetmezliği Hastalarının Sağ Kalım Tahmini: Sınıflandırmaya Dayalı Makine Öğrenmesi Algoritmalarının Bir Uygulaması

Sinem BOZKURT KESER¹, Kemal KESKİN²

¹ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 26040, Eskişehir, Türkiye

² Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü, 26040, Eskişehir, Türkiye

e-posta: sbozkurt@ogu.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8013-6922>

Sorumlu yazar e-posta: kkeskin@ogu.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3969-2396>

Geliş Tarihi: 06.12.2021

Kabul Tarihi: 30.03.2023

Öz

Anahtar kelimeler

Kalp yetmezliği;
Makine öğrenmesi;
Rastgele Orman;
Aşırı Gradyan
Arttırma; Yapay Sinir
Ağları

Kardiyo-vasküler hastalıklar dünya genelinde en çok ölüme sebep olan hastalıklar arasında yer almaktadır. Bir kardiyo-vasküler hastalık olan kalp yetmezliği, kalbin vücudun ihtiyaç duyduğu kanı pompalayamaması durumudur. Ülkemizde sıklıkla görülen bu hastalığın sonucu olarak ölümler yaşanmaktadır. Bu çalışmada kalp yetmezliğe sahip hastaların sağ kalım veya ölüm durumlarının tahmin edilmesi için makine öğrenmesi tabanlı bir yaklaşım önerilmektedir. Üç farklı sınıflandırma algoritması kullanılarak önerilen yöntemin etkinliği değerlendirilmektedir. Gerçekleştirilen deneylerde, Yapay Sinir Ağı algoritması ile en yüksek doğruluk değerine (86.67%) ulaşılmıştır. Önerilen yöntem, ölüm riskinin yüksek olduğu kalp yetmezliği hastalarına daha etkin ve uygun tedavi planlarının hazırlanması açısından yol gösterici olacaktır.

Prediction of Survival of Heart Failure Patients: An Application of Classification-Based Machine Learning Algorithms

Abstract

Keywords

Heart failure;
Machine learning;
Random Forest;
Extreme Gradient
Boosting; Artificial
Neural Networks

Cardio-vascular diseases are among the diseases that cause the most deaths worldwide. Heart failure, a cardiovascular disease, is a condition in which the heart cannot pump the blood that the body needs. Deaths occur as a result of this disease, which is frequently seen in our country. In this study, a machine learning-based approach is proposed to predict survival or death of patients with heart failure. The effectiveness of the proposed method is evaluated using three different classification algorithms. In the experiments performed, the highest accuracy values (86.67%) was achieved with the Artificial Neural Network algorithm. The proposed method will guide the preparation of more effective and appropriate treatment plans for heart failure patients with a high risk of death.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Dünya Sağlık Örgütü verilerine göre, dünya genelindeki ölümlerin %31 gibi büyük bir oranla en başta gelen sebebi kardiyo-vasküler hastalıklardır ve her yıl yaklaşık olarak 17,9 milyon bireyin yaşamı bu hastalıklar nedeniyle sonlanmaktadır. Kalp yetmezliği, koroner kalp hastalığı, serebrovasküler hastalık, romatizmal kalp hastalığı sıklıkla karşılaşılan kardiyo-vasküler hastalıklardır (İnt. Kyn. 1). Kalp yetmezliği, kalbin çeşitli sebeplerle vücudun

ihtiyaç duyduğu miktardaki kanı pompalayamaması durumudur. Türkiye’de ilk olarak 2012 yılında erişkinlerin kalp yetmezliği yaygınlığının tespit edilmesine yönelik yapılan çalışmada, yaklaşık 2,5 milyon bireyin kalp yetmezliğine sahip olduğu ve yaygınlık oranınının 45 yaş üstü bireyler için %2,9 olduğu belirtilmiştir (Degertekin vd. 2012). Birçok ülkede olduğu gibi ülkemizde de yaygın olarak görülen kalp yetmezliği, ölüm sebeplerinin başında gelmektedir. Bu sebeple, kalp yetmezliğinin ölümle

sonuçlanmadan önce tespit edilmesi büyük önem taşıtmaktadır. Her ne kadar yapılan klinik uygulamalarla kalp yetmezliği ile ilişkili olaylar tespit edilebilse de, genel olarak yüksek doğruluk seviyesine ulaşılamamıştır (Buchan *et al.* 2019). Bu doğrultuda, uzmanların karar verme sürecini hızlandırmada ve daha yüksek doğruluk seviyelere erişimin sağlanması yapay zeka teknolojilerine başvurulmaktadır.

Son yıllarda birçok alanda etkinliği kanıtlanmış bir yapay zeka teknolojisi olan makine öğrenmesi ve veri madenciliği, günümüzde özellikle karmaşık sağlık problemlerinde, tanı, hastalık izleme, tedavi planı ve hastaların sonucunun tahmini için sıklıkla kullanılmaktadır. Düşük sol ventrikül ejeksiyon fraksiyonuna sahip kalp yetmezliği hastalarında ani kardiyak ölümlerin tahmin oranını yükseltmek için yapılan çalışmada, implante edilebilen kardiyoverter defibrilatrden yararlanma olasılığı en yüksek olan kalp yetmezliği hastalarını belirlemeye yönelik yeni stratejiler geliştirilmiştir (Meng *et al.* 2019). Ejeksiyon fraksiyonuna bağlı kalp yetmezliği yaşayan hastalardaki hastaneye yatış ve ölüm oranını tespit etmeye yönelik model geliştirmek ve doğrulamak için geleneksel lojistik regresyon yönteminin yanında Rastgele Orman ve Destek Vektör Makineleri (SVM, Support Vector Machines) yaklaşımları da kullanıldı. Geliştirilen modelin zamanla değişen takip verileri olmadan temel hasta özelliklerini kullanması ne çıkan eksikliğidir (Angraal *et al.* 2020). Uygun ve yerinde müdahale edebilmek için kalp yetmezliği hastalarının takibinin yapılması önemlidir. 47 öznitelige sahip bir veri seti kullanılarak kalp yetmezliği hastalarının 30 günlük yeniden kabul veya ölümünü tahmin etmek için çok katmanlı algılayıcı tabanlı bir model geliştirildi. Çalışmada spesifik klinik verilerin kullanılmaması ve sadece 65 yaş ve üstü hastalara yer verilmesi zayıflık olarak ortaya çıkmaktadır (Awan *et al.* 2019). 11 farklı laboratuvar değişkeni için 970 korunmuş ejeksiyon fraksiyonuna bağlı kalp yetmezliği olan hastadan veriler alındı. Ayrıca 290 hasta da doğrulama grubu olarak kayıt edildi. Yaklaşık 5 yıl süren takip sırasında, tüm nedenlere bağlı ölümler birincil son nokta olarak kullanılırken, bileşik son noktalar ise ikincil son nokta olarak seçildi.

Komorbidite yükü, kardiyak anormallikler ve uzun vadeli prognoz ile karakterize edilen 3 farklı fenogrup bir güdümsüz öğrenme yaklaşımı olan kümeleme stratejisi ile ayrıştırıldı. Fenogrup 1 en düşük riske sahip iken, fenogrup 3 en yüksek riskli olarak bulundu (Gu *et al.* 2021, Segar *et al.* 2020). Benzer olarak, bir başka çalışmada atrial fibrilasyon, anemi ve böbrek hastalıklarını da göz önünde bulundurarak 6 fenogrup oluşturuldu (Hedman *et al.* 2020). Pakistan'daki 299 kalp yetmezliği hastası için Qlattice adında sembolik regresyon yöntemine dayanan yeni bir model ile minimal bir matematiksel dönüşüm seti tanımlandı ve bu set Cox modelinde tahmin için kullanıldı (Wilstup and Cave, 2021). Topluluk ağaçları makine öğrenimi tekniklerini kullanarak geliştirilen modelde, Aşırı Gradyan Arttırma (XGBoost, Extreme Gradient Boosting) diğer topluluk ağaçları yöntemlerine göre daha iyi bir performans göstermiştir (Moreno-Sanchez, 2020). Bir diğer çalışmanın sonuçları, kalp yetmezliğine sahip hastaların sadece serum kreatinin ve ejeksiyon fraksiyon özelliklerine dayanarak yapılacak sağ kalım tahminininin, 11 adet öznitelikten oluşan veri setinin kullanılmasının tüm veri seti kullanılmasının yerine daha iyi performans göstereceğini ortaya koydu (Chicco and Jurman, 2020).

Bu çalışmada, laboratuvar kayıtlarına dayanan, 13 öznitelik ve 299 örneklem ile oluşturulan bir veri kümesi, kalp yetmezliği hastalarının sağ kalma veya ölüm durumlarının tahmini için kullanılmıştır. Tahmin için makine öğrenmesi alanında popüler olan, Rastgele Orman, Yapay Sinir Ağları (YSA – Artificial Neural Network) ve Aşırı Gradyan Arttırma (AGA – Extreme Gradient Boosting) yöntemleri kullanılmıştır. Yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar analiz edildiğinde literatürde aynı veri kümesini kullanarak yapılan benzer çalışmalara kıyasla daha iyi performans değerlerine ulaşılmıştır (Chicco and Jurman, 2020; Erdas ve Olcer, 2020).

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, kalp yetmezliğine bağlı olarak hastaların hayatta kalma veya ölme durumları tahmin edilmektedir. Bu amaçla, hastaların tıbbi kayıtlarını içeren bir veri seti üzerinde makine

öğrenmesi algoritmalarının performansları analiz edilmektedir. Çalışmanın takip eden alt bölümlerinde, veri seti, veri ön işleme, makine öğrenmesi algoritmaları ve performans ölçütleri anlatılmaktadır.

2.1 Veri Seti

Kalbin vücuda yeteri kadar kan pompalamaması sonucu görülen kalp yetmezliği sigara kullanımı, yüksek tansiyon, diyabet, stres gibi faktörler ile daha hızlı ilerlemektedir. Bu hastalığa bağlı hayatta kalma analizi için bir model geliştirmek üzere hastaların belirli bir süre takip edilmesi ve hasta öldüğünde hasta ile ilgili verilerin kayıt altına alınması gerekmektedir. Bu amaçla, Kaliforniya Üniversitesi - Irvine Makine Öğrenmesi Deposu'nda paylaşılan kalp yetmezliği klinik veri seti kullanılmıştır (Aktaş Potur ve Erginel, 2021, Aydın, 2021, Chicco and

Jurman, 2020, Erdas ve Olcer, 2020). Bu veri seti, Nisan ve Aralık 2015 tarihleri arasında 285 gün takip edilen ve New York Kalp Cemiyeti'nin (NYHA) konjestif kalp yetersizliği sınıflamasına göre Sınıf 3 veya 4 kalp yetmezliği olarak sınıflandırılan 299 hastanın verilerini içermektedir. Veri setinde 105 kadın ve 194 erkek hasta bulunmaktadır. Hematokrit seviyeleri, %36'dan düşük olan hastaların anemi olduğu kabul edilmiştir. Veri setindeki hastaların 96'sı (%32.1) belli bir takip süresinden sonra ölmüştür. Bu hastalardan on üç farklı parametre toplanarak veri seti oluşturulmuştur. Bu parametrelerin bazıları sadece ikili (boolean) veri iken bazıları sürekli (continuous) değerlerdir. Toplanan veriler, kısa açıklamalar ve değer aralıkları ile ilgili ayrıntılar Çizelge 1'de sunulmaktadır.

Çizelge 1. Veri setinde kullanılan parametreler, açıklamaları ve değer aralıkları

Öznitelik	Açıklama	Ölçüm Tipi	Değer Aralığı
Yaş	Hasta yaşı	yıl	[40,...,95]
Anemi	Hemoglobin düşüklüğü	ikili	0, 1
Kreatin fosfokinaz	Kandaki CPK enzimi seviyesi	meg/L*	[23,...,7861]
Diyabet	Kandaki glukoz miktarı	ikili	0, 1
Ejeksiyon Fraksiyonu	Kalbin her atmasından sonra kalbe gelen kanın geri pompalandığı miktar	yüzde	[14,...,80]
Yüksek tansiyon	Hasta hipertansiyona sahip olup/olmadığı	ikili	0, 1
PLT	Kandaki trombosit miktarı	kiloplatelets/mL	[25.01,...,850.00]
Cinsiyet	Kadın veya Erkek	ikili	0, 1
Serum kreatinin	Kandaki serum kreatinin miktarı	mg/dL*	[0.50,...,9.40]
Serum sodyum	Kandaki serum sodyum miktarı	mEq/L*	[114,...,148]
Sigara kullanımı	Hastanın sigara kullanıp /kullanmadığı	ikili	0, 1
Zaman	Takip dönemi	gün	[4,...,285]
Ölüm olayı (hedef)	Takip döneminde hasta ölmüşse	ikili	0, 1

*meg/L: microgram per liter, mL: microliter, mEq/L: milliequivalents per litre

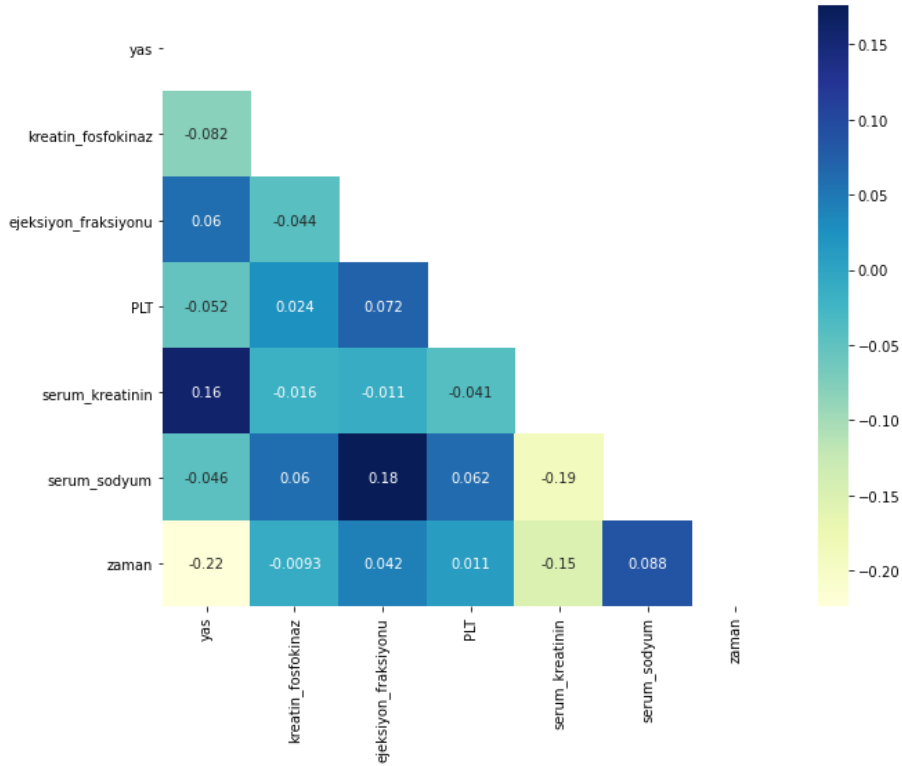
2.2 Veri Ön İşleme

Veri setinde kategorik ve sürekli öznitelikler bulunmaktadır. Bu özniteliklerin birbirleriyle ilişkilerini tespit etmek üzere Şekil 1 ile gösterilen ilişki haritası oluşturulmuştur.

Kas dokusunun hasar görmesine bağlı olarak kreatinin fosfokinaz enzim seviyesinin kandaki değeri yüksek çıkmaktadır. Bu durum, kalp yetmezliğinin göstergeleri arasında sayılmaktadır. Ejeksiyon fraksiyonu, kasılma sırasında sol ventrikülün yüzde olarak ne kadar kan pompalandığını gösterirken serum kreatinini ise böbreklerin fonksiyonelliğini tespit etmede kullanılan kas metabolizmasının ürettiği bir atıktır. Yüksek serum kreatinini, böbreklerin düzgün

çalışmadığına işaret etmektedir. Serum sodyum testi ile kandaki sodyum seviyesi belirlenmektedir. Düşük sodyum seviyeleri kalp yetmezliği belirtileri arasındadır (Chicco and Jurman, 2020).

Veri setinde kayıp veri bulunmamaktadır. Makine öğrenmesi modellerini uygulamadan önce veriler %75 eğitim ve %25 test verisi olarak ayrılmıştır. Bu işlemden sonra, sürekli özniteliklere standartlaştırma işlemi uygulanmıştır. Sürekli özniteliklere standartlaştırma işlemi uygulanmazsa, yüksek varyanslı öznitelikler model uydurma sürecine hâkim olabilir ve modelin beklendiği gibi diğer özniteliklerden (daha düşük varyanslı) doğru bir şekilde öğrenmemesine neden olabilir.



Şekil 1. Sürekli öznitelikler arasındaki ilişki haritası

2.3 Sınıflandırma Algoritmaları

Bu çalışmada, kalp yetmezliğine bağlı olarak hastaların hayatta kalma veya ölme durumları tahmin etmek üzere RO, YSA ve AGA modelleri kullanılmıştır.

RO, 2001 yılında Breiman tarafından geliştirilmiş birçok karar ağacı ile oluşturulmuş bir topluluk algoritmasıdır (Breiman 2001). Karar ağacı algoritmalarından farklı olarak kök düğümü bulma ve düğümleri bölme işlemlerini rastgele olarak gerçekleştirir. Yeniden örnekleme yöntemi ile veri setinden farklı alt kümeler oluşturulur ve her bir alt örneklem için bir karar ağacı modeli oluşturulur. Karar ağaçları, sınıflandırma ve regresyon ağaçları (CART, Classification and Regression Trees) yöntemi kullanılarak üretilir. Sınıflandırma işleminde her ağacın tahmin sonucu alınır ve oy yönteminin sınıflandırıcısının ne olacağına çoğunluk tarafından karar verilir. RO hızlı çalışan sınıflandırma algoritması olup aşırı uyum sorununa karşı dirençlidir. Çok sayıda karar ağacının sınıflandırıcı olarak kullanılması ve her bir sınıflandırıcıdan elde edilen tahminlerden çoğunluk oyu ile genel bir tahmin üretilmesi, tahminlerdeki hata oranını ve yanlılığı azaltır.

YSA, sınıflandırma, modelleme, tahmin gibi birçok günlük yaşam probleminin çözümünde başarılı bir yöntemdir. Çok Katmanlı Algılayıcı (ÇKA, Multi-layer Perceptron), doğrusal olmayan problemlerin çözümü için sıklıkla kullanılan bir YSA modelidir. En az üç katmandan oluşan giriş ve çıkış katmanları arasında en az bir katman kullanan ileri beslemeli, geri yayımlı bir ağıdır (Haykin 1999). İleri yayılım aşamasında, ağın çıkış ve hata değeri hesaplanırken, geriye doğru yayılma aşamasında hesaplanan hata değerini en aza indirecek şekilde katmanlar arasındaki bağlantı ağırlık değerleri güncellenir. YSA gücü, esnekliği ve kullanım kolaylığı nedeniyle birçok karmaşık en iyileme problemlerinde etkili çözümler üretilmesini sağlamaktadır. Son yıllarda klasik tekniklerle çözülemeyen problemler için sinir ağlarının uygulanmasına ilgi artmış ve YSA birçok tıbbi uygulamada başarıyla kullanılmaktadır.

AGA, Karar Ağacı'nı temel alan ölçeklenebilir, taşınabilir ve hesaplamalı olarak derlenmiş bir topluluk öğrenme algoritmasıdır Gradyan Arttırma Algoritması'nı kullanan bu yöntem Düzenli Arttırma yöntemi olarak da adlandırılır ve paralel işleme işlevselliği sağlar. Gradyan Arttırma algoritması en iyileme problemini, adım yönünü belirleme ve adım boyutunu bulmak üzere iki temel adımda çözmeye çalışır. AGA ise adım boyutunu ve yönünü tek

seferde bulur. AGA, dizi modellerindeki hataları azaltmayı amaçlar. Bellek ve donanım kaynaklarının en iyi şekilde kullanımını hedefleyen bu algoritma son zamanlarda sınıflandırma ve regresyon problemlerinde sıklıkla tercih edilmektedir (Chen and Guestrin, 2016).

2.4 Performans Ölçütleri

Gerçek sınıf etiketleri ile hedef sınıf etiketleri arasındaki ilişkinin gösteriminde karmaşıklık matrisinden yararlanılır (Han and Kamber, 2001). Sınıflandırma işlemi sonucu elde edilen performans değerlerini (doğru pozitif (DP), doğru negatif (DN),

Çizelge 3. Performans Ölçütleri

Ölçüt	Açıklama	Denklem
Doğruluk (ACC)	Doğru olarak sınıflandırılan örneklem sayısının toplam örneklem sayısına oranı	$\frac{DP + DN}{DP + YP + DN + YN}$
Hassasiyet (PREC)	Sınıflandırma algoritmasının doğru tahmin ettiği pozitif örneklem sayısının pozitif olarak tahmin ettiği toplam örneklem sayısına oranı	$\frac{DP}{DP + YP}$
Hatırlama (RC)	Sınıflandırma algoritmasının pozitif örneklemeleri doğru tahmin etme gücü	$\frac{DP + YN}{DN}$
Özgüllük (SP)	Sınıflandırma algoritmasının ne kadar gerçek negatif değeri doğru tahmin ettiğinin ölçüsü	$\frac{DN + YP}{DN}$
F-ölçütü (FS)	Hassasiyet ve hatırlama ölçütlerinin geometrik ortalaması	$\frac{2 * PREC * RC}{PREC + RC}$

Alıcı İşletim Eğrisi (AİE, Receiver Operating Characteristics) ve Eğri Altında Kalan Alan (AKA, Area Under Curve): Performans değerlendirmede kullanılan bir diğer analiz AİE analizidir. Sınıflandırma algoritmasının, hassasiyet ve özgüllük açısından birlikte değerlendirilebilmesine olanak sağlar. Bu eğrinin oluşturduğu koordinat sisteminin x ekseninde (1-özgüllük), y ekseninde ise duyarlılık yer alır (Harrington, 2012; Mitchell, 1997).

3. Deneysel Sonuçları

Bu çalışmada, kalp yetmezliğine bağlı olarak hastaların hayatta kalma veya ölme durumları tahmin edilmektedir. Bu doğrultuda, Python programlama dili ile geliştirilmiş makine öğrenmesi ve veri madenciliği alanında yayınlanmış algoritmalara ait fonksiyonları içeren popüler bir kütüphane olan scikit-learn kütüphanesinden yararlanılmıştır. Deneyler Windows 10 işletim

yanlış pozitif (YP), yanlış negatif (YN)) göstermek için kullanılan bir görselleştirme aracıdır (Çizelge 2).

Çizelge 2. Karmaşıklık matrisi gösterimi

	Tahmin Edilen Sınıf Etiketleri	
	0	1
Gerçek Sınıf Etiketleri	0 DP	1 YN
	1 YP	DN

Çizelge 2 ile verilen karmaşıklık matrisindeki bu değerler kullanılarak sınıflandırma algoritmasının başarımını analiz etmek için Çizelge 3 ile verilen performans ölçütleri hesaplanır.

sisteminde, Python'un 3.8.10 sürümü, scikit-learn kütüphanesinin 0.24.2 sürümü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm deneyler, 8 GB RAM'e sahip (Intel (R) Core(TM) i7-4510U CPU @ 2.00GHz 2.60 GHz) bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada ele alınan problem sınıflandırma problemi olarak ele alınıp sınıflandırma aşamasında RO, AGA ve YSA algoritmasından yararlanılmıştır. Sınıflandırma algoritmalarının başarımında hiper-parametrelerin seçimi çok önemlidir. Bu amaçla, rastgele arama algoritması yöntemi ile hiper-parametreler en iyilenmiştir (Bergstra and Bengio, 2012). Algoritmalar için rastgele arama algoritması ile en iyilenen hiper-parametreler Çizelge 4 ile detaylandırılmaktadır. Sınıflandırma algoritmalarının analizi amacıyla oluşturulan karmaşıklık matrisi, Çizelge 5 ile verilmektedir.

Çizelge 4. Sınıflandırma algoritmaları için seçilen hiper-parametreler

Sınıflandırıcı	Hiper-parametre	Açıklama	Değer
RO	n_estimator	Ağaç sayısı	10
	learning_rate	Öğrenme oranı	0.16
AGA	min_child_weight	Çocuk düğümdeki minimum örnek ağırlığı	10
	max_depth	Ağacın maksimum derinliği	10
	n_estimators	Ağaç sayısı	100
YSA	num_layers	Katman sayısı	2
	units	Katmandaki nöron sayısı	16

epochs	Eğitim tur sayısı	10 ⁴
drop_rate	Seyreltme oranı	0.25
activation	Aktivasyon fonksiyonu	RELU
optimizer	Optimizasyon algoritması	ADAM

Çizelge 5. Sınıflandırma algoritmalarının karmaşıklık matris sonuçları

		Tahmin edilen sınıf etiketi					
		RO		AGA		YSA	
		0	1	0	1	0	1
Gerçek sınıf etiketi	0	47	4	44	7	49	2
	1	10	14	6	18	8	16

Çizelge 5 ile verilen karmaşıklık matrislerinde 0 kalp yetersizliğinin olmadığı ve 1 ise kalp yetersizliğinin olduğu vakaları ifade etmektedir. Çizelge 5'deki sonuçlar incelendiğinde RO ve YSA algoritmalarının kalp yetersizliği olmayan vakaları tespit etmede daha başarılı olduğu AGA algoritmasının ise kalp

yetersizliği olan vakaları tespit etmede daha başarılı olduğu görülmektedir. Çizelge 5 ile verilen karmaşıklık matrisleri kullanılarak hesaplanan performans ölçütleri ve hesaplama süreleri Çizelge 6 ile verilmektedir.

Çizelge 6. Sınıflandırma algoritmalarının sonuçları

	ACC (Eğitim)	ACC (Test)	PREC	RC	FS	AUC	MEZ* (s)	MTS* (s)
RO	%99.10	%81.33	%80.12	%75.25	%66.67	%88.39	0.032	0.002
AGA	%100.00	%82.67	%82.88	%80.64	%80.30	%90.60	0	0.005
YSA	%87.05	%86.67	%86.90	%86.67	%86.08	%89.87	0	0.112

*MEZ: Model Eğitim Zamanı, MTZ: Model Test Zamanı

Çizelge 6 ile verilen sonuçlar incelendiğinde YSA algoritması ile elde edilen performans ölçütü değerlerinin daha iyi olduğu görülmektedir.

Çalışmada önerilen algoritmalar için model eğitim ve test aşamalarında harcanan sürelerinin de birbirlerine oldukça yakın olduğunu söyleyebiliriz.

Çizelge 7. Aynı veri kümesini kullanan çalışmaların sonuçlarının karşılaştırılması

Yazarlar	Yöntem	Doğru sınıflandırma oranı
(Chicco and Jurman, 2020)	Lojistik regresyon	%83.80
(Erdas ve Olcer, 2020)	One Rule	%86.00
Önerdiğimiz yaklaşım	YSA	%86.67

Literatürde aynı veri kümesini kullanarak yapılmış olan çalışmalar incelendiğinde, önerilen yöntem ile elde edilen doğruluk değerinin, diğer çalışmalardan daha iyi olduğu görülmektedir (Çizelge 7).

4. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada, kalp yetmezliğine bağlı olarak hastaların hayatta kalma veya ölme durumları tahmin edilmektedir. Hastaların tıbbi kayıtlarını içeren gerçek bir veri seti üzerinde RO, AGA ve YSA algoritmalarının performansları analiz edilmektedir. Doğruluk, hassasiyet, hatırlama, f-ölçütü, AİE eğrisi altında kalan alan ve işlem süreleri açısından

sınıflandırıcılar analiz edilmiş ve çalışmada ele alınan problemin çözümünde en uygun modelin RO modeli olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada kullanılan algoritmaların karmaşık matrisleri incelendiğinde RO ve YSA algoritmalarının kalp yetersizliği olmayan vakaları tespit etmede daha başarılı olduğu AGA algoritmasının ise kalp yetersizliği olan vakaları tespit etmede daha başarılı olduğu görülmektedir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, farklı sınıflandırıcıların da performansı bu doğrultuda incelenerek farklı modellerin bir topluluk öğrenme modeli ile bir araya getirilmesi ve daha yüksek

performans değerlerinin elde edilmesi üzerine çalışılacaktır.

5. Kaynaklar

- Aktaş Potur, E., ve Erginel, N., 2021. Kalp Yetmezliği Hastalarının Sağ Kalımlarının Sınıflandırma Algoritmaları ile Tahmin Edilmesi. *European Journal of Science and Technology*, **24**, 112–118.
- Angraal, S., Mortazavi, B. J., Gupta, A., Khera, R., Ahmad, T., Desai, N. R., Jacoby, D. L., Masoudi, F. A., Spertus, J. A., and Krumholz, H. M., 2020. Machine Learning Prediction of Mortality and Hospitalization in Heart Failure With Preserved Ejection Fraction. *JACC: Heart Failure*, **8(1)**, 12–21.
- Awan, S. E., Bennamoun, M., Sohel, F., Sanfilippo, F. M., Chow, B. J., and Dwivedi, G., 2019. Feature selection and transformation by machine learning reduce variable numbers and improve prediction for heart failure readmission or death. *PLOS ONE*, **14(6)**, e0218760.
- Aydın, A., 2021. Kalp Yetmezliği Hastalarında Kritik Parametre Seçimi ve Sağkalım Modeli Geliştirilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 155–162.
- Bergstra, J., and Bengio, Y., 2012. Random search for hyper-parameter optimization. *Journal of Machine Learning Research*, **13(2)**.
- Breiman, L., 2001. Random Forest. *Machine Learning*, **45(1)**, 5–32.
- Buchan, T. A., Ross, H. J., McDonald, M., Billia, F., Delgado, D., Duero Posada, J. G., Luk, A., Guyatt, G. H., and Alba, A. C., 2019. Physician Prediction versus Model Predicted Prognosis in Ambulatory Patients with Heart Failure. *The Journal of Heart and Lung Transplantation*, **38(4)**, S381.
- Chen, T., and Guestrin, C., 2016. XGBoost. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 785–794.
- Chicco, D., and Jurman, G., 2020. Machine learning can predict survival of patients with heart failure from serum creatinine and ejection fraction alone. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, **20(1)**, 16.
- Degertekin, M., Erol, C., Ergene, O., Tokgozoglu, L., Aksoy, M., Erol, M. K., Eren, M., Sahin, M., Eroglu, E., Mutlu, B., ve Kozan, O., 2012. Heart Failure Prevalence and Predictors in Turkey (HAPPY) Çalışması. *Türk Kardiyoloji Dernegi Arsivi-Archives of the Turkish Society of Cardiology*, **40(4)**, 298–308.
- Erdas, C. B., and Olcer, D., 2020. A Machine Learning-Based Approach to Detect Survival of Heart Failure Patients. *2020 Medical Technologies Congress (TIPTEKNO)*, 1–4.
- Gu, J., Pan, J., Lin, H., Zhang, J., and Wang, C., 2021. Characteristics, prognosis and treatment response in distinct phenogroups of heart failure with preserved ejection fraction. *International Journal of Cardiology*, **323**, 148–154.
- Han, J., and Kamber, M., 2001. *Data Mining: Concepts and Techniques* (3rd ed.). Morgan Kaufmann Publishers.
- Harrington, P., 2012. *Machine Learning in Action*. Manning Publications.
- Haykin, S. S., 1999. Neural Networks: A comprehensive Foundation. In *Prentice-Hall, Inc*, **7458**. Prentice Hall.
- Hedman, Å. K., Hage, C., Sharma, A., Brosnan, M. J., Buckbinder, L., Gan, L.-M., Shah, S. J., Linde, C. M., Donal, E., Daubert, J.-C., Målarstig, A., Ziemek, D., and Lund, L., 2020. Identification of novel pheno-groups in heart failure with preserved ejection fraction using machine learning. *Heart*, **106(5)**, 342–349.
- Meng, F., Zhang, Z., Hou, X., Qian, Z., Wang, Y., Chen, Y., Wang, Y., Zhou, Y., Chen, Z., Zhang, X., Yang, J., Zhang, J., Guo, J., Li, K., Chen, L., Zhuang, R., Jiang, H., Zhou, W., Tang, S., ... Zou, J., 2019. Machine learning for prediction of sudden cardiac death in heart failure patients with low left ventricular ejection fraction: study protocol for a retrospective multicentre registry in China. *BMJ Open*, **9(5)**, e023724.
- Mitchell, T., 1997. *Machine Learning*. McGraw Hill.
- Moreno-Sanchez, P. A., 2020. Development of an Explainable Prediction Model of Heart Failure Survival by Using Ensemble Trees. *2020 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, 4902–4910.
- Segar, M. W., Patel, K. V., Ayers, C., Basit, M., Tang, W. H.

W., Willett, D., Berry, J., Grodin, J. L., and Pandey, A., 2020. Phenomapping of patients with heart failure with preserved ejection fraction using machine learning-based unsupervised cluster analysis. *European Journal of Heart Failure*, **22(1)**, 148–158.

Wilstup, C., and Cave, C., 2021. Combining symbolic regression with the Cox proportional hazards model improves prediction of heart failure deaths. *MedRxiv*, 2021.01.15.21249874.

İnternet Kaynakları

1-<https://www.who.int/Health-Topics/Cardiovascular-Diseases/>, (07/06/2021).

Araştırma Makalesi / Research Article

Dengesiz Metin Sınıflandırmada Öznitelik Seçim Yöntemlerinin Etkililiği

Hande TİRYAKI¹, Alper Kürşat UYSAL²¹Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Eskişehir.²Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Alanya.Sorumlu yazar e-posta: handetiryaki@eskisehir.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-1533-6901>e-posta: alper.uysal@alanya.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4057-934X>

Geliş Tarihi: 10.09.2022

Kabul Tarihi: 14.03.2023

Öz

Metin verilerinin sınıflar arasında dağılımı genellikle eşit değildir. Bu durum, metin sınıflandırma işleminde sınıflandırıcıların performansına olumsuz yansımaktadır. Dengesiz metin sınıflandırma ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Metin sınıflandırma işleminin önemli aşamalarından olan öznitelik seçim aşaması, dengesiz metin probleminde de kritik öneme sahiptir. Öznitelik seçme metodlarının dengesiz metinlerin sınıflandırılması üzerindeki etkisi bu çalışmada etraflıca araştırılmıştır. Bu doğrultuda, iki farklı veri seti üzerinde üç farklı sınıflandırıcı ve dokuz farklı öznitelik seçim metodu ile birçok deney yapılmıştır. Ayrıca öznitelik seçim yöntemlerinin başarıları farklı öznitelik sayılarında da gözlemlenmiştir. NDM, DFSS, PFS, POISSON, CHI2, IG, GINI, DFS ve MDFS olarak adlandırılan 9 farklı öznitelik seçim metodu değerlendirilmiştir. Destek Vektör Makinesi (SVM), Karar Ağacı (DTREE) ve Basit Bayes (MNB) sınıflandırıcıları ile deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Reuters-21578 veri setinde DFS ve CHI2 öznitelik seçim yöntemleri Makro-F1 değerlendirme metriği üzerinden yaklaşık en yüksek 80 değerini alırken, SPAM SMS veri setinde, DFS öznitelik seçim yöntemi en yüksek skor olarak 95 ve CHI2 öznitelik seçim yöntemi 94 değerlerini almıştır. Öznitelik seçme metodlarından DFS ve CHI2'nin dengesiz metin sınıflandırmada daha başarılı olduğu görülmektedir.

Anahtar kelimeler

Dengesiz metin sınıflandırma; Boyut indirgeme; Öznitelik seçimi; Terim seçimi

The Effectiveness of Feature Selection Methods for Imbalanced Text Classification

Abstract

The distribution of text data across classes is often imbalanced. This situation has a negative impact on the performance of classifiers in the text classification process. Many studies have been performed on imbalanced text classification. The feature selection stage, which is one of the important stages of the text classification process, is also critical in the imbalanced text classification problem. The effect of feature selection methods on the classification of imbalanced texts has been thoroughly investigated in this study. In this direction, many experiments were carried out with three different classifiers and nine different feature selection methods on two different data sets. In addition, the success of feature selection methods has been observed employing different number of features. Nine different feature selection methods called NDM, DFSS, PFS, POISSON, CHI2, IG, GINI, DFS and MDFS were evaluated. Experimental results obtained with Support Vector Machines (SVM), Decision Tree (DTREE), and Naive Bayes (MNB) classifiers. On the Reuters-21578 dataset, DFS and CHI2 feature selection methods obtained approximately 80 as the highest Macro-F1 score. On the SPAM SMS dataset, DFS feature selection method obtained 95 and CHI2 feature selection method obtained 94 as the highest Macro-F1 score. It is seen that feature selection methods DFS and CHI2 are more successful than the others for imbalanced text classification.

Keywords

Imbalanced text classification;
Dimension reduction;
Feature selection;
Term selection

1. Giriş

Dengesiz veride, bir sınıftaki örnek sayısı diğer sınıflardaki örnek sayılarından önemli ölçüde azdır

(He and Garcia 2009, Kamalov *et al.* 2022). Dengesiz veri problemini çözmek için örnekleme yöntemleri, algoritmik yöntemler ve öznitelik seçme yöntemleri

dahil olmak üzere çok sayıda yaklaşım ortaya konmuştur (Ogura *et al.* 2011, Maldonado *et al.* 2014). Algoritmik yöntemler tek sınıflı öğrenme, topluluk ve maliyete duyarlı öğrenme yöntemleri olmak üzere üç başlık altında incelenebilir (Galar *et al.* 2011). Örnekleme yöntemleri ve algoritmik yöntemler, yüksek boyutlu dengesiz verilerde her zaman yüksek performans vermezler (Chen and Wasikowski 2008). Öznitelik seçimi, dengesizlik sorununu çözenin yöntemlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Ogura *et al.* 2011). Yüksek boyutlu dengesiz metin sınıflandırmanın başarımını iyileştirmek için örnekleme yöntemleri, öznitelik seçimi ve her iki yöntemin birleştirilmesinin sonuçları, öznitelik seçme yöntemlerinin etkisinin örnekleme yöntemlerinden daha fazla olduğunu göstermiştir (Liu and Yu 2005).

Metin sınıflandırma, metin içerikli belgeleri önceden tanımlanmış kategorilere ayırma işlemidir. Metin sınıflandırma işlemi genel olarak öznitelik çıkarma, öznitelik seçimi, öznitelik (terim) ağırlıklandırma ve sınıflandırma aşamalarından oluşur.

Metin sınıflandırma çalışmalarının çoğunda olduğu gibi, öznitelik çıkarma işlemi için kelime çantası (bag of words) yaklaşımı kullanılabilir (Uysal and Gunal 2012, Gasparetto *et al.* 2022). Bu yaklaşımda, belgelerdeki terimlerin sırası göz ardı edilir ve bunların dokümanlarda görülme sıklıkları kullanılır (Uysal *et al.* 2012). Bu nedenle, bir metin koleksiyonundaki benzersiz kelimenin her biri farklı bir öznitelik olarak kabul edilir. Sonuç olarak, bir doküman çok boyutlu bir öznitelik vektörü (Uysal and Gunal 2012) ile temsil edilir. Bir öznitelik vektöründe, her boyut, terim frekansı (TF), terim frekansı-ters doküman frekansı (TF-IDF) vb. ile ağırlıklandırılmış bir değere karşılık gelir (Schütze *et al.* 2008, Hajibabae *et al.* 2022).

Metinden öznitelik çıkarımı sırasında “dizgelere ayrıştırma”, “küçük harfe dönüştürme”, “durak kelimeleri ayıklama” ve “köklere indirgeme” ön işleme adımları uygulanmaktadır. Literatürde dengesiz veri setleri üzerinde çalışan öznitelik seçme metodları araştırıldığında, bu konuda pek fazla çalışmaya rastlanmamıştır. Bulunan çalışmalar şu şekilde özetlenebilir:

Dengesiz verilerde öznitelik seçimi için kullanılan FAST (Chen and Wasikowski 2008), özniteliklerin

sınıflandırıcıdaki eşik değerini değiştirerek AUC değerini ölçüp öznitelik ayırımı değerlendirir. Gömülü ve çok adımlı yöntemler de araştırmacılar tarafından kullanılmaktadır.

Yüksek boyutlu dengesiz verilerin sınıflandırmasında kullanılan bir diğer öznitelik seçme metodu olan SYMON, sarmalayıcı öznitelik seçme metodu kategorisine girmektedir. Harmony arama algoritmasını kullanmaktadır. SVM-RFE, SVM-BFE, D-HELL, SMOTE-RLF, SMOTE-PCA ile karşılaştırıldığında G-Ortalama (G-Mean) ve F-skor performansı olarak SYMON iyi sonuçlar vermiştir (Moayedikia *et al.* 2017).

PFS ise dengesiz metin sınıflandırma için önerilen bir diğer öznitelik seçme metodudur. Öznitelik seçme alt kategorilerinden filtre kategorisinde yer alıp olasılıksal bir metottur (Pouramini *et al.* 2018).

Bu çalışmada, dengesiz metin sınıflandırma problemi öznitelik seçimi açısından ele alınmıştır. Ayrıca yapılan deneylerde “dizgelere ayrıştırma”, “küçük harfe dönüştürme”, “durak kelimeleri ayıklama” ve “köklere indirgeme” ön işleme adımları uygulanmıştır. Terim ağırlıklandırma için TF-IDF kullanılmıştır. Değerlendirme metriği olarak özellikle Makro-F1 tercih edilmiştir. Makro-F1, dengesiz veri setlerinde sınıflar bazındaki sınıflandırma başarımını daha iyi temsil etmektedir. Daha kapsamlı analizler yapabilmek amacıyla, 30 ile 500 arasında 5 farklı öznitelik boyutunda Makro-F1 cinsinden sonuçlar karşılaştırılmıştır. Böylece, çok sayıda güncel öznitelik seçim yönteminin veri dağılımının sınıflar bazında farklılaştığı noktalarda ne şekilde performans sağladığı detaylı olarak araştırılmıştır. Bu sayede, öznitelik seçim yöntemleri arasında dengesiz metin sınıflandırma problemi açısından performansı yüksek olanlar tespit edilmiştir.

2. Materyal ve Metod

2.1 Öznitelik seçimi

Öznitelik seçim teknikleri genellikle üç kategoriye ayrılır: filtreler, sarmalayıcılar ve gömülü yöntemler. Filtre teknikler hesaplama açısından hızlıdır; ancak genellikle öznitelik bağımlılıklarını dikkate almazlar (Uysal and Gunal 2012). Filtre tabanlı yöntemler özellikle metin sınıflandırma alanı için yaygın olarak tercih edilmektedir. Metin sınıflandırmada ayırt edici özniteliklerin seçimi için çok sayıda filtre

tabanlı teknik vardır. Bu çalışmada dokuz farklı filtre tabanlı öznitelik seçim yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemler aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır. Öznitelik seçim yöntemlerinin formüllerini ortak bir gösterim ile ifade edebilmek için Çizelge 1'deki bilgilerden faydalanılması söz konusu olacaktır. Çizelge 1'de, a değeri sınıf ve ilgili terimin aynı anda bulunduğu durumların sayısını belirtmektedir. d değeri ise hem sınıfın hem de ilgili terimin aynı anda bulunmadığı durumların sayısını temsil etmektedir. c ve d değerleri de bu mantıksal çerçevede hesaplanmaktadır.

Çizelge 1. İkili Olasılık Çizelgesi için Genel Gösterim

	t_i	\bar{t}_i
$\frac{C_j}{C_j}$	a	b
$\frac{C_j}{C_j}$	c	d

2.1.1 Normalleştirilmiş Fark Ölçütü (NDM)

Normalleştirilmiş fark ölçütü, göreceli doküman frekanslarını hesaba katan yeni bir öznitelik sıralama ölçüsüdür (Rehman *et al.* 2017). NDM'nin formülü aşağıda verilmiştir:

$$NDM = \frac{\left| \frac{a}{a+b} - \frac{c}{c+d} \right|}{\min\left(\frac{a}{a+b}, \frac{c}{c+d}\right)} \quad (1)$$

$\min\left(\frac{a}{a+b}, \frac{c}{c+d}\right) = 0$ olduğu durumda, NDM değerinin sonsuz çıkması için payda küçük bir değerle değiştirilir.

2.1.2 Ayrımcı Öznitelik Seçimi (DFSS)

DFSS, dokümanlardaki öznitelikleri ayırt edici güçle seçen, ardından öznitelikler ve belgeler arasındaki anlamsal benzerliği hesaplayan yeni bir öznitelik seçim yöntemidir (Zong *et al.* 2015). Formülü aşağıda belirtilmiştir:

$$DFSS = \frac{a_{tf}}{a} * \frac{a}{c_{tf}} * \frac{a}{a+c} * \frac{a}{a+b} * \left| \frac{a}{a+c} - \frac{b}{b+d} \right| \quad (2)$$

a_{tf} : t teriminin o sınıfta geçme sayısı

c_{tf} : t terimin o sınıf hariç tüm sınıflarda geçme sayısı

2.1.3 Olasılıksal Öznitelik Seçimi (PFS)

Dengesiz metin sınıflandırma için önerilen tek-tarafli öznitelik seçme metodu PFS, öznitelik dağılımını hesaba katan olasılıksal bir metottur (Pouramini *et al.* 2018). PFS formülü aşağıdaki gibidir:

$$PFS = \frac{\left(\frac{a}{a+b}\right) + \left(\frac{a}{a+c}\right)}{(a+b)/N} + \frac{\left(\frac{d}{d+c}\right) + \left(\frac{d}{d+b}\right)}{(c+d)/N} \quad (3)$$

$\frac{a}{a+b}$: O sınıfta t teriminin olma olasılığı

$\frac{a}{a+c}$: t teriminin geçtiği durumlarda t'nin o sınıfta olma olasılığı

$\frac{d}{d+c}$: O sınıf hariç tüm sınıflarda t teriminin olmama olasılığı

$\frac{d}{d+b}$: t teriminin olmadığı durumlarda o sınıfta olmama olasılığı

$(a+b)/N$: t teriminin var olma olasılığı

$(c+d)/N$: t terimin var olmama olasılığı

2.1.4 Poisson Dağılımı (POISSON)

Her bir terimin olasılık dağılımının standart Poisson dağılımından ne kadar saptığına bağlı olarak terimin önemini tahmin eden bir öznitelik seçme yöntemidir (Ogura *et al.* 2009). Formül adımları aşağıda gösterilmektedir:

$$\lambda = F / N \quad (4)$$

$$\hat{a} = (a+b) * \left(1 - e^{(-\lambda)}\right) \quad (5)$$

$$\hat{b} = (a+b) * e^{(-\lambda)} \quad (6)$$

$$\hat{c} = (c+d) * \left(1 - e^{(-\lambda)}\right) \quad (7)$$

$$\hat{d} = (c + d) * e^{(-lambda)} \quad (8)$$

$$Poisson = \frac{(a-\hat{a})^2}{\hat{a}} + \frac{(b-\hat{b})^2}{\hat{b}} + \frac{(c-\hat{c})^2}{\hat{c}} + \frac{(d-\hat{d})^2}{\hat{d}} \quad (9)$$

F : t teriminin tüm dokümanlardaki toplam frekansı

N : Bütün sınıflardaki toplam doküman sayısı

a+b : O sınıfa ait olan doküman sayısı

c+d :O sınıfa ait olmayan doküman sayısı

2.1.5 Ki-kare (CHI2)

Öznitelik seçim yöntemleri içinde istatistik dağılımı baz alan ki-kare istatistiği, terim ve sınıf arasındaki bağımlılığın varlığını değerlendirir (Chen and Chen 2011). Ki-Kare ile elde edilen skorun yüksek olması, belirtilen terim ile ilgili sınıf arasındaki bağlantının kuvvetli olduğunu gösterir. Ki-kare formülü aşağıda belirtilmiştir:

$$CHI_2 = N * \frac{(a*d - b*c)^2}{(a+c)*(b+d)*(a+b)*(c+d)} \quad (10)$$

2.1.6 Bilgi Kazanımı (IG)

Bir kelimenin varlığının veya yokluğunun herhangi bir sınıf için uygun sınıflandırma seçiminin yapılmasını sağladığı bilgi miktarı IG ile ölçülür (Forman 2003). Bilgi kazanımı formülü aşağıda verilmiştir:

$$IG(t) = \frac{a}{N} * \log_2 * \frac{a * N}{(a+c)*(a+b)} + \frac{b}{N} * \log_2 * \frac{b * N}{(b+d)*(b+a)} + \frac{c}{N} * \log_2 * \frac{c * N}{(a+c)*(c+d)} + \frac{d}{N} * \log_2 * \frac{d * N}{(b+d)*(c+d)} \quad (11)$$

$\frac{a}{N}$: t teriminin o sınıfta olma olasılığı

$\frac{b}{N}$: t teriminin o sınıfta olmama olasılığı

$\frac{c}{N}$: t teriminin o sınıf hariç tüm sınıflarda olma olasılığı

$\frac{d}{N}$: t teriminin o sınıf hariç tüm sınıflarda olmama olasılığı

2.1.7 Gini Katsayısı (GINI)

GINI, karar ağaçlarında en iyi öznitelik dağılımını bulmak için orijinal olarak kullanılan yöntemin geliştirilmiş bir versiyonudur. Doğru, hesaplama karmaşıklığı düşük ve hızlı bir yöntemdir (Shang et al. 2007). Formülü aşağıdaki gibidir:

$$GI(t) = \sum_{i=1}^M \left(\frac{a}{a+b} \right)^2 * \left(\frac{a}{a+c} \right)^2 \quad (12)$$

Burada (a/a+b), o sınıfta t teriminin olma olasılığıdır. (a/a+c) ise t teriminin geçtiği durumlarda t'nin o sınıfta olma olasılığıdır.

2.1.8 Ayırtedici Öznitelik Seçici (DFS)

DFS, belirtilen kriterlere göre bilgilendirici olmayanları atarken ayırt edici öznitelikleri seçmeyi amaçlayan metin sınıflandırma için başarılı öznitelik seçim algoritmalarından biridir (Uysal and Gunal 2012). DFS aşağıdaki formülle ifade edilebilir:

$$DFS(t) = \sum_{j=1}^M \frac{(a/(a+c))}{(b/(a+b)) + (c/(c+d)) + 1} \quad (13)$$

M, sınıfların toplam sayısıdır, (a/a+c), t teriminin geçtiği durumlarda t'nin C_j sınıfında olma olasılığıdır. (b/a+b), C_j sınıfında t teriminin olmama olasılığıdır ve (c/c+d) C_j hariç tüm sınıflarda t teriminin olma olasılığıdır.

2.1.9 Değiştirilmiş Ayırtedici Öznitelik Seçici (MDFS)

Başarılı, ayırt edici bir öznitelik seçici olan DFS'in analizine ve modifikasyonuna dayanarak önerilen değiştirilmiş ayırt edici öznitelik seçici MDFS, özellikle metin sınıflandırmanın terim ağırlıklandırma alanında TF-MDFS olarak uygulanmıştır. TF-MDFS'in basit, etkin ve verimli olduğu gözlemlenmiştir (Chen et al. 2021).

Bu çalışmada, MDFS yöntemi öznitelik seçme metodu olarak kullanılmıştır ve DFS'e çarpan olarak $(d/(b+d))$ eklenerek MDFS formülü elde edilmiştir :

$$MDFS(t) = \sum_{j=1}^M \frac{(a/(a+c)) * (d/(b+d))}{(b/(a+b)) + (c/(c+d)) + 1} \quad (14)$$

$(d/(b+d))$, t teriminin olmadığı durumlarda C_j hariç tüm sınıflarda olmama olasılığıdır.

2.2 Sınıflandırıcılar

2.2.1 Destek vektör makineleri (Support vector machines-SVM)

SVM, verileri iki veya daha fazla kategoriye ayırabilen yaygın bir sınıflandırma tekniğidir. Sınıflandırma yapmak, yani iki sınıflı bir örnek uzayında pozitif ve negatif örnekler arasında ayırım yapmak için bir hiper düzlem kullanır. Çalışmalarda libSVM paketinin varsayılan değerleri kullanılmıştır (Chang and Lin 2011).

2.2.2 Karar ağaçları (Decision tree-DT)

Karar ağaçları doğrusal olmayan sınıflandırıcılardır. Karar ağaçları algoritmasının temel amacı, öznitelikleri kategorilere denk gelecek şekilde farklı bölgelere ayırmaktır (Quinlan 1986). İkili sınıflandırma ağacı en çok tercih edilen karar ağacıdır.

2.2.3 Çok terimli Basit Bayes (Multinomial naive bayes-MNB)

Basit Bayes, metin sınıflandırma konusunda sıklıkla kullanılan bir sınıflandırıcıdır. Modelleme ve durum geçişlerini belirtmek için kullanılan yöntemlerden biri olan Basit Bayes (Witten and Frank 2002), genellikle çok terimli verilerin ayrık ve sürekli değişkenlerini modellemek için kullanılır. Çok terimli Basit Bayes ise metin sınıflandırma için tasarlanmış bir Basit Bayes türüdür. Basit Bayes doküman üzerinde belirli kelimelerin varlığı ya da yokluğu ile ilgili modelleme yaparken, çok terimli Basit Bayes kelime sayılarını modelleme ve hesaplamalara öncelik verir.

2.3 Veri setleri

Reuters-21578: Reuters-21578 veri seti, haber makaleleri içeren bir doküman koleksiyonudur. 135 kategoriden oluşmaktadır. Dengesiz metin sınıflandırma için ilk 8 kategori kullanılarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çizelge 2'de Reuters-

21578 veri seti için eğitim ve test doküman sayıları verilmiştir.

Spam SMS: SMS Spam Koleksiyonu, SMS Spam araştırması için toplanan bir dizi SMS etiketli mesajdır. Yasal (legitimate) veya spam olmasına göre etiketlenmiş 5.574 mesajdan oluşan bir İngilizce SMS seti içerir. Deneysel çalışmada orijinal versiyon kullanılmıştır. Çizelge 3'te ise SPAM SMS veri seti için eğitim ve test doküman sayıları verilmiştir.

Bu çalışmada, tüm ön işleme adımları uygulanmıştır. Kök bulma işlemi için Porter kök çıkarma algoritması (Moayedikia *et al.* 2017) ve ağırlıklandırma yaklaşımı olarak TF-IDF (Schütze *et al.* 2008) kullanılmıştır. Her iki veri setinde de öznitelik sayıları olarak sırayla 30, 50, 100, 300 ve 500 seçilerek sınıflandırma başarıları ölçülmüştür.

Çizelge 2. Reuters-21578 Veri Seti (R8) Özellikleri

Sınıf adı	Eğitim Doküman Sayısı	Sınıf Dağılımı (%)	Test Doküman Sayısı	Toplam Doküman Sayısı
earn	2877	42	1087	3964
acq	1650	25	719	2369
money-fx	538	8	179	717
grain	433	6	149	582
crude	389	6	189	578
trade	369	5	117	486
interest	347	5	131	478
ship	197	3	89	286
Toplam	6800	100	2660	9460

Reuters-21578 Veri Seti (R8), earn ve acq adında sırayla %42 ve %25 dağılımları olan iki majör sınıf ve altı minör sınıf içermektedir.

Çizelge 3. Spam SMS Veri Seti Özellikleri

Sınıf adı	Eğitim Doküman Sayısı	Sınıf Dağılımı (%)	Test Doküman Sayısı	Toplam Doküman Sayısı
spam	522	14	225	747
legitimate	3378	86	1449	4827
Toplam	3900	100	1674	5574

Spam SMS Veri Seti ise, bir majör (legitimate) ve bir minör (spam) sınıf içeren binary (ikili) bir veri setidir.

2.4 Değerlendirme metriği (Makro-F1)

Özellikle dengesiz veri setlerinin kullanıldığı deneylerde değerlendirme metriği olarak Makro-F1 tercih edilmektedir. Makro-F1 formülü aşağıda verilmiştir:

$$Makro - F1 = \frac{1}{M} * \sum_{i=1}^M \left\{ \frac{2 * TP_{M_i}}{2 * TP_{M_i} + FP_{M_i} + FN_{M_i}} \right\} \quad (15)$$

TP: M_i sınıfında olan ve doğru şekilde sınıflandırılan doküman sayısı

FP: M_i sınıfında olmayan ve yanlış şekilde sınıflandırılan doküman sayısı

FN: esasen M_i sınıfında olmadığı halde yanlış şekilde sınıflandırılan doküman sayısı

M: toplam sınıf sayısı

3. Bulgular

İki farklı veri setinde gerçekleştirilen deneyler sonucu elde edilen sonuçlar Çizelge 4 ve Çizelge 5'te sunulmaktadır.

Çizelge 4. Reuters-21578 Veri Seti için SVM (a), DTREE (b) ve MNB (c) sınıflandırıcıları Makro-F1 değerleri

Öznitelik Seçme Metodları	Öznitelik Sayıları				
	30	50	100	300	500
NDM	44,328	49,26	53,71	68,2	72,13
DFSS	77,195	79,959	78,93	79,6	80,58
PFS	14,449	14,449	14,27	14,5	20,304
POISSON	76,23	79,26	79,73	80,8	80,48
CHI2	74,242	78,806	80,3	78,5	79,79
IG	70,315	77,357	80,03	80,5	80,04
GINI	74,425	79,361	79,73	80,1	80,86
DFS	76,771	79,794	80,3	79,1	79,66
MDFS	77,109	77,041	77,32	77,3	78,03

(a)

Öznitelik Seçme Metodları	Öznitelik Sayıları				
	30	50	100	300	500
NDM	45,574	50,115	54,28	71,2	71,53
DFSS	74,587	75,013	74,97	76,9	77,35
PFS	15,409	15,409	15,54	15,5	16,723
POISSON	73,301	72,873	74,47	77,7	77,65
CHI2	74,333	77,479	75,36	77,9	78,37
IG	71,726	72,999	76,1	78,4	77,54
GINI	71,875	74,926	74,63	76,3	77,68
DFS	74,95	76,684	76,65	77,9	78,43
MDFS	75,157	76,044	76,3	76,3	75,81

(b)

Öznitelik Seçme Metodları	Öznitelik Sayıları				
	30	50	100	300	500
NDM	44,405	49,844	54,93	73,2	74,32
DFSS	74,137	78,56	78,46	77,6	77,13
PFS	15,361	15,354	12,96	13,4	20,353
POISSON	75,88	77,652	78,28	79,5	77,8
CHI2	75,356	77,424	79,5	79,5	78,97
IG	70,659	76,52	76,27	76,9	75,75
GINI	74,458	79,212	78,98	78,8	77,96
DFS	73,69	77,45	78,81	79,3	77,59
MDFS	74,769	75,773	76,54	75,8	74,73

(c)

Çizelge 5. SPAM SMS Veri Seti için SVM (a), DTREE (b) ve MNB (c) sınıflandırıcıları Makro-F1 değerleri

Öznitelik Seçme Metodları	Öznitelik Sayıları				
	30	50	100	300	500
NDM	88,15	88,925	91,043	94,153	94,028
DFSS	89,802	92,319	93,742	94,747	93,106
PFS	89,482	89,206	91,252	91,134	91,560
POISSON	90,786	93,493	94,684	94,182	94,035
CHI2	90,786	91,645	93,501	94,453	94,059
IG	90,747	92,95	93,815	94,584	94,787
GINI	90,904	91,679	93,692	95,34	94,828
DFS	89,322	93,035	94,106	95,216	95,482
MDFS	87,338	89,206	91,252	91,134	91,56

(a)

Öznitelik Seçme Metodları	Öznitelik Sayıları				
	30	50	100	300	500
NDM	87,666	87,835	88,679	91,365	89,912
DFSS	89,685	90,394	90,734	89,802	88,554
PFS	88,293	89,295	91,043	91,229	91,529
POISSON	90,823	91,995	92,382	91,298	91,298
CHI2	90,823	90,393	92,382	91,298	91,298
IG	90,979	91,124	91,495	91,48	91,413
GINI	90,979	89,82	90,507	91,48	91,149
DFS	89,823	91,662	91,529	91,825	91,645
MDFS	87,054	89,02	90,624	90,739	90,813

(b)

Öznitelik Seçme Metodları	Öznitelik Sayıları				
	30	50	100	300	500
NDM	89,423	89,186	91,576	94,807	94,95
DFSS	90,972	92,734	93,621	94,97	94,97
PFS	88,113	88,075	90,959	93,176	93,176
POISSON	91,731	93,166	94,011	94,869	94,869
CHI2	91,731	93,043	94,011	94,869	94,869
IG	92,8	92,771	95,034	94,89	94,89
GINI	92,193	93,466	93,986	95,178	95,178
DFS	90,904	93,221	93,661	95,428	95,428
MDFS	87,91	86,711	88,016	90,713	90,754

(c)

Çizelge 4'e göre Reuters-21578'in kullanıldığı deneyde SVM Makro-F1 değeri olarak 80 civarında en yüksek değerlerini vermiştir. Onun ardından sırasıyla 79 ve 78 civarında MNB ve DTREE sınıflandırıcılarının sonuçları gelmektedir. Reuters-21578 veri setinde SVM > MNB > DTREE sıralamasını yapmak mümkündür. Makro-F1 değerleri arasında fark çok açık değildir. Yüksek değerler genellikle 300, 500 öznitelik sayılarında görülmüştür. Özellikle DTREE ve MNB sınıflandırıcılarında CHI2 ve DFS 78 ve 79 Makro-F1 değerleriyle diğer öznitelik seçme yöntemlerine göre ön plandadır. PFS ise tüm sınıflandırıcılarda 20 ve altı Makro-F1 değerleriyle en düşük Makro-F1 sonuçlarını vermiştir. PFS yöntemini 74 ve altı Makro-F1 değerleriyle NDM isimli yöntem takip etmektedir.

Çizelge 5'teki SPAM SMS veri seti üzerinde yapılan deneylerde sınıflandırıcı başarı sıralaması SVM \approx MNB > DTREE şeklindedir. SVM ve MNB 95 Makro-F1 civarında sonuçlar verirken DTREE 91-92 değerleri aralığındadır. Ancak, Makro-F1 başarı düzeyleri Reuters-21578 veri setine göre yüksektir. Öznitelik sayılarına göre bakıldığında SVM ve MNB yüksek öznitelik sayılarında düşük öznitelik sayılarına göre yüksek sonuçlar vermektedir. Buna karşın, DTREE sınıflandırıcı 50, 100, 300 öznitelik boyutlarında diğer öznitelik boyutlarına göre yüksek makro-F1 sonuçları vermiştir. DFS, diğer öznitelik seçme yöntemlerine göre SVM ve MNB'de 95 ve üzeri değerlerle daha başarılı sonuçlar vermiştir. PFS, Reuters-21578 veri setindeki kadar düşük değerler vermemiştir ve diğer öznitelik seçme yöntemleriyle çok yakın Makro-F1 değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 4 ve Çizelge 5'te verilen sonuçların daha iyi yorumlanabilmesi için Çizelge 6 ilave olarak sunulmuştur. Çizelge 6'da, deneyler sonucunda elde edilen Makro-F1 değerlerine göre en iyi skorları üreten öznitelik seçme yöntemleri görülmektedir.

Çizelge 6. Öznitelik seçim metodlarının en iyi Makro-F1 değerlerini ürettiği durumların sayısı

DFS	CHI2	POISSON	GINI	IG	DFSS
6	4	3	3	3	1

Çizelge 6'dan görüleceği üzere dengesiz metin sınıflandırmada öznitelik seçimi noktasında başarı açısından DFS ve CHI2 yöntemleri diğer yöntemlere göre önde görünmektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada Reuters-21578 ve SPAM SMS veri setleri üzerinde SVM, DTREE ve MNB sınıflandırıcıları kullanılarak 9 farklı öznitelik seçme yönteminin başarıları kıyaslanmıştır. 2 farklı veri seti üzerinde yapılan deneyler sonucunda, genel olarak DFS ve CHI2'nin iyi performans verdiği, PFS ve NDM'nin ise özellikle Reuters-21578 veri seti üzerinde kötü performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmanın devamı olarak spesifik alanlardaki dengesiz metin sınıflandırma problemi çerçevesinde öznitelik seçim yöntemlerinin performansı araştırılabilir.

5. Kaynaklar

Chang, C.C. and Lin, C.J., 2011. LIBSVM: a library for support vector machines. *ACM transactions on intelligent systems and technology (TIST)*, **2(3)**, 1-27.

Chen, L., Jiang, L. and Li, C., 2021. Modified DFS-based term weighting scheme for text classification. *Expert Systems with Applications*, **168**, 114438.

Chen, X.W. and Wasikowski, M., 2008. Fast: a roc-based feature selection metric for small samples and imbalanced data classification problems. *In Proceedings of the 14th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining*, 124-132.

Chen, Y.T. and Chen, M.C., 2011. Using chi-square statistics to measure similarities for text categorization. *Expert systems with applications*, **38(4)**, 3085-3090.

Forman, G., 2003. An extensive empirical study of feature selection metrics for text classification. *J. Mach. Learn. Res.*, **3(Mar)**, 1289-1305.

Galar, M., Fernandez, A., Barrenechea, E., Bustince, H. and Herrera, F., 2011. A review on ensembles for the class imbalance problem: bagging-, boosting-, and hybrid-based approaches. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, **42(4)**, 463-484.

Gasparetto, A., Marcuzzo, M., Zangari, A. and Albarelli, A., 2022. A Survey on Text Classification Algorithms: From Text to Predictions. *Information*, **13(2)**, 83.

Hajibabaei, P., Malekzadeh, M., Ahmadi, M., Heidari, M., Esmailzadeh, A., Abdolazimi, R. and James Jr, H., 2022. Offensive language detection on social media based on text classification. *In 2022 IEEE 12th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, 0092-0098. IEEE.

He, H. and Garcia, E.A., 2009. Learning from imbalanced data. *IEEE Transactions on knowledge and data engineering*, **21(9)**, 1263-1284.

Kamalov, F., Thabtah, F. and Leung, H.H., 2022. Feature Selection in Imbalanced Data. *Annals of Data Science*, 1-15.

Liu, H. and Yu, L., 2005. Toward integrating feature selection algorithms for classification and clustering. *IEEE Transactions on knowledge and data engineering*, **17(4)**, 491-502.

Maldonado, S., Weber, R. and Famili F., 2014. Feature selection for high-dimensional class-imbalanced data sets using support vector machines. *Information sciences*, **286**, 228-246.

Moayedikia, A., Ong, K. L., Boo, Y. L., Yeoh, W.G. and Jensen, R., 2017. Feature selection for high dimensional imbalanced class data using harmony search. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **57**, 38-49.

Ogura, H., Amano, H. and Kondo M., 2009. Feature selection with a measure of deviations from Poisson in text categorization. *Expert Systems with Applications*, **36(3)**, 6826-6832.

Ogura, H., Amano, H. and Kondo, M., 2011. Comparison of metrics for feature selection in imbalanced text classification. *Expert Systems with Applications*, **38(5)**, 4978-4989.

Pouramini, J., Minaei-Bidgoli, B. and Esmaili, M., 2018. A novel feature selection method in the categorization of imbalanced textual data. *KSII Transactions on Internet and Information Systems (TIIS)*, **12(8)**, 3725-3748.

Quinlan, J.R., 1986. Induction of decision trees. *Machine learning*, **1(1)**, 81-106.

- Rehman, A., Javed, K. and Babri, H.A., 2017. Feature selection based on a normalized difference measure for text classification. *Information Processing & Management*, **53(2)**, 473-489.
- Schütze, H., Manning, C.D. and Raghavan, P., 2008. Introduction to information retrieval. Vol. **39**. Cambridge University Press Cambridge.
- Shang, W., Huang, H., Zhu, H., Lin, Y., Qu, Y. and Wang, Z., 2007. A novel feature selection algorithm for text categorization. *Expert Systems with Applications*, **33(1)**, 1-5.
- Uysal, A.K. and Gunal, S., 2012. A novel probabilistic feature selection method for text classification. *Knowledge-Based Systems*, **36**, 226-235.
- Uysal, A.K., Günal, S., Ergin, S. and Günal, E.Ş., 2012. Detection of SMS spam messages on mobile phones. In *2012 20th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 1-4. IEEE.
- Witten, I.H. and Frank, E., 2002. Data mining: practical machine learning tools and techniques with Java implementations. *Acm Sigmod Record*, **31(1)**, 76-77.
- Zong, W., Wu, F., Chu, L. K. and Sculli, D., 2015. A discriminative and semantic feature selection method for text categorization. *International Journal of Production Economics*, **165**, 215-222.

AKÜ FEMÜBİD 23 (2023) 025201 (380-394)

AKU J. Sci. Eng. 23 (2023) 025201 (380-394)

DOI: 10.35414/akufemubid.1121652

Araştırma Makalesi / Research Article

Dört Eksen Adım Motor Konum Denetimli Üretim Süreci Tasarımı: Deney Seti Donanımı, Yazılımı ve Uygulaması

Burcu KESKİN^{1*}, İlyas EMİNOĞLU²¹ Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 55200, Samsun, Türkiye² Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 55200, Samsun, TürkiyeSorumlu yazar e-posta: burcu.keskin@omu.edu.tr
e-posta: ilyase@omu.edu.trORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1186-1220>
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4143-1395>

Geliş Tarihi: 26.05.2022

Kabul Tarihi: 02.03.2023

Öz

Uygulamalı eğitim, mühendislik öğrencilerinin gerçek bir sorunla karşı karşıya kaldıklarında problemlere çözüm getirebilme kabiliyeti kazandırmaktadır. Elektrik Elektronik Mühendisliği Kontrol ve Kumanda alt bölümünde verilen teorik derslerin yanında eğitimin uygulamalı olarak da desteklenmesi gerekmektedir. Kontrol laboratuvarında öğrencilere adım motor ile çalışan konum/pozisyon denetimli bir prosesin bileşenlerini ve işleyişini gösterebilmek amacı ile dört adım motorlu servo kabiliyetli eğitim seti kavramsal olarak kurgulanıp, tasarlanıp, imal edilip, çalıştırılmıştır. Kaynak yapma, delme, vidalama gibi ardışık işlemlerin üretim sürecini temsil eden konum/pozisyon denetimli eğitim seti hem mikrodenetleyici hem programlanabilir mantık denetleyicisi (PLC) ile çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Bu çalışmada eğitim setinin konum/pozisyon denetimi PLC kullanılarak yapılmıştır. Eğitim seti kontrol sistemleri laboratuvarında öğrenim gören öğrencilere konum/pozisyon denetim prosesinde yer alan, adım motorları, sürücüler, kayış kasnak yapısı, vidalı miller, güç kaynakları, sınır anahtarları, optik konum algılayıcılar, algoritma çıkarma, merdiven diyagramına çevirme ve konum/pozisyon denetimi hakkında deneyim kazanmalarını sağlayacaktır. Böylece eğitim seti kontrol sistemleri laboratuvarında öğrenim gören öğrencilerin birinci elden uygulamalı deneyim edinmelerine katkıda bulunacaktır.

Anahtar kelimeler

Eğitim seti; Adım motor; Hareket denetimi; PLC; Tasarım

Four-Axis Stepper Motor Position Controlled Manufacturing Process Design: Hardware, Software and Application

Abstract

Hands-on training gives engineering students the ability to find solutions when faced with a real problem. In addition to theoretical courses offered in Control Systems branch of the Electrical and Electronics Engineering department, education should be supported practically. In the control laboratory, a four-step motor servo-capable training setup was conceptually fictionalized, designed, manufactured and operated in order to show the students the components and operation of a motion control process working with the step motors. The motion-controlled training setup, which simulates the manufacturing process of welding, drilling, and screwing etc. is designed to be controlled by both a microcontroller and a programmable logic controller (PLC). In this study, the training set was controlled by using PLC. The training setup will provide the students studying in the control systems laboratory to gain experience in the servo controlled manufacturing process, stepper motors, drivers, belt and pulley structure, screw shafts, power supplies, limit switches, optical position sensors, developing algorithm, PLC programming, position control. As a result, the training set will contribute to the students' hands-on experience in the control systems laboratory.

Keywords

Training setup; Step motor; Motion Control; PLC; Servo controlled process; Design

1. Giriş

Mühendislik eğitiminde verilen teorik bilginin faydası ve kalıcılığı için uygulamaların kullanımı oldukça önemlidir. Uygulamalar sayesinde kazanılacak olan pratik deneyim, öğrencilere simülasyon veya fiziksel test donanımı gibi yöntemlerle sunulabilmektedir. Bu yöntemlerden biri olan deney setlerinin kullanımı, eğitim açısından önemli bir katkı sağlamaktadır (Freeman *et al.* 2014, Kheir *et al.* 1996). Kontrol sistemleri eğitimi için bazı ticari firmalar, adım ve servo motor eğitim setleri tasarlayarak imal etmektedirler. Bunlardan biri, muhtelif eğitim setlerinin yanında adım motoru eğitim setleri de üreten bir Avrupalı firmadır (Int Kyn. 1). Kuzey Amerikalı başka bir firmanın ise kontrol, robotik uygulamaları için servo modülleri bulunmaktadır. Aynı zamanda bu firma kendi sistemlerinin sayısal ikizlerini çıkararak sanal laboratuvar çözümleri sunmaktadır (Int Kyn. 2). Farklı bir Kuzey Amerikalı firma ise, akademik ve endüstriyel alanda kontrol sistemleri eğitimi için ekipmanlar sağlamaktadır (Int Kyn. 3). Kontrol alanında çeşitli eğitim setleri üreten Asyalı bir firma tarafından üretilmiş; ardışık olarak pozisyon, hız ve akım geri beslemeli olarak kontrol edilebilen servo motor eğitim setleri bulunmaktadır (Int Kyn. 4). Yine Avrupalı bir firma otomasyon, robotik alanında eğitim sistemleri sağlamaktadır. Bu firmanın MATLAB/Simulink Real Time Workshop/ Real Time Windows Target (RTW/RTWT) ortamında gerçek zamanlı olarak çalışan modüler servo eğitim seti bulunmaktadır (Int Kyn. 5). Yerli bazı firmalar da kontrol sistemleri eğitimi için PLC ile denetlenen adım ve servo motor eğitim setleri tasarlamakta ve imal etmektedir (Int Kyn. 6, Int Kyn. 7).

Akademik çalışmalarda adım ve servo motor eğitimine katkı sağlamak amacıyla farklı deney seti tasarımları yayınlanmıştır. Rata ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada kullanılmış iki eksen grafik yazıcı cihazı ve (Mitsubishi) PLC'nin de içinde bulunduğu bir laboratuvar seti tasarımı yapılmıştır (Rata and Rata 2015). Bu çalışma ile öğrencilere pratik deneyim sağlayacak donanımsal ve yazılımsal maliyet etkin bir deney seti çözümü sunulmuştur. Oravec ve arkadaşları ise kullanıcı dostu ve düşük

maliyetli bir 2B grafik yazıcı tasarlamışlardır (Oravec *et al.* 2016). Araştırma ve eğitim açısından tasarlanan bu cihazdaki adım motoru mikroişlemci kullanılarak denetlenmiştir. Awad ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada ise adım motorlarının kullanıldığı başka bir alan olan güneş takip sistemi, PLC ve mikrodenetleyici kullanılarak denetlenmiştir (Awad *et al.* 2019). Peng ve arkadaşları adım motorları ve PLC kullanarak, malzeme taşıyan mobil bir robot tasarımı ve denetimini gerçekleştirmişlerdir (Peng *et al.* 2016). Bu çalışmanın eğitim ve araştırma açısından mobil bir platform sunduğu yazarları tarafından ifade edilmektedir. Bir başka çalışmada ise, ilaç endüstrisi için bir konveyör hattı geliştirilmiştir (Antipin *et al.* 2018). Geliştirilen konveyör hattında bulunan iki konveyörün senkronize hareketi için adım motorları kullanılmıştır. Bu çalışmalara ilave olarak, uzaktan erişimli laboratuvarlar giderek yaygınlaşmaktadır. Bu bağlamda, yapılan bir çalışmada PLC (ABB'nin iştiraki olan B&R ürünü), iki adet adım motoru ve iki adet delikli diskten oluşan eğitim seti uzaktan erişimli olarak tasarlanmıştır (Cernohorsky and Richter 2015). Böylece, öğrenciler disklerin senkron hareket denetimini uzaktan erişimle yapabilmektedirler. Bir diğer çalışmada, adım motorun yarım adım (half step) ve tam adım (full step) hareketi ile nasıl çalıştığı, hız çıkıntılarının nasıl şekillendiği deneysel olarak gösterilmiştir (Irmak *et al.* 2012). Fukumoto ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, yük ve tahrik motorunu temsilen kullanılan iki adet adım motorunun içinde yer aldığı bir deney seti tasarımı yapılmıştır (Fukumoto *et al.* 2021). Adım motorları, tasarlanan set içinde bulunan mikroişlemcilerle uzaktan denetlenebilmektedir. Ayrıca bu set adım motorlarının akım dalga şekillerini ve görsel olarak motorun hareketini de uzaktan izlemeye imkan sağlamaktadır.

Bu çalışmaya Ondokuz Mayıs Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Kontrol ve Kumanda alt bölümü derslerinde kullanılmak amacıyla bir üretim sürecini temsil eden dört adım motorundan (ve kızılötesi sensörlerden) oluşan servo kabiliyetli (konum/pozisyon denetimli) deney seti gereksiniminden hareketle yola çıkılmıştır. Adım motorları endüstriyel servo uygulamalarında,

biyomedikal cihazlarda ve bilgisayar ekipmanları gibi geniş bir alanda kullanılmaktadır. Adım motorları girişten verilen elektriksel darbeleri mekanik bir harekete dönüştürmeyi sağlar. Ancak doğru akım motorlarından farklı olarak adım motorları yalnızca güç kaynağı bağlayarak dönmemektedir. Bu yüzden bu motorların sayısal bir darbe tarafından uyarılması gerekmektedir. Özetle bu motorların kontrolü için sayısal işaret üretecek olan PLC, mikrodenetleyici gibi araçların kullanımının bilinmesi önemlidir. Adım motorları hem pozisyon hem de hız açısından herhangi bir geri besleme gerektirmedikleri, konum hataları birikimli olmadıkları ve sayısal ekipmanlarla uyumlu çalıştıkları için caziptirler (Kenjo 1984). Adım motorların hareketleri ayırık ve tekrarlanabilir olduğundan hassas konumlandırmayı kolaylaştırmaktadır. Yüksek hızda olmalarının yanı sıra tutma ve bırakma (stick-slip) problemleri olmadan çok yavaş hareket edebilmektedirler. Ayrıca adım motorlarının tutma torkları yüksek olduğundan fren kullanım ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır (Larson 1979).

Laboratuvara kaynak, delme, vidalama, gibi ardışık işlemleri yapabilecek kabiliyette çok eksenli (karmaşık) üretim sürecini temsil eden konum/pozisyon denetimli bir deney seti robotik uygulamaları eğitime büyük katkı sağlayacağı düşünülerek tasarlanmıştır.

Bu çalışmadaki deney seti dört adım motoru, motor sürücüler, güç kaynakları, optik sensörler, sınır anahtarları, acil durdurma butonu, klemens, endüstriyel tip fiş, iki adet hareketli kablo kanalı, iki adet vidalı mil, mikrodenetleyici içeren çok amaçlı denetim kartı ve hoparlörlerden oluşmaktadır. Set üstünde bulunan mikrodenetleyici içeren çok amaçlı denetim kartı öğrencilere set hakkında sesli ve yazılı olarak bilgi vermek ve sistemi denetlemek amacıyla dahili olarak bulunmaktadır. Düzenekte adım motorları PLC (veya mikrodenetleyici) ile denetlenmektedir. Kontrol ve Kumanda bölümü dersleri için Siemens S7-1200 serisi PLC'ler kullanıldığından, bu düzenekte bu model PLC tercih edilmiştir. Harici olarak kullanılan PLC ile eğitim setinde konum/pozisyon denetiminin nasıl

gerçekleştirileceği öğrencilere aktarılacaktır. Düzenek eğitim sürecinde kullanılırken öncelikle öğrencilere, düzenekle ilgili gerekli bilgiler aktarılacak ve ilk uygulama gösterimi yapılacaktır. Daha sonra uygulaması yapılan konum/pozisyon denetimini, öğrencilerin uygulamalı olarak kendilerinin gerçekleştirmesi istenecektir. Böylelikle düzenek sayesinde derste kazanılan teorik bilginin pratiğe aktarılması sağlanacaktır.

Bu makale giriş, sistem tasarımı ve kontrolü hakkında bilgi veren materyal ve metot, bulgular ve tartışma ile sonuç bölümlerinden oluşmaktadır.

2. Materyal ve Metot

Hareket denetiminde genellikle AC servo motorlar tercih edilmektedir fakat bu tip motorların fiyatları adım motorlara göre nispeten daha yüksektir. Şekil 1'de servo motor, adım motor, DC motor ve sürücüler sırasıyla gösterilmiştir. Şekil 2'de servo motor ve adım motorlarıyla oluşturulan birkaç ticari eğitim seti gösterilmiştir. Şekil 2.b, Şekil 2.c ve Şekil 2.d setleri temel olarak servo motor hız ve konum kabiliyetini gösteren setlerdir. Bu setler servo motorun nasıl çalıştırılacağı ve ölçümlerin nasıl alınacağını gösterildiği ürünlerdir. Şekil 2.a ise bir üretim sürecini temsil eden bir eğitim setidir. Bu set ise tek eksen konum denetiminin adım motoruyla yapıldığı bir servo uygulamasıdır.



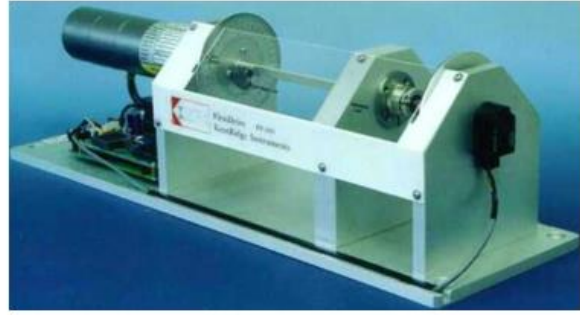
Şekil 1. Servo, adım, doğru akım motorları ve sürücüler

2.1 Eğitim setinin donanımsal tasarımı

Eğitim seti Çizelge 1'de verilen elemanlardan oluşmaktadır. Malzemelerin maliyeti yaklaşık 850\$ civarındadır. Adım motor setine ait; disk, eyleyici ve sensör kalıpları üç boyutlu yazıcı kullanılarak imal edilmişlerdir. Üç boyutlu yazıcıda basılan ürünlerde plastik malzeme kullanılmıştır. Şekil 3 üç boyutlu imalat çizimleri görülmektedir. Şekil 4 üç boyutlu çizimlerin baskıları verilmiştir.



a)



b)



c)



d)

Şekil 2. Servo ve adım motor eğitim setleri

Şekil 5’de gösterilen adım motor seti üç numara (3) ile gösterilen dört adet adım motoru, dört adet adım motor sürücüsü (1), iki adet vidalı mil (8), üç adet DC besleme kaynağı (2), altı adet optik sensör ve dört adet sınır anahtarı (6), acil durumlar için acil durdurma butonu (5), sistemin nasıl çalıştığına dair sesli anlatımın ve ilk sunumun yapıldığı bir mikrodenetleyici ile tasarlanmış çok amaçlı denetim kartı (7), sesli anlatım için hoparlörler (4), bağlantılar için kablolama ve klemensler, 3B yazıcıdan basılmış olan muhtelif ürünlerden oluşmaktadır. Sistemde bulunan dört motorun işlevi tanımlanacak olursa ilk motor (M1, disk vidalı mili) birinci vidalı mili hareket ettirmektedir, birinci vidalı mil üzerinde muhtelif delikler olan bir disk barındırmakta, diskteki muhtelif delikler, vidalanacak, kaynak yapılacak üretim parçalarını temsil etmektedir. İkinci motor (M2, eyleyici vidalı mili) ikinci vidalı mili hareket ettirmekte olup üzerinde vida söküp takmayı vb. temsil eden, ileri geri hareketi yapan eyleyiciyi taşımaktadır. Muhtelif iş parçalarını veya iş duraklarını temsil eden disk, üçüncü motor (M3) tarafından döndürülmektedir. M3 motoru veya döner disk, M1 motorunun sürdüğü birinci vidalı

milin arabası üzerindedir. Dördüncü motor (M4) ise kaynak, vida sıkımayı temsil eden eyleyiciye güç aktarmaktadır. M4 motoru ve eyleyici, ikinci vidalı milin arabasında bulunmaktadır.



Şekil 3. Eğitim seti üç boyutlu imalat çizimleri**Çizelge 1.** Eğitim setinde kullanılan eleman listesi

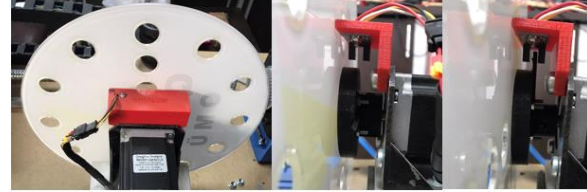
Ürün	Adet	Fiyat (\$)
Nema 23 adım motoru	2	47
Nema 34 adım motoru	2	169
Microstep sürücüsü	2	30
CWD556 sürücü	2	118
Mean Well LRS-350-36-KO güç kaynağı	2	74,36
Helios S-35-12 güç kaynağı	1	8,31
Optik sensör	6	4,6
Sınır anahtarı	4	2,6
Acil durdurma butonu	1	1,95
Klemens	2	4,55
Endüstriyel tip fiş	1	16,25
Hareketli kablo kanalı	2	26,64
Vidalı mil	2	50
Vidalı mil uç yatak	4	56
Lineer kızak lineer ray araba	2	40
Lineer kızak lineer ray	4	80
3B baskı ürünleri	-	-
Nema 23 flanş	2	8
Nema 34 flanş	2	15,6
Nema 34 gergi ayar flanş	2	18,2
Kasnak	4	16,25
Kayış	2	9,75
Mikroişlemci bölmesi	1	30
Hoparlör	2	16,25
İkaz lambası	1	13

Sistemin yeniden kurulumunun yapılabilmesi ve bağlantılarda kopukluk gibi oluşabilecek çeşitli hataları önlemek için E-Plan üzerinden sistemin elektriksel bağlantı şeması çıkarılmıştır. Ek'de E-Plan projesi gösterilmiştir.

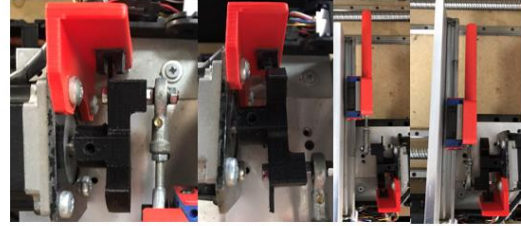
2.2 Sistem donanımı

Eğitim setinde dört adet adım motor bulunmaktadır. Çizelge 1'den de görüldüğü gibi iki tip Nema adım motoru kullanılmıştır. Vidalı milleri hareket ettiren motorlar daha fazla torka ihtiyaç duyduğundan Nema 34 motorları kullanılmıştır. Disk ve eyleyicinin

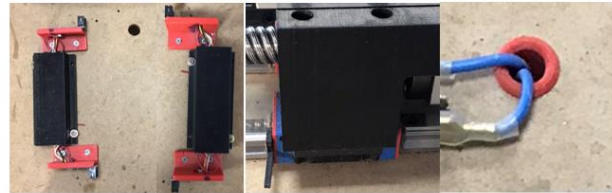
(döner hareket ileri geri harekete çeviren mekanik parça) daha az torka ihtiyacı olduğu için Nema 23'ler kullanılmıştır.



a) Disk 3D baskı parçaları



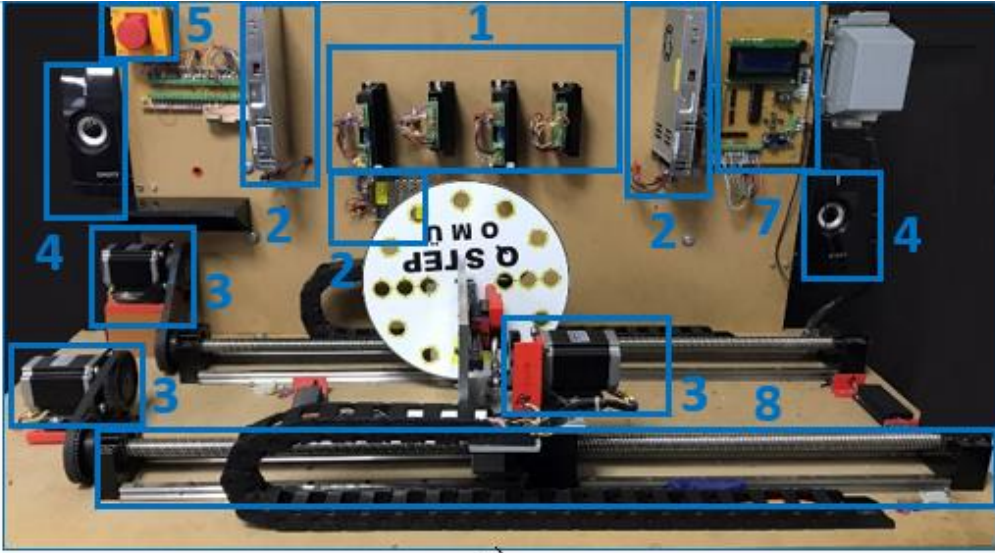
b) Eyleyici 3D baskı parçaları



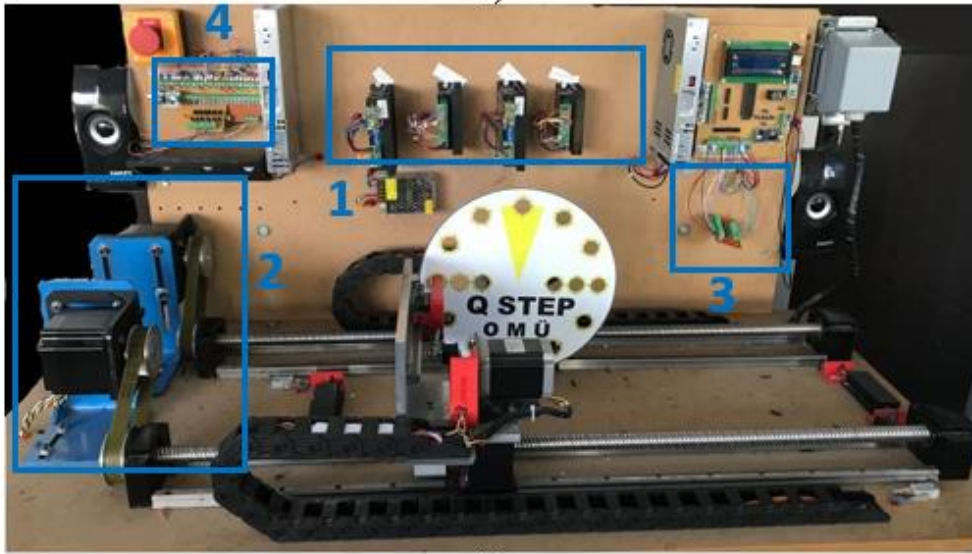
c) Taban sensör 3D baskı parçaları d) Taban tabla 3D baskısı e) Rekor 3D baskısı

Şekil 4. Eğitim seti üç boyutlu imalat çizim baskıları

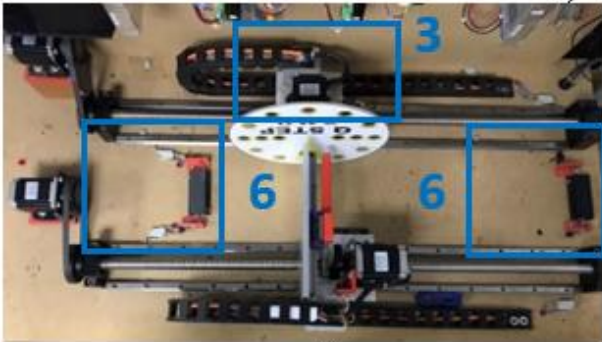
Adım motorları süren sürücüler motorlara uygun sürücüler seçilmiştir. Nema 34 motoruna uygun akım verebilecek CWD556 sürücüsü, Nema 23 motoruna uygun Microstep sürücüsü tercih edilmiştir. Nema adım motorunun CWD556 sürücüsüne ve denetleyiciye bağlantısı Şekil 6'da gösterildiği gibidir. Burada adım motor ve sürücü bağlantısı için Şekil 7'de gösterilen bağlantı şekillerinden paralel bağlantı yapısı seçilmiştir. Bunun nedeni ise yüksek hız istenmesidir. Şekil 6'daki gösterimde anahtar (DIP switch) ayarları gösterilmemiştir. Anahtar ayarlarıyla motora bir tam dönüş için kaç darbe uygulanacağı ve en fazla ne kadar akım verilebileceği gibi parametreler seçilebilmektedir. Bu seçime göre adım motoruyla bir darbeye kaç derece gidebileceği ayarlanabilmektedir. Bu seçim CWD556 sürücüsü için 5.,6.,7. ve 8. anahtarların ayarlanmasıyla değiştirilebilmektedir.



a)



b)

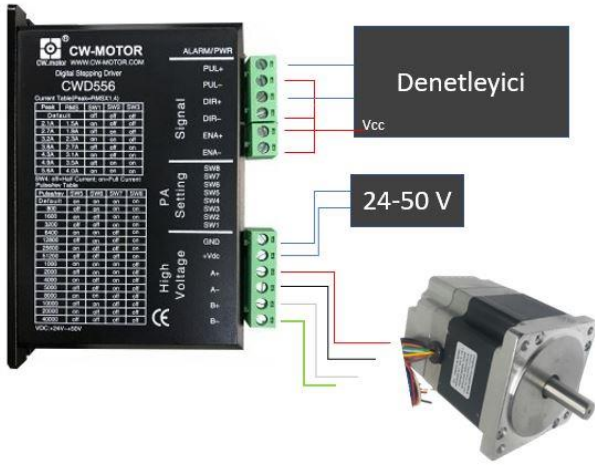


c)

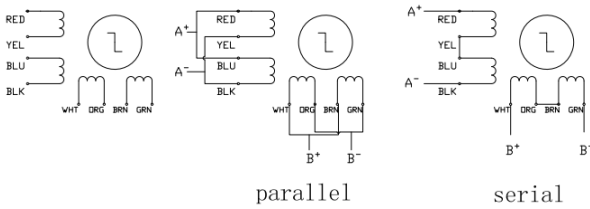


d)

Şekil 5. (a) Eğitim seti ilk prototip, (b) nihai prototip (1,2,3 yapılan değişiklikler), (c) üstten görünüşü, (d) arkadan görünüşü

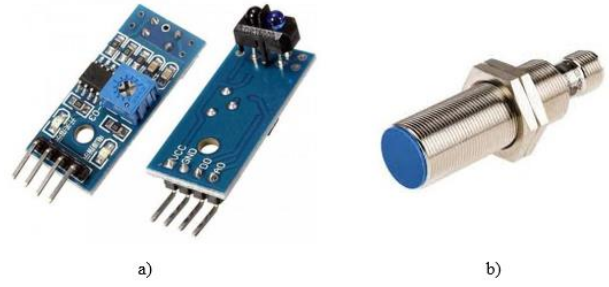


Şekil 6. Nema 34 adım motorunun CWD556 sürücüsü ve denetleyici bağlantısı



Şekil 7. Nema 34 adım motorunun CWD556 sürücüsüne paralel ve seri bağlantı yapıları

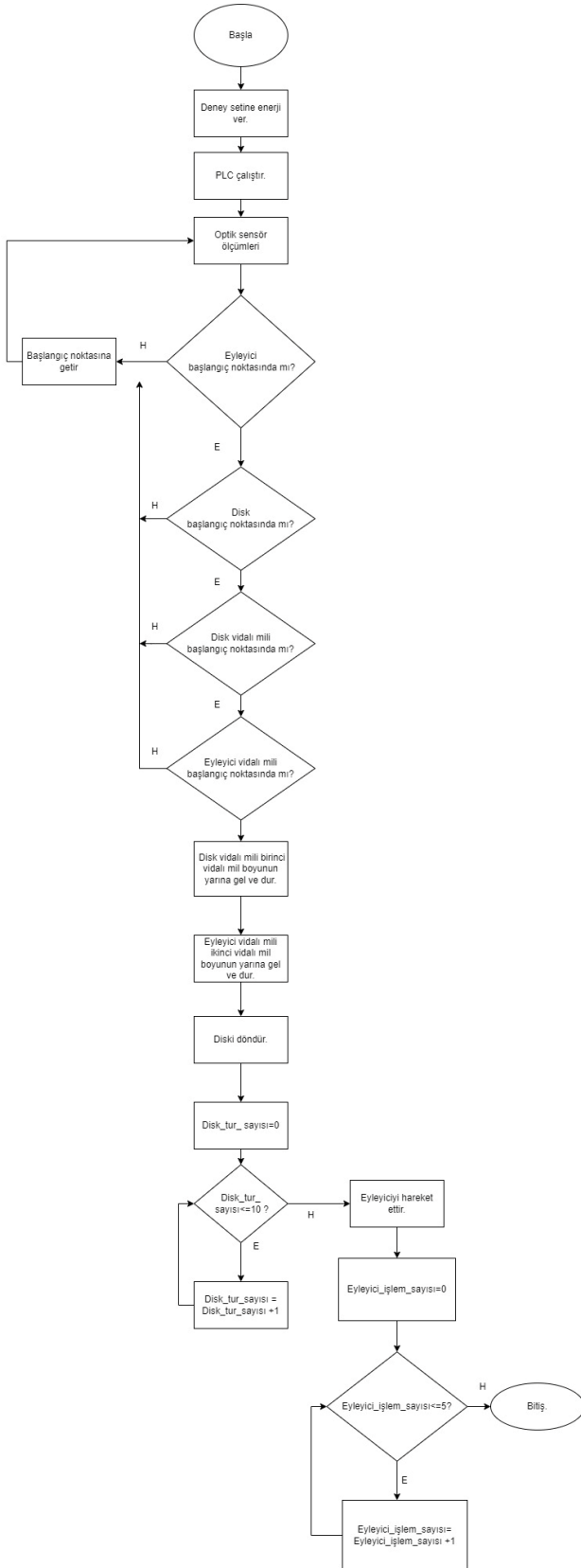
Akım ayarı ise 1.,2.,3. anahtarların ayarlarıyla yapılabilmektedir. Motor durağanken (sabit konumda iken), motorun tutma kuvveti 4. anahtarla alakalıdır. Adım motor setinde yüksek torka ihtiyaç duyulduğu durumlarda adım motorunun yapısı kaynaklı adım kaçırmaları oluşabilmektedir. Bu durumun engellenmesi için belirlenen senaryo çalıştırılırken hatanın oluşmasını engelleyecek şekilde anahtar ayarları seçilmiştir. Nema 24 motorunu süren sürücü içinde yapılan ayarlamalar benzer olmakla beraber anahtar adlandırmaları gibi birkaç cüzi farklılığa dikkat edilerek gerekli ayarlamalar yapılmıştır. Şekil 8.a'da deney setinde kullanılan optik sensörler görülmektedir. Bu sensörler ekonomik olması dolayısıyla tercih edilmiştir fakat endüstriye yönelik olarak Şekil 8.b'deki bir manyetik sensörde kullanılabilir. Sınır anahtarları, optik sensörün hemen sonrasına yerleştirilmiştir. Eğer optik sensörün temsil ettiği başlangıç noktası (yazılımsal vb. nedenlerle) aşılabilecek olursa sınır anahtarının NC (normalde kapalı) kontağı NO (normalde açık) durumuna geçip sistemin enerjisini kesmekte yani sistem donanımsal olarak durdurulmaktadır.



Şekil 8. (a) Optik sensör, (b) Manyetik sensör

2.3 Sistemin çalışması

Kurulumu yapılan deney düzeneği üzerinde bulunan dört adım motoru endüstri de sıkça kullanılan PLC ile denetlenecektir. Adım motorları konum/pozisyon denetimi ile iki farklı senaryoya göre kontrol edilecektir. İlk senaryo, dört adım motorun da teker teker ileri ve geri yönde olmak üzere farklı hızlarda çalıştırılmasıdır. İkinci senaryo ise Şekil 9'daki algoritmada gösterildiği gibi ilk olarak eğitim seti enerjilendirilecektir. Daha sonra harici olarak kullanılan PLC çalıştırılacaktır. Sistem başlangıç noktasına getirilirken eyleyicinin diske zarar vermemesi zorunludur. Bunun için ilk olarak eyleyicinin başlangıçta olup olmadığını algılanması gereklidir. Eğer eyleyici sensörü başlangıç noktasında ise (sensör lojik 1 üretiyorsa) sırasıyla disk sensörü, disk vidalı mil sol sensörü, eyleyici vidalı mil sol sensörü sayısal çıkışları kontrol edilecektir. Yapılan kontrollere göre motorlar başlangıç noktasına getirilecektir. Bu durumda tüm sensör çıkışları (eyleyici sensörü, disk sensörü, disk vidalı mil sol sensörü, eyleyici vidalı mil sol sensörü) lojik 1 verir. Başlangıç konumuna hizalanma sağlandıktan sonra, M1 motoru vidalı mili döndürerek, vidalı milin taşıdığı döner diski önceden belirlenmiş mesafeye konumlandıracaktır. M2 motoru eyleyici vidalı milini döndürerek, üzerindeki eyleyiciyi döner diskin tam karşısına hizalanmasını sağlayacaktır. Hizalanma işlemi tamamlandıktan sonra, M3 motoru diski 10 tur döndürecek ve duracaktır. Son olarak M4 motoru eyleyiciye ileri geri hareketi yaptırarak, iş parçasını temsil eden geometriden 5 kez geçirerek duracak ve üretim sürecinin bir parçasını temsil eden konum denetimi sonlanacaktır.



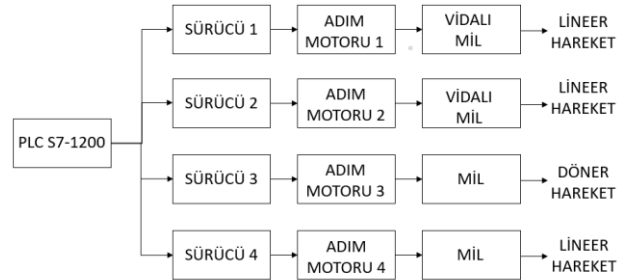
Şekil 9. Üretim süreci parçasını temsil eden konum/pozisyon denetim algoritması

2.4 Kontrol uygulaması

Eğitim seti hem PLC hem de mikroişlemci ile kontrol edilebilecek şekilde yapılmıştır. Bu sayede farklı derslerde bu iki araçtan birini kullanarak öğrenciler

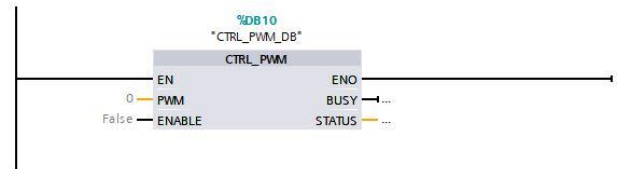
kendi kodlarıyla sistemin kontrolünü harici olarak yapabilmektedir. Sistemde dört adet kontrol edilmesi gereken adım motoru bulunmaktadır.

Setin blok şeması Şekil 10'da gösterilmiştir. Eğitim seti PLC S7 1200 serili PLC ile harici olarak kontrol edilmiştir. Programlama Siemens firmasının TIA PORTAL yazılımı aracılığıyla yapılmıştır.



Şekil 10. Sistemin blok şeması

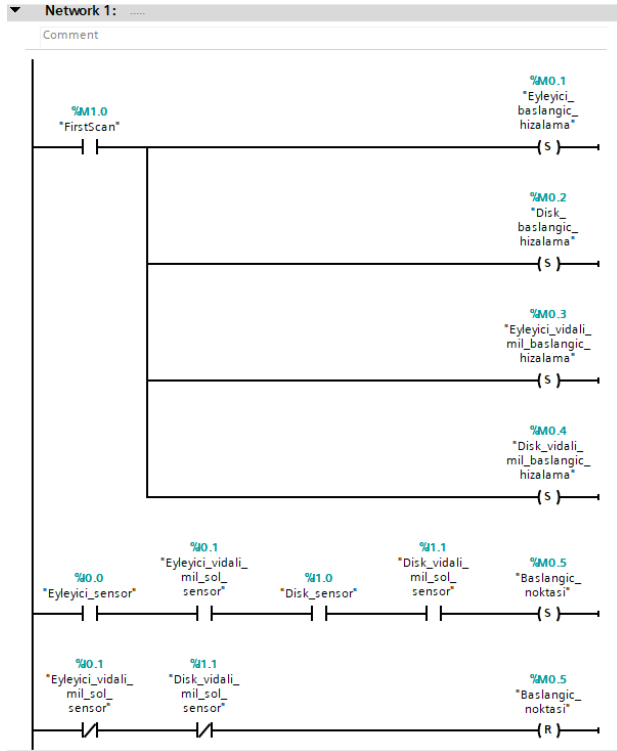
Sistemin blok şemasından görüldüğü gibi üç adet adım motoru lineer ve bir adet adım motoru döner hareketi sağlamaktadır. Ayrıca tüm motorlar PLC ile kontrol edilmektedir. Set PLC ile kontrol edilirken TIA PORTAL'da bulunan Şekil 11'deki PWM (Pulse Width Modulation) bloğu kullanılmıştır.



Şekil 11. PWM bloğu

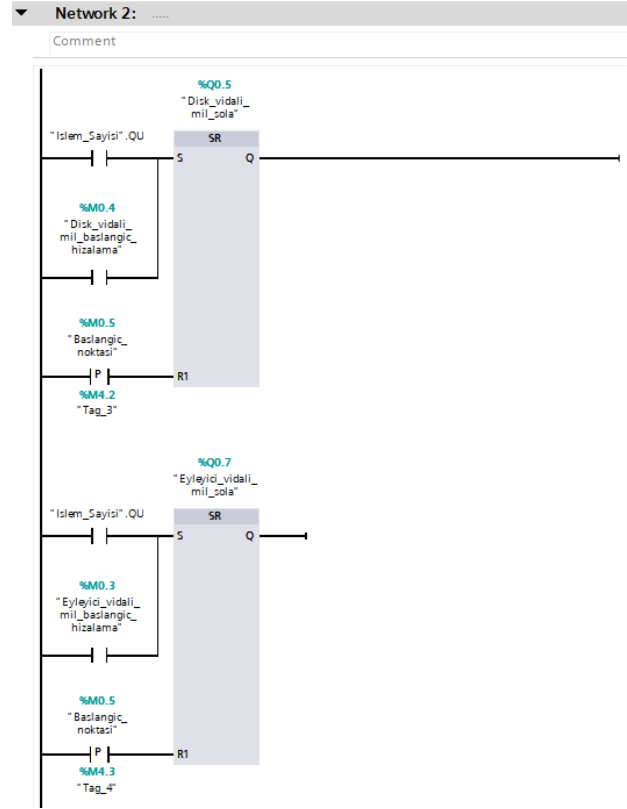
PWM bloğu aracılığıyla verilen darbeler ile sistemin konumu/pozisyonu açık çevrim olarak denetlenmiştir. Adım motorlar genel olarak açık çevrim denetlense de başlangıçta nerede başlamaları gerektiği, sistemin yazılımsal sınırları, eyleyici işlem sayısı (delme vb.) ve disk dönme sayısı gibi bilgiler optik sensörler aracılığıyla geri beslemeli olarak alınmıştır. Tasarlanan eğitim setiyle pek çok üretim süreci senaryosu öngörülüp, gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada Şekil 9'da gösterilen senaryo gerçekleştirilmiştir. Her defasında, sistem PLC ile kontrol edilmeye başladığında tüm adım motorlarının başlangıç konumuna getirilmesi gerekmektedir. Ayrıca diske mekaniksel bir zarar verilmemesi için ilk olarak eyleyicinin başlangıç

konumuna getirilmesi zorunludur. Şekil 12'e bu durum için oluşturulmuş olan PLC merdiven diyagramı gösterilmiştir. Şekil 13'de ise oluşturulan senaryoya göre motor yönlerinin ne olması gerektiğine dair oluşturulmuş PLC blokları gösterilmiştir.

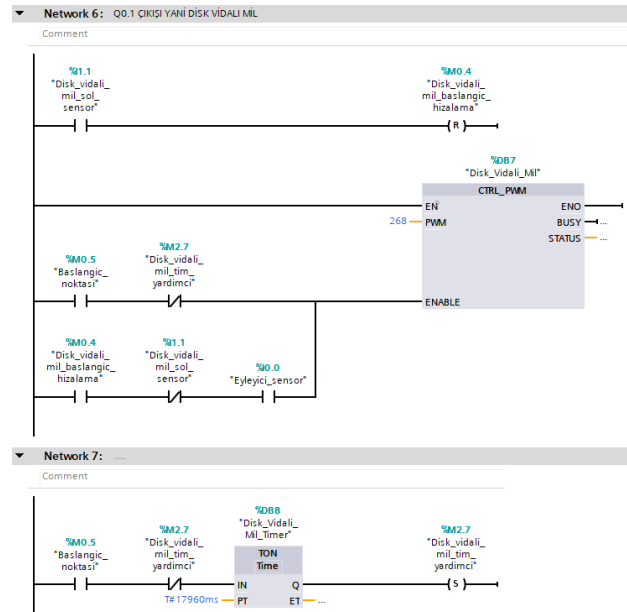


Şekil 12. Başlangıç hizalama merdiven diyagramı

Belirlenen senaryoya göre ilk olarak disk vidalı mili, birinci vidalı mil boyunca ilerleyip duracaktır daha sonra eyleyici vidalı mili diske hizalanacak şekilde ikinci vidalı mil boyunca hareket edecek ve duracaktır. Bu hizalanma durumu için gerekli adım sayısının bilinmesi gereklidir. Bunun içinde sistemde ne kadar darbe verildiğinde hizalandığının önceden çıkarılması gereklidir. Bu nedenle çeşitli denemeler yapılmıştır. Yapılan denemeler sonucunda disk vidalı milinin tam hizalama için eyleyici vidalı milinden N=8640 adım daha fazla darbe verilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Disk vidalı mili PWM işaretinin periyodu 1.5 ms olarak belirlendiğinden bu adım sayısı, 12960 ms değerine denk gelmektedir. Şekil 14'de görüldüğü gibi Disk_Vidalı_Mil_Timer ile sistemin hizalanması ve milde belirli bir mesafe ilerlemesi durumu için gerekli PWM darbelerinin verilmesi sağlanmıştır.



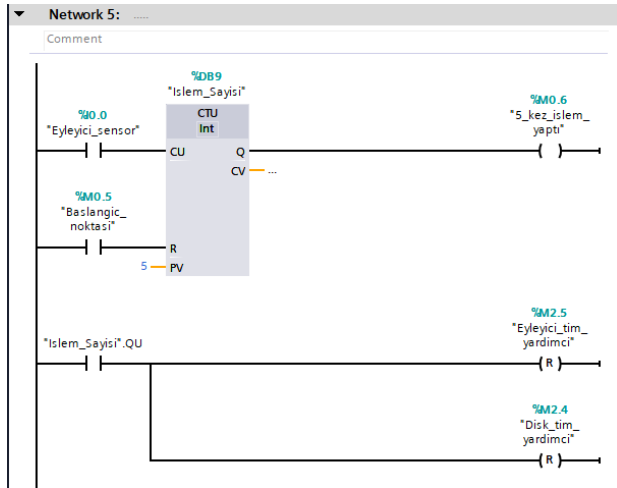
Şekil 13. Motor yönlerinin belirlenmesi



Şekil 14. Disk vidalı mili pozisyon ayarı için zamanlayıcı kullanımı

Disk vidalı mili hizalamasını tamamladıktan sonra eyleyici vidalı mili de benzer şekilde zamanlayıcı yardımıyla hizalanması sağlanır. Daha sonra disk motoruna 10 tur dönecek şekilde PWM işareti uygulanır ve zamanlayıcı ile kontrolü sağlanır. En son olarak da eyleyici motor yardımıyla eyleyici diskin üzerindeki geometriden 5 kez geçirilir. Toplam geçiş ya da işlem sayısı eyleyici sensörü ve Şekil 15'deki

sayıcı yardımıyla denetlenir. Denetimi sağlamak için toplamda 11 network kullanılmış olup önemli kısımlarına burada değinilmiştir. Değinilmeyen kısımlar benzer biçimde yukarıda bahsedildiği gibi gerçekleşmiştir. Kısaca Şekil 9'daki algoritmaya uygun olarak üretim sürecini temsil eden sistemin konum/pozisyon denetimi PLC ile bu şekilde gerçekleşmiştir.



Şekil 15. Eyleyici işlem sayısı ayarı için sayıcı kullanımı

3. Bulgular ve Tartışma

Eğitim seti Kontrol ve Kumanda bölümü derslerinde kullanılması için tasarlanmıştır. Bu eğitim setinde adım motorlarının kullanılmasının temel sebebi adım motorlarının servo gibi motorlara göre daha ekonomik olmasıdır. Bu eğitim seti PLC vasıtasıyla konum/pozisyon denetimi ile denetlenebilecek şekilde tasarlanmıştır ve çalıştırılmıştır.

Set tasarlanıp kurulduktan sonraki kontrol aşamasında sistemde bazı sorunlar ortaya çıkmıştır. İlk karşılaşılan elektriksel sorun tercih edilen optik sensörlerin çıkışları PLC'nin algılayabileceği 24V ve mikrodenetleyicinin algılayabileceği 5V seviyesine ulaşamamıştır. Çözümü için, sensörlerin gerilim çıkışı ilk olarak optokuplör kullanılarak elektriksel olarak yalıtılmış ve NPN transistörün baz ucuna verilmiştir. Daha sonra güç kaynağından alınan 12V DC gerilim DC-DC dönüştürücü ile 24V DC gerilim değerine yükseltilmiş ve NPN transistörün kolektör ucuna verilmiştir. Bu şekilde sensörden gelen düşük gerilim çıkışı elektriksel olarak yalıtılmış bir biçimde 24V gerilim çıkışına dönüştürülmüştür. Böylelikle istenilen gerilim değerinde sensör gerilim çıkışının

alınması sağlanmıştır. 5V gerilimi için de benzer bir devre yapılmıştır fakat 12V güç kaynağında 5V'lük çıkış bulunduğundan DC-DC dönüştürücü kullanılmamıştır ve optokuplörün içinde bulunan transistör istenilen gerilim çıkış değerinde (5V DC) çıkış verebildiği için fazladan bir transistöre ihtiyaç duyulmamıştır. İkinci elektriksel sorun; disk sürücüsünün güç kablosu ve disk optik sensörü aynı kablo kanalından geçtiğinden dolayı istenmeyen bir gerilim indüklenmesi optik sensörde oluşmuştur. Çözüm olarak, optik sensörün gerilim çıkışının yükseltilmesinde kullanılan kartta bulunan transistörün emitör direnci yerine 0.7V'lük eşik gerilimine sahip bir diyot konulmuştur. Bu sayede gerilim indüklenmesi kaynaklı anlık tepeler kaybolmuştur. Üçüncü olarak ise eğitim seti hem mikrodenetleyici ile hem de PLC ile kontrol edilmesi için NPN olarak tasarlanmıştır. S71200 serili PLC'lerin çıkışları ise PNP olarak çalışmaktadır. Bu yüzden PLC çıkışları PNP'den NPN'e dönüştürülmüştür. Dördüncü olarak ise ilk tasarımda kullanılan vidalı milleri hareket ettiren adım motorları için Nema23 adım motorları kullanılmıştır fakat eyleyici ve disk vidalı milleri için daha yüksek tork değerine sahip adım motorlarının gerekliliği denemelerde görülmüştür. Bu sebeple Nema23 motorları, Nema34 adım motorları ile değiştirilmiştir. Beşinci olarak Nema34 adım motorlarını sürmek içinde Microstep sürücü daha fazla güç aktaran CWD556 sürücüsü ile değiştirilmiştir. Altıncı sorun mekanik içeriklidir, Nema34 motorları kendi flanşlarına monte edilip, kendi flanşları da özel olarak tasarlanıp imal ettirilen ve gergi ayarında kullanılan ikinci bir flanş (mavi renkli) ile Şekil 5.b'deki gibi MDF tabana sabitlenmiştir. Yedinci sorunda mekanik içeriklidir, ilk kullanılan kayış kasnak yapısı mekaniksel olarak kayışın kaçma veya gezinmesine sebep olmaktaydı. Şekil 5.a ve Şekil 5.b'de görüldüğü gibi daha geniş kayış ve kayış tahditli kasnaklarla değişimi sağlanmış ve gezinme sorunu çözülmüştür.

Yukarıdakilere ilave gelecek çalışması olarak; adım motorları açık çevrimle kontrol edilebilen bir motordur ancak bu motorlar yüksek torklu uygulamalarda adım kaçırabilmektedirler. Bu sebeple yüksek tork ve hızın isteneceği durumlarda

geri besleme gerekmektedir. Bu nedenle vidalı milleri süren adım motorlarına enkoder eklenerek sistem gelecek çalışmada geri beslemeli hale getirilebilir. Mekaniksel iyileştirme olarak ise hali hazırda kullanımda olan vidalı milin, diş aralığı dardır, daha seyrek diş aralığı olan bir mille değişimi sağlanabilir. Bu değişim sistemin daha çevik çalışmasına yardımcı olabilir. Ayrıca ilerleyen çalışmalarda adım motor seti uzaktan erişimli hale getirilerek uzaktan laboratuvar uygulamasında kullanılabilir bir set haline getirilebilir. Bu yazıda, daha ziyade eğitim setinin nasıl tasarlandığı konusu ön planda tutulmuştur. Bu eğitim seti kullanılarak, öğrencilerde nasıl bir eğitimsel ilerleme ve farkındalık oluşturulduğu konusu bir başka eğitim makalesinde ele alınabilir (Chevalier *et al.* 2021).

4. Sonuç

Adım motorları ve sürücüleri, güç kaynakları, optik sensörler, sınır anahtarları, vidalı miller, lineer kızak arabaları, PLC'den oluşan ve kompleks üretim sürecini temsil eden servo kabiliyetli (konum/pozisyon denetimli) elektro-mekanik eğitim seti tasarlanarak, imal edildi. Kısaca deney seti karmaşık üretim süreçlerini (pozisyonlama, delme, vidalama, kaynak vb. iş parçalarını) temsil edilecek şekilde oluşturuldu. Daha sonra öngörülen üretim süreci isterleri ve kısıtlarına göre algoritma akış şeması biçimine getirildi ve detaylandırıldı. Akış şemasına göre PLC merdiven diyagramı oluşturuldu, deneme çalışmaları ile oluşturulan program parça parça test edildi ve ortaya çıkan hatalar çözümlenerek düzeltildi. Bu şekilde, çok motorlu/çok eksenli eğitim setinin (üretim planlamasına uygun olarak) konum/pozisyon denetimi hem sıralı hem de eş zamanlı olarak başarı ile gerçekleştirildi. Bu sayede PLC denetimli, adım motor servo seti ile üretim süreçlerinde konum/pozisyon denetiminin nasıl gerçekleştirileceği bilgisinin öğrencilere aktarılması mümkün hale gelmiştir.

Eğitim seti sayesinde öğrencilerin farklı senaryoları kendilerinin öngörüp, algoritmasını çıkarmaları, PLC programı haline dönüştürüp, denemeleri ve hataları düzeltip çalışır hale getirmeleri hedeflenmektedir.

Eğitim seti ile öğrencilerin servo kabiliyetli karmaşık üretim süreçleri hakkında temel kabiliyetleri kazanacağı öngörülmektedir.

Teşekkür

Elektrik ve mekanik mühendislik işçiliğinde emeği geçen Bekir Altın'a yaptığı katkılardan dolayı teşekkür ederiz.

5. Kaynaklar

- Antipin, A., Frizen, V., Sannikov, P., & Volhin, M. S., 2018. Application of the drive systems through the stepper motors in the process equipment, manipulators and pushers without feedback. *2018 20th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, SIELA 2018 - Proceedings*, 1–4.
- Awad, H., Moawad, S., & Atalla, A., 2019. Experimental Comparison between Microcontrollers and Programmable Logic Controllers in Sun Tracking Applications. *2018 20th International Middle East Power Systems Conference, MEPCON 2018 - Proceedings*, 58–63.
- Cernohorsky J., & Richter R., 2015. *Remote Measurement in Electrical Engineering Laboratories*. 21–23.
- Chevalier, A., Dekemele, K., Juchem, J., & Loccufier, M., 2021. Student Feedback on Educational Innovation in Control Engineering: Active Learning in Practice. *IEEE Transactions on Education*, **64(4)**, 432–437.
- Freeman, S., Eddy, S. L., McDonough, M., Smith, M. K., Okoroafor, N., Jordt, H., & Wenderoth, M. P., 2014. Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **111(23)**, 8410–8415.
- Fukumoto, H., Yamaguchi, T., Ishibashi, M., & Furukawa, T., 2021. Developing a Remote Laboratory System of Stepper Motor for Learning Support. *IEEE Transactions on Education*, **64(3)**, 292–298.
- Irmak, E., Colak, I., Kabalci, E., & Kose, A., 2012. Implementation of an interactive remote laboratory platform for stepper motor experiments. *15th International Power Electronics*

and Motion Control Conference and Exposition, EPE-PEMC 2012 ECCE Europe, DS3e.5-1-DS3e.5-5.

Kenjo, T., 1984. *Stepping Motors and Their Microprocessor Controls*. OXFORD SCIENCE PUBLICATIONS.

Kheir, N. A., Åström, K. J., Auslander, D., Cheok, K. C., Franklin, G. F., Masten, M., & Rabins, M., 1996. Control systems engineering education. *Automatica*, **32(2)**, 147–166.

Larson, N. G., 1979. *Stepping Motor Control System*.
Oravec, J., Kalúz, M., Bakárač, P., & Bakošová, M., 2016. Improvements of Educational Process of Automation and Optimization Using 2D Plotter. *IFAC-PapersOnLine*, **49(6)**, 16–21.

Peng, T., Qian, J., Zi, B., Liu, J., & Wang, X., 2016. Mechanical Design and Control System of an Omni-directional Mobile Robot for Material Conveying. *Procedia CIRP*, **56**, 412–415.

Rata, M., & Rata, G., 2015. Application with a XY-Plotter Controlled by PLC Used in Student Laboratory Works. *The 9th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering*, 117–120.

İnternet kaynakları

1-[https://www.festo.com/us/en/e/technical-education/learning-systems/electric-power-technology/motor-controls-and-drives-id_32896/.](https://www.festo.com/us/en/e/technical-education/learning-systems/electric-power-technology/motor-controls-and-drives-id_32896/) (13.05.2022)

2-https://www.quanser.com/products_category/rotary-motion-platform//, (13.05.2022)

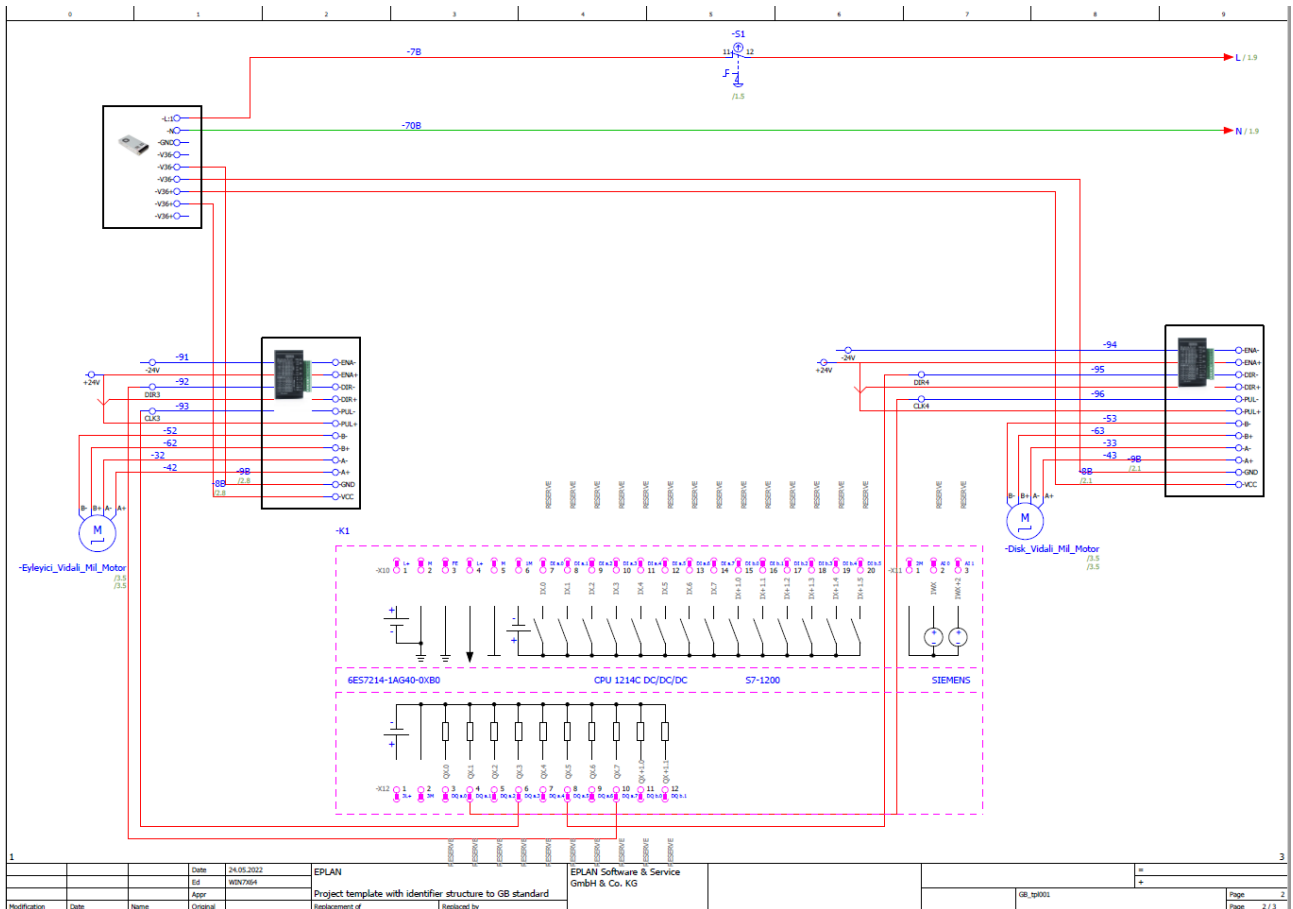
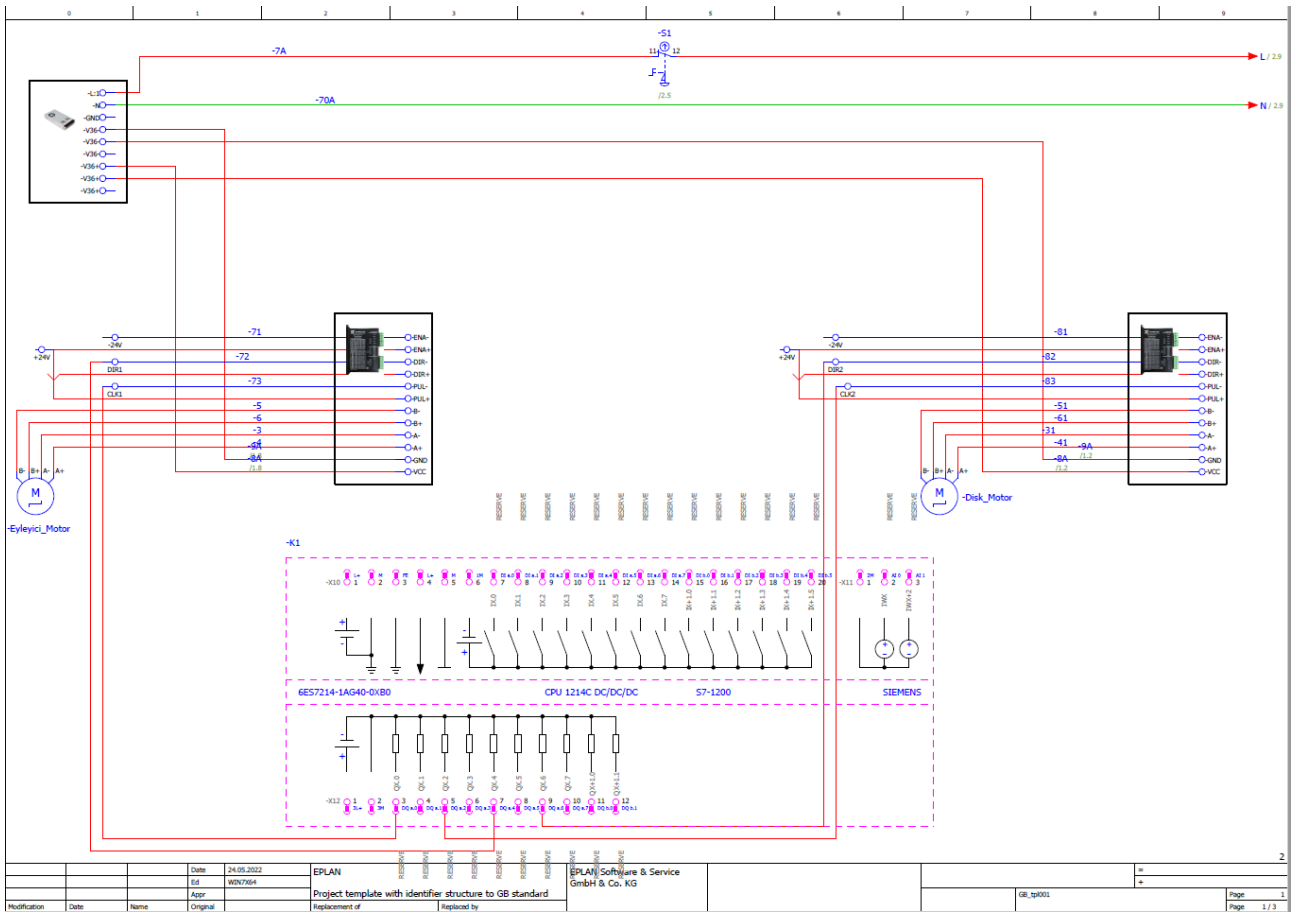
3-<http://www.ecpsystems.com/index.htm>, (13.05.2022)

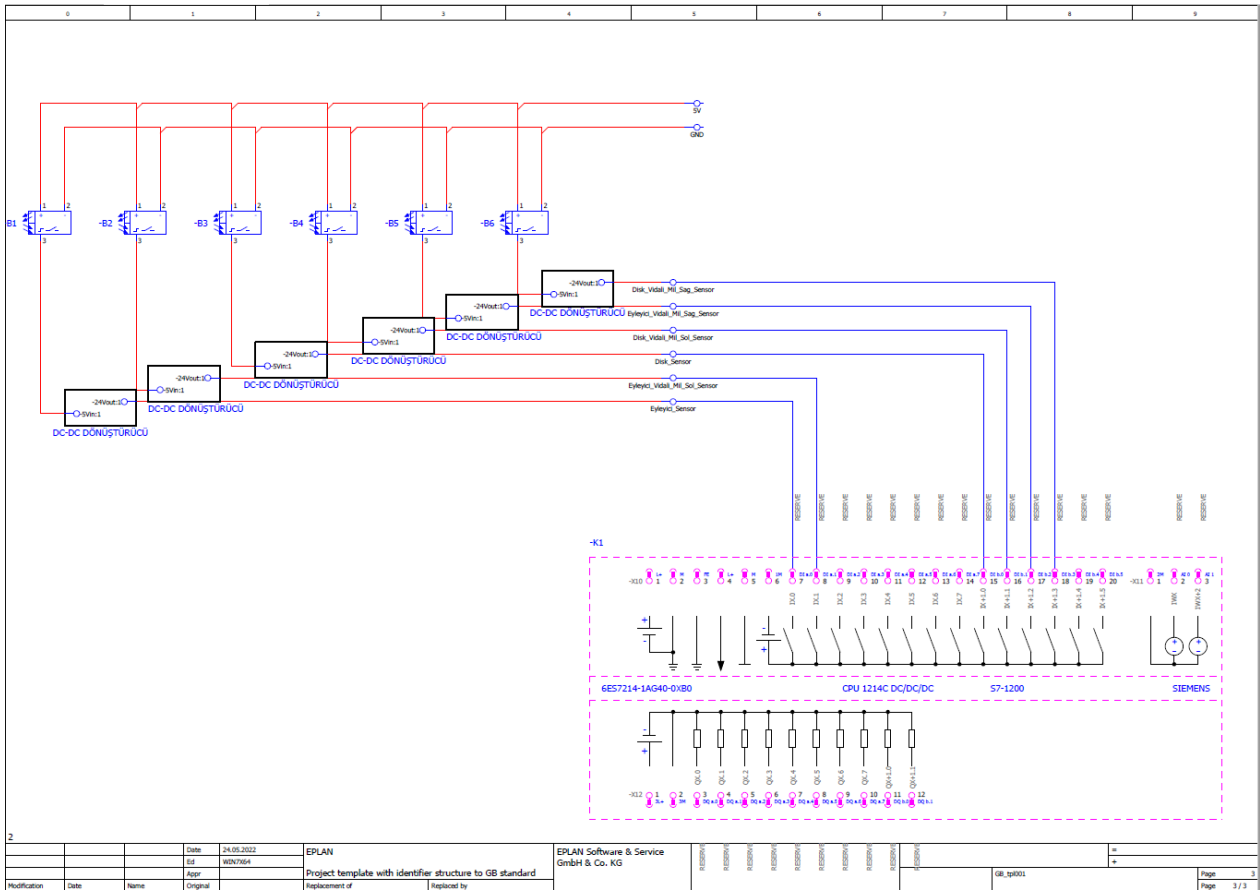
4-<http://www.kri.com.sg/>, (13.05.2022)

5-<https://www.inteco.com.pl/products/modular-servo/>, (13.05.2022)

6-<http://www.ulusotomasyon.com/egitim-setleri-deney-setleri>, (13.05.2022)

7-<https://www.yildirimelektronik.com/urunler/1/teknik-egitim-setleri?m=kat>, (13.05.2022)





AKÜ FEMÜBİD 23 (2023) 025501 (395-401)

AKU J. Sci. Eng. 23 (2023) 025501 (395-401)

DOI: 10.35414/akufemubid.1175281

Araştırma Makalesi / Research Article

GNSS/Nivelman Verisiyle Yerel Jeoidin Modellenmesinde Polinomlarla Enterpolasyon ve En Küçük Kareler Destek Vektör Makineleri Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Merve OCAK^{1*}, Leyla ÇAKIR¹¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Trabzon.

Sorumlu yazar e-posta*: merveocak@ktu.edu.tr

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-4477-4396>

lcakir@ktu.edu.tr

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-6624-4727>

Geliş Tarihi: 14.09.2022

Kabul Tarihi: 20.03.2023

Öz

Günümüzde gelişen teknolojiyle birlikte haritalık faaliyetlerinde GNSS ölçüm yöntemleri, yersel ölçü yöntemlerine göre daha çok tercih edilmektedir. GNSS ölçümleri ile elde edilen yükseklik bilgisi elipsoidal yüksekliktir. Fakat yeryüzü üzerindeki bir noktayı fiziksel olarak tanımlayabilmemiz için ortometrik yüksekliklere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durumda elipsoidal yükseklikten ortometrik yüksekliğe geçiş sağlanabilmesi için jeoid yüksekliğinin bilinmesi gerekir. Bu çalışmada Trabzon ilinde ITRF96 koordinat sistemindeki 455 adet GNSS/Nivelman noktası kullanılarak en uygun yerel jeoidin belirlenmesi amaçlanmıştır. Kullanılan noktalar model ve test noktası olarak iki gruba ayrılmış ve yerel jeoidin belirlenmesi için polinomlarla enterpolasyon ve en küçük kareler destek vektör makineleri (EKK-DVM) yöntemleri kullanılmıştır. Ayrıca uygulamada çalışma bölgesi için nokta yoğunlukları farklı iki durum oluşturulmuş ve nokta sayısının jeoid modelleme üzerindeki etkisi incelenmiştir. İstatistiksel sonuçlar ve grafikler incelendiğinde jeoid modellemede polinomlarla enterpolasyon yöntemine kıyasla EKK-DVM yönteminin daha iyi duyarlılığa sahip olduğu görülmektedir.

Anahtar kelimeler

Jeoid; GNSS/Nivelman; Polinomlar; En küçük kareler destek vektör makinesi

Comparison of Polynomial Interpolation and Least Squares Support Vector Machines Methods for Modelling Local Geoid using GNSS/Levelling Data

Abstract

GNSS surveying methods are more preferred than terrestrial measuring methods thanks to recent technological developments in mapping activities. The height information obtained by GNSS measurements is the ellipsoidal height. However, orthometric heights are needed to be able to physically describe a point on the ground. Thus, the geoid height must be known in order to convert an ellipsoidal height to orthometric height. In this study it is aimed to determine the most suitable local geoid by using 455 GNSS/levelling points in ITRF96 coordinate system of Trabzon province. The points used are divided into two groups as reference and test points, and polynomial interpolation and least support vector machine (LS-SVM) methods are used to determine the local geoid. In addition, two cases with different point densities are generated for the study region and the effect of the number of points on the modeling is examined. When the statistical results and graphics are examined, it is seen that the LS-SVM has better accuracy compared to the polynomial interpolation method in geoid modelling.

Keywords

Jeoid; GNSS/Levelling; Polynomials; Least Support Vector Machine

© Afyon Kocatepe Üniversitesi.

1. Giriş

Konum bilgisinin üçüncü boyutu olan yükseklik, mühendislik ve jeodezik çalışmalar için önemli bir

parametredir. Yeryüzündeki bir noktanın yüksekliği, jeoid yüzeyine çekül eğrisi boyunca olan uzaklık olarak tanımlanmaktadır. Jeoid ise fiziksel yeryüzünün şekli olarak tanımlanmasına rağmen

düzgün bir şekle sahip olmadığı için matematiksel olarak ifade edilmesi oldukça güçtür ve fiziksel yeryüzünde yapılan ölçümlerin değerlendirilebilmesi için matematiksel bir hesap yüzeyine gerek vardır. Bu yüzden jeoidin belirlenmesi önemli bir problemidir.

Teknolojinin gelişmesi ve uydu tekniklerinin yaygınlaşması ile birlikte haritacılık faaliyetlerinde GNSS (Küresel Konum Belirleme Sistemleri) ölçüm teknikleri, daha hızlı, kolay ve pratik bir şekilde konum bilgisi sağladığından dolayı yersel ölçüm tekniklerine göre çokça tercih edilmektedir. GNSS ölçümlerinde nokta konumları WGS84 elipsoidine bağlı olarak jeosentrik koordinatlar (X,Y,Z) ya da coğrafi koordinatlar (ϕ, λ, h) olarak elde edilmektedir (Çakır ve Yılmaz, 2013). Fakat elde edilen elipsoidal yüksekliklerin ülke sisteminde kullanılabilir olması için fiziksel anlam taşıyan ortometrik yüksekliklere dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu dönüşüm için aşağıdaki bağıntı kullanılmaktadır.

$$h = N + H \quad (1)$$

Bu eşitlikte h elipsoidal yüksekliği, H ortometrik yüksekliği ve N ise jeoid yüksekliğini ifade etmektedir (Heiskanen ve Moritz 1967). Böylece elipsoidal ve jeoid yüksekliği bilinen noktanın kolayca ortometrik yükseklik değeri hesaplanabilir. Haritacılık faaliyetlerinde gerekli olan jeoid yükseklik bilgisi Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği'nde (BÖHHBÜY) önerildiği gibi çalışma alanındaki mevcut yerel jeoid modelinden yararlanılarak ya da GNSS/Nivelman yöntemiyle yerel jeoid modeli oluşturularak elde edilebilir (Int Kyn.1).

Literatürdeki çalışmalara bakıldığında yerel jeoid modelleme ile ilgili enterpolasyon yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen birçok çalışma görülmektedir (Zhong 1997; Kuhar vd. 2001; Yanalak ve Baykal 2001; İnal vd. 2002; Kavzoğlu ve Saka 2005; Zaletynik 2008; Akyılmaz vd. 2009; Kao vd. 2014; Çakır ve Yılmaz 2014; Doğanalp ve Selvi 2015; Karaaslan vd. 2016; Kaloop vd. 2018; Tuşat ve Mikailsoy 2018; Yılmaz ve Kuru 2019; Erol ve Erol 2021). Bu çalışmada örnekleri verilen çalışmalarda da amaçlanan yerel jeoid modellemesi kapsamında

GNSS/Nivelman ölçüleriyle jeoid yüksekliklerinin enterpolasyonu yapılmıştır. Modelleme için kullanılan noktalar dayanak ve test noktaları olacak şekilde iki gruba ayrılmıştır. Jeoidin modellenmesinde polinomlar ile enterpolasyon ve en küçük kareler destek vektör makineleri yöntemlerinden yararlanılmıştır. Oluşturulan yerel jeoid modellerinde kullanılan yöntemlerle hesaplanan jeoid yükseklik değerleri ve bilinen jeoid yükseklik değerleri istatistiksel olarak karşılaştırılarak en doğru sonucu veren yöntemin belirlenmesi hedeflenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1 Polinomlarla Enterpolasyon

Polinomlarla enterpolasyon yöntemi, jeoid modelleme çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde amaçlanan oluşturulacak olan jeoid modelinin, tek bir fonksiyon ile en iyi şekilde ifade edilmesidir. Bunun için ortogonal veya ortogonal olmayan polinom yüzeyleri kullanılmaktadır. Ortogonal polinomlar ile enterpolasyonda;

$$N(x, y) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} a_{ij} x^i y^j \quad (2)$$

eşitliğinden, ortogonal olmayan polinomlar ile enterpolasyonda ise

$$N(x, y) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n a_{ij} x^i y^j \quad (3)$$

eşitliğinden yararlanılmaktadır. Burada n polinom derecesini, α polinom bilinmeyen katsayılarını, x ve y ise noktaların düzlem koordinatlarını ifade etmektedir. Bu eşitliklerde yer alan polinom bilinmeyen katsayıları ise en küçük kareler ilkesine göre dengelemeli olarak hesaplanmaktadır. Bu yöntemde dikkat edilmesi gereken en önemli şey kullanılacak olan polinom derecesinin belirlenmesidir. Polinom derecesi düşük bir değer seçildiğinde yüzey kabaca belirlenmiş olmakta, yüksek seçildiğinde ise yüzeyde salınımlar oluşmaktadır. Bundan dolayı en iyi yüzey için polinom derecesi, istatistik analizler yardımıyla bulunur. Bu aşamada, model ve kestirilen

parametreler için anlamlılık ve uyumsuz ölçü testlerinden yararlanır (İnal vd. 2002).

2.2 En Küçük Kareler Destek Vektör Makinaları

Destek vektör makineleri Vapnik tarafından geliştirilen istatistiksel öğrenme teorisine dayalı bir makine öğrenme tekniğidir. Sınıflandırma ve regresyon tahmini problemlerini çözmek için geliştirilmiştir. DVM yönteminde veriler düşük boyutlu uzaydan yüksek boyutlu uzaya eşlenir. Bunun için en uygun karar fonksiyonları yani optimal hiperdüzlem oluşturulur (Vapnik 2000). Oluşturulan bu karar fonksiyonları ikinci dereceden programlama ile elde edilir fakat hesap karmaşıklığı fazla olmaktadır. EKK-DVM yaklaşımında ise bu eksikliğin üzerine gidilmiş ve ikinci dereceden programlama yerine lineer denklem sistemleri kullanılmıştır. Bu da DVM formülasyonlarındaki eşitsizlik kısıtlamalarının eşitlik kısıtlamaları ile değiştirilmesiyle elde edilmiştir (Suyken ve Vandewalle 1999). Girdi verisi $x_i \in R^n$ ve çıktı verisi $y_i \in R$ olan N tane veri noktasından oluşan bir eğitim veri seti için EKK-DVM kestirilecek fonksiyonu aşağıdaki eşitlik ile elde edilir.

$$y(x) = w^T \varphi(x) + b \quad (4)$$

Bu eşitlikte $\varphi(\cdot)$ girdi verilerini bulunduğu uzaydan yüksek boyutlu bir uzaya eşleyen kernel fonksiyonu, w ağırlık vektörü ve b bias değeridir. EKK-DVM'de optimal hiperdüzlemin oluşturulması yapısal risk minimizasyon kuralına göre eşitlik (5), (6) ve (7)'ye bağlı olarak çözümlenir.

$$\text{minimize } \frac{1}{2} w^T w + \frac{1}{2} \gamma \sum_{i=1}^N e_i^2 \quad (5)$$

$$y_i = w^T \varphi(x_i) + b + e_i \quad i = 1, \dots, N \quad (6)$$

Burada γ düzenleme parametresi, e ise hata değeridir. Ağırlık vektörü sonsuz boyutta olabileceğinden dolayı optimizasyon eşitliklerini ikincil forma dönüştürmek için Lagrange fonksiyonu kullanılmaktadır.

$$L(w, b, e, \alpha) = \frac{1}{2} w^T w + \frac{1}{2} \gamma \sum_{i=1}^N e_i^2 - \sum_{i=1}^N \alpha_i (w^T \varphi(x_i) + b + e_i - y_i) \quad (7)$$

Yukarıdaki eşitlikte yer alan α Lagrange çarpanlarıdır ve standart DVM'lerde bu çarpanlar sadece pozitif değer alırken, EKK-DVM'de hem pozitif hem de negatif değerler alabilmektedir (Suyken ve Vandewalle 1999). Eşitlik (7)'deki problemin çözümü için gerekli olan koşullar şu şekildedir;

$$\frac{\partial L}{\partial w} = 0 \rightarrow w = \sum_{i=1}^N \alpha_i \varphi(x_i)$$

$$\frac{\partial L}{\partial b} = 0 \rightarrow w = \sum_{i=1}^N \alpha_i = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial L}{\partial e_i} = 0 \rightarrow \alpha_i = \gamma e_i \quad i = 1, \dots, N$$

$$\frac{\partial L}{\partial \alpha_i} = 0 \rightarrow w^T \varphi(x_i) + b + e_i - y_i = 0 \quad i = 1, \dots, N$$

w ve e elimine edildikten sonra eşitlik (9)'daki matris formuyla a ve b değerleri çözümlenir.

$$\begin{bmatrix} 0 & \vec{1}^T \\ \vec{1} & \Omega + \gamma^{-1} I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ y \end{bmatrix} \quad (9)$$

$y = [y_1; \dots; y_N]$, $\vec{1} = [1; \dots; 1]$, $a = [a_1; \dots; a_N]$ olmak üzere ve Kernel fonksiyonu $K_{ij} = \varphi(x_i)^T \varphi(x_j)$, $i, j = 1, \dots, N$ ile birlikte lineer denklem kümesi çözümlendiğinde fonksiyon tahmini için EKK-DVM modeli eşitlik (10)'daki gibi olmaktadır. Kullanılan çekirdek fonksiyonları sayesinde hesap yükü büyük ölçüde azalmakta ve bu durum DVM metodolojisini etkili ve verimli hale getirmektedir (Suyken ve Vandewalle 1999; Patil vd. 2005). Bu çalışmada ise radyal tabanlı çekirdek fonksiyonu olarak $K(x, x_i) = e^{-\lambda \|x - x_i\|^2}$ kullanılmıştır.

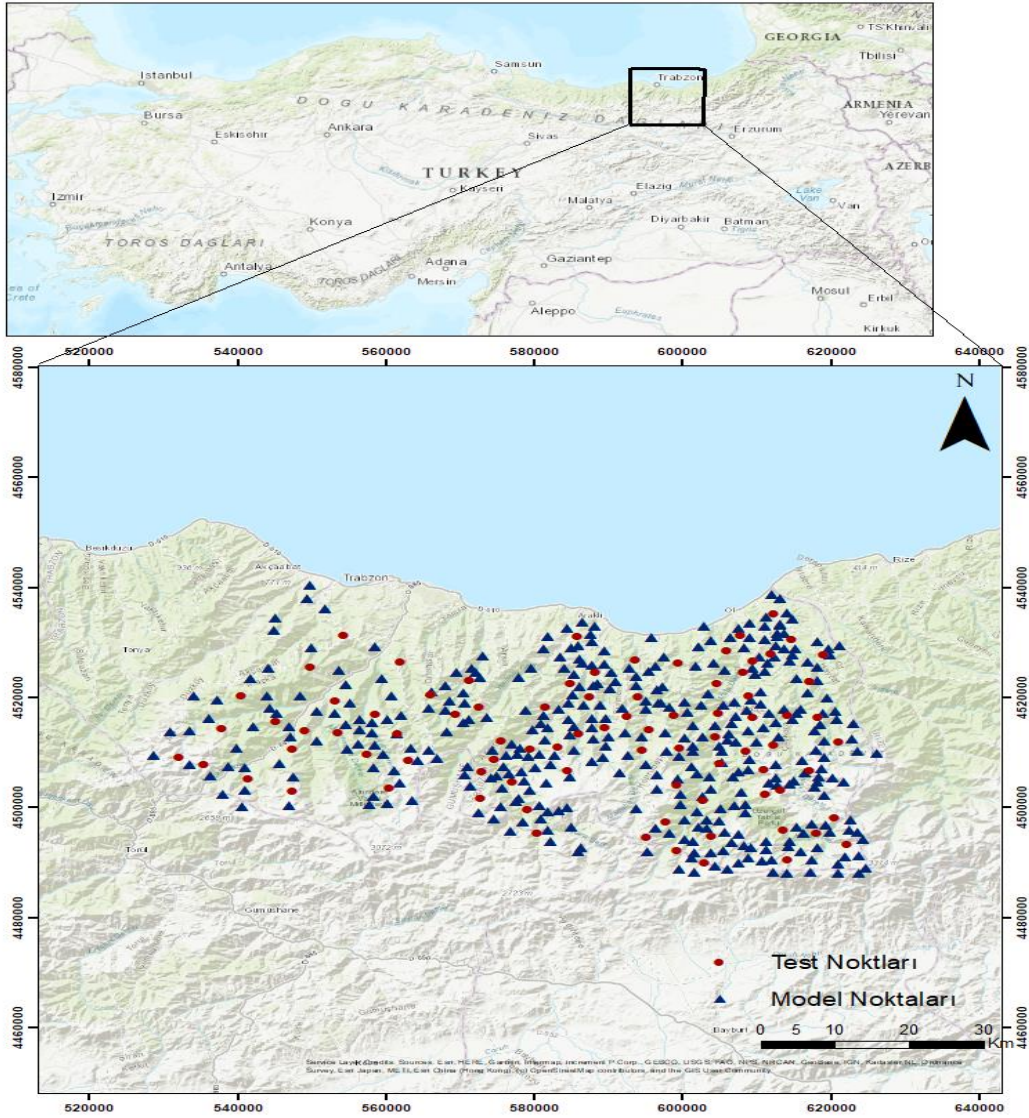
$$y(x) = \sum_{i=1}^N \alpha_i K(x, x_i) + b \quad (10)$$

3. Bulgular

Çalışmada Doğu Karadeniz Bölgesinde bulunan Trabzon iline ait Tapu ve Kadastro IX. Bölge Müdürlüğü tarafından yapılan çalışmalar kapsamında tesis edilen C3 dereceli noktalar kullanılmıştır (Şekil 1). Yaklaşık olarak 4700 km²'lik bir alana dağılmış olan 455 adet noktanın jeoid yükseklik değerleri GNSS/Nivelman yöntemiyle belirlenmiştir. Çalışmada bu noktalara ait jeoid

yükseklik değerleri ve ITRF96 koordinat sisteminde sağa ve yukarı değerleri kullanılmıştır. Çalışma sahası oldukça eğimli bir topografyaya sahip olduğundan jeoid yükseklik değerleri 24.597-30.692m arasında değişmektedir. Bu çalışmada yerel jeoid modellemede polinomlar ile enterpolasyon ve en küçük kareler destek vektör makineleri yöntemleri kullanılmıştır. Uygulamada 455 adet noktanın 85 adedi test noktası, geriye kalan 370 adet nokta ise model noktası olarak belirlenmiştir (Model 1). Ayrıca modellemede kullanılan model noktası sayısının yerel jeoid modelleme üzerindeki etkisini inceleyebilmek için de model nokta sayısı azaltılarak 270 adet noktalı

ikinci bir nokta seti oluşturulmuştur (Model 2). Model noktalarının belirlenmesinde noktaların homojen dağılımda ve araziye iyi temsil edecek yerlerde olmasına dikkat edilmiştir. Kullanılan yöntemler sonucunda hesaplanan test noktalarına ait jeoid yükseklik değerleri ile gerçek jeoid yükseklik değerleri karşılaştırılmış, elde edilen jeoid yükseklik farklarına ait KOH ve R^2 değerleri değerlendirme ölçütü olarak ele alınmıştır. Böylelikle kullanılan yöntemlerden hangisinin daha iyi duyarlılıkta sonuç verdiği tespit edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 1. Çalışma alanı

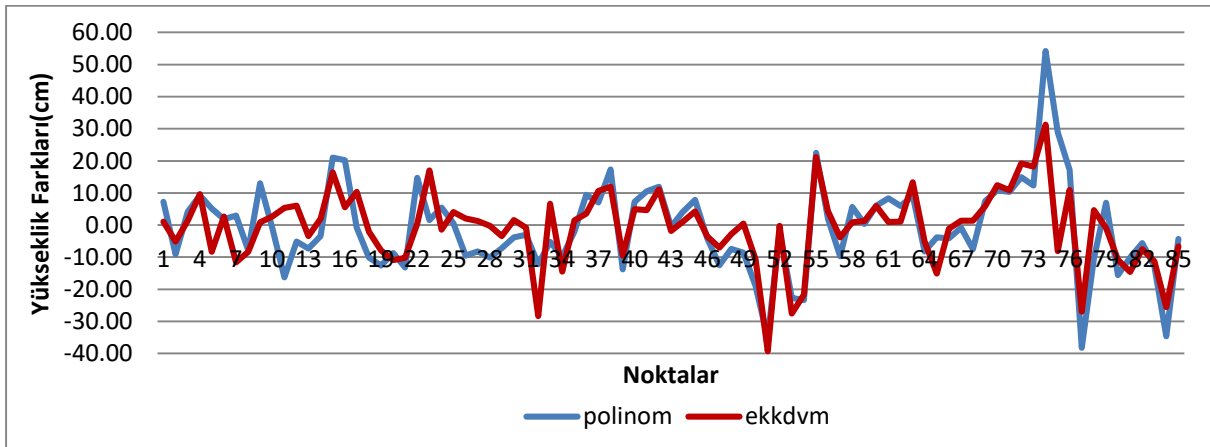
Kullanılan yöntemlerden polinomlar ile enterpolasyon yönteminde polinom dereceleri birinci dereceden başlanarak arttırılmış ve polinom katsayı parametrelerinin anlamlı olup olmadığı t testine göre belirlenmiştir. Polinom yüzeyleri için elde edilen istatistiksel değerlendirmelere göre Model 1 için test noktalarına ait elde edilen KOH ve R^2 değerleri 6. ortogonal olmayan polinom için 13.81cm ve 0.9899 olarak hesaplanmıştır. Model 2 için ise 7. ortogonal olmayan polinomlar kullanıldığında KOH 14.29 cm ve R^2 0.9894 olarak hesaplanmıştır.

EKK-DVM yönteminde, radyal tabanlı çekirdek fonksiyonu kullanılmıştır. Bu yöntem sonucunda

EKK-DVM ile model 1 için düzenleme parametresi $\gamma=455.21$, çekirdek fonksiyonunda kullanılan kernel boyutu $\lambda=0.2571$ olarak elde edilmiş ve KOH ve R^2 değerleri 11.47 cm ve 0.9930 olarak hesaplanmıştır. Model 2 için ise düzenleme parametresi $\gamma=182.99$, kernel boyutu $\lambda=0.2715$ olarak elde edildiğinde KOH=12.22cm ve $R^2=0.9922$ olarak hesaplanmıştır. Kullanılan yöntemler sonucunda her iki model için elde edilen test noktalarına ait istatistiksel sonuçlar Çizelge 1’de gösterilmiştir. Ayrıca noktalara ait gerçek jeoid yükseklik değerlerinden kullanılan yöntemler sonucunda bulunan jeoid yükseklik değerleri çıkartılarak yükseklik değerleri farkları elde edilmiş olup Şekil 2 ve Şekil 3’te gösterilmiştir

Çizelge 1. Test noktalarına ait istatistiksel sonuçlar

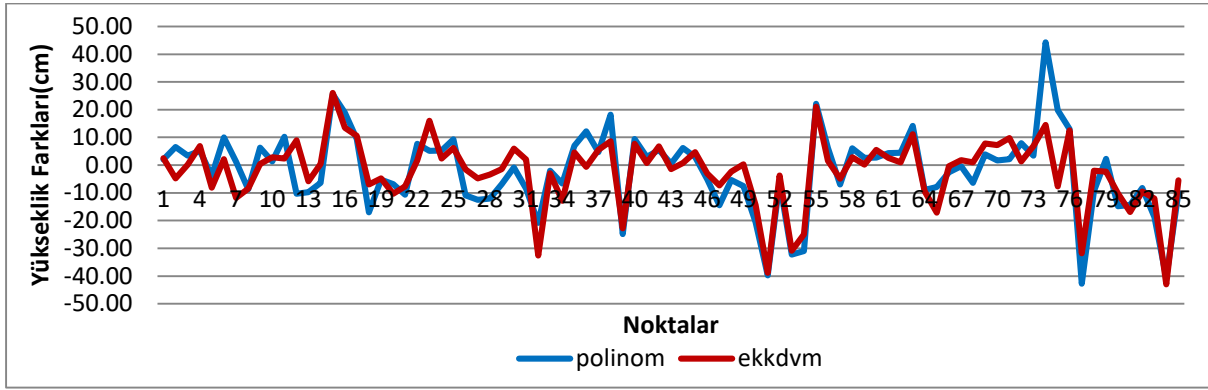
Yöntemler	Model 1				Model 2			
	min (cm)	maks (cm)	KOH (cm)	R^2	min (cm)	maks (cm)	KOH (cm)	R^2
Polinomlar	-38.28	54.21	13.81	0.9899	-42.82	44.22	14.29	0.9894
EKK-DVM	-39.35	31.25	11.47	0.9930	-42.95	26.01	12.22	0.9922



Şekil 2. Model 1 için test noktalarına ait jeoid yükseklik farkları

Şekil 2 incelendiğinde her iki yöntem için test noktalarına ait hesaplanan jeoid yükseklik farkı maksimum olan noktanın aynı nokta olduğu, bu nokta için hesaplanan maksimum jeoid yükseklik farkının polinomlar ile enterpolasyon yöntemi ile 54.21 cm, EKK-DVM yöntemi ile 31.25 cm olduğu görülmektedir. Tüm test noktaları için EKK-DVM yöntemiyle hesaplanan jeoid yüksekliği değerlerinin polinomlar ile enterpolasyon sonucu hesaplanan değerlere oranla daha iyi olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 3 incelendiğinde de Model 2’ye göre test noktalarına ait hesaplanan maksimum yükseklik farkları için EKK-DVM yöntemiyle hesaplanan değerlerin polinomlar ile enterpolasyon sonucu hesaplanan değerlere oranla daha iyi olduğu görülmektedir. Hesaplanan maksimum jeoid yükseklik farkı polinomlar ile enterpolasyon yöntemi için 44.22 cm, en küçük kareler destek vektör makineleri yöntemi için 26.01 cm dir.



Şekil 3. Model 2 için test noktalarına ait jeoid yükseklik farkları

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, yerel jeoid modeli oluşturmak için farklı iki yöntemden yararlanılmıştır. Uygulama bölgesine homojen dağılmış olan toplam 455 adet C3 derece noktadan farklı nokta dağılımına sahip iki ayrı test modeli oluşturularak polinomlar ve EKK-DVM yöntemleri ile kestirilen jeoid yükseklik değerleri ve gerçek jeoid yükseklik değerleri karşılaştırılmıştır. İstatistiksel değerlendirme sonuçlarına göre KOH değeri en küçük ve R^2 değeri

yüksek olan yöntemlerin performansları değerlendirilmiştir. Aynı zamanda jeoid modellemede nokta yoğunluğunun katkısı da irdelenmiş, nokta sayısı azaldıkça test noktalarına ait elde edilen jeoid yükseklik değerlerinin doğruluğunun azalmakta olduğu görülmüştür. Kullanılan yöntemlerden en iyi sonuç yapay zeka yöntemlerinden biri olan EKK-DVM yöntemiyle elde edilmiştir.

Teşekkür

Yazarlar bu çalışmada kullanılan verileri sağlanmasında Trabzon Tapu ve Kadastro IX. Bölge Müdürlüğü'ne katkıları için teşekkür eder.

5. Kaynaklar

Akyılmaz, O., Özlüdemir, M.T., Ayan, T. ve Çelik, R. N., 2009. Soft Computing Methods for Geoidal Height Transformation, *Earth Planets and Space*, **61**, 825–833.

Çakır, L. and Yılmaz, N., 2014. Polynomials, Radial Basis Functions and Multilayer Perception Neural Network Methods in Local Geoid Determination with GPS/Levelling, *Measurement*, **57**, 148- 153.

Doğanalp, S. ve Selvi, H.Z., 2015. Local Geoid Determination in Strip Area Projects by Using Polynomials, Least-Squares Collocation and Radial Basis Functions, *Measurement*, **73**, 429-438.

Erol S. ve Erol B., 2021. A Comparative Assessment of Different Interpolation Algorithms for Prediction of GNSS/Levelling Geoid Surface Using Scattered Control Data, *Measurement*, **173**, 1-17.

Heiskanen, W.A. and Moritz, H., 1967. *Physical Geodesy*, W.H. Freeman and Company, San Francisco.

İnal, C. ve Yiğit, C.Ö., 2004. Elipsoidal Yüksekliklerin Ortometrik Yüksekliğe Dönüşümünde Enterpolasyon Yöntemlerinin Kullanılabilirliği, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **19(1)**, 73-83.

Kaloop, M.R., Rabah, M., Hu, J.W. ve Zaki, A., 2018. Using Advanced Soft Computing Techniques for Regional Shoreline Geoid Model Estimation and Evaluation, *Marine Georesources & Geotechnology*, **36(6)**, 688–697.

Karaaslan, Ö., Tanır Kayıkçı, E. ve Aşık, Y., 2016. Jeoid Yüksekliklerini Belirlemek İçin Kullanılan Enterpolasyon Metotlarının Trabzon İli Verilerine Uygulanması, *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, **8(2)**, 151-164.

Kao, S.P., Chen, C.N., Huang, H.C. ve Shen, Y.T., 2014, Using a Least Squares Support Vector Machine to Estimate a Local Geometric Geoid Model, *BCG - Boletim de Ciências Geodésicas*, **20(2)**, 427–443.

- Kavzoglu, T. ve Saka, M.H., 2005. Modelling Local GPS/Levelling Geoid Undulations Using Artificial Neural Networks, *Journal of Geodesy*, **78**, 520–527.
- Kuhar, M., Stopar, B., Turk, G., ve Ambrozic, T., 2001. The Use of Artificial Neural Network in Geoid Surface Approximation, *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten*, **108(1)**, 22–27.
- Patil, N.S., Shelokar, P.S., Jayaraman, V. K. ve Kulkarni, B.D., 2005. Regression Models Using Pattern Search Assisted Least Square Support Vector Machines, *Chemical Engineering Research and Design*, **83(A8)**, 1030–1037.
- Suykens, J.A.K. ve Vandewalle, J., 1999. Least Squares Support Vector Machine Classifiers, *Neural Processing Letters*, **9**, 293–300.
- Tusat, E. ve Mikailsoy, F., 2018. An Investigation of the Criteria Used to Select the Polynomial Models Employed in Local GNSS/Leveling Geoid Determination Studies, *Arabian Journal of Geosciences*, **11**, 1-15.
- Vapnik, V. N., 2000. The Nature of Statistical Learning Theory, Second Edition, 314, New York.
- Yanalak, M. ve Baykal, O., 2001. Transformation of Ellipsoid Heights to Local Leveling Heights, *Journal of Surveying Engineering*, **127(3)**, 90-103.
- Yılmaz M. ve Kuru B., 2019. Makro ve Mikro Ölçekteki Lokal Jeoid Tespiti için Enterpolasyon Yöntemlerinin Karşılaştırılması, *Geomatik*, **4(1)**, 41-48.
- Zaletnyik, P., Völgyesi, L. ve Paláncz, B., 2008. Modelling Local GPS/Levelling Geoid Undulations Using Support Vector Machines, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, **52(1)**, 39-43.
- Zhong, D., 1997. Robust Estimation and Optimal Selection of Polynomial Parameters for the Interpolation of GPS Geoid Heights, *Journal of Geodesy*, **71**, 552-561.

İnternet kaynakları

- 1-
<https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/3.5.201811962.pdf> (15/04/2021)

AKÜ FEMÜBİD 23 (2023) 025502 (402-416)

AKU J. Sci. Eng. 23 (2023) 025502 (402-416)

DOI: 10.35414/akufemubid.1203930

Araştırma Makalesi / Research Article

Havran-Balıkesir Fay Zonu Üzerinde Jeodezik Çalışmalar: İlk Sonuçlar

Eda Esmâ EYÜBAGİL¹, İbrahim TIRYAKIOĞLU^{1,2*}, Halil İbrahim SOLAK^{2,3}, Hasan Hakan YAVAŞOĞLU⁴, Cemal Özer YİĞİT⁵, Bahadır AKTUĞ⁶, Çağlar ÖZKAYMAK^{2,7}, Mehmet Ali UĞUR¹, Ece Bengünaz ÇAKANŞİMŞEK¹, Ertuğrul DEMİRELLİ¹

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar.

²Afyon Kocatepe Üniversitesi Deprem Uygulama ve Araştırma Merkezi, Afyonkarahisar

³Afyon Kocatepe Üniversitesi, Uzaktan Eğitim Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Afyonkarahisar.

⁴İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

⁵Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Gebze/Kocaeli.

⁶Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Ankara.

⁷Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar.

Sorumlu yazar e-posta*: edaeyubagil@gmail.com.

itiryakioglu@aku.edu.tr

hisolak@aku.edu.tr

yavasoglu@itu.edu.tr

cyigit@gtu.edu.tr

aktug@ankara.edu.tr

caglarozkaymak@aku.edu.tr

maliugur@aku.edu.tr

ece-bengunaz.cakansimsek@usr.aku.edu.tr

ertugruldemirelli@gmail.com.

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-4790-0543>

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-4954-7109>

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5286-0369>

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-3139-4327>

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-1942-7667>

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-7995-4477>

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-0377-1324>

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-2741-900X>

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-9926-0264>

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-6882-9446>

Geliş Tarihi: 14.11. 2022

Kabul Tarihi: 22.03.2023

Öz

Havran-Balıkesir Fay Zonu (HBFZ), Batı Anadolu'daki önemli fay zonlarından birisidir. Edremit'in doğusundan, Balıkesir'e kadar KKD-GGB yönünde uzanan HBFZ iki ana fay ve altı segmentten oluşmaktadır. Fay zonu üzerinde kapsamlı paleosismolojik çalışmalar gerçekleştirilmiş ve zonun segmentlerindeki depresizlik süreleri sismik bir boşluk (asismik hareket, krip) olarak değerlendirilmiştir. Bu nedenle, HBFZ'nin depresizlik sürelerinin detaylı olarak araştırılması amacıyla, çalışma bölgesinde 55 noktadan oluşan bir GNSS ağı oluşturulmuştur. Ağdaki 21 noktada 2022 yılında bir kampanya GNSS ölçüsü gerçekleştirilmiştir. Ağda yer alan diğer sürekli ve kampanya tipi 34 noktanın ise geçmiş yıllara ait GNSS verileri çeşitli kurumlardan temin edilmiştir. Elde edilen tüm veriler GAMIT/GLOBK yazılımıyla değerlendirilmiştir. Çalışma bölgesinin Avrasya plakası sabit hız alanı 4-25 mm/yıl aralığında ve 0.18 mm/yıl doğruluğunda elde edilmiştir. Hız alanı kullanılarak, bölgenin iki boyutlu güncel jeodezik gerinim alanı hesaplanmıştır. Gerinim alanı incelendiğinde, çalışma bölgesinde KD-GB yönlü sıkışma bileşeninin baskın olduğu görülmüştür. Ek olarak, tarihsel ve aletsel dönem deprem kataloglarından yararlanılarak çalışma bölgesinin sismotektonik haritaları oluşturulmuştur. Bu sonuçlar, ilk sonuçlar olarak sunulmaktadır. HBFZ'nin güncel deformasyonlarının ve deprem potansiyelinin belirlenmesi için jeodezik çalışmalar devam etmektedir.

Anahtar kelimeler

Havran Balıkesir Fay Zonu; GNSS; Gerinim; Sismik boşluk

Geodetic Measurements on Havran-Balıkesir Fault Zone: First Results

Abstract

The Havran-Balıkesir Fault Zone (HBFZ) is one of the important fault zones in Western Anatolia. The HBFZ extending from the east of Edremit to Balıkesir in the NNE-SSW direction consists of two main faults and six segments. In the paleoseismological studies carried out on the fault zone and the earthquake -free times in the segments of the zone have been evaluated as a seismic gap (seismic movement, crip). When the geodetic studies of the region are examined, there is no geodetic study focused on HBFZ. For this reason, a GNSS network consisting of 55 points was created in the study area in order to investigate the earthquake-free times of HBFZ in detail. In 2022, a campaign-style GNSS measurement was carried out at 21 points in the network. The GNSS data of the other 34 continuous and campaign-type points in the network for the previous years were obtained from various institutions. All obtained data were evaluated with GAMIT/GLOBK software. The Eurasian plate fixed velocity field of the study area was obtained in the range of 4-25 mm/year and with an accuracy of 0.18 mm/year. By using the velocity field, the two-dimensional current geodetic strain area of the region was calculated. When the strain area is examined, it is observed that the NE-SW direction compression component is dominant in the study region. In addition, seismotectonic maps of the study area were generated by using earthquake catalogs of historical and instrumental periods. These results are presented as first results. Geodetic studies are continuing to determine the current deformations and earthquake potential of HBFZ.

Keywords

Havran-Balıkesir Fault Zone; GNSS; Seismic gap

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Yer kabuğunda meydana gelen deformasyonların belirlenmesiyle, deformasyona neden olan aktif yapıların sismik tehlike analizleri gerçekleştirilebilmektedir. Günümüzde mm hassasiyetini yakalayan Küresel konum belirleme sistemleri (Global Navigation Satellite Systems-GNSS), bu alanda yapılan çalışmalar için hızlı ve güvenilir sonuçlara ulaşılmasını sağlamaktadır. GNSS ölçülerinden elde edilen hızlar ile deformasyona maruz kalan aktif bir yapının güncel kayma hızı, jeodezik gerinimleri ve jeodezik deprem tekrarlama periyotları hesaplanabilmektedir (Aktuğ 2017, Poyraz vd. 2018, Tiryakioğlu vd. 2019, Akyar 2020, Solak 2020, Eyübagil vd. 2021, Gezgin vd. 2022).

Son yıllarda deprem aktivitesiyle adından sıkça söz edilen Batı Anadolu'nun özellikle Kuzeybatı kesimindeki deprem yoğunluğu ön plana çıkmaktadır. Havran-Balıkesir Fay Zonu (HBFZ), Güney Marmara Bölgesi' nin (GMB) sismik kaynaklarından birisidir. Balıkesir il merkezi ile Edremit arasındaki alanda K70°D uzanımına sahip zon, yaklaşık 150 km uzunlukta ve 10-12 km genişliktedir. Havran-Balya ve Balıkesir isimlendirmelerine sahip 2 ana fay ve bu ana faylara bağlı gelişmiş birçok

segmentten oluşmaktadır (Emre vd. 2011, Duru vd. 2012, Sözbilir vd. 2015, Sözbilir vd. 2016a, Sözbilir vd. 2016b, Sözbilir vd. 2016c, Sümer vd. 2018, Solak 2020). Bölgede HBFZ için Sözbilir vd. (2016a, 2016b, 2016c) tarafından yapılan kapsamlı paleosismolojik çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalarla, segment bazlı jeolojik deprem tekrarlama periyotları elde edilmiştir. HBFZ' nin bazı segmentlerinin elde edilen süreleri aştığı vurgulanarak, üzerinde sismik bir boşluk (asismik hareket – krip, yüksek enerji birikimi) olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca HBFZ' nin aktif fay segmentlerinden oluşmasına rağmen Güney Marmara'daki diğer sismik kaynaklara oranla aktivitesinin azlığına dikkat çekilmiştir. Bölgeye ait jeodezik çalışmalar incelendiğinde; Batı Anadolu ölçeğinde yapılan çalışmalarla karşılaşılmakta, HBFZ ölçeğinde ise jeodezik kapsamlı bir çalışma yer almamaktadır (Reilenger vd. 2006, Aktuğ vd. 2009, Solak 2020). Solak (2020) tarafından gerçekleştirilen GNSS çalışmasında, GNSS hızları aracılığıyla HBFZ civarında yüksek değerlere sahip gerinimler elde edilmiştir.

Havran-Balıkesir Fay Zonu için jeolojik çalışmalar sonucunda ulaşılan depremsizlik sürelerinin nedenlerinin detaylı olarak GNSS yöntemleri ile

araştırılması amacıyla; başlangıçta 21 noktalı bir GNSS ağı kurulmuştur. Kurulan bu ağda 2022 yılında bir kampanya GNSS ölçüsü gerçekleştirilmiştir. Fay zonunun tüm segmentlerinin hareketlerini izlemek ve veri setini genişletmek amacıyla; bölgede toplam 55 noktalı bir GNSS ağı oluşturulmuştur. HBFZ için oluşturulan tüm ağa ait ölçülerin değerlendirilmesinde bilimsel değerlendirme yazılımlarından GAMIT/GLOBK yazılım takımı kullanılmıştır. 55 noktalı ağda yer alan ve geçmiş yıllara ait ölçüsü bulunan 36 GNSS noktasının güncel hızları, Avrasya plakası sabit alınarak 4-25 mm/yıl aralığında ve 0.18 mm/yıl doğruluğunda elde edilmiştir. Elde edilen GNSS hızları ile çalışma bölgesinin iki boyutlu gerinim analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışma bölgesinde KD-GB yönlü sıkışma bileşeninin baskın olduğu görülmüştür. HBFZ özelinde en büyük sıkışma bileşenlerinin ise Gökçeyazı ve Havran segmentleri civarında olduğu görülmüştür. HBFZ'nin kapsamlı jeodezik çalışmaları devam etmekte olup bu çalışmada elde edilen öncül sonuçlar irdelenerek incelenmiştir.

2. Çalışma Bölgesinin Tektonik Özellikleri ve Sismotektoniği

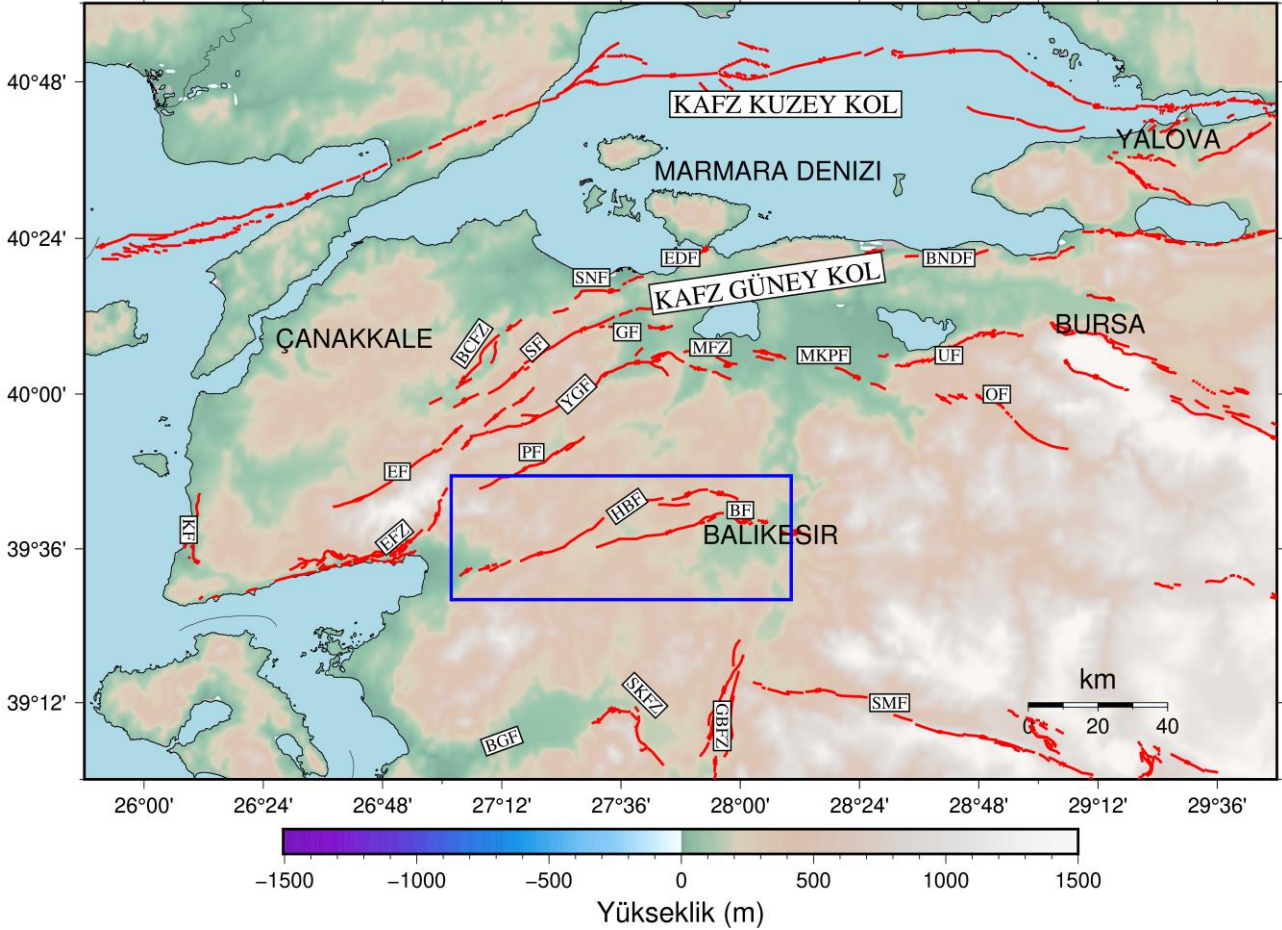
Ülkemizin en önemli sismik kaynakları olarak bilinen Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) ve Kuzey Anadolu Fay Zonunun (KAFZ) Pliyosen' den bu yana meydana getirdikleri hareketler, Batı Anadolu'nun deformasyonunun anlaşılmasını sağlamaktadır. Batı Anadolu'da yapılan GNSS çalışmaları bölgenin güncel deformasyon modelini ortaya koymakta ve K-G genişlemeli rejimi desteklemektedir (McKenzie 1972; Dewey and Şengör 1979, McClusky vd. 2000, Bozkurt 2001, Reilinger vd. 2006, Aktuğ vd. 2009, Tiryakioğlu vd. 2013, Tiryakioğlu vd. 2017, Tiryakioğlu vd. 2018, Solak 2020, Eyübagil vd. 2021). D-B uzanımlı Kuzey Anadolu Fay Zonu, Düzce civarında iki farklı kola ayrılarak, kuzey kol ve güney kol olarak isimlendirilmektedir Kuzey kol, 1999 yılında meydana gelen İzmit (Mw: 7.4) ve Düzce (Mw: 7.2) depremlerini oluşturan koldur ve Kocaeli üzerinden Marmara Denizi'nin içerisine girmektedir. Güney olarak ifade edilen kol ise Güney Marmara Bölgesi (GMB) boyunca İznik ile Ege Denizi arasında uzanan pek çok paralel/alt paralel sağ doğrultu

atımlı faylarla karakterize olmuştur (Şengör and Barka 1992, Özalp vd. 2013, Sözbilir vd. 2016c). Batı Anadolu'nun batı sınırını oluşturan İBTZ GMB' nin güneyinde konumlanmakta ve son yıllarda yapılan çalışmalarla bölge tektoniğinde etkin rol oynadığı ifade edilmektedir (Ring vd. 1999, Sözbilir vd. 2011, Özkaymak vd. 2013, Uzel vd. 2013, Sümer vd. 2018, Solak 2020). GMB ve İBTZ içerisindeki ana tektonik yapılar kuzeyden güneye doğru; Biga- Çan Fay Zonu (BÇFZ), Manyas Fay Zonu (MFZ), Yenice-Gönen Fayı (YGF), Evciler Fayı (EF), Pazarköy Fayı (PF), Edremit Fay Zonu (EFZ) ve Havran-Balıkesir Fay Zonu (HBFZ) Gelenbe Fay Zonu (GFZ), Soma-Kırkağaç Fay Zonu (SKFZ), Bergama Fayı (BF), Menemen Fayı (MF) ve Gediz Grabeni (GGB)'dir (Şekil 1) (Emre vd. 2011, Sözbilir vd. 2016c Solak 2020).

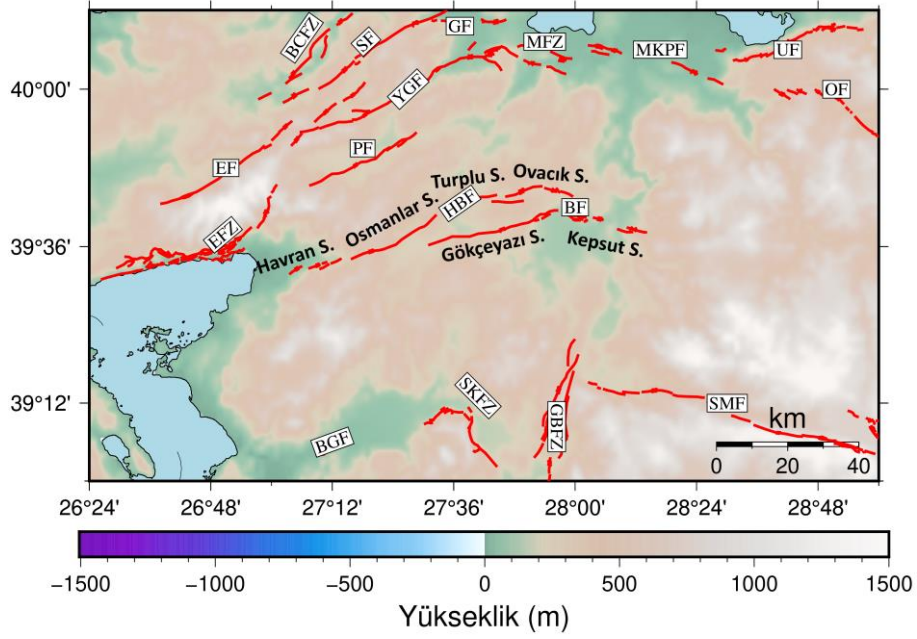
Havran Balıkesir Fay Zonu (HBFZ), KAFZ 'ın güney kolu üzerinde yer almaktadır. Zonun içerisindeki ana faylardan Havran-Balya Fayı batıdan doğuya; Havran (HS)(1), Osmanlar (OS)(2), Turplu (TS)(3), Ovacık (OvS)(4) olmak üzere 4 farklı fay segmenti bulunmaktadır. Yaklaşık 70 km uzunluğa sahip Balıkesir Fayı ise batıdan doğuya; Gökçeyazı (GS) (1) ve Kepsut (KS) (2) olmak üzere 2 farklı fay segmentine ayrılmaktadır. Havran, Osmanlar, Turplu, Ovacık ve Gökçeyazı segmentleri, ters bileşen içeren doğrultu atımlı fay mekanizmasına; en doğudaki Kepsut segmenti oblik atımlı normal fay mekanizmasına sahiptir (Şekil 2) (Sözbilir vd. 2016c, Sümer vd. 2018, Solak 2020). Havran Balıkesir Fay Zonu (HBFZ), KAFZ 'ın güney kolu üzerinde yer almaktadır. Zonun içerisindeki ana faylardan Havran-Balya Fayı batıdan doğuya; Havran (HS)(1), Osmanlar (OS)(2), Turplu (TS)(3), Ovacık (OvS)(4) olmak üzere 4 farklı fay segmenti bulunmaktadır. Yaklaşık 70 km uzunluğa sahip Balıkesir Fayı ise batıdan doğuya; Gökçeyazı (GS) (1) ve Kepsut (KS) (2) olmak üzere 2 farklı fay segmentine ayrılmaktadır. Havran, Osmanlar, Turplu, Ovacık ve Gökçeyazı segmentleri, ters bileşen içeren doğrultu atımlı fay mekanizmasına; en doğudaki Kepsut segmenti oblik atımlı normal fay mekanizmasına sahiptir (Şekil 2) (Sözbilir vd. 2016c, Sümer vd. 2018, Solak 2020).

Literatürde HBFZ ve çevresi için gerçekleştirilmiş pek çok jeolojik çalışma bulunmaktadır (Emre vd. 2011, Duru vd. 2012, Özkaymak vd. 2013, Uzel vd. 2013, Sözbilir vd. 2016a, Sözbilir vd. 2016b, Sözbilir vd. 2016c, Sümer vd. 2018). Bu çalışmalardan Sözbilir vd. (2016a, 2016b, 2016c) tarafından gerçekleştirilen hendek tabanlı paleosismolojik çalışmalar HBFZ' nin sismotektoniğinin anlaşılması bakımından önem taşımaktadır. Bu çalışmalarda zonun segment bazlı ortalama deprem tekrarlama periyotları belirlenerek, sistematik dere ötelenmeleri baz alınmış ve Havran-Balıkesir Fay Zonu boyunca uzun dönem jeolojik kayma hızı 3.59-3.78 mm/yıl aralığında hesaplanmıştır. Ayrıca bu çalışmalarda segmentler için son ürettikleri depremlerden günümüze kadar geçen süreler hesaplanmıştır. Özellikle Gökçeyazı segmentinde

2000 yıla ulaşan depremsizlik süresi nedeniyle bölgede yıkıcı bir deprem beklendiği vurgulanmıştır. Bölgede yoğun jeolojik çalışmalar yapılmasına rağmen kısıtlı jeodezik çalışmalar bulunmaktadır (Reilinger vd. 2006, Aktuğ vd. 2009, Solak 2020). Solak (2020) tarafından bölgede gerçekleştirilen GNSS ölçüleriyle elde edilen sonuçlarda HBFZ için yüzeysel olabilecek sonuçlara yer verilmiştir. Bu öncül nitelikteki sonuçlara göre; HBFZ üzerinde jeodezik olarak hesaplanan kayma hızı her segmentte farklı olmakla beraber yaklaşık 5 mm/yıl civarındadır. Bu bilgiler HBFZ genelinde baskın açılma bileşenleri ile birlikte Balıkesir civarında sağ doğrultu atımlı fay mekanizmasını işaret etmektedir. Zon üzerindeki en yüksek gerinimlerin ise Ovacık segmentinde olduğu görülmüştür.



Şekil 1. Güney Marmara ve çevresindeki ana tektonik yapılar (Faylar (Emre vd. 2011) batıdan doğuya; KF: Kestaneli Fayı, EF: Evciler Fayı EFZ:Edremit Fay Zonu, BGF: Bergama Fayı, BCFZ: Biga-Çan Fay Zonu, SF: Sarıköy Fayı,YGF: Yenice-Gönen Fayı, HBF: Havran-Balya Fayı, SNF: Sinekci Fayı, GF: Gündoğan Fayı, EDF: Edincik Fayı, MFZ: Manyas Fay Zonu, BF: Balıkesir Fayı, SKFZ: Soma-Kırkağaç Fay Zonu, GBFZ: Gelenbe Fay Zonu, MKPF: Mustafa Kemalpaşa Fayı, BDNF: Bandırma Fayı, UF: Ulubat Fayı, OF: Orhaneli Fayı, SMF: Simav Fay Zonu. (Çalışma bölgesi HBFZ mavi çerçeve ile gösterilmiştir.)).

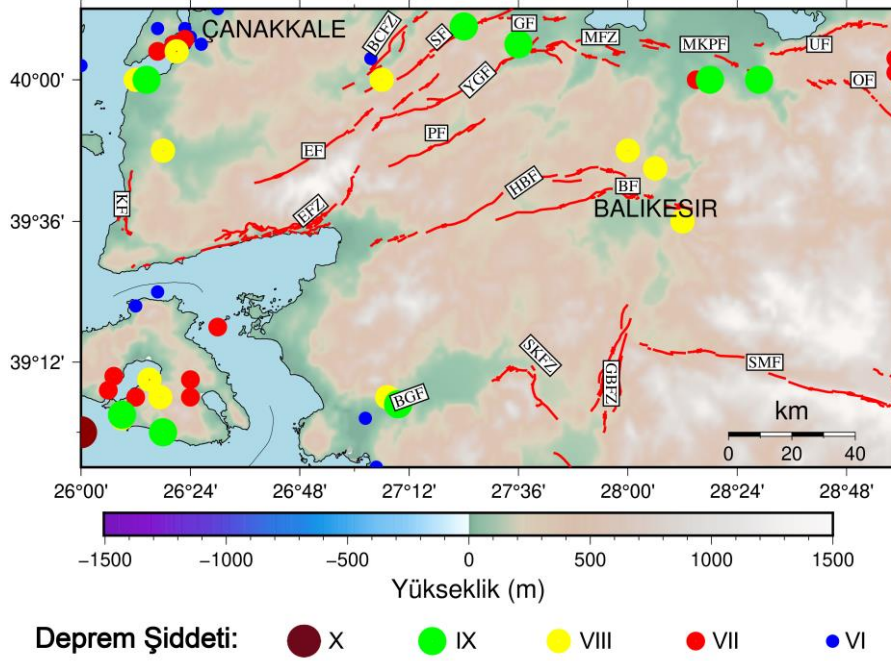


Şekil 2. Havran-Balıkesir Fay Zonu (HBFZ) ve segmentleri

2.1 Çalışma Bölgesi Sismotekniği

Balıkesir ili ve çevresi Türkiye'nin en aktif sismik kaynaklarından Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun güney kolunda yer alması sebebiyle de deprem üretme potansiyeli yüksek olan bir bölgedir. Bu nedenle çalışma bölgesinin sismotektonik özelliklerinin incelenmesi büyük önem arz etmektedir. Bu çalışma kapsamında, Balıkesir ve civarındaki alanda kayıt altına alınan aletsel ve tarihsel döneme ait deprem kayıtları taranmıştır. Havran-Balıkesir fay zonu civarının tarihsel dönem depremleri için Türkiye ve Yakın Çevresi İçin Geliştirilmiş Tarihsel Dönem (MÖ 2000-MS 1900) Deprem Kataloğu'ndan yararlanılmıştır (Başarı Baştürk vd. 2017). Tarihsel dönemde şiddeti VI ve VI' dan büyük depremler Şekil 3'de verilmiştir. Bölgenin tarihsel dönem sismotektonik haritası incelendiğinde; şiddeti VI ve VI' dan büyük depremlerin Midilli Adası, Ege Denizi civarında ve Çanakkale, Bursa yörelerinde meydana

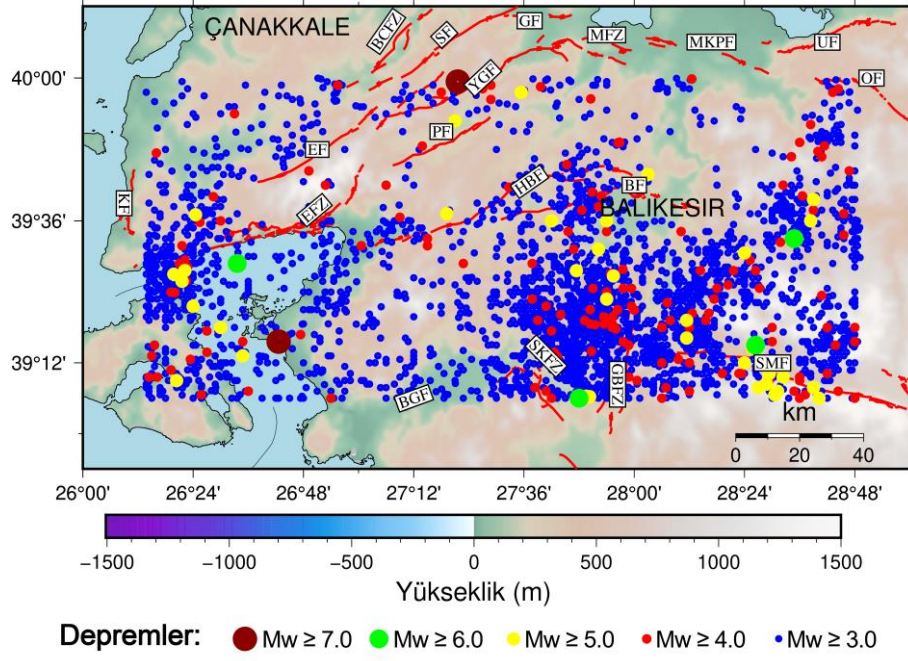
geldiği görülmektedir. Balıkesir civarında ise şiddeti VIII olan 3 farklı deprem görülmektedir (Şekil 3). Aletsel dönem için ise Tan vd. (2008), Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü (KOERI) ve T.C. İç İşleri Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından hazırlanan aletsel dönem deprem katalogları taranmıştır. Çalışma bölgesi içerisinde aletsel dönemde meydana gelen tüm depremlerin, konumları ve büyüklük, derinlik gibi bilgilerin karşılaştırılması yapılmış ve ulaşılabilen tüm depremlerin verilerine ulaşılmıştır. Ulaşılan tüm Mw≥3.0 deprem verileri doğrultusunda çalışma bölgesinin sismotektonik haritası elde edilmiş ve Şekil 4'de verilmiştir. HBFZ'nin aktif yapıları Emre vd. (2011) tarafından hazırlanan Türkiye Diri Fay Haritası'nda diri fay statüsünde gösterilmiş ve Sözbilir vd. (2016c) tarafından detaylı olarak haritalanmıştır. Çalışma kapsamında sismotektonik haritaların oluşturulmasında bu çalışmalarda haritalanan faylar altlık olarak kullanılmıştır (Şekil 4).



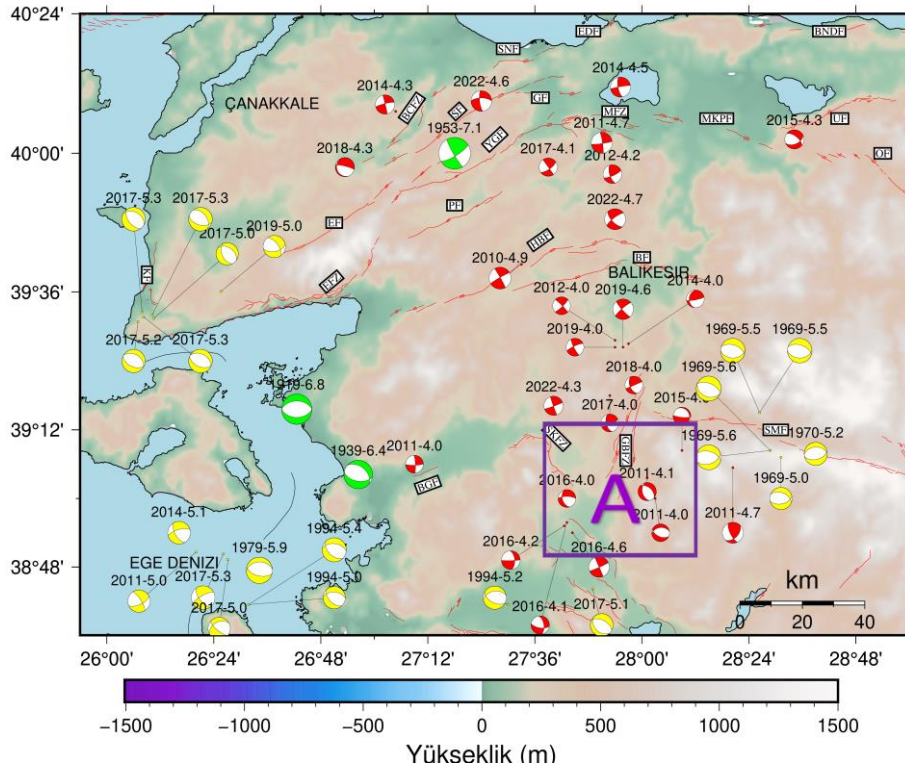
Şekil 3. Tarihsel dönemde çalışma bölgesinde şiddeti VI ve VI'dan büyük meydana gelen depremler.

Ülkemizde aletsel dönem deprem katalogları her ne kadar 1900'lü yıllardan kayıtları içerse de 1960'lı yıllardan sonra sismometre ağlarının genişlemesiyle daha fazla sayıda deprem kayıtları elde edilmeye başlanmıştır. Deprem odak mekanizma çözümleri ise sadece hasar yaratan depremlerden sonra yapılmıştır. 2010 yılından sonra AFAD $M_w \geq 4.0$ depremler için otomatik odak mekanizma çözümlerini web sayfasında yayınlamaya başlamıştır (İnt.Kyn.1). Çalışma kapsamında, bölge sismotektoniğinin daha iyi anlaşılması için $M_w \geq 4.0$ depremlerin odak mekanizma çözümleri elde edilmiş ve Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir. 2010 yılı öncesi yıllarda meydana gelen $M_w \geq 4.0$ depremlerin odak mekanizma çözümleri çeşitli yayınlardan alınmıştır (Tan vd. 2008, Yolsal Çevikbilen vd. 2014). 2010 yılı sonrası $M_w \geq 4.0$ depremlerin odak mekanizma çözümleri ise AFAD web sitesinden alınmıştır (Şekil 5, Şekil 6) (İnt. Kyn.1).

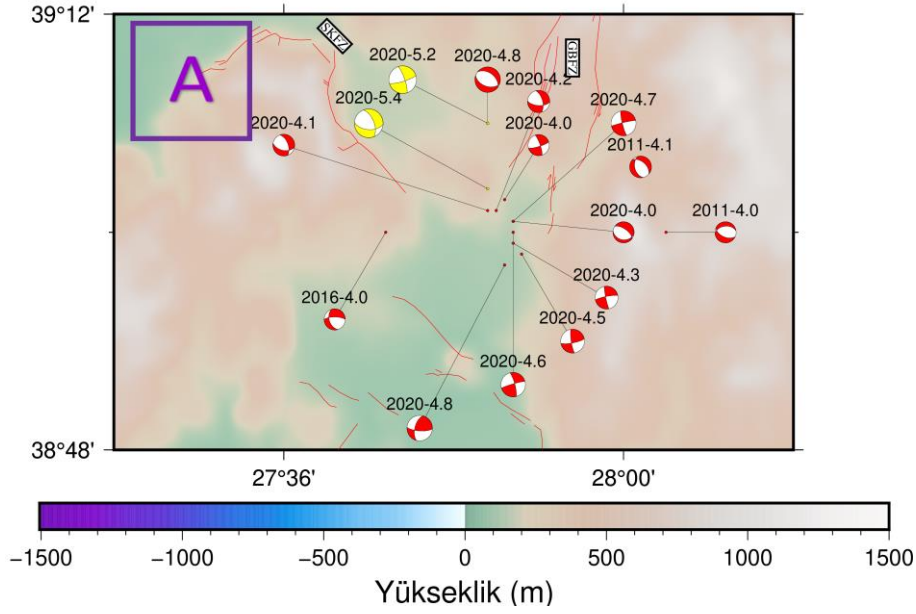
Aletsel dönem $M_w \geq 3.0$ sismotektonik haritası ve $M_w \geq 4.0$ depremlerin odak mekanizma çözümleri incelendiğinde; HBFZ ve çevresinde sıklıkla ve $M_w \geq 4.0$ depremlerin meydana geldiği görülmektedir. Bölgede orta büyüklük olarak ifade edilebilecek $M_w = 5.0-6.0$ depremlerin daha çok Ege Denizi içerisinde, Gelenbe Fay Zonu ve Simav Fay Zonu civarında olduğu görülmektedir. $M_w \geq 6.0$ ve $M_w \geq 7.0$ depremler ise çalışma bölgesinde en az sıklıkta meydana gelen depremler olduğu anlaşılmaktadır. HBFZ incelendiğinde; özellikle Havran, Osmanlar, Turplu ve Ovacık segmentlerinde aletsel dönemde $M_w = 5.0$ 'den büyük bir depremin meydana gelmediği ve $M_w = 3.0$, $M_w = 4.0$ depremlerin Gökçeyazı segmentinde sıklıkla meydana geldiği görülmektedir. Kepsut segmenti ise HBFZ üzerinde deprem aktivite yoğunluğu en az olan segmenttir.



Şekil 4. Aletsel dönemde çalışma bölgesinde Mw≥3.0 meydana gelen depremler.



Şekil 5. Aletsel dönemde çalışma bölgesinde Mw≥4.0 meydana gelen depremler ve odak mekanizma çözümleri (A: GBFZ' de 2020 yılında meydana gelen deprem fırtınası).



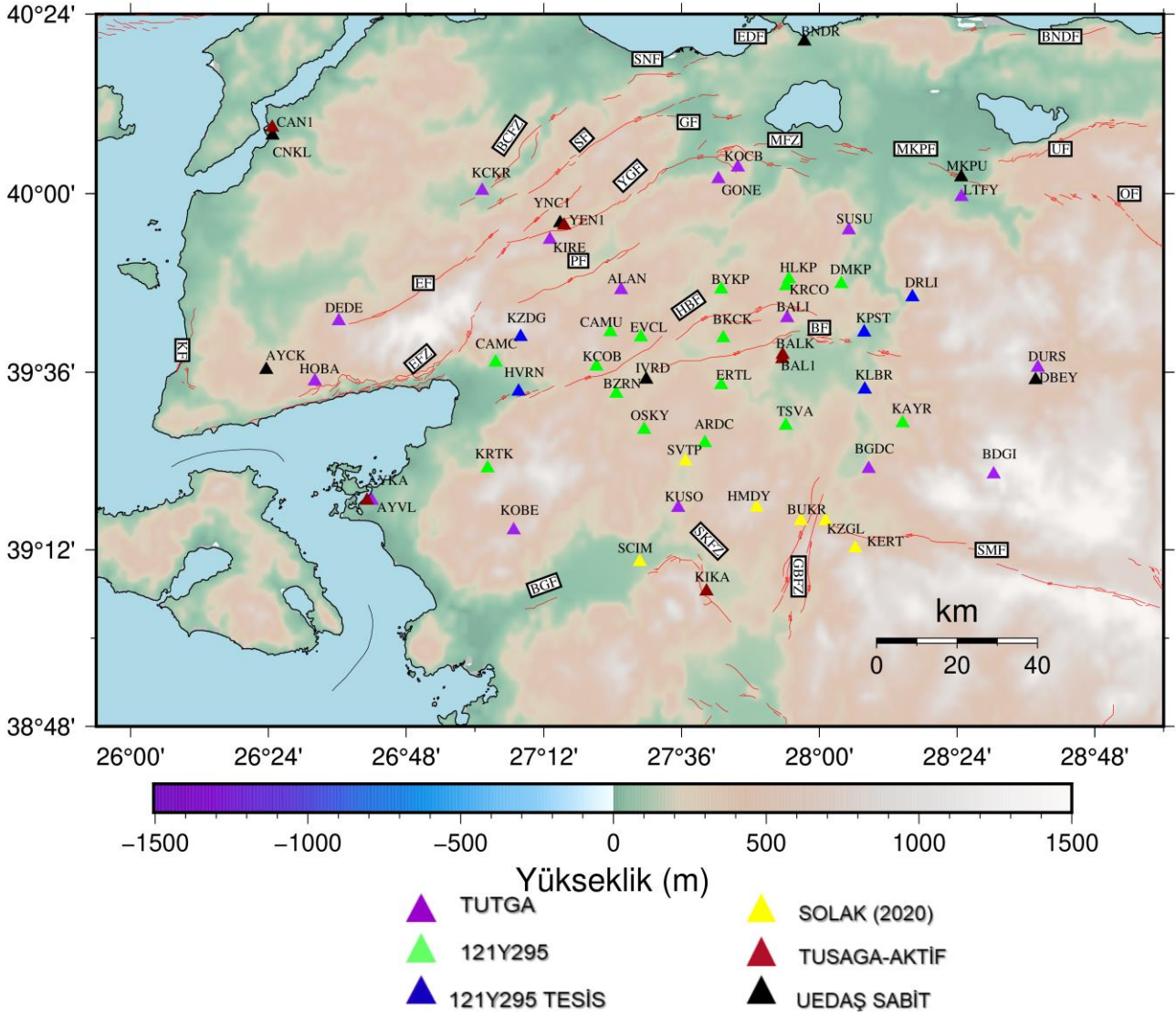
Şekil 6. GBFZ' de 2020 yılında meydana gelen depremler ve odak mekanizma çözümleri.

3. Çalışma Bölgesinde Oluşturulan GNSS Ağı ve GNSS Ölçüleri

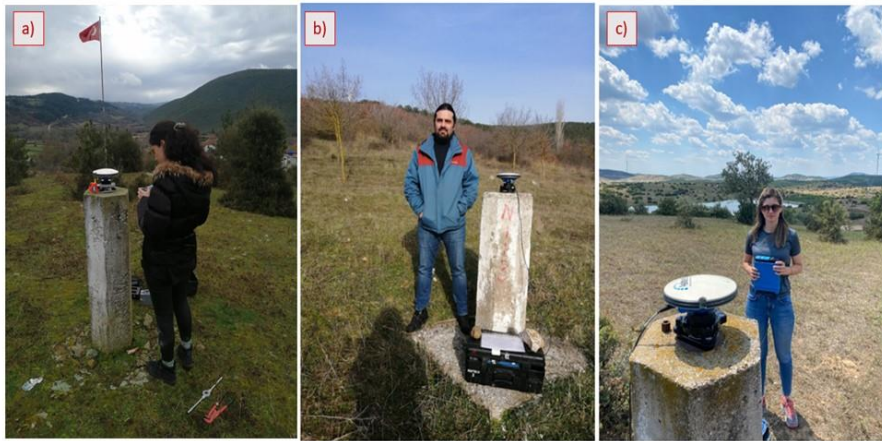
Havran-Balıkesir Fay Zonu' nun (HBFZ) güncel hareketlerini GNSS yöntemi ile belirlemek amacıyla; tüm segmentleri içine alan 21 noktalı bir GNSS ağı kurulmuştur. Ağın kurulması esnasında nokta dağılımlarının fay zonuna uygun ve homojen bir geometri sağlaması göz önünde bulundurulmuştur. Bu noktalar; sağlam zeminlerde, mümkün olduğunca insan aktivitesinden uzakta konumlanan, haritacılık çalışmaları amacıyla önceden tesis edilmiş ve fay HBFZ' ye dik profiller oluşturmak amacı ile yeni tesisi gerçekleştirilmiş noktalardır. HBFZ için kapsamlı bir jeodezik çalışma gerçekleştirebilmek ve segment bazlı daha detaylı yorumlar yapabilmek amacıyla bu noktalara ilave olarak; Afyon Kocatepe Üniversitesi (AKÜ) Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (BAPK) tarafından desteklenen 19.FENBIL.02 numaralı proje kapsamında, Solak'a (2020) ait çalışmadaki GNSS ağında yer alan noktalardan uygun 6 nokta ve bölgede mevcut olan 6 Türkiye Ulusal Sabit Aktif GNSS Ağı (TUSAGA-Aktif CORS-TR) istasyonu ağa dahil edilmiştir. Ayrıca bölgede yer alan Harita Genel Müdürlüğü (HGM) tarafından tesis edilmiş 15 Türkiye Ulusal Temel GNSS Ağı (TUTGA) noktası ve Uludağ Elektrik Dağıtım A.Ş' ne (UEDAŞ) ait sabit GNSS Ağına ait 7 istasyon ağa dahil edilmişlerdir. Dahil edilen

noktalarla birlikte toplam 55 noktalı bir GNSS ağı oluşturulmuştur. Oluşturulan GNSS ağı Şekil 7'de verilmiştir.

HBFZ' nin 21 noktalı olarak başlangıçta kurulan ağın tamamında 2022 yılının Şubat-Ağustos ayları arasında 1. Kampanya GNSS ölçüleri gerçekleştirilmiştir. Bu noktalar Şekil 7'de proje no ile belirtilmiştir. Ölçüler esnasında tüm noktalarda hem faz başlangıç belirsizliklerinin çözümü hem de maksimum konum-hız doğruluğu elde edebilmek amacıyla ikişer kişiden oluşan ekipler ile eş zamanlı, en az sekiz saatlik ve iki gün tekrarlı şekilde veriler toplanmıştır. Ölçülerde beş adet ASHTECH-ZXtreme ve beş adet THALES alıcı donanımları kullanılmıştır. Her bir noktada 15 sn. örnekleme aralıklı veri kaydı esas alınmıştır. Bunun yanı sıra ilgili GNSS alıcıları içerisinde veri karmaşıklığını önlemek ve değerlendirme için ön bir hazırlık olarak; her bir noktadaki gözlem için en yakın yerleşim yerinin ismi dört karakterli olacak şekilde alıcılara kaydedilmiştir. GNSS antenini etkileyebilecek verileri kaybetmemek ve atmosferik gecikmeleri-anten faz merkezi değişimlerini modellemede verilerin yetersiz kalmasını önleyebilmek amacıyla, kayıt esnasında minimum yükseklik açısı ise 5° olarak belirlenmiştir. 1. Kampanya GNSS ölçüleri gerçekleştirilen bazı noktalara ait görseller Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 7. HBZ için oluşturulan GNSS ağı.



Şekil 8. 1. Kampanya GNSS ölçüsü gerçekleştirilen bazı noktalar (a) CLVA b) DMKP c) OSKY).

1. Kampanya ölçüleri gerçekleştirilen noktaların geçmiş yıllardaki ölçülerine ait verilerini araştırma-temin çalışmaları devam etmektedir. Çalışma bölgesinde yer alan ve kurulan GNSS ağına dahil edilen, TUTGA noktalarının verilerinin temini

“Kurumlar arası iş birliği ve veri dağıtım protokolü” kapsamında Harita Genel Müdürlüğü’nden elde edilmiştir. Ek olarak, ağına dahil edilen Uludağ Elektrik Dağıtım A.Ş.’na (UEDAŞ) ait bölgedeki 7 sabit GNSS istasyonunun iki yıllık geçmiş dönem verileri temin

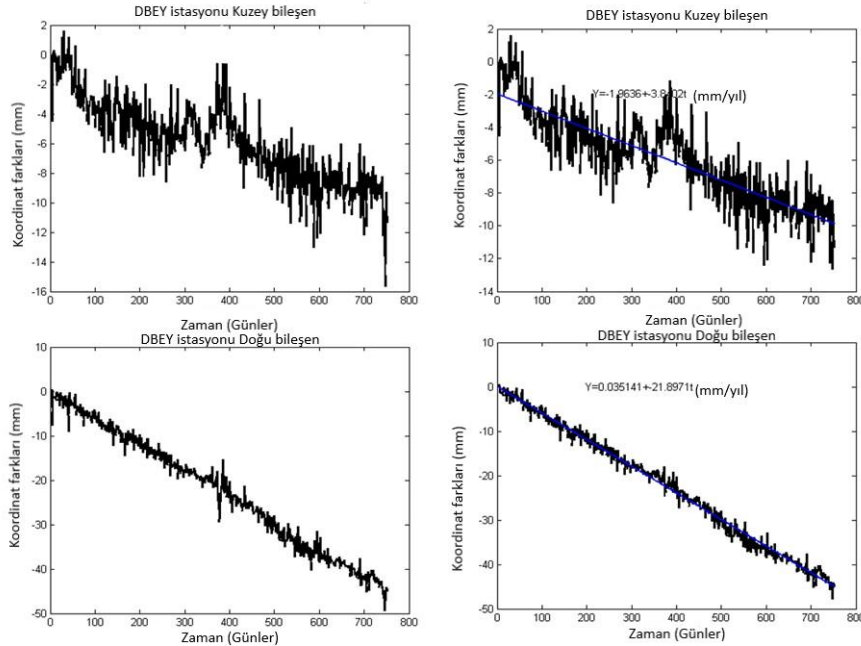
edilmiştir. Ayrıca Tapu Kadastro Genel Müdürlüğü (TKGM) sitesinde yayınlanan bölge TUSAGA AKTİF istasyonlarının 30 sn alıcıdan özerk bir format olan RINEX verileri de temin edilmiştir.

HBFZ için oluşturulan GNSS ağına ait elde edilen tüm ölçülerin değerlendirilmesi ve analiz edilmesinde GAMIT/GLOBK yazılım takımının 10.71 sürümü (Mart 2020) kullanılmıştır (Herring vd. 2018). Massachusetts Institute of Technology (MIT) tarafından geliştirilen bu yazılım takımının GAMIT modülü kısaca noktaların öncül koordinatlarını kullanmakta ve uydu yörünge bilgileri, atmosferik etkiler, saat hataları gibi parametrelerin doğrusal kestirimini yapmaktadır. Ölçülerdeki faz kesikliklerini ortadan kaldırarak çeşitli iterasyonlarla GNSS noktalarına ait üç boyutlu koordinatların dengelenmesini sağlamaktadır. GLOBK modülü, uydu-jeodezi teknikleriyle elde edilen ölçmelerin değerlendirilmesinin sonucunda ulaşılan tüm çözümleri Kalman Filtresiyle birleştirmektedir. Kalman Filtresi ise veri parametrelerinin kestirimini ardışık olarak sağlayan bir yöntem uygulamaktadır (Herring vd. 2018).

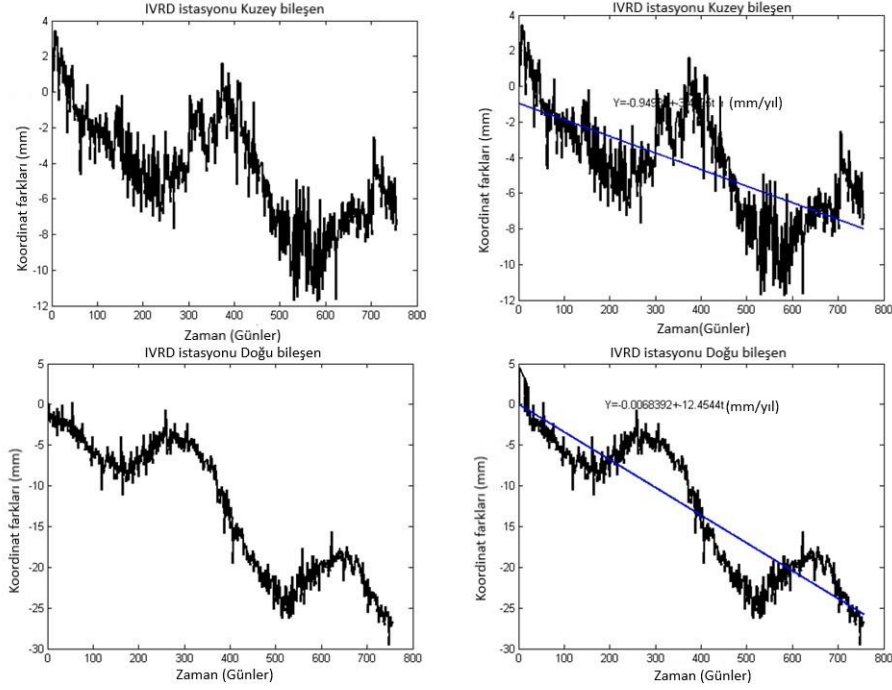
GNSS ölçülerinden elde edilen verilerin işlenmesi GAMIT modülünde gerçekleştirilmiştir. Bu adımda elde edilen değerler incelenerek kontrol aşamaları

sağlanmış ve GLOBK adımına geçilmiştir GAMIT yazılımı ile elde edilen koordinatlar kullanılarak, noktalara ait yıllık zaman serileri üretilmiştir. Sabit istasyonların lineer, mevsimsel ve düzensiz hareketleri zaman serileri analizi ile belirlenebilmektedir (Gülal vd. 2013, Gülal vd. 2015, Tiryakioğlu vd. 2017b). Çalışma bölgesinde bulunan sabit GNSS istasyonlara ait serilerinin analizi gerçekleştirilmiştir. Serilerdeki uyuşumsuz ölçüler tespit edilerek atılmıştır. Matlab ile geliştirilen yazılım aracılığıyla sabit GNSS istasyonlarının zamansal hareketini belirlemek için seriye uyan doğrusal fonksiyonun katsayıları kestirilmiştir, Şekil 9 ve Şekil 10'da verilmiştir. Kestirilen katsayılar yardımı ile sabit noktaların (ITRF14_era) hızları elde edilmiştir (Şekil 9, Şekil 10).

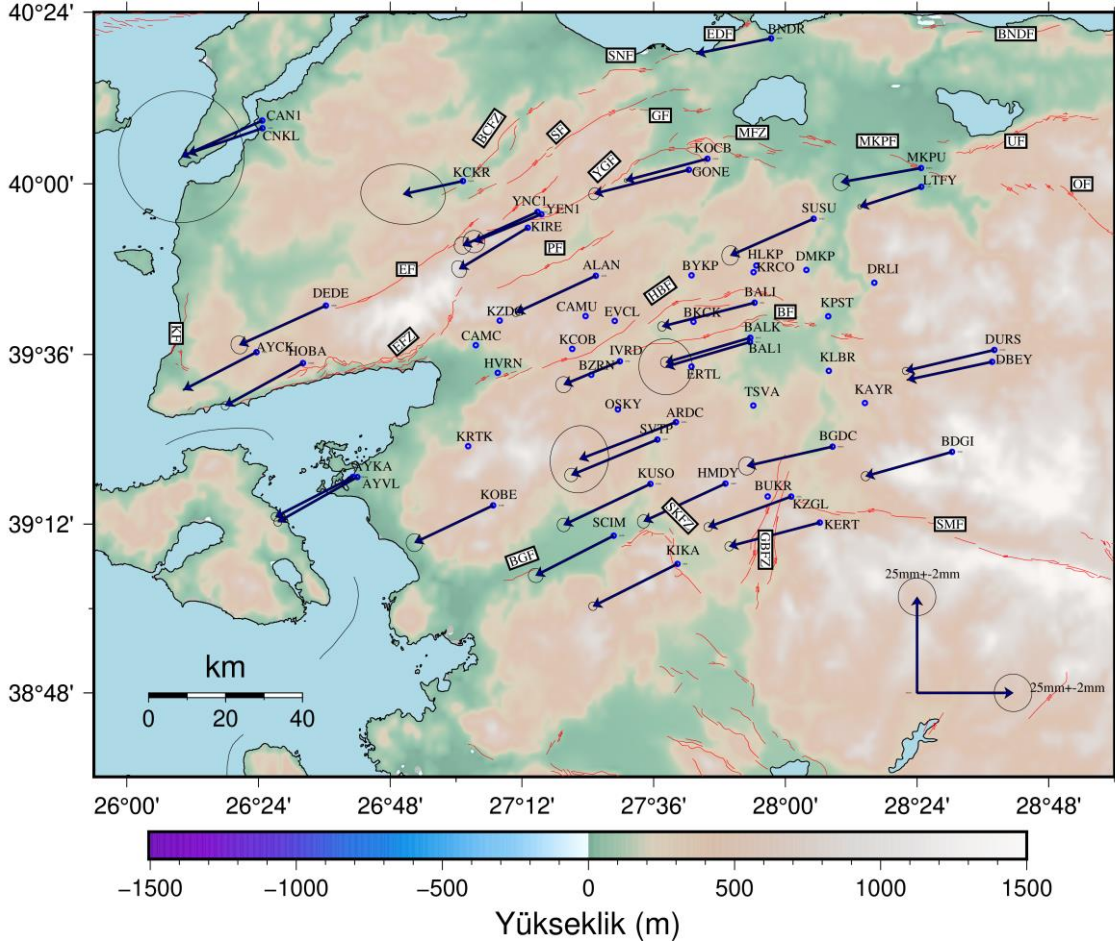
Yıllık zaman serilerinin üretilmesinin ardından stabilizasyon ve hız belirleme aşamalarına geçilmiştir. Bu çalışmada stabilizasyon için Uluslararası Küresel Uydu Konumlama Sistemi Servisi (International GNSS Service IGS) istasyonlarından Solak (2020) tarafından yapılan çalışmada kullanılan 25 tane IGS istasyonu seçilerek, Avrasya plakası referans alınmıştır. Çalışma bölgesinin stabilizasyon çalışması sonucunda 0.18 mm/yıl olarak elde edilen Avrasya plakası sabit ilk hızları Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 9. DBEY istasyonunun kuzey ve doğu bileşenine ait zaman serisi ve lineer fonksiyonu (ITRF14_EURA).



Şekil 10. IVRD istasyonunun kuzey ve doğu bileşenine ait zaman serisi ve lineer fonksiyonu (ITRF14_EURA).



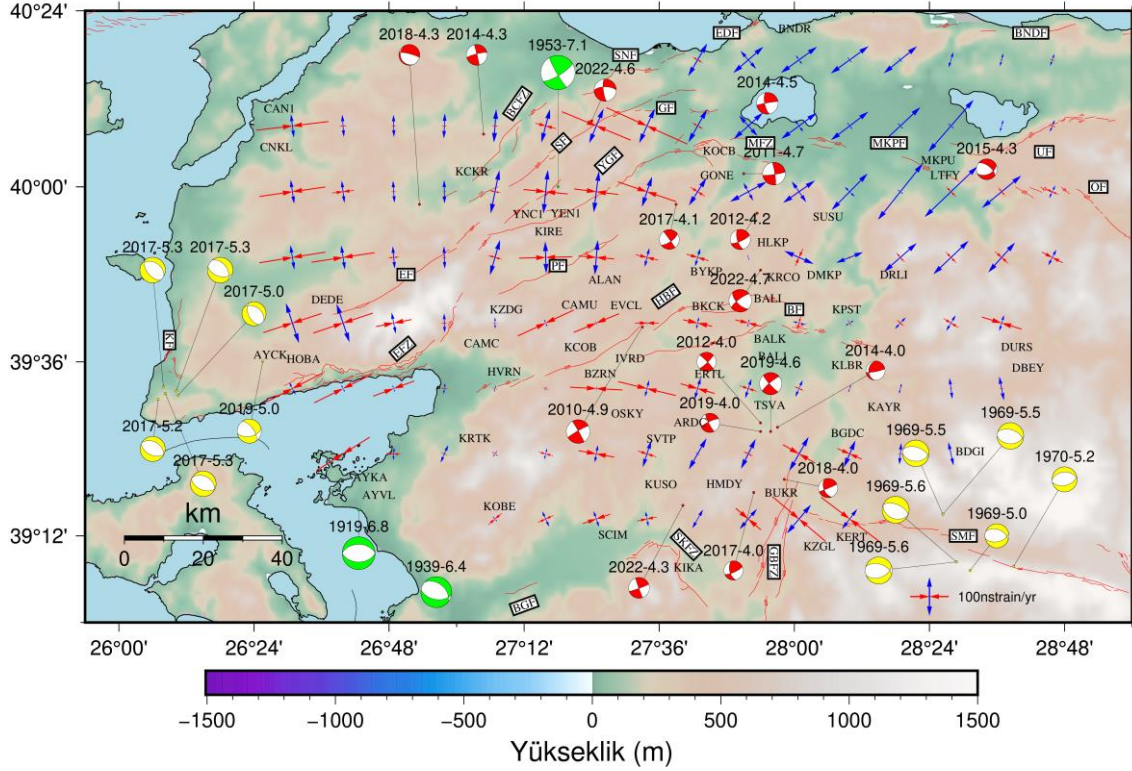
Şekil 11. Çalışma bölgesi Avrasya plakası sabit hız alanı.

Bir fay zonunda meydana gelen stres birikimi o fay zonunun güncel deformasyonu ile ilgili bilgi vermektedir. HBFZ' nin güncel deformasyonu hakkında yorumlar yapabilmek amacıyla; çalışma bölgesinin iki boyutlu gerinim analizi, GeodSuit

yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir (GeodSuit, 2017). Gerinim analizi için bölge 0.15° x 0.15°'lik gridlere ayrılarak ve GLOBK ile elde edilen hızlar girdi verisi olarak kullanılmıştır. HBFZ için elde edilen gerinim alanı Şekil 12'de verilmiştir. Ayrıca çalışma

bölgesinin sismotektonik haritaları için elde edilen deprem odak mekanizma çözümleri, GNSS hız

verileri doğrultusunda hesaplanan gerinim alanı üzerinde belirtilmiş ve Şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 12. Aletsel dönemde çalışma bölgesinde Mw≥4.0 meydana gelen depremlerin odak mekanizma çözümleri ve gerinim alanı.

4. Tartışma ve Sonuç

Ağda yer alan sabit GNSS istasyonlarının zaman serilerinin analizi gerçekleştirilmiştir (Şekil 9, Şekil 10). Şekil 10 incelendiğinde, IVRD istasyonunun periyodik hareketleri dikkat çekmektedir. İvrindi bölgesi bu fay zonunun Gökçeyazı segmentinde bulunup, Sözbilir vd. (2016c) tarafından yapılan çalışmada asismik hareketin olabileceği ifade edilmektedir. IVRD istasyonundaki hareketin anlamlandırılması için IVRD istasyonuna çok yakın konumda bulunan ve Solak 2020’de IVRD olarak isimlendirilen kampanya tipi nokta IVR2 noktası olarak yeniden isimlendirilerek kampanya tipi ölçülerle takip edilecektir. Şekil 11’de yer alan Avrasya sabit hız alanı incelendiğinde, K-G bileşenlerinin -4 ile -12 mm/yıl, D-B bileşenlerinin -15 ile -25 mm/yıl arasında olduğu görülmektedir. Hızların standart sapmaları ise 0.3-6.0 mm arasında değişmektedir. Bu hız alanı, ağda yer alan GNSS noktalarından geçmiş yıllarda 2 ve 3 kampanya ölçüsü bulunan noktalardan elde edilmiştir. Bölgede daha önce gerçekleştirilen jeodezik çalışmalarda hız alanlarıyla genel anlamda uyum içerisinde olduğu görülmüştür (Reilinger vd. 2006, Aktuğ vd.

2009, Solak 2020). Hız alanı kullanılarak gerçekleştirilen gerinim analizi esnasında hata elipsleri büyük olan noktalara ait hız bileşenleri, analize dahil edilmemiştir. Şekil 12’de gerinim analizi sonuçları incelendiğinde, HBFZ’ nin doğu kesiminde KD-GB yönlü sıkışmalar göze çarpmaktadır. Batı kısmında ise sıkışmalarla birlikte açılma bileşenleri de görülmektedir. Çalışma bölgesindeki diğer aktif fay zonları üzerindeki gerinim bileşenleri incelendiğinde, GBFZ üzerinde KD-GB doğrultulu sıkışma ve KB-GD doğrultulu açılma bileşenlerinin varlığı söz konusudur. HBFZ’ nin kuzeyindeki YGF üzerinde K-G doğrultulu açılma ve D-B doğrultulu sıkışma bileşenleri dikkat çekmektedir. Çalışma bölgesinin batısında konumlanan EFZ üzerinde ise KD-GB yönlü sıkışma bileşenleri görülmektedir. Solak (2020) tarafından yapılan çalışmada gerinim analizi sonuçları HBFZ üzerinde baskın açılma bileşenlerini göstermektedir. Aynı çalışmada zon üzerindeki en büyük gerinim bileşenleri Ovacık segmentinde ve sıkışma bileşeni baskın olarak görülmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlarla uyum göstermemesinin temel sebebinin; söz konusu çalışmada HBFZ civarında

yapılan gerinim hesaplarının beş jeodezik noktaya ait hız verilerinden elde edilmesi olarak düşünülmektedir. Bu çalışmadaki gerinim analizi sonuçları, ilk sonuçlar olarak sunulmakla birlikte jeodezik gerinim hesapları üzerinde çalışılmaktadır. Şekil 14'te gerinim bileşenleri ile meydana gelen deprem odak mekanizma çözümleri arasındaki uyum incelendiğinde ise elde edilen güncel veriler doğrultusunda literatür ile uyumlu olduğu görüşüne varılmıştır. HBFZ' nin güncel deformasyonlarının ve deprem potansiyelinin belirlenmesine yönelik jeodezik çalışmalar devam etmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma 121Y295 numaralı TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmiştir. Çalışmada kullanılan TUSAGA-AKTİF verileri için Tapu Kadastro Genel Müdürlüğü'ne (TKGM) Harita Genel Müdürlüğü'ne (HGM) ve Uludağ Elektrik Dağıtım A.Ş.'ne teşekkür ederiz.

5. Kaynaklar

Aktuğ, B., 2017. Jeodezik Deprem Tehlike Haritası, 16. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 03.05.2017 - 06.05.2017, Beytepe Kültür ve Kongre Merkezi, Ankara

Aktuğ B., Nocquet J. M., Cingoz A., Parsons B., Erkan Y., England P. C., Lenk O., Gurdal, M. A., Kılıçoğlu, A., Akdeniz, H., Tekgul, A., 2009. Deformation of western Turkey from a combination of permanent and campaign GPS data: limits to block-like behavior, *Journal of Geophysical Research*, **114**, B10404.

Akyar, B. E., 2020. Deprem tekrarlama periyotlarının jeodezik verilerle belirlenmesi: Banaz ve Elvanpaşa segmenti, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar, 86.

Başarır Baştürk, N., Özel, N. M., Altınok, Y., Duman, T.Y., 2017. Türkiye ve yakın çevresi için geliştirilmiş tarihsel dönem (MÖ 2000 - MS 1900-) deprem katalogu. Türkiye Sismotektonik Haritası Açıklama Kitabı (Ed. T.Y. Duman), Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayınlar Serisi, 4, 239 s. Ankara-Türkiye.

Dewey, J. F., and Şengör, A. M. C., 1979. Aegean and surrounding regions: complex multiple and

continuum tectonics in a convergent zone, *Geological Society of America Bulletin*, **90**, 84–92

Bozkurt, E., 2001. Neotectonics of Turkey – a synthesis. *Geodinamica Acta*, **14**, 3–30.

Duru, M., Pehlivan, Ş., Okay, A. İ., Şentürk, Y., Kar, H., 2012. Biga Yarımadası'nın genel ve ekonomik jeolojisi. 28, Yüzer, E, ve Tunay, G, (editörler), Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, Ankara, 7–74.

Emre, Ö., Doğan, A., Duman, T. Y., Özalp, S., 2011. 1:250,000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası Serisi, Balıkesir (NJ 35-3) Paftası, Seri No:4, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.

Eyübagil, E. E., Solak, H. İ. Kavak, U. S., Tiryakioğlu, İ., Sözbilir, H., Aktuğ, B., Özkaymak, Ç., 2021. Present-Day Strike-Slip Deformation Within The Southern Part Of İzmir Balıkesir Transfer Zone Based On GNSS Data And Implications For Seismic Hazard Assessment. Western Anatolia, *Turkish Journal of Earth Sciences*, **30**, 143-160.

Gezgin, C., Ekercin, S., Tiryakioğlu, I., Aktuğ, B., Erdoğan, H., Gürbüz, E., Osman, O., Bilgilioglu, S. S., Torun, A. T., Gündüz, H. İ., Oktar, O., Türkmen, C., Kaya, E., 2022. Determination of recent tectonic deformations along the Tuz Gölü Fault Zone in Central Anatolia (Turkey) with GNSS observations. *Turkish Journal of Earth Sciences*, **31(1)**, 20-33.

Gülal, E., Erdoğan, H., Tiryakioğlu, I., 2013. Research on the stability analysis of GNSS reference stations network by time series analysis. *Digital Signal Processing*, **23**, 1945–1957.

Gülal, E., Dindar, A.A., Akpınar, B., Tiryakioğlu, I., Aykut, N.O., Erdoğan, H., 2015. Analysis and management of GNSS reference station data, *Technical Gazette* **22(2)**, 407-414.

Herring, T. A., King, R. W., Floyd, M. A., McClusky, S. C., 2018. Introduction to GAMIT/GLOBK, Release 10.7, Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Mass. Inst. of Technol.

McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., Gürkan, M., Hamburger, M., Hurst, K., Kahle, L., Kastens, G., Kekelidze, G., King, R., Kotzev, V., Lenk, O., Mahmoud, S., Mishin, A., Nadariya, M., Ouzounis, A., Paradisis, D., Peter, Y.,

- Prilepin, M., Reilinger, R., Sanlı, I., Seeger, H., Tealab, A., Toksöz, M. N., Veis, G., 2000. Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the Eastern Mediterranean and Caucasus, *Journal of Geophysical Research*, **105**,5695-5719.
- McKenzie, D. P., 1972. Active tectonics of the Mediterranean region, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, **30**, 109-185.
- Özalp, S., Emre, Ö., Doğan, A., 2013. The segment structure of southern branch of the North Anatolian fault and paleoseismological behaviour of the Gemlik Fault, NW Anatolia. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, **147**, 1–17.
- Özkaymak, Ç., Sözbilir, H., Uzel, B., 2013. Neogene-Quaternary evolution of the Manisa Basin: evidence for variation in the stress pattern of the Izmir-Balıkesir Transfer Zone, western Anatolia. *Journal of Geodynamics*, Special issue: Tethyan Evolution, Anatolia, **65**, 117-135.
- Poyraz, F., Hastaoglu, K. O., Kocbulut, F., Tiryakioğlu, I., Tatar, O., Demirel, M., Duman, H., Aydın, C., Ciger, A. F., Gürsoy, Ö., Türk, T., Sığırcı, R., 2018. Determination of the block movements in the eastern section of the Gediz Graben (Turkey) from GNSS measurements. *Journal of Geodynamics*, Special issue: Tethyan Evolution, Anatolia, **123(2)**, 117-135.
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrance, S., Ergintav, S., Cakmak, R., Ozener, H., Kadirov, F., Guliev, I., Stepanyan, R., Nadariya, M., Hahubia, G., Mahmoud, S., Sakr, K., ArRajehi, A., Paradissis, D., AlAydrus, A., Prilepin, M., Guseva, T., Evren, E., Dmitrotsa, A., Filikov, S. V., Gomez, F., AlGhazzi, R., Karam, G., 2006. 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 Atmospheres*. **111(B5)**: B05411.
- Solak, H. İ., 2020. İzmir-Balıkesir Transfer Zonu ve çevresindeki güncel deformasyonların GNSS Yöntemi ile incelenmesi, Doktora Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar,147.
- Sözbilir, H., Özkaymak Ç., Sümer, Ö., Uzel, B., Eski, S., Tepe, Ç., Softa, M., Güler, T., Yaralı, G., 2015. 3. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, İzmir, Türkiye, 14 - 16 Ekim 2015. DEÜ, İzmir.
- Sözbilir, H., Sümer, Ö., Özkaymak, Ç., Uzel, B., Güler, T., Eski, S., 2016a. Kinematic analysis and palaeoseismology of the Edremit Fault Zone: evidence for past earthquakes in the southern branch of the North Anatolian Fault Zone, Biga Peninsula, NW Turkey, *Geodinamica Acta*, **28**, 273-294.
- Sözbilir, H., Özkaymak, Ç., Uzel, B., Sümer, Ö., Eski, S., Güler, T., Yaralı G., 2016b. Edremit Körfezi ile Balıkesir ili arasında kalan diri fayların tektonik jeomorfolojisi ve paleosismolojisi. No: UDAP-G-13-18, Kalkınma Bakanlığı Projesi.
- Sözbilir, H., Özkaymak, Ç., Uzel, B., Sümer, Ö., Eski, S., Tepe, Ç., 2016c. Paleoseismology of the Havran Balıkesir Fault Zone: evidence for past earthquakes in the strike-slip dominated contractional deformation along the southern branches of the North Anatolian Fault in northwest Turkey, *Geodinamica Acta*, **28(4)**, 254-272.
- Sümer, Ö., Uzel, B., Özkaymak, Ç., Sözbilir, H., 2018. Kinematics of the Havran-Balıkesir Fault Zone and its implication on geodynamic evolution of the Southern Marmara Region, NW Anatolia, *Geodinamica Acta*, **30:1**, 306-323.
- Şengör, A. M. C., and Barka, A. 1992. Evolution of escape related strike-slip systems: Implications for distribution of collision orogens. Abstracts, 29th IGC, Japan.
- Tan, O., Tapırdamaz, M. C., Yörük, A., 2008, The Earthquakes Catalogues for Turkey, *Turkish Journal of Earth Science*, **17**, 405-418.
- Tiryakioğlu, I., Floyd, M., Erdogan, S., Gulal, E., Ergintav, S., McClusky, S., Reilinger, R., 2013. GPS constraints on active deformation in the Isparta Angle region of SW Turkey, *Geophysical Journal International*, **195**, 1455-1463.
- Tiryakioğlu, I., Yiğit, C.O., Yavaşoğlu, H. 2017a. The Determination of interseismic, coseismic and postseismic deformations caused by the Gökçeada-Samothraki earthquake (2014, Mw: 6.9) Based On GNSS Data.. *Journal of African Earth Sciences* **133**, 86-94.
- Tiryakioğlu, I., Yavaşoğlu, H., Uğur, M.A., Özkaymak, Ç., Yılmaz, M., Kocaoğlu, H., Turgut, B., 2017b. Analysis

of October 23 (Mw 7.2) and November 9 (Mw 5.6), 2011 Van earthquakes using long-term GNSS time series, *Earth Science Research Journal*, **21(3)**, 147-156.

Tiryakioğlu, İ., Gulal, E., Solak, H.I., Ozkaymak, C., 2018. Crustal Deformation Modelling by GNSS Measurements: Southwestern Anatolia, Turkey. In: Kallel, A., Ksibi, M., Ben Dhia, H., Khélifi, N. (eds) Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions. EMCEI 2017. Advances in Science, Technology & Innovation. Springer, Cham.

Tiryakioğlu, İ., Umutlu, A. İ., Poyraz, F., 2019. Jeodezik Yöntemlerle Deprem Tekrarlama Periyotlarının Belirlenmesi: Alaşehir Bölgesi Örneği *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **3**, 762-768.

Uzel, B., Sözbilir, H., Özkaymak, Ç., Kaymakçı, N., Langereis, C. G., 2013. Structural evidence for strike-slip deformation in the Izmir-Balıkesir Transfer Zone and consequences for late Cenozoic evolution of western Anatolia (Turkey), *Journal Geodynamics*, **65**, 94-116

Yolsal Cevikbilen, S., Taymaz, T., Helvacı, C., 2014. Earthquake mechanisms in the Gulfs of Gökova, Sığacık, Kuşadası, and the Simav region (Western Turkey): Neotectonics, seismotectonics and geodynamic implications, *Tectonophysics*, **635**, 100-124.

İnternet kaynakları

1 1-<https://www.afad.gov.tr/>, (07.09.2022)

Veri Madenciliği Uygulamalarının Web Tabanlı Mekânsal Görsel Analitik Ortamda Sunumu: COVID-19 Aşı Tweet'leri Örneği

Burak ÇAĞLAR¹, Hüseyin Zahit SELVİ²

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.

² Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Konya.

e-posta:bcaglar19@gmail.com,
hzselvi@erbakan.edu.tr,

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-4490-1447>

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7486-0992>

Geliş Tarihi: ; Kabul Tarihi:

Öz

Anahtar kelimeler

Mekânsal görsel analitik; Veri madenciliği; Büyük veri; Etkileşimli haritalama; Sosyal medya

Mekânsal görsel analitik, mekânsal bilgilerin etkileşimli görsel ara yüzlerle ele alındığı analitik akıl yürütme bilimidir. Mekânsal görsel analitik sistemleri sayesinde, Twitter gibi sosyal medya platformlarındaki büyük veri setlerinden bir konu hakkında elde edilen veriler son kullanıcıya etkileşimli haritalama sistemleriyle sunulabilir. 11 Mart 2020'de Dünya Sağlık Örgütü'nün COVID-19 salgını duyurmasının ardından Twitter veri trafiğinde de ciddi bir artış görülmüştür. Bu çalışmada, COVID-19 salgını döneminin önemli tartışmalarından biri olan COVID-19 aşılı tweet trafiğinin zamansal ve mekânsal gelişimi veri madenciliği teknikleriyle incelenmiş ve görsel analitik ortamda sunulmuştur. Bu çalışma ile twitter gibi sosyal medya platformlarının sahip olduğu büyük veri olarak kabul edilen veri setlerinin veri madenciliği yöntemleriyle analiz edilerek afet ve kriz yönetimi açısından önemli çıkarımlar yapılabileceği ortaya konmuştur.

Presentation of Data Mining Applications in Web Based Geovisual Analytical Environment: Example of COVID-19 Vaccine Tweets

Abstract

Keywords
Geovisual analytic;
Data mining; Big data;
Interactive mapping;
Social media

Spatial visual analytics is the science of analytical reasoning in which spatial information is handled with interactive visual interfaces. Thanks to spatial visual analytics systems, data obtained from large data sets on social media platforms such as Twitter can be presented to the end user with interactive mapping systems. After the World Health Organization announced the COVID-19 outbreak on March 11, 2020, there has been a significant increase in Twitter data traffic. In this study, the temporal and spatial development of tweet traffic about COVID-19 vaccines, which is one of the important discussions of the COVID-19 epidemic period, was examined with data mining techniques and presented in a visual analytical environment. With this study, it has been revealed that important inferences can be made in terms of disaster and crisis management by analyzing the data sets, which are accepted as big data, of social media platforms such as twitter with data mining methods.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Görsel analitik alanının gelişmesiyle ortaya çıkan mekânsal görsel analitik, coğrafi konum ve bu konumdaki nesnelere, olaylar, olgular ve işlemleri içeren problemlerin etkileşimli görsel ara yüzlerle ele alındığı analitik akıl yürütme bilimidir (Thomas and Cook 2005, Andrienko *et al.* 2007, Andrienko *et al.* 2011). Mekânsal görsel analitik, kullanıcıların

mekânsal verileri kullanarak örüntüleri tespit etmeleri ve gelecekteki sonuçları tahmin etmeleri için kartografya, hesaplamalı yöntemler, ara yüz tasarımı, biliş bilimi vb. alanların her birini etkileşimli haritalama sisteminde birleştirmektedir (Robinson 2017).

Mekânsal görsel analitik'in çeşitli alanlarda uygulamaları bulunmaktadır. MacEachren *et al.* (2011) geliştirdikleri SensePlace2 adlı uygulamada

kriz yönetimi alanında Twitter mesajlarını kullanarak coğrafi temelli durumsal farkındalık ile ilgili mekânsal görsel analitik yaklaşımı sunmuşlardır. Moore *et al.* (2013) geliştirdikleri eXplorer isimli mekânsal görsel analitik uygulamasıyla grid tabanlı toplanan WikiCrimes verileriyle analiz işlemleri gerçekleştirerek, analiz sonuçlarını kullanıcıya mekânsal olguların daha kolay anlaşıldığı nokta (pin) haritaları, yoğunluk haritaları ve koroplet haritalar ve istatistiksel bilgi grafikleri şeklinde sunmuşlardır. Luo *et al.* (2015) küresel değişim değerlendirme (global change assessment) modelinden iklim senaryolarının keşfedilmesini sağlamak için kullanıcıların su kıtlığını coğrafi farklılıklar, zamansal değişim ve gelecekteki farklı iklim politikaları senaryolarıyla karşılaştırarak keşfetmelerine olanak tanıyan web tabanlı mekânsal görsel analitik yaklaşımı sunmuşlardır. Lei *et al.* (2015) Nijer Nehri Havzasındaki su arzı, talebi ve kıtlığını çeşitli senaryolar altında keşfetmek için web tabanlı bir mekânsal görsel analitik yaklaşımı sunmuşlardır. Robinson *et al.* (2016) Suriye'deki siyasi, sosyal, ekonomik ve askeri olayların örüntülerini anlamak için mekânsal-zamansal verilerin değerlendirilmesinde STempo mekânsal görsel analitik sistem tasarımı yaklaşımını ortaya koymuşlardır.

Yakın zamanda tüm dünya'nın yaşamış olduğu COVID-19 pandemisi gibi kriz dönemlerinde; Facebook, Instagram ve Twitter gibi sosyal medya platformlarında paylaşılan haberlerin, resmi haber ajanslarından daha hızlı verilmeleri ve daha fazla içerik barındırmaları nedeniyle insanların sosyal medya platformlarında normalden daha fazla zaman geçirdikleri görülmektedir. Kullanıcı sayısı ve sosyal ifade paylaşım sınırlamalarının bulunmadığı bu tür sosyal medya platformları sürekli yapılan sosyal mesaj paylaşımlarıyla büyük verinin barındırıldığı platformlar haline dönüşmektedir. Büyük veriye dönüşen sosyal medya verileri doğru uygulama ve analiz teknikleriyle işlenerek karar vericiler için anlamlı bilgi haline dönüşmektedir (Imran *et al.* 2015, Castillo 2016, Imran *et al.* 2020). Geçmişte Pakistan Sel Felaketi (Murthy and Longwell 2012), Nepal depremi (Kumar 2020), Hindistan Sel Felaketi (Nair *et al.* 2017) vb. birçok olayda twitter verileri analiz edilerek kullanılmıştır. Eligüzel (2021), Nepal

Depremiyle ilgili tweetleri kullanarak metin sınıflandırması ve konum bilgilerine yeni bir yaklaşım getirerek olası bir deprem durumunda, kapsamlı bir deprem yönetimi sağlamak için Twitter'dan faydalı bilgiler çıkarmaya odaklanmıştır. COVID-19'un küresel istatistikleri incelendiğinde, 31 Ekim 2022 tarihi itibarıyla onaylanmış COVID-19 vaka sayılarının 627 milyonu aştığı, ölüm vakalarının 6.5 milyonun üzerinde olduğu ve 12.8 milyar doz üzerinde COVID-19 aşısı yapıldığı görülmektedir (Int Kyn. 1). Pfizer/BioNTech, Sinopharm, Sinovac, Moderna, Oxford/AstraZeneca, Covaxin ve Sputnik V aşılara Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından acil kullanım onayı (EUA) verilmesiyle birlikte dünya çapında hızlı bir şekilde aşılama çalışmaları gerçekleştirilmiştir (Dayan 2021). Dünya Sağlık Örgütü'nün 11 Mart 2020'de COVID-19 salgını ilan etmesinin ardından sosyal medya platformlarından biri olan Twitter uygulamasının kullanım trafiğinde büyük bir artış görülmüş ve insanların doğal yaşamlarından uzak kaldığı, sosyal medya ortamlarında vakit geçirdikleri bu dönemde pandemiye özgü birden fazla terim twitter uygulamasında trend olmuştur. Bu terimlerin en fazla kullanılanları arasında aşı ile ilgili terimler de yer almaktadır. Bu dönemdeki Twitter verileri, duygu analizi, konu modelleme, davranış analizi, veri madenciliği ve analitik görselleştirme alanlarında çalışan araştırmacılar için değerli bir kaynak haline dönüşmüştür.

Bu çalışmada, COVID-19 pandemi döneminin en büyük tartışma konularından olan COVID-19 aşılı hakkında atılan tweet'lerin hangi ülkelerin gündeminde yer aldığı ve tweet trafiğinin mekânsal – zamansal gelişimi, kümeleme analizi yöntemiyle incelenmiş ve interaktif yapılı görsel analitik ortamda sunulmuştur. Çalışmada Pfizer/Biontech, Sinopharm, Sinovac, Moderna, Oxford AstraZeneca, Covaxin, Sputnik markalarının ürettiği COVID-19 aşılı hakkında atılan tweet veri seti kullanılmıştır. İlk olarak, tweet'lerin coğrafi kodlama işlemi yapılmıştır. Bu sayede belirli bir konum bilgisi içeren tweet'lerin harita üzerinde işaretlemesi gerçekleştirilmiştir. İkinci olarak, tweet veri setinde bulunan gizli verilerin keşfi gerçekleştirilmiştir. Üçüncü aşamada, kümeleme analizi yöntemiyle birden fazla değişken kullanarak kümeleme analizi

yapılmıştır. Çalışmanın son aşamasında, COVID-19 aşısı hakkındaki tweet verilerinin mekânsal-zamansal gelişiminin gösterilmesi, kümeleme analiz sonuçlarının görsel analitik ortamda sunulması amacıyla web tabanlı interaktif bir uygulama geliştirilmiştir. Kümeleme analizi tekniğiyle, ülkelerin “covid” ve “aşı” içerikli atılan tweetler ile o ülkelerde uygulanan Covid-19 aşuları arasında mekânsal-zamansal benzerlik ve farklılıklar ortaya konulmuştur.

2. Materyal ve Metot

2.1 COVID-19 Tweet Veri Seti

Bu çalışmada, Gabriel Preda tarafından dünya genelinde Pfizer/BioNTech, Sinopharm, Sinovac, Moderna, Oxford/AstraZeneca, Covaxin ve Sputnik V aşuları ile ilgili toplanarak hidratlanmış şekilde “COVID-19 All Vaccines Tweets” başlığı altında Kaggle platformunda kullanıcıların paylaşımına açılan tweet veri seti kullanılmıştır (Int Kyn. 2).

2.2 Coğrafi Kodlama

Twitter kullanıcıları, kullandıkları mobil cihazın küresel konumlandırma sistemini (GPS) kullanarak coğrafi konumlarını tweet’e eklenmesini sağlayabilmektedirler. Ancak daha önceki çalışmalar incelendiğinde;

Bennett *et al.* (2018) 2016-2017 yılları arasında Southampton şehrinde gerçekleştirdikleri çalışma kapsamında elde ettikleri 5 milyon tweet’den yaklaşık 36 bin tweet’in coğrafi konum verisine sahip olduğunu,

Burton *et al.* (2012) twitter üzerindeki sağlık iletişimi hakkında gerçekleştirdikleri çalışma kapsamında elde ettikleri 23.8 milyon tweet verisinden sadece 2.02% oranındaki yani yaklaşık 480 bin tweet’in coğrafi konuma sahip olduğunu bildirmiştir.

Birçok twitter kullanıcısı kullanıcı profillerini tanımlarken, konum bilgisi olarak şehir, eyalet, ülke isimlerini girmektedir. Ancak birçok kullanıcı da hiçbir konum ifade etmeyen rastgele ya da mizahi ifadeler girmektedir (Burton *et al.*2012).

Bu çalışmada, tweet verilerinin harita üzerinde konumlandırılması için twitter kullanıcılarının kendi konumlarını ifade ettikleri “user_location” öznitelik

bilgisi kullanılmıştır. Twitter kullanıcılarının bu alana herhangi bir kısıtlama olmaksızın istediği içeriği girebildiği için öncelikli olarak yeryüzünde bir konum ifade eden içeriklerin bulunması işlemi gerçekleştirilmiştir. Konum ifade eden içeriklerin bulunması işleminde aşağıdaki hususlara dikkat edilmiştir;

- Kullanıcının tweet atarken konum bilgisini açmamış ve/veya konum kısmına herhangi bir ifade yazmamış olması (boş bırakması),
- Kullanıcının tweet atarken konum bilgisini açmış olması ya da konum bilgisini koordinat çiftleriyle (enlem/boylam) tanımlarken “°”, “N”, “S”, “E”, “W”, “K”, “G”, “D”, “B ifadelerini kullanması,
- Kullanıcının konum bilgisini kendi ana dilindeki ülke ismiyle ifade etmesi (Örneğin; الإماراتالعربية المتحدة),
- Kullanıcının konum bilgisini İngilizce ülke ismiyle ifade etmesi (Örneğin; United Arab Emirates),
- Kullanıcının konum bilgisini ülkelerin id/kod bilgileri ile ifade etmesi (Örneğin; AE),
- Kullanıcının konu bilgisini ülkelerin ISO3 ülke kodu bilgileri ile ifade etmesi (Örneğin; ARE).

Kullanıcı konum bilgisini yerleşim şehir ismi ile ifade etmişse bu tweetlerin bulunmasında SimpleMaps firmasının www.simplemaps.com/data/world-cities adresinde yer alan Temel düzeyde kullanıma sunulan ve öne çıkan şehirleri (büyük, başkentler vb.) içeren “csv” formatındaki veri setinden yararlanılmıştır.

2.3 Kümeleme Analizi

Kümeleme analizinin temel amacı, bir veri topluluğundaki nesnelere (birimleri) benzerliklerine göre kendi içinde olabildiğince birbirine benzeyen, kendi aralarında ise olabildiğince farklı kümelere ayırmaktır (Tatlıdil 1996, Atbaş 2008).

Nesnelere (birimleri) benzerliklerine göre kümelemede en çok kullanılan algoritmalar hiyerarşik ve hiyerarşik olmayan yöntemler olarak iki kategoriye ayrılmaktadır (Blashfield and Aldenferder 1978). Her iki yöntem de yer alan algoritmalarındaki en önemli ölçüt, kümeleme analizi sonucunda oluşan kümeler arasındaki farkın ve

kümeler içi benzerliklerin maksimum düzeyde sağlanmasıdır.

Hiyerarşik kümeleme yöntemleri içerisinde en iyi kümeleme sonucunu veren yöntemler biri olan Ward tekniği, birimlerin kümelenmesinde varyansı minimuma indiren ve en uygun küme sayısını tahmin eden yöntemdir (Hands and Everit 1987). Ward yönteminde Hata Kareler Toplamı (ESS) formülünden yararlanılmaktadır.

$$ESS = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \quad (1)$$

Burada x_i i'inci gözlemin skoru, n veri sayısıdır (Aldenderfer and Blashfield 1984).

Hiyerarşik kümeleme yöntemlerinden biri olan K-ortalamalar (K-Means) algoritması J.B. MacQueen tarafından geliştirilmiştir (MacQueen 1967). Merkez nokta kümeyi temsil etmektedir. Her veri sadece bir kümenin elemanı olması sebebiyle keskin bir kümeleme algoritmasıdır. Küme sayısının az olduğu büyük veri setlerinde çok hızlı çalışmaktadır (Han and Kamber 2001). Algoritmanın genel mantığı, n adet veriden oluşan veri setini, küme içi benzerliğin maksimum ve kümeler arası benzerliğinin minimum olduğu k adet kümeye bölümlenektir (Silahtaroglu 2013).

Kümeleme Analizi işlemlerinde, IBM şirketinin geliştirmiş olduğu IBM SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) Statistics yazılımı ve/veya Konstanz Üniversitesi'nde geliştirilen, açık kaynak ve çapraz platform veri analizi, raporlama, entegrasyon platform olan KNIME (Konstanz Information Miner) yazılımı kullanılmıştır.

3. Uygulama

COVID-19 pandemi döneminin en büyük tartışma konularından olan COVID-19 aşılı hakkında atılan tweet'lerin hangi ülkelerin gündeminde yer aldığı ve tweet trafiğinin mekânsal – zamansal gelişimi, kümeleme analizi yöntemiyle incelenmiş ve interaktif yapıları görsel analitik ortamda sunulması hedeflenmiştir.

Çalışma'nın ilk aşamasında, Gabriel Preda tarafından dünya genelinde Pfizer/BioNTech, Sinopharm,

Sinovac, Moderna, Oxford/AstraZeneca, Covaxin ve Sputnik V aşılı ile ilgili toplanarak hidratlanmış şekilde "COVID-19 All Vaccines Tweets" başlığı altında Kaggle platformunda kullanıcıların paylaşımına açılan tweet veri setinin düzenlenmesi gerçekleştirilmiştir. "csv" formatındaki "COVID-19 AllVaccinesTweets" veri seti öncelikle veri hazırlama sürecine sokularak "dbase (dbf)" formatında dönüştürülmüştür. Dönüşüm işlemi sonucunda; "tweet_id", "user_name", "user_location", "user_description", "user_created", "user_followers", "user_friends", "user_favourites", "user_verified", "date", "text", "hashtags", "source", "retweets", "favorites" ve "is_retweet" olmak üzere 16 adet özniteli alanından ve 218412 adet tweet'ten oluşan tweet veri seti elde edilmiştir.

İkinci aşamada, COVID-19 tweet verilerinin harita ekranı üzerinde coğrafi işaretlenmesi gerçekleştirilmiştir. COVID-19 tweet veri setindeki "user_location" özniteliğinde yer alan koordinat çiftleri, anadildeki ülke isimleri, İngilizce ülke isimleri, ülke kodları ve iso3 ülke kodları sorgulamalarıyla eşleşen tweetler ve "Null" değere sahip olmayan diğer tweetler Arcgis Geocoding servisi kullanılarak harita üzerinde konumlandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Veri setindeki 218412 adet tweet verisinden; 142733 adet tweet harita üzerinde bir konumla eşleşmiştir. Eşleşme sağlamayan 75679 adet tweet verisinden 64348 adet tweet verisinin "user_location" özniteliği "Null" değere sahiptir. Geriye kalan 11331 adet verinin konum ifade etmeyen kelime, cümle ya da mizahi ifadeler (Örneğin; of Hope", "all around the world", "always somewhere...", "Anywhere But Here", "Around the World" vb.) içerdiği tespit edilmiştir.

Üçüncü aşamada, COVID-19 tweet veri seti içerisinde yer alan gizli örüntülerin keşfi gerçekleştirilmiştir. Örneğin; COVID-19 Tweet veri seti incelendiğinde, toplamda 218.412adet tweet olduğunu, bu tweetlerden 142.733adetinin Geocoding servisi kullanılarak coğrafi işaretleme yapıldığı bilinmektedir. Ancak bu tweetlerin hangi ülkeden atıldığı ve ülkelerde COVID19 hakkında tweet atan kullanıcı sayısının da belirlenmesi

gerekmektedir. Çalışma kapsamında aşağıdaki sorulara cevap bulmak amacıyla veri setinde gerçekleştirilen sql sorgulamaları ve mekânsal analiz teknikleriyle yeni öznetelik alanları oluşturulmuştur.

1. Tweetler hangi ülkelerden atılmıştır?
2. Bu tweetler kaç kullanıcı tarafından atılmıştır?
3. Ülkelerin tweet atan kullanıcı sayıları nelerdir?
4. Pfizer/Biontech aşısı hakkındaki tweetler hangileridir?
5. Sinopharm aşısı hakkındaki tweetler hangileridir?
6. Sinovac aşısı hakkındaki tweetler hangileridir?
7. Moderna aşısı hakkındaki tweetler hangileridir?
8. Oxford AstraZeneca aşısı hakkındaki tweetler hangileridir?
9. Covid kelimesi hakkındaki tweetler hangileridir?
10. Aşı kelimesi hakkındaki tweetler hangileridir?

Dördüncü aşamada, ülkelerin “Tweet Sayısı”, “Covid Kelimesi İçeren Tweet Sayısı” ve “Vaccine (Aşı) Kelimesi İçeren Tweet Sayısı” değişkenlerine göre kümeleme analizi gerçekleştirilmiştir. Kümeleme analizinde kullanılacak veriler ilk olarak veri hazırlama sürecinden geçirilmiştir. Veri hazırlama sürecinde öncelikle veriler arasında birim farklılıkları olup olmadığı, eksik değer olup olmadığı kontrol edilmiştir. Kümeleme analizinde kullanılacak veriler aynı birimde olduğundan verilerin birimsel standardize işlemine gereksinim görülmemiştir.

Kümeleme analizi algoritmalarının verilerin birbirleriyle ilişkili olup olmadığına bakmaksızın analiz sonuçları vermesi nedeniyle kümeleme analiz işlemi önceden veriler arasındaki korelasyon testinin yapılması gerekmektedir. Birbirleriyle hiçbir ilişkisi olmayan verilerin kümelenebilmesi ile istenmeyen sonuçlar ortaya çıkabilmektedir (Selvi ve Çağlar 2017). Bu bakımdan veriler arasındaki korelasyonun tespiti için Pearson korelasyon testi aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanmıştır.

$$r = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{[n \sum X^2 - (\sum X)^2][n \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \quad (2)$$

Eşitlikte r iki değişken arasındaki Pearson korelasyon katsayısını, X ve Y değişkenleri, n veri sayısını ifade etmektedir.

Kümeleme çalışmalarında kullanılacak veriler arasındaki korelasyon katsayısının 0.80 olması gerektiği (Romesburg 1984) görüşü dikkate alındığında bu çalışmada kullanılan “Tweet Sayısı”, “Covid Kelimesi İçeren Tweet Sayısı” ve “Vaccine (Aşı) Kelimesi İçeren Tweet Sayısı” değişkenlerinin birbirleriyle ilişkili olduğu gözlemlenmiştir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Değişkenler Arasındaki Pearson Korelasyon Katsayıları

		Tweet Sayısı	Covid	Vaccine (Aşı)
Tweet Sayısı	Pearson Korelasyon	1	.998	.992
Covid	Pearson Korelasyon	.998	1	.997
Vaccine	Pearson Korelasyon	.992	.997	1

Veri setinin kümeleme analizi işleminde iki farklı kümeleme analizi algoritması kullanılmıştır. İlk yöntemde, her gözlemin ayrı bir küme olarak düşünüldüğü ve benzerlik katsayılarına göre birbirine en çok benzeyen kümelerin birleştirildiği yöntem olan Birleştirici Hiyerarşik Kümeleme (AGNES) algoritması Ward Tekniği kullanılarak uygulanmıştır. İkinci yöntemde ise, n adet veri nesnesinden oluşan bir veri kümesini, kullanıcı tarafından verilen k adet kümeye bölerek, oluşan farklı kümeler arasındaki benzerliğin minimum ve kümeler içi benzerliğin maksimum düzeyde elde edilmesini amaçlayan K-Means (K-Ortalamlar) algoritması uygulanmıştır.

Hiyerarşik kümeleme algoritması ile yapılan kümeleme işleminde dendrogram üzerinden yapılan incelemede en ideal küme sayısının 3 olduğu, K-Means algoritması ile gerçekleştirilen kümeleme analizi işleminde ise Silhouette katsayısı testi uygulanarak en kaliteli kümeleme için $k=3$ olması gerektiği tespit edilmiştir. Ward yöntemiyle gerçekleştirilen hiyerarşik kümeleme işlemiyle oluşan kümelere ait bilgiler Çizelge 2’de ve K-Means algoritması ile gerçekleştirilen bölümlenmeli kümeleme işlemiyle oluşan kümelere ait bilgiler Çizelge 3’te verilmiştir.

Çizelge 2. Hiyerarşik (Ward) Yöntemle Kümeleme Sonuçları

Hiyerarşik Kümeleme (Ward Tekniği)	Küme 1 (Üye:1)	Küme 2 (Üye:1)	Küme 3 (Üye:205)
------------------------------------	----------------	----------------	------------------

Tweet Sayısı	56080	30912	9543 – 1
“Covid” kelimesi içeren Tweet Sayısı	15443	9563	2911 – 0
“Vaccine” kelimesi içeren Tweet Sayısı	22913	16383	4358 – 0

Çizelge 3.K-Means Yöntemiyle Kümeleme Sonuçları

K-Means Kümeleme	Küme 1 (Üye:2)	Küme 2 (Üye:5)	Küme 3 (Üye:200)
Tweet Sayısı	56080 – 30922	9543 - 2668	2333 – 1
“Covid” kelimesi içeren Tweet Sayısı	15443 – 9563	2911 - 706	585 – 0
“Vaccine” kelimesi içeren Tweet Sayısı	22913 – 16383	4358 - 1553	1327 – 0

Hiyerarşik kümeleme işlemi sonucunda; Hindistan 1. kümeyi, Amerika Birleşik Devletleri 2. kümeyi ve diğer ülkeler ise 3. kümeyi oluşturmuştur. Hiyerarşik kümeleme yönteminde en yüksek tweet sayısına sahip Hindistan ve Amerika Birleşik Devletleri ayrı ayrı birer küme oluştururken, diğer ülkelerin hepsi tek bir küme de yer almıştır.

K-Means algoritması ile gerçekleştirilen kümeleme işlemi sonucunda; Hindistan ve Amerika Birleşik Devletleri 1. kümeyi, Kanada – Birleşik Krallık – Filipinler – Pakistan – Çin ülkeleri 2. kümeyi, diğer ülkeler ise 3. kümeyi oluşturmuştur.

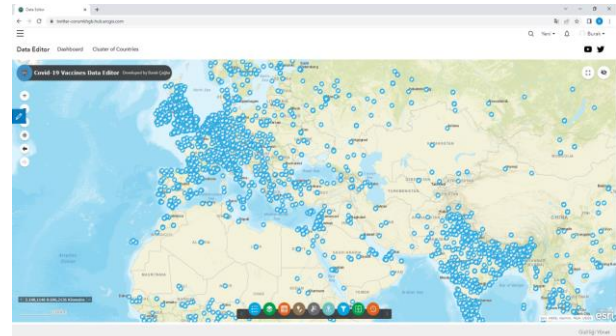
Çalışmanın son aşamasında, elde edilen kümeleme analiz sonuçlarının tematik haritalar şeklinde görselleştirilmesi ve analiz sonuçlarının web tabanlı interaktif uygulama üzerinde sunumu gerçekleştirilmiştir. Çalışma dünya genelindeki ülkeleri kapsadığından coğrafi işaretlemede, mekânsal analiz işlemlerinde ve tematik harita görselleştirmelerinde 1:1 milyon ölçekli Ülke İdari Sınır verileri (Int Kyn. 3) Web Mercator projeksiyonunda kullanılmıştır. Tematik harita renk seçimlerinde kartografik tasarım için renk seçimi tavsiyesi veren çevrimiçi Color Brewer yazılımı kullanılmıştır (Int Kyn. 4).

ArcGIS Pro 2.9 yazılımı kullanılarak hazırlanan tematik haritalar ve öznitelik tabloları, Web üzerinde yayınlanmak amacıyla ArcGIS Online

sunucuları üzerine Veri Düzenleme, Haritalama ve Sorgu özellikleri ile servis edilmiştir. ArcGIS Online sunucuları üzerine servis edilen Web Haritaları; ArcGIS Web App Builder, ArcGIS Dashboard, ArcGISHub yazılımları kullanılarak interaktif web uygulaması geliştirilmiştir. Bu uygulama üzerinden coğrafi veriye ve öznitelik bilgilerine erişim sağlanabilmektedir. Tasarımcı tarafından oluşturulan yapılara göre sorgulama ve analizler gerçekleştirilmekte, veri tabanında yer alan bilgilere çeşitli grafik araçlarla ve haritalar üzerindeki açılır pencereler ile interaktif şekilde erişim sağlanabilmektedir.

Geliştirilen web uygulamasına <https://twitter-corumkhgb.hub.arcgis.com/> internet adresinden kullanıcı bilgileri ile erişim sağlanmaktadır. Uygulama “Data Editor”, “Dashboard” ve “Cluster of Countries” şeklinde isimlendirilen üç sekmeden oluşmaktadır.

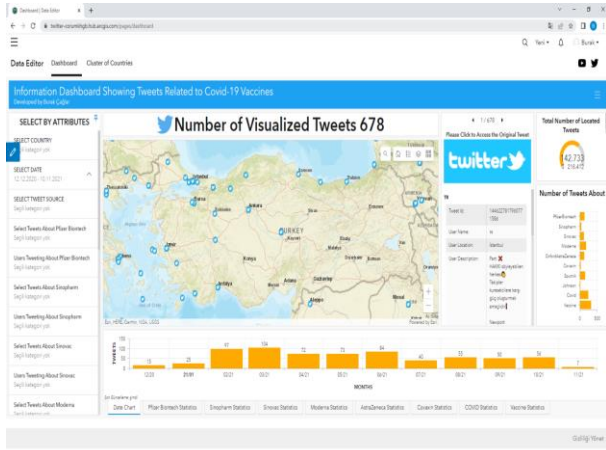
“Data Editor” olarak adlandırılan ilk sekmede, COVID-19 veri setindeki verilerin harita üzerindeki dağılımları twitter sembolüyle görülmektedir (Şekil 1). Bu sayfa üzerinde verilerin öznitelik bilgileri görüntülenmekte ve düzenlenebilmektedir. Veriler üzerinde zamansal filtreleme işlemi gerçekleştirilebilmekte, verilerin mekânsal-zamansal gelişimi izlenebilmekte ve farklı katmanlar arasından swipe (sıyırma) aracıyla karşılaştırma işlemleri gerçekleştirilmektedir.



Şekil 1.Web Uygulaması “Data Editor” Sekmesi

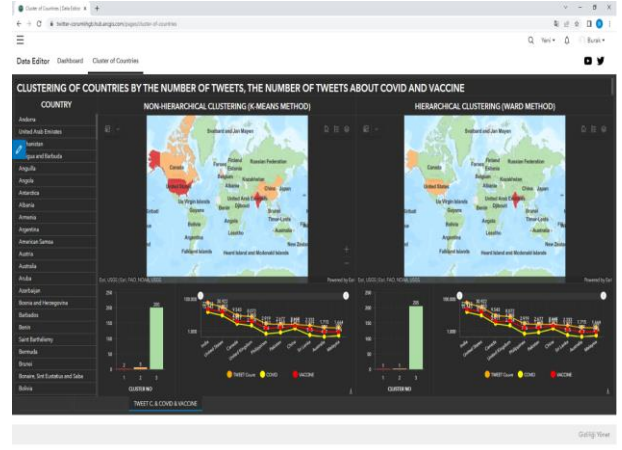
“Dashboard” olarak adlandırılan ikinci sekme, COVID-19 veri setindeki verilerden mekânsal analiz işlemleri sonucunda elde edilen bilgilerin gösterildiği paneldir (Şekil 2). Burada, ilk sekmede olduğu gibi verilerin harita üzerinde dağılımları görülmekte, ayrıca tweetlerin mekânsal – zamansal

dağılımları sütun grafik üzerinden aylık bazlı olarak takip edilebilmektedir. Harita penceresinin üzerindeki pencerede o an ekran yayılımının da olan tweet sayısı görülmekte, harita ekranının sağındaki pencerede yayılımda olan veya seçimi yapılan tweet'e ilişkin öznitelik bilgileri görüntülenmekte ve Twitter logosuna tıkladığında ise o tweet'e ilişkin orijinal twitter sayfasına erişim sağlanmaktadır. Harita penceresinin solundaki pencerede ön tanımı yapılmış çeşitli öznitelik sorgulamaları yapılabilmekte ve sorgu sonuçları harita üzerinde görüntülenebilmektedir. Zamansal değişimi gösteren sütun grafiğin altındaki sekmelerden Pfizer/Biontech, Sinopharm, Sinovac, Moderna, AstraZeneca, Covaxin aşılı ile Covid ve Aşı kelimelerini içeren tweetlere ilişkin ülkesel bazlı istatistikî bilgilere erişilmektedir.



Şekil 2. Web Uygulaması "Dashboard" Sekmesi

"Cluster of Countries" olarak adlandırılan son sekmede, ülkelerin "Tweet Sayısı", "Covid Kelimesi İçeren Tweet Sayısı" ve "Vaccine (Aşı) Kelimesi İçeren Tweet Sayısı" değişkenlerine göre hiyerarşik kümeleme ve K-Means kümeleme algoritmaları ile gerçekleştirilen kümeleme analizi sonuçlarına dayalı tematik görselleştirmeler yan yana gösterilmektedir (Şekil 3). Harita penceresinin altında yer alan sütun grafikte küme bilgileri, sütun grafiğin yanında yer alan çizgi grafikte ise harita ekranında yer alan ülkelerin kümeleme işleminde kullanılan öznitelik değişkenlerine ait değerler görülmektedir. Harita penceresinin sol kısmında ise ülkeler listesi yer almaktadır. Bu pencerelerde birbirleriyle etkileşimli olarak çalışmaktadır.



Şekil 3. Web Uygulaması "Cluster of Countries" Sekmesi

4. Araştırma Bulguları

COVID-19 pandemi döneminin en büyük tartışma konularından olan COVID-19 aşılı hakkında atılan tweet'lerin hangi ülkelerin gündeminde yer aldığı ve tweet trafiğinin mekânsal – zamansal gelişimi, kümeleme analizi yöntemiyle incelenmiş ve sonuçlar interaktif yapıları görsel analitik ortamda sunulmuştur.

COVID-19 Tweet veri setinde bulunan toplam 218.412 adet tweet verisinden; 142.733 adet tweet harita üzerinde coğrafi olarak işaretlenmiştir. Harita üzerinden coğrafi işaretlemesi gerçekleştirilen 142.733 adet tweet dünya genelinde 207 ülkeden atılmıştır. Atılan tweet sayılarına bakıldığında; Hindistan 56.080 tweetle 1.sırada, Amerika Birleşik Devletleri 30.922 tweetle 2.sırada ve Kanada 9.543 tweetle 3.sırada yer almıştır.

Covid-19 Tweet veri seti twitter kullanıcı bazlı incelendiğinde; 218.412 adet tweet'in toplam 86.558 farklı kullanıcı tarafından atıldığı, 12.210 adet tweet ile Hindistan'dan "CoWIN Clore 18-44" isimli kullanıcının 1.sırada, 11.495 adet tweet ile konum bilgisi bulunmayan "CowinBangalore" isimli kullanıcının 2.sırada ve 5.710 adet tweet ile yine Hindistan'dan "VaxBLR" isimli kullanıcının olduğu tespit edilmiştir.

Covid-19 Tweet veri seti atılan tweet'lerin zamansal gelişimi açısından incelendiğinde; veri setinin 12 Aralık 2020 ile 10 Kasım 2021 tarihi aralığında atılan tweetleri kapsadığı, 12 Şubat 2021 tarihine kadar atılan tweet sayısının 6.986 olduğu, Mart/2021

tarihinde atılan tweet sayılarının hızlı bir yükselişe geçtiği ve Nisan/2021 ayı itibarıyla aylık ortalama 25 bin tweet'in atıldığı görülmüştür.

Covid-19 Tweet veri seti atılan tweet'lerin kaynağı (kullanılan platform açısından) incelendiğinde; 218.412 adet Tweet'in toplam 369 farklı kaynaktan atıldığı, 56.496 adet tweet ile "Twitter for Android" kaynağının 1. sırada, 54.363 adet tweet ile "Twitter Web App" kaynağının 2.sırada ve 46.614 adet tweet ile "Twitter for iPhone" kaynağının 3.sırada olduğu belirlenmiştir.

Covid-19 Tweet veri seti analiz edildiğinde; Covaxin aşısı hakkında 69.844 adet tweet (konumlu 37.700 / konumsuz 32.144), Moderna aşısı hakkında 46.007 adet tweet (konumlu 31.711 / konumsuz 14.296), Pfizer/biontech aşısı hakkında 21.484 adet tweet (konumlu 14.232 / konumsuz 7.252), Sputnik aşısı hakkında 17.703 adet tweet (konumlu 12.713 / konumsuz 4.990), Sinovac aşısı hakkında 10.960 adet tweet (konumlu 7.433 / konumsuz 3.527), Sinopharm aşısı hakkında 8.867 adet tweet (konumlu 6.588 / konumsuz 2.279), AstraZeneca aşısı hakkında 8.325 adet tweet (konumlu 5.712 / konumsuz 2.613) ve Johnson aşısı hakkında 2.147 adet tweet (konumlu 1.383 / konumsuz 764) tespit edilmiştir. Ayrıca "Covid" kelimesi içeren 55.229 adet tweet'in (konumlu 41.530 / konumsuz 13.699) ve "Vaccine / aşı" kelimesi içeren 96.299 adet tweet'in (konumlu 69.608 / konumsuz 26.691) olduğu tespit edilmiştir.

Veri madenciliği tekniklerinden biri olan kümeleme analizi yöntemiyle ülkelerin "Tweet Sayısı", "Covid Kelimesi İçeren Tweet Sayısı" ve "Vaccine (Aşı) Kelimesi İçeren Tweet Sayısı" değişkenleri ile gerçekleştirilen;

Hiyerarşik kümeleme işlemi sonucunda, Hindistan 1. kümeyi, Amerika Birleşik Devletleri 2. kümeyi ve diğer ülkeler (205 ülke) ise 3. kümeyi oluşturmuştur. Hiyerarşik kümeleme yönteminde en yüksek tweet sayısına sahip Hindistan ve Amerika Birleşik Devletleri ayrı ayrı birer küme oluştururken, diğer ülkelerin hepsi tek bir küme de yer almıştır.

K-Means algoritması ile gerçekleştirilen kümeleme işlemi sonucunda ise; Hindistan ve Amerika Birleşik

Devletleri 1. kümeyi, Kanada – Birleşik Krallık – Filipinler – Pakistan – Çin ülkeleri 2. kümeyi, diğer ülkeler ise 3. kümeyi oluşturmuştur.

5. Sonuçlar ve Öneriler

Sosyal medya'nın kullanımı arttıkça insanlar arasındaki iletişim kurma şeklide değişmektedir. Toplumun tamamını ilgilendiren pandemi gibi acil durumlarda, kriz yöneticilerinin olaya uygun şekilde müdahale etmelerine yönelik veriler sosyal medya aracılığıyla kullanıcılardan toplanabilir. Sosyal medya sayesinde, meydana gelen bir olaya ilişkin gerçek zamanlı bildirimler analiz edilerek, yaşanan olaya ilişkin etkilerin ilk farkındalıkları ve olaya ilişkin toplumun tepkisi belirlenebilir.

Statista firması tarafından yayınlanan "Ocak 2022 İtibarıyla Twitter Kullanıcı Sayısına Göre Önde Gelen Ülkeler" raporunda; Amerika Birleşik Devletleri 76.9 milyon kullanıcı ile 1.sırada, Japonya 58.95 milyon kullanıcı ile 2. sırada ve Hindistan'ın 23.6 milyon kullanıcı ile 3. sırada olduğu görülmektedir (Int Kyn. 5). Bu çalışma kapsamında elde edilen analiz sonuçları incelendiğinde, Hindistan 56.080 tweetle 1.sırada, Amerika Birleşik Devletleri 30.922 tweetle 2.sırada ve Kanada 9.543 tweetle 3.sırada yer aldığı görülmektedir. Twitter kullanıcı sayısı bakımından 58.95 milyon kullanıcı ile 2.sırada bulunan Japonya'dan Covid-19 aşısı hakkında toplamda 564 adet tweet atılırken, Twitter kullanıcı sayısı bakımından 7.9 milyon kullanıcı sayısı ile dünya genelinde 14. sırada yer alan Kanada'nın Covid-19 aşısı hakkında toplamda attığı 9.543 tweetle 3.sırada yer alması dikkat çeken bir sonuç olmuştur. Ülkelerin Covid-19 aşılara verdikleri ön kullanım onayları ve gerçekleştirdikleri aşılama çalışmaları dikkate alındığında, Kanada da Pfizer/Biontech aşısının toplu aşılama çalışmalarına 14 Aralık 2020'de başlanılırken (Int Kyn. 6), Japonya'da Pfizer/Biontech aşısının toplu aşılama çalışmalarına 17 Şubat 2021'de başlanılmış (Int Kyn. 7) olması, ülkelerden atılan Covid-19 aşısı hakkındaki tweet'ler ile ülkelerin gerçekleştirmiş oldukları aşılama takvimi arasında doğrusal bir ilişki bulunduğu şeklinde yorumlanmıştır. Yine aynı şekilde Covid-19 veri setindeki tweet trafiğinde yaşanan artışların ülkelerin aşılama takvimleriyle ilişkili olduğu

gözlemlenmiştir. Ancak atılan tweet'lerin Covid-19 aşılarını destekler nitelikte mi olduğu yoksa Covid-19 aşısı karşıtlığı hakkında mı olduğu bu çalışma kapsamında gerçekleştirilmemiştir. Bu konu, twitter mesajlarından duygu analizi tespiti kapsamında başka çalışmalar içeriğinde gerçekleştirilebilir.

Bu çalışmada kullanılan Covid-19 Tweet veri seti'nin kümeleme analizinde, K-Means algoritmasının Hiyerarşik kümeleme algoritmasına göre daha iyi bir kümeleme analizi yaptığı değerlendirilmiştir. Çok değişkenli kümeleme analizi sonucunda oluşan kümeler incelendiğinde, Hindistan ve Amerika Birleşik Devletleri ülkelerinden atılan tweetlerin yüksek düzeyde "covid" ve "Vaccine/aşı" kelimelerini içererek aynı kümede buldukları görülmektedir. Yine Kanada, Birleşik Krallık, Filipinler, Pakistan ve Çin ülkelerinden atılan tweetlerinde aynı düzeyde "Covid" ve "Vaccine/aşı" kelimeleriyle ilgili oldukları ve ülkelerin aynı grupta oldukları gözlemlenmektedir.

Burada verilen sonuçlar yürütülmekte olan doktora tez çalışmasının ilk bulgularıdır. Bundan sonraki çalışmada, ülkelerin uygulamış oldukları aşı türleri ve dozları hakkındaki bilgiler araştırılıp uygulamaya dahil edilerek çalışma kapsamında elde edilen sonuçların karşılaştırılması ve desteklenmesi planlanmaktadır.

6. Kaynaklar

Aldenderfer, M.S., R.K. Blashfield, 1984. Cluster analysis, Beverly hills: Sage Publications.

Andrienko, G., Andrienko, N., Jankowski, P., Keim, D., Kraak, M. J., MacEachren, A. M., and Wrobel, S., 2007. Geovisual analytics for spatial decision support: setting the research agenda. *International Journal of Geographical Information Science*, **21(8)**, 839-857.

Andrienko, G., Andrienko, N., Keim, D., MacEachren, A. and Wrobel, S., 2011. Challenging problems of geospatial visual analytics, *Journal of Visual Languages and Computing*, **22 (4)**, 251-256.

Atbaş, A.C.G., 2008. Kümeleme Analizinde Küme Sayısının Belirlenmesi Üzerine Bir Çalışma, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.

Bennett, N.C., Millard, D.E., Martin, D., 2018. Assessing twitter geocoding resolution. In: Proceedings of the 10th ACM Conference on Web Science, 239-243.

Blashfield, R.K., Aldenderfer, M.S., 1978. The literature on cluster analysis, *Multivariate Behavioral Research*, **13**, 271-295.

Burton, S.H., Tanner, K.W., Giraud-Carrier, C.G., West, J.H., Barnes, M.D., 2012. "right time, right place" health communication on twitter: value and accuracy of location information. *Journal of Medical Internet Research*, **14(6)**, 1-11.

Castillo, C., 2016. Big crisis data: Social media in disasters and time-critical situations. Cambridge University Press.

Dayan, S., 2021. COVID-19 ve Aşı, *Dicle Tıp Dergisi / Dicle Medical Journal*, **48** (Özel Sayı / Special Issue): 98-113.

Eligüzel, N., 2021. Using twitter for situational awareness after an earthquake: The roles of text categorization and location information, Doktora Tezi, Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep.

Han, J., Kamber, M., 2001. "Data Mining Concepts and Techniques", Morgan Kaufmann Publishers Inc.

Hands, S., Everit, B., 1987. A Monte Carlo study of the recovery of cluster structure in binary data by hierarchical cluster techniques. *Multivariate Behavioral Research*, **22**, 235-243.

Imran, M., Castillo, C., Diaz, F., Vieweg, S., 2015. Processing social media messages in mass emergency: A survey. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, **47(4)**, 1-38.

Imran, M., Mitra, P., Castillo, C., 2016. Twitter as a lifeline: Human annotated twitter corpora for nlp of crisis-related messages. In: Proceedings of the Tenth International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC 2016). European Language Resources Association (ELRA): Paris, France.

Imran, M., Ofli, F., Caragea, D., Torralba, A., 2020. Using ai and social media multimodal content for disaster response and management: Opportunities, challenges, and future directions. *Information Processing & Management*, **57**, 1-9.

Kumar, P., 2020. Twitter, disaster and cultural heritage: A case study of the 2015 Nepal earthquake, *Journal of Contingencies and Crisis Management*, **28**, 453-465.

Lei, T., Liang, X., Mascaro, G., Luo, W., White, D., Westerhoff, P., and Maciejewski R., 2015. An Interactive Web-Based Geovisual Analytics Tool to Explore Water Scarcity in Niger River Basin, Workshop on Visualisation in Environmental Sciences (EnvirVis).

- Luo, W., Chang, Z., Kong, L.L., Link, R., Hejazi, M., Clarke, L., and Maciejewski, R., 2015. Web-Based Visualization of the Global Change Assessment Model. In: Proceedings of Visualization in Environmental Sciences (EnvirVis 2015), EuroVis 2015. Cagliari, Italy: May 25-26.
- MacEachren, A.M., Jaiswal, A., Robinson, A. C., Pezanowski, S., Savelyev, A., Mitra, P., Zhang, X., and Blanford, J., 2011. SensePlace2: Geotwitter Analytics Support for Situation Awareness. 2nd IEEE Conference on Visual Analytics Science and Technology 2011, VAST 2011- Providence, RI, United States, Pages 181-190.
- Moore, A., De Oliveira, M., Caminha, C., Furtado, V., Basso, V. and Ayres, L., 2013. Applying Geovisual Analytics to Volunteered Crime Data, Geospatial Visualisation, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Murthy, B. and Longwell S.A., 2012. Twitter And Disasters, *Information Communication&Society*, **16(6)**, 1-19.
- Nair, M.R., Ramya, G.R.,Sivakumar, P.B., 2017. Usage and analysis of Twitter during 2015 Chennai flood towards, disaster management, *Procedia Computer Science*, **115** ,350–358.
- Robinson, A.C., 2017. Geovisual Analytics, *The Geographic Information Science&Technology Body of Knowledge* (3rd Quarter 2017 Edition).
- Robinson, A. C., Peuquet, D. J., Pezanowski, S., Hardisty, F. A., and Swedberg, B., 2016. Design and evaluation of a geovisual analytics system for uncovering patterns in spatio-temporal event data. *Cartography and Geographic Information Science*, 1-13.
- Romesburg, H.C., 1984. Cluster Analysis for Researchers, Belmont, CA: Lifetime Learning Publications.
- Selvi, H.Z., Çağlar, B., 2017. Çok Değişkenli Haritalama İçin Kümeleme Yöntemlerinin Kullanılması, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **6(2)**, 415-429.
- Silahtaroglu, G., 2013. Veri Madenciliği (Kavram ve Algoritmaları), Papatya Yayıncılık, İstanbul.
- Tatlidil, H., 1996. Uygulamalı Çok Değişkenli İstatistiksel Analiz, Hacettepe Taş. Yayınları, Ankara.
- Thomas, J. and Cook, K., 2005. Illuminating the Path: Research and Development Agenda for Visual Analytics, IEEE Press, 194 p.

İnternet kaynakları

- 1- <https://covid19.who.int/> (31.10.2022)
- 2- <https://www.kaggle.com/datasets/gpreda/all-covid19-vaccines-tweets> (06.10.2021)
- 3- <https://ec.europa.eu/eurostat/web/gisco/geodata/reference-data/administrative-units-statistical-units/countries> (01.03.2021)
- 4- <https://colorbrewer2.org/> (20.03.2021)
- 5- <https://www.statista.com/statistics/242606/number-of-active-twitter-users-in-selected-countries/> (31.10.2022)
- 6- https://en.wikipedia.org/wiki/COVID-19_vaccination_in_Canada (31.10.2022)
- 7- https://en.wikipedia.org/wiki/COVID-19_vaccination_in_Japan (31.10.2022)

AKÜ FEMÜBİD 23 (2023) 025504 (427-437)

AKU J. Sci. Eng. 23 (2023) 025504 (427-437)

DOI: 10.35414/akufemubid.1171393

Araştırma Makalesi / Research Article

İHA ile Derin Öğrenme Algoritmaları Kullanılarak Hasarlı Yapıların Tespit Edilmesi

Erdem Emin MARAŞ¹, Halil İbrahim SARIYILDIZ²¹Samsun Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Samsun.²Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Samsun.Sorumlu yazar e-posta: erdem.maras@samsun.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5205-1622>e-posta: halilibrahim.yildiz@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1889-2786>

Geliş Tarihi:09.10.2022

Kabul Tarihi:06.04.2023

Öz

Bu çalışmada, hasarlı yapıların hızlı ve güvenilir bir şekilde tespit edilebilmesi için derin öğrenme algoritmalarında evrimsel sinir ağı mimarisinin bir modeli olan Mask Region-based Convolutional Neural Network (Mask R-CNN) modeli kullanılarak hasar tespiti yapılmaya çalışılmıştır. Eğitim alanı olarak 2010 yılında Haiti’de meydana gelen 316.000 insanın öldüğü, 280.000 civarı yapının hasar gördüğü 7.0 büyüklüğündeki deprem bölgesi seçilmiştir. Bölgede 5 cm ve 7 cm çözünürlüğe sahip insansız hava aracı görüntüleri çalışmada kullanılmıştır. Görüntüler ilk aşamada üç sınıfta “hasarlı”, “az hasarlı” ve “hasarsız” olarak eğitilip test edilmiştir. İnsansız hava aracı verileri ile yapılan test işleminde ise yapılar %58.62 oranıyla bulunmuş ve bulunan yapılar %83.53 genel doğrulukla sınıflandırılmıştır. İkinci aşamada görüntüler “hasarlı” ve “hasarsız” olarak iki sınıfta etiketlenip eğitim ve test işlemi gerçekleştirilmiştir. İnsansız hava aracı verileri ile yapılan test işleminde ise yapılar %74.50 oranıyla bulunmuş ve bulunan yapılar %95.12 genel doğruluk oranıyla sınıflandırılmıştır.

Anahtar kelimeler

Derin Öğrenme;
Uzaktan Algılama;
Evrimsel Sinir Ağı;
İHA

Detection of Damaged Structures Using Deep Learning Algorithms with UAV

Abstract

In the study, damage detection was tried to be done using Mask Region-based Convolutional Neural Network (Mask R-CNN) model, which is a model of convolutional neural network architecture in deep learning algorithms in order to detect damaged structures quickly and reliably. The 7.0 magnitude earthquake zone, which occurred in Haiti in 2010, in which 316,000 people died and 280,000 buildings were damaged, was chosen as the training area. Unmanned aerial vehicle images with a resolution of 5 cm and 7 cm used in the study. In the first stage, the images were trained and tested in three classes as “damaged”, “slightly damaged” and “undamaged”. In the test process with unmanned aerial vehicle data, the structures were found with a rate of 58.62% and the structures found were found with an overall accuracy of 83.53%. In the second stage, the images were labeled in two classes as “damaged” and “undamaged” and training and testing was carried out. In the test process with unmanned aerial vehicle data, the structures were found with a rate of 74.50% and the structures found were classified with an overall accuracy of 95.12%.

Keywords

Deep Learning;
Remote Sensing;
Convolutional Neural
Network; UAV

1. Giriş

Afetlerin neden olduğu hasarın tespitinde son zamanlarda derin öğrenme mimarilerinden evrimsel sinir ağının kullanıldığı çalışmaların başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. Buna karşılık afet hasarları uzaktan algılama verileri ile ilgili kamuya açık veri sınırlı erişimlidir (Nex et al. 2019). Derin öğrenme algoritmaları büyük veri çalışmalarında başarılı sonuçlar vermektedir.

Uydu görüntülerinden sağlanan anlık büyük miktarda verilerin işleme ihtiyacı uydu görüntüleri ile derin öğrenme çalışmalarına giderek artan ilgiye sebep olmaktadır (Bhangale et al. 2019).

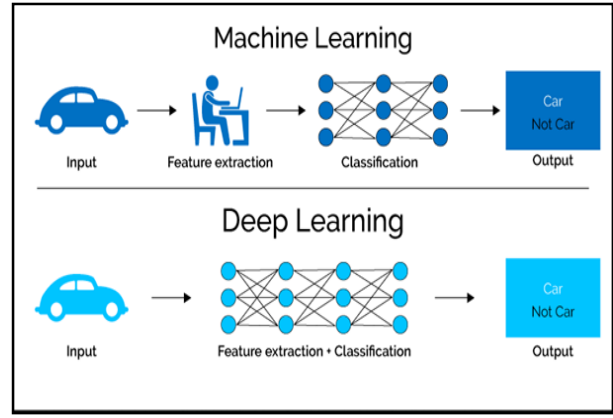
Bu çalışmada deprem sonrası yapı hasarı oluşmuş binaların tespiti derin öğrenme algoritmalarından evrimsel sinir ağı kullanılarak yapılmaya çalışılmıştır. Model olarak Mask R-CNN modeli seçilmiş transfer öğrenimi yapılarak modelin başarısı arttırılmaya çalışılmıştır. Eğitim verileri 2010'da Haiti'de meydana gelen 7.0 büyüklüğünde depremden elde edilen uydu görüntüsü ve ağıın başarısının çözünürlükle artacağı düşüncesiyle yine Haiti'den elde edilmiş daha yüksek çözünürlüğe sahip insansız hava aracı görüntüleri ile yapılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1 Derin Öğrenme

Derin öğrenme insanın öğrenme sürecini ilham alarak insanın karşılaştığı sorunların üstesinden gelirken kullandığı analiz, öğrenme, karar verme gibi süreçleri kullanarak çok fazla sayıda veri ile insan denetimi olarak veya olmayarak veri üzerinde özellik tespiti, analiz yapma ve sınıflandırma gibi işlemleri yapabilen makine öğrenmesi alanının bir alt dalıdır (Kayaalp ve Süzen 2018).

Derin öğrenmenin diğer makine öğrenimlerinden ayrılmasını sağlayan yanı kendi kendine özellik çıkarımı yapmasıdır. Makine öğreniminde bu özellikler kullanıcı tarafından yapılır. Yapay sinir ağlarından ayıran özelliği ise çok sayıda gizli katmanı olmasıdır (İnt. Kyn. 1). Şekil-1 ile makine öğrenmesi ve derin öğrenme arasındaki fark gösterilmiştir.



Şekil 1. Geleneksel makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemlerinde özellik çıkarımı (İnt. Kyn. 1)

2.2 Evrimsel Sinir Ağları

Evrimsel sinir ağları görüntü işleme alanında son yıllarda ön plana çıkan yapay sinir ağlarındaki parametre sayısını azaltarak daha büyük verilerle çalışma imkânı sağlayan özel bir mimardır. Mimarinin ilk katmanları daha basit özellikler bulabilirken son katmanlarına doğru daha karmaşık ve soyut özellikleri bulabilmektedir (Albawi et al. 2018).

Evrimsel sinir ağlarının genel olarak çalışma mantığında giriş verileri girildikten sonra bu katmanlar eğitilir ve sonuç çıktısı elde edilerek elde edilen hata geriyeye yayılım algoritması ile bütün ağırlıklara aktarılır. Yapılan yinelemelerle en doğru sonucu veren ağırlıklar hesaplanmaya çalışılır (İnik ve Ülker 2017).

Evrimsel sinir ağları daha çok görüntü sınıflandırmada kullanılırlar da giriş verisi olarak görüntünün yanı sıra ses ve video gibi veriler de giriş verisi olarak kullanılmaktadır. Evrimsel sinir ağlarında görüntü sınıflandırma işlemi pikseller, kenar kombinasyonlarından oluşan motifleri, bu motifler birleşerek nesnelere oluşturmaktadır (LeCun et al. 2015).

Yapısında evrim, havuzlama ve tam bağlantı katmanı gibi kendine özgü görevleri olan ayrı katmanları barındırır. Bunlar birbirini takip edecek şekilde dizilerek evrimsel sinir ağları modelini oluştururlar. Bu yapının ilk kısımlarında öznelik çıkartım işlemleri gerçekleştirilirken sınıflandırma işlemi ise son katmanlarda gerçekleşir (Nie et al. 2011).

Evrişimsel sinir ağları mimarisinin katmanları;

- Giriş Katmanı (Input Layer)
- Evrişim Katmanı (Convulation Layer)
- Düzleştirilmiş Doğrusal Birim Katmanı (Rectified Linear Units Layer)
- Havuzlama Katmanı (Pooling Layer)
- Tam Bağlantılı Katman (Fully Connected Layer)
- DropOut Katmanı
- Sınıflandırma Katmanı (Classification Layer)'dır.

Evrişimsel sinir ağlarının genel olarak çalışma mantığında giriş verileri girildikten sonra bu katmanlar eğitilir ve sonuç çıktısı elde edilerek eldeki daha önce eğitilmiş verilerle karşılaştırılarak bir hata belirler.

Elde edilen hata geriye yayılım algoritması ile bütün ağırlıklara aktarılır. Yapılan yinelemelerle en doğru sonucu veren ağırlıklar hesaplanmaya çalışılır (İnik ve Ülker 2017).

Evrişimsel sinir ağları daha çok görüntü sınıflandırmada kullanılırlar da giriş verisi olarak görüntünün yanı sıra ses ve video gibi veriler de giriş verisi olarak kullanılmaktadır. Evrişimsel sinir ağlarında görüntü sınıflandırma işlemi pikseller, kenar kombinasyonlarından oluşan motifleri, bu motifler birleşerek nesnelere oluşturmaktadır (LeCun et al. 2015).

2.3 Mask Region-based Convolutional Neural Network

Mask R-CNN (Mask Region-based Convolutional Neural Network), nesne tanıma ve piksel bazlı görüntü segmentasyonu için kullanılan bir derin öğrenme modelidir. Mask R-CNN, Faster R-CNN modeline dayanır ve Faster R-CNN'nin çıktısına bir piksel seviyesi maske tahmin edici ağı ekler. Bu sayede, hem nesnelere konumlarını hem de piksel düzeyindeki segmentasyonlarını aynı anda tahmin edebilir.

Mask R-CNN, önce Faster R-CNN'nin ağına özellik haritalarını çıkarır. Daha sonra, bu özellik haritalarını iki ayrı dalda işler. İlk dal, Faster R-CNN'deki gibi nesnelere konumlarını tespit etmek için kullanılır. İkinci dal, özellik haritalarından nesne maskelerini tahmin etmek için bir piksel seviyesi ağı kullanır. Bu dal, nesnelere piksel bazlı segmentasyonu için

kullanılır ve Mask R-CNN modelini diğer nesne tanıma modellerinden ayıran özelliğdir (Neven et al. 2019).

Mask R-CNN, nesne tanıma ve piksel bazlı görüntü segmentasyonu için sıklıkla kullanılan bir derin öğrenme modelidir. Mask R-CNN'nin başarılı özellikleri:

- Nesne tanımanın yanı sıra, her pikselin hangi nesneye ait olduğunu belirleyerek piksel bazlı görüntü segmentasyonu yapabilir.
- Diğer modellere göre daha yüksek doğruluk oranlarına sahiptir. Bu durum farklı uygulamalarda daha iyi sonuçlar elde etmek için önemlidir.
- Aynı anda birden fazla nesneyi algılama ve sınıflandırma yeteneğine sahiptir.
- Benzer modellere göre daha hızlı çalışabilir ve gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılabilir.

Başarısız Özellikleri:

- Diğer modellere göre daha fazla bellek gerektirir, bu da yüksek boyutlu görüntülerle çalışırken bir dezavantaj olabilir.
- Eğitim için daha fazla zaman gerektirebilir. Bu durum modelin ölçeklendirilmesi ve kullanımı için bir dezavantaj olabilir.
- Küçük nesnelere algılama ve segmentasyon konusunda diğer modellere göre daha az başarılıdır. Bu durum modelin bazı uygulamalarda daha az kullanışlı hale getirebilir.

şeklinde açıklanmaktadır (He et al. 2017).

2.4 Donanım ve Yazılım

Çalışmada ArcGIS Pro programının 2.7.0 sürümü kullanılarak eğitim verileri oluşturulmuş ve yine bu program kullanılarak eğitim işlemleri yapılmıştır. ArcGIS Pro programını derin öğrenme çalışmalarında etkin bir şekilde kullanabilmek için programın sürümüne uygun olan derin öğrenme kütüphaneleri yüklenmiştir (Şahin 2021).

Eğitimde ekran kartının kullanılıp daha hızlı bir şekilde yapılabilmesi yüklenen kütüphanelere uygun olarak CUDA 10.1 ve CUDNN 7.6 eklentileri

yüklenmiştir (İnt. Kyn. 2). Kullanıma hazır hale gelen programda görüntüler için önce etiketleme işlemi yapılmıştır. Bunun için programda Classification araçları altında Training Sample Manager aracı kullanılmıştır.

Etiketlenen veriler Geoprocessing araçlarında Image Analyst Toolbox altında bulunan Deep Learning araç setleri kullanılarak eğitime hazır hale getirilip eğitilmiştir. Eğitime hazır hale getirmek için önce Export Training Data For Deep Learning görüntü analisti kullanılıp eğitimde kullanılacak modele uygun olarak görüntüler düzenlenmiştir.

Eğitime hazır hale getirilmiş görüntü Train Deep Learning Model görüntü analisti kullanılarak eğitim gerçekleştirilmiştir. Eğitilmiş model Detect Objects Using Deep Learning görüntü analisti kullanılarak test edilmiştir.

3. Kaynak Araştırması

Robertson vd. (2019), doğal afet zamanında paylaşılan sosyal medya görüntülerinden acil durum verisi içerenleri sınıflandırmaya çalışmıştır. Bunun için 2017'deki Harvey Kasırgası sırasında paylaşılan Twitter görüntülerini VGG-16 evrimsel modeli ile eğitip, test etmişlerdir. Sınıflandırma çalışması bu alanda öncü bir çalışma olmakla beraber istenilen sonuca ulaşamamıştır.

Zhai ve Peng (2004), Michael Kasırgası sonrası Google Street View ile elde edilen görüntülerle hasarlı alanların tespitini yapmaya çalışmıştır. Bunun için Amerika Birleşik Devletleri'nin Florida eyaleti Mexico Beach bölgesindeki Google Street View verilerini kullanarak VGG-19 evrimsel modeli ile sokak seviyesinde görüntülerle %70 doğruluk oranı ile hasarlı yapıları tespit etmiştir. Sonucu uzaktan algılama verileri ile yapılan çalışmalarla kıyaslayarak kapı, pencere ve dış duvar hasarının sokak görüntülerinde değerlendirmeye alınabilmesinden dolayı daha avantajlı ve iyi sonuçlar verdiği ifade edilmiştir.

Khosravi vd. (2020), çalışmalarında evrimsel sinir ağları algoritmasını kullanarak bir sel duyarlılık haritası oluşturmayı amaçlamışlardır. Söz konusu çalışma için İran ülkesi haritası kullanılmış olup, ülke genelinde daha önceki 2769 sel verisi toplanmıştır. Toplanan bu eğim, yükseklik, bakı, yağış, jeoloji,

arazi kullanımı, yollardan uzaklık ve benzeri veriler taşkın haritası yapımı için evrimsel sinir ağı algoritmasıyla işlenmiş ve oluşturulan modelin doğruluğu test edilmiştir. Çalışmada evrimsel sinir ağları mimarisi ile oluşturulan taşkın duyarlılık haritasının %75'lik kabul edilebilir bir doğruluğa sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Cheng vd. (2021), çalışmalarında insansız hava aracı (İHA) görüntülerini kullanarak derin öğrenme tabanlı bir heyelan afeti sonrası oluşan çatlakları tanıma modelini oluşturmayı ve olası bir heyelan tespiti yapmayı amaçlamaktadırlar. Çalışmada Çin'in Guizhou kentinde 10 Haziran 2018 tarihinde meydana gelen bir heyelan vakası ele alınmış, otomatik bir heyelan çatlak tanıma modeli oluşturmak için bir derin öğrenme mimarisi olan RetinaNET mimarisi temel alınarak geliştirdikleri model kullanılmıştır. Söz konusu çalışmada veri seti olarak insansız hava aracı görüntüleri ve uydu görüntüleri kullanılarak oluşturdukları modelle eğitilmiş ve %73 doğrulukla test sonuçlarına ulaşılmıştır.

Yeum vd. (2018), çalışmalarında geçmiş yıllarda yaşanan bazı büyük doğal afetler (deprem, kasırga ve benzeri) sonrası çekilmiş yaklaşık 90 bin yer seviyesindeki görüntüyü evrimsel bir model olan Alexnet modelini kullanarak, görüntülerin otomatik olarak sınıflandırılmasının ne şekilde yapılabileceğini adım adım göstermiş olup, söz konusu çalışmada toplanan görüntülerden çöken binaları ve bina bileşenlerini (kolon ve benzeri) %86'dan fazla doğrulukla başarılı bir şekilde tespit etmiş ve sınıflandırmışlardır.

Bragagnolo vd. (2021), çalışmalarında heyelan sonrası yeryüzünde meydana gelen değişimleri tespit ederek dinamik olarak heyelan izlerinin takibini yapabilmeye çalışmışlardır. Bu amaç doğrultusunda bölütleme çalışmalarında kullanılan U-Net modelini eğitebilmek için gerekli olan heyelan veri setini Nepal'in bir bölgesinden Landsat-8 uydusu ile elde edilmiş 230 tane uydu görüntüsü ile oluşturulmuştur. Doğrulama için 35, test için 10 uydu görüntüsü daha kullanılmıştır. Eğitim sonucunda test edilen veriler %81 ile %93 arası değişen doğrulukta sonuçlar vermiş ve aynı çalışma bölgesinde konuyla alakalı daha önce yapılmış

araştırmalara oranla daha iyi bir sonuç elde edilmiştir.

Gupta vd. (2021), yapmış oldukları çalışmalarda Endonezya'nın Palu kentinde yaşanan tsunami felaketinde, hasar almış alanları ve erişim sağlanabilecek yolları belirleyebilmek için uydu görüntüleri ile farklı bölütleme modelleri kullanarak araştırmaya çalışmışlardır. Özellikle kentte bulunan yol ağının sağlıklı bir şekilde tahminini elde edebilmek adına OpenStreetMap (OSM)'de bulunan bilgilerden yararlanmaya çalışmışlardır. Yapılan karşılaştırmalarda VGG16'nın özellik çıkarmada diğerlerinden daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Ayrıca çalışmada ENetSeparable adını verdikleri bir model önermişlerdir. Önerilen model ile yapılan bölütleme işleminde %90'dan yüksek sonuçlar elde edebilmişlerdir.

Moradi ve Shah-Hosseini (2020), Haiti'nin VHR uydu görüntüleri ve evrişim ağı olan UNet üzerinde çalışmalar gerçekleştirmiştir. Ayrıca literatürdeki önceki çalışmalardan farklı olarak piksel bozulmasını inceleyerek, nihai hassasiyeti artıran bir yaklaşım geliştirerek genel olarak %68,71'lik doğruluğa ulaşmıştır.

Corbane vd. (2011) gerçekleştirdiği çalışmada, Haiti'de 2010 yılında meydana gelen depremle ilgili olarak kullanılan 0,15 m mekansal çözünürlüklü görüntüler kullanılarak tespit edilen hasarlı yapıların, geçici saha araştırmaları sırasında elde edilen GPS coğrafi etiketli verilerle karşılaştırıldığında yaklaşık %65 doğrulukla belirlenmiştir. Benzer bir genel doğruluk değeri de Ajmar vd. (2011), tarafından (%70) gerçekleştirilen çalışmalarla elde edilmiştir.

Boccardo ve Giulio Tonolo (2012) gerçekleştirdiği çalışmada, hasar derecelerini değerlendirmek için girdi verisi olarak kullanılan raster görüntülerin mekansal çözünürlüklerini karşılaştırarak, 0,15 m çözünürlüklü görüntülerden belirlenen hasar bilgilerinin 0,5 m çözünürlüklü uydu verilerinden belirlenen hasar bilgilerine kıyasla % 85 daha doğru olduğunu ortaya koymuştur.

4. Bulgular

Çalışmada Birleşmiş Milletlerin deprem sonrası insansız hava araçları ile elde ettiği görüntüler

kullanılmıştır. Görüntüler sabit kanatlı Swinglet CAM Sensefly İHA ile elde edilmiştir.

Sensefly Swinglet CAM, küçük bir insansız hava aracı (UAV) olarak tasarlanmıştır ve yüksek çözünürlüklü görüntüleme ve haritalama uygulamaları için kullanılmaktadır. Sensefly Swinglet CAM; 0,5 kg ağırlığındadır ve kanat açıklığı 0,72 metre, uzunluğu 0,5 metre olan bir delta kanatlı tasarıma sahiptir. Tam şarjlı bataryalarla yaklaşık 30 dakika uçuş süresi sağlar. Yüksek çözünürlüklü kamerası sayesinde 12 megapiksel fotoğraflar ve 720p video kaydedebilir. Swinglet CAM, bir radyo kontrol cihazı veya otomatik bir uçuş kontrol sistemi kullanılarak uzaktan kontrol edilebilir. Otomatik uçuş sistemi, programlanabilir bir rota takip sistemi, sabit bir uçuş yüksekliği ve hava koşullarına uygun bir stabilizasyon sistemine sahiptir. İHA üzerine monte edilen Canon IXUS 125 HS model kamera ile yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edebilmektedir (İnt. Kyn. 3).

Çalışmada kullanılan İHA görüntüleri, Birleşmiş Milletler Eğitim ve Araştırma Enstitüsü tarafından paylaşılan 8 Şubat 2012'de Port-au-Prince'in Cité Soleil ve Gran Ravine bölgelerinden toplanmış sırasıyla 5 cm ve 7 cm konumsal çözünürlüğe sahiptir.

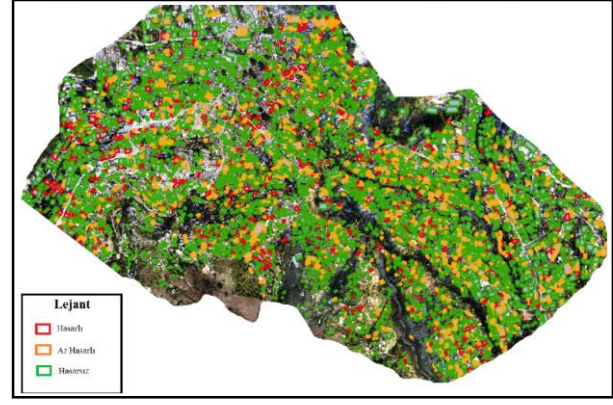
Cité Soleil bölgesine ait görüntü test çalışmaları için, Gran Ravine bölgesine ait görüntü ise eğitim çalışmaları için kullanılmıştır. Şekil-2'de test için kullanılan insansız hava aracı görüntüsüne, Şekil-3'te ise eğitim çalışmalarında kullanılan görüntüye örnekleri verilmiştir.



Şekil 2. Test için kullanılan Cité Soleil Bölgesine Ait Bir Görüntü



Şekil 3. Eğitim İçin Kullanılan Gran Ravine Bölgesine Ait Bir Görüntü



Şekil 4. İnsansız Hava Aracı Görüntüsünde Etiketleme Çalışmasının Yapıldığı Sahanın Tamamı

İnsansız hava aracı ile eğitim için yapılar üç sınıf hasarlı, hasarsız ve az hasarlı olarak sınıflandırılıp etiketlenmiştir. İnsansız hava aracı görüntüsü ile eğitim için 3829 hasarsız, 962 az hasarlı, 545 hasarlı yapı sınıflandırılıp etiketlenmiştir. Test için etiketlenmiş yapılar önce üç sınıfta test edilmiş daha sonra daha sonra az hasarlı olarak etiketlenmiş yapılar çıkarılarak test işlemi tekrar edilmiştir. İnsansız hava aracı görüntülerinden elde edilen eğitim ve test verilerinin dağılımı ve birbirlerine oranları Çizelge-1.'de gösterilmiştir.

Çizelge 1. İnsansız Hava Aracı Görüntülerinde Test ve Eğitim Verilerinin Dağılımı ve Birbirlerine Oranı

	Eğitim	Üç Sınıflı Test Verileri	Test / Eğitim (Üç Sınıf İçin)	İki Sınıflı Test Verileri	Test / Eğitim (İki Sınıf İçin)
Hasarlı	545	13	%0.02	13	%0.02
Hasarsız	3829	97	%0.03	97	%0.03
Az Hasarlı	962	35	%0.04	-	-

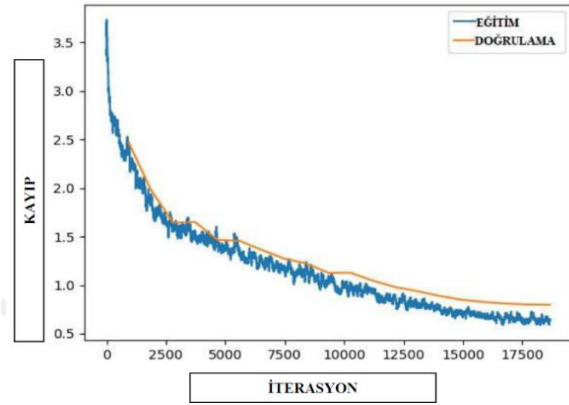
İnsansız hava araçları verilerinde altlık olarak kullanılacak harici olarak hazırlanmış yapı hasar tespiti olmadığından saha tek tek gözlemlenip değerlendirilerek etiketlenmiştir. Görüntülerin yüksek çözünürlüklü 7 cm konumsal çözünürlüğe sahip olması bunu mümkün kılmıştır. Etiket sınıfı üç sınıf olarak hasarlı, az hasarlı ve hasarsız şeklinde belirlenmiştir. Eğitim sahasının tamamına yakını etiketlenmeye çalışılmış sonuç olarak Şekil-4'de gösterildiği gibi 3829 yapı hasarsız, 962 yapı az hasarlı, 545 yapı hasarlı olarak tespit edilmiştir.

Etiketleme işlemi tamamlandıktan sonra her bir eğitim görüntüsü nesne tespiti için kullanacağımız model olan Mask R-CNN modeline uygun olarak dönüştürülerek eğitime hazır hale getirilmiştir. İnsansız hava aracı verileri önce üç sınıfta (hasarlı, az hasarlı ve hasarsız) eğitilmiş daha sonra az hasarlı veriler çıkarılarak sadece hasarlı ve hasarsız verilerle eğitilmiştir. Eğitim işleminde ImageNET ile eğitilmiş ResNet-101 ağından transfer öğrenimi gerçekleştirilmiştir. İnsansız hava aracıyla üç sınıfta yapılan eğitimin eğitim parametreleri Çizelge-2'de gösterilmiştir.

Çizelge 2. Üç Sınıfla Eğitilmiş Mask R-CNN Modelinin Eğitim Parametreleri

Eğitim Parametresi Türü	Parametre Değeri
Model	Mask R-CNN
Maksimum Epok	20
Mini Batch Boyutu	2
Çalıştırma Ortamı	GPU - NVIDIA GeForce GTX 1660 Ti 6GB GDDR6
Learning Rate	0.000075858 – 0.000075858
Chip size	256
Transfer Öğrenimi	ResNet-101
Doğrulama Verisi Oranı	%10
Eğitim Süresi	~5 Saat

Eğitim sonucunda hasarlı yapılar için %72.82, hasarsız yapılar için %78.47, az hasarlı yapılar için %61.93 ortalama doğruluk değeri elde edilmiştir. Eğitim boyunca oluşan kayıp fonksiyonun grafiği Şekil-5'de gösterilmiştir.



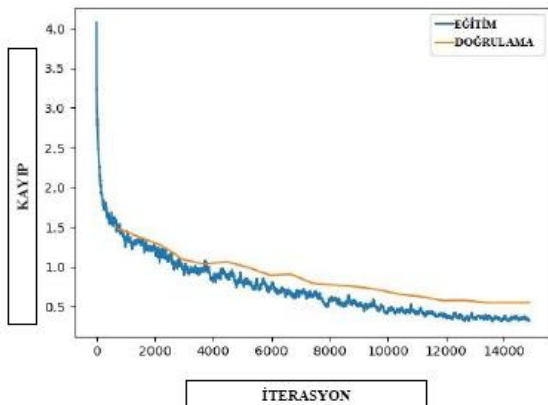
Şekil 5. Üç Sınıflı Yapılan Eğitimin Kayıp Fonksiyonunun Grafiği

İnsansız hava aracıyla yapılan üç sınıflandırmadan sonra az hasarlı yapılar çıkarılarak hasarlı ve hasarsız yapı verileri ile iki sınıflı olarak eğitim tekrarlanmıştır. İki sınıflı verilerle yapılan eğitimin eğitim parametreleri Çizelge-3'de verilmiştir.

Çizelge 3. İki Sınıflı Eğitilmiş Mask R-CNN Modelinin Eğitim Parametreleri

Eğitim Parametresi Türü	Parametre Değeri
Model	Mask R-CNN
Maksimum Epok	20
Mini Batch Boyutu	2
Çalıştırma Ortamı	GPU - NVIDIA GeForce GTX 1660 Ti 6GB GDDR6
Learning Rate	0.0000063096 – 0.000063096
Chip size	256
Transfer Öğrenimi	ResNet-101
Doğrulama Verisi Oranı	%10
Eğitim Süresi	~ 5 Saat

İki sınıflı insansız hava aracı görüntülerinin eğitimi sonucunda hasarlı yapılar için %76.11, hasarsız yapılar için %69.47 ortalama doğruluk değeri elde edilmiştir. Eğitim boyunca oluşan kayıp fonksiyonunun grafiği Şekil-6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. İki Sınıflı Yapılan Eğitimin Kayıp Fonksiyonunun Grafiği

Şekil-6.'da verilen kayıp fonksiyonu grafiğinde yaklaşık 14000 iterasyondan sonra eğitim verilerinin hata değerleri toplamı 0.5'in altına düşerken doğrulama verilerinin hata değerleri toplamı 0.5'e yaklaşmıştır.

Gerçekleştirilen çalışmada iterasyon sayısı, eğitim verilerinin boyutuna, modelin karmaşıklığına ve parametrelerine bağlı olarak belirlenmiştir. Daha büyük bir eğitim veri seti genellikle daha uzun bir eğitim süresi gerektirirken, daha karmaşık bir model daha fazla iterasyon gerektirebilir.

Özellikle iki sınıflı yapılan eğitimde kayıp fonksiyonunu 0,5 değerinin altına düşürülmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, eğitim süresi boyunca modelin doğruluğu ve kaybı takip edilerek, iterasyon sayısı bu ölçümlere dayanarak belirlenmiştir.

Sınıflandırma problemlerinde, bir modelin performansı genellikle doğruluk (accuracy) ölçütü ile değerlendirilir. Dolayısıyla, kayıp fonksiyonunun 0,5'in altında olması, modelin doğru tahmin etme olasılığının %50'den daha yüksek olduğunu ve dolayısıyla doğruluk oranının %50'den daha yüksek olacağını gösterir. Bu değer iterasyon sayısı artırılarak yükseltilebilir ancak, iterasyon sayısının çok yüksek olması aşırı uyuma (overfitting) riskini oluşturacağı hususu dikkate alınarak, iterasyon sayısı eğitim süreci boyunca verimliliği ve doğruluğu en üst düzeye çıkarmak için optimize edilmiştir.

5. Test İşlemlerinin Gerçekleştirilmesi

İnsansız hava araçları görüntülerinde ise daha önce eğitim ve doğrulama için kullanılmamış farklı bir alandan alınmış görüntü kullanılarak test işlemi gerçekleştirilmiştir. Test işleminde sınıflandırma doğruluğu karmaşıklık matrisi üzerinden gerçekleştirilmiştir. Karmaşıklık matrisi Çizelge-4'de gösterilmiştir.

Çizelge 4. Karmaşıklık matrisi

	Gerçekte Hasar Var	Gerçekte Hasar Yok
Tahmin Hasar Var	True Positive (TP)	False Positive (FP)
Tahmin Hasar Yok	False Negative (FN)	True Negative (TN)

Karmaşıklık matrisi oluşturulduktan doğruluk oranı denklem (1)'deki gibi, precision oranı denklem

(2)'deki gibi, recall oranı denklem (3)'teki gibi ve F1 skoru denklem (4)'teki gibi hesaplanmıştır. Doğruluk, doğru yapılan tahminlerin tüm veriye oranını vermektedir.

Bunun dışında yanlış yapılan tahminlerinde hesaba katıldığı precision ve recall modelin değerlendirmesi için kullanılabilir. F1 skoru precision ve recall değerlerinin harmonik ortalaması alınarak hesaplanmaktadır (Metlek ve Kayaalp 2020).

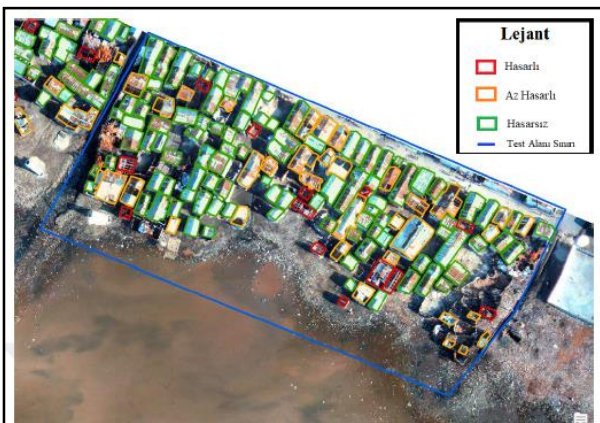
$$\text{Doğruluk} = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (1)$$

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (2)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (3)$$

$$\text{F1 Skoru} = 2x \frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (4)$$

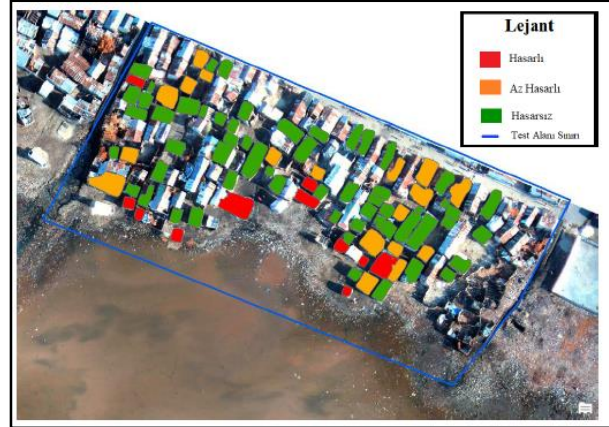
İnsansız hava aracı verileri üç sınıfa ve iki sınıfa ayrılarak test edilmiştir. Üç sınıflı toplam 145 etiket oluşturulmuştur. Test işlemi Şekil-7'de gösterilen mavi çerçeveli alan için yapılmıştır.



Şekil 7. Üçlü Sınıflandırmada Kullanılan Test Alanı ve Etiketleri

Test işlemi sonucunda 58 hasarsız, 11 hasarlı, 18 az hasarlı yapı bulunmuştur. Bulunan yapılar Şekil 6'da gösterilmiştir. Tespit edilen 87 yapıdan 85'i etiket

verisi ile kesişmektedir. Etiketli yapıların tespiti %58.62 oranında olmuştur. Test işlemi sonuçları Şekil-8'de sunulmuştur.



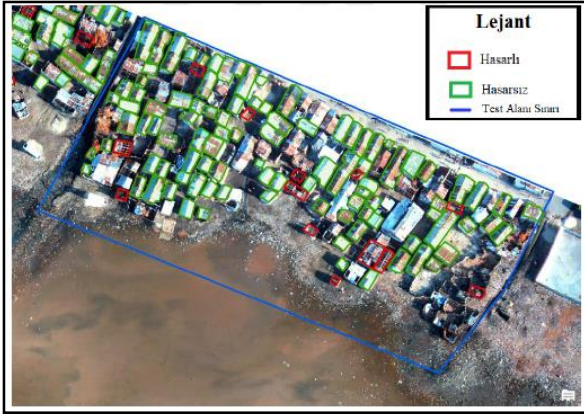
Şekil 8. Üçlü Sınıflarla Yapılan Test İşlemi Sonucu Tespit Edilen Yapılar

Bulunan yapılar etiketli verilerle karşılaştırıldığında hasarlı olarak tahmin edilen 9 yapıdan 5'inin doğru 4'ünün yanlış tahmin edildiği, hasarsız olarak tahmin edilen 58 yapıdan 48'inin doğru 10'unun yanlış tahmin edildiği, az hasarlı olarak 18 yapının bulunduğu bunların 11'inin doğru 7'sinin yanlış olarak tahmin edildiği görülmektedir. Doğruluk değerleri Çizelge-5'de verilmiştir. Tablo incelendiğinde genel doğruluk değerinin %83.53 olduğu görülmüştür.

Çizelge 5. Üçlü Sınıflarla Yapılan Test İşleminin Doğruluk Değerleri

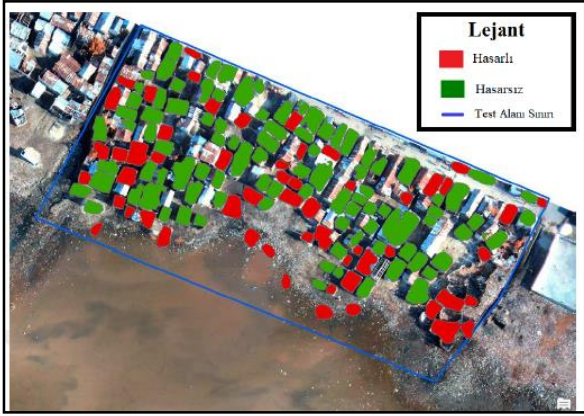
	Doğruluk	Precision	Recall	F1 Skoru
Hasarlı	0.9176	0.5556	0.6250	0.5883
Hasarsız	0.8235	0.8276	0.9057	0.8649
Az Hasarlı	0.7647	0.6111	0.4583	0.5238

Üç sınıfla yapılan test işleminden sonra aynı alan içerisindeki az hasarlı yapılar çıkarılıp hasarlı ve hasarsız şeklinde iki sınıf üzerinden test işlemi tekrarlanmıştır. İkili sınıf ile yapılan test işleminde kullanılan toplam 110 hasarlı ve hasarsız yapı Şekil-9'da mavi çerçeveli alan içerisinde gösterilmiştir. Test işlemi sonucunda 95 hasarsız, 56 hasarlı yapı bulunmuştur.



Şekil 9. İkili Sınıflandırmada Kullanılan Test Alanı ve Etiketleri

Test işlemi sonucunda 95 hasarsız, 56 hasarlı yapı bulunmuştur. Bulunan yapılar Şekil-10'da gösterilmiştir.



Şekil 10. İkili Sınıflarla Yapılan Test İşlemi Sonucu Tespit Edilen Yapılar

Tespit edilen yapılar incelendiğinde eğitime dâhil edilmemiş yapıların ve test alanına düşen zeminden moloz temizliği yapılmış çökmüş bina izlerinin de algılandığı anlaşılmaktadır. Tespit edilen yapılarla etiket verilerinin kesiştiği 82 yapı görülmektedir. Etiketli yapıların tespiti %74.55 oranında olmuştur. Bulunan yapılar etiketli verilerle karşılaştırıldığında hasarlı olarak tahmin edilen 15 yapının 11'i doğru 4'ünün yanlış tahmin edildiği, hasarsız olarak tahmin edilen 67 yapının tamamının doğru tahmin edildiği görülmektedir. Test işleminin doğruluk değerleri Çizelge-6'da verilmiştir.

Çizelge 6. İkili Sınıflarla Yapılan Test İşleminin Doğruluk Değerleri

	Doğruluk	Precision	Recall	F1 Skoru
Hasarlı	0.9512	0.73333	1.0000	0.8461
Hasarsız	0.9512	1.0000	0.9437	0.9710

Tablo incelendiğinde genel doğruluk değerinin %95.12 olduğu görülmüştür. Hasarlı tahmin edilen 15 yapıdan 11'inin doğru tahmin edilmesinden hasarlı yapıların precision değeri %73.33 olduğu görülmüştür. Hasarlı yapıların recall değeri gerçekte hasarlı olan yapıların tamamı bulunmasından dolayı %100 olmuştur.

6. Tartışma ve Sonuç

Deprem gibi doğal afetler sonucunda hasarlı yapılar oluşmaktadır. Afetin etkilerini hızlı ve doğru bir şekilde tespit etmek normal yaşama dönüşü hızlandırmak ve muhtemel can kayıplarının en aza indirgenmesi için önemli bir faktördür. Bu sebeple afet sonrası afet alanına bütüncül bir yaklaşımla değerlendirme olanağı sunan uzaktan algılama verilerini kullanmak etkili bir çözüm olmaktadır.

Olaydan sonraki ilk saatlerde/günlerde mevcut olan tek veri kaynağı uydu görüntüleridir. İHA görüntüleri ise olaydan birkaç gün sonra elde edilebilirken, saha bilgileri (doğrulama amacıyla kullanılan yer gerçeği verileri) genellikle birkaç hafta sonra, genellikle afet sonrası ihtiyaç değerlendirmesi aşamasında elde edilir. Ancak yüksek çözünürlüklü kameralar ve sensörler ile donatılmış İHA'lar, hasarlı bina ve altyapıların doğru ve ayrıntılı görüntülerini sağlayarak deprem hasar tespitinde önemli bir rol oynamaktadır. İHA'lardan toplanan veriler, yetkililerin müdahale çabalarına öncelik vermelerine ve kaynakları daha verimli bir şekilde tahsis etmelerine yardımcı olabilecektir.

Derin öğrenme makine öğrenmesinin bir alt dalı olarak gizli katman sayısını fazla olmasının avantajını kullanarak uydu verileri gibi düzenli ve çok sayıda elde edilen verilerin insandan bağımsız bir şekilde değerlendirilebilmesi için etkili sonuçlar üretmektedir.

Elde edilen sonuçlar, literatür taramasında uydu görüntüleri kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalarla karşılaştırıldığında, konumsal çözünürlük arttıkça yapıların tespiti ve sınıflandırma başarısının arttığı tespit edilmiştir. Doğrulama konularına odaklanan birkaç araştırmanın sonuçları, %60 ila %70 aralığında genel doğruluk değerleri bildirmektedir.

Bu çalışmada insansız hava aracı verileri iki aşamada ele alınmıştır. İlk aşamada hasarlı, az hasarlı ve hasarsız şeklinde üç sınıfta incelenmiştir. İnsansız hava aracı verileri ile yapılan test işleminde ise yapılar %58.62 oranıyla bulunmuş ve bulunan yapılar %83.53 genel doğrulukla sınıflandırılmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında veriler hasarlı ve hasarsız şekillinde etiketlenmiş ilk aşamayla aynı test sahası kullanılarak test işlemleri yapılmıştır. İnsansız hava aracı verilerindeki yapılar %74.50 oranıyla bulunmuş ve bulunan yapılar %95.12 genel doğruluk oranıyla sınıflandırılmıştır.

Gelişen teknolojilerle birlikte insansız hava araçlarından alınan görüntülerin konumsal çözünürlüğünün artması sayesinde afet sonrası yapılarda meydana gelen hasarın tespit edilmesinde Mask R-CNN gibi derin öğrenme modellerinin kullanılabilirliği anlaşılmaktadır.

Özellikle afet yaşanma riski yüksek olan bölgeler için afet sonrasında hasarlı yapıların hızlı ve yüksek doğrulukta belirlenmesi için görüntü alımı, eğitim setlerinin hazırlanması ve en uygun derin öğrenme algoritmalarının kullanılmasına yönelik çalışmaların yapılmasının faydalı olacağı değerlendirilmektedir.

7. Kaynaklar

Albawi, S., Mohammed, T. A. and Al-Zawi, S., 2018. Understanding of a convolutional neural network. Proceedings of 2017 International Conference on Engineering and Technology, ICET 2017, 1–6.

Bhangale, U., Durbha, S., Potnis, A. and Shinde, R., 2019. Rapid Earthquake Damage Detection Using Deep Learning from VHR Remote Sensing Images. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2654–2657.

Boccardo, P., ve Giulio T. F., 2012. Haiti earthquake damage assessment: review of the remote sensing role. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **39**, 529-532.

Bragagnolo, L., da Silva, R. V. ve Grzybowski, J. M. V., 2021. Amazon forest cover change mapping based on semantic segmentation by U-Nets. *Ecological Informatics*, **62**, 101279.

Cheng, Z., Gong, W., Tang, H., Juang, C. H., Deng, Q., Chen, J. and Ye, X., 2021. UAV photogrammetry-based remote sensing and preliminary assessment of the behavior of a landslide in Guizhou, China. *Engineering Geology*, **289**, 106172.

Corbane, C., Carrion, D., Lemoine, G., Broglia, M., 2011. Comparison of damage assessment maps derived from very high spatial resolution satellite and aerial imagery produced for the haiti 2010 earthquake. *Earthquake Spectra*, **27**, 199-218.

Gupta, A., Watson, S. ve Yin, H., 2021. Deep learning-based aerial image segmentation with open data for disaster impact assessment. *Neurocomputing*, **439**, 22–33.

He, K., Gkioxari, G., Dollár, P. ve Girshick, R., 2017. Mask R-CNN, IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), Venice, Italy, 2980-2988.

İnik, Ö. ve Ülker, E., 2017. Derin Öğrenme ve Görüntü Analizinde Kullanılan Derin Öğrenme Modelleri. *Gaziosmanpaşa Journal of Scientific Research*, **6(3)**, 85–104.

Kayaalp, K. ve Süzen, A. A., 2018. Derin Öğrenme Ve Türkiye'deki Uygulamaları. ISBN 978-605-7510-53-2, İksad Publishing House, 44-52.

Khosravi, K., Panahi, M., Golkarian, A., Keesstra, S. D., Saco, P. M., Bui, D. T. and Lee, S., 2020. Convolutional neural network approach for spatial prediction of flood hazard at national scale of Iran. *Journal of Hydrology*, **591**, 125552.

LeCun, Y., Bengio, Y. and Hinton, G., 2015. Deep learning. *Nature*, **521(7553)**, 436–444.

Metlek, S. ve Kayaalp, K., 2020. Derin Öğrenme ve Destek Vektör Makineleri İle Görüntüden Cinsiyet Tahmini. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, **8(3)**, 2208–2228.

Moradi, M., ve Shah-Hosseini, R., 2020. Earthquake damage assessment based on deep learning change detection method using VHR images. IECG-2020 Conference Proceedings Paper, 8545.

Neven, D., De Brabandere, B., Proesmans, M., ve Van Gool, L., 2019. Instance segmentation by jointly optimizing spatial embeddings and clustering

bandwidth, 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 8837-8845.

Nex, F., Duarte, D., Tonolo, F. G. and Kerle, N., 2019. Structural Building Damage Detection with Deep Learning: Assessment of a State-of-the-Art CNN in Operational Conditions. *Remote Sensing*, **11(23)**, 2765.

Nie, Y., Takaki, T., Ishii, I. ve Matsuda, H.,2011. Behavior recognition in laboratory mice using HFR video analysis. Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1595–1600.

Robertson, B. W., Johnson, M., Murthy, D., Smith, W. R. and Stephens, K. K., 2019. Using a combination of human insights and ‘deep learning’ for real-time disaster communication. *Progress in Disaster Science*, **2**, 100030.

Şahin, N., 2009. Afet Yönetimi ve Acil Yardım Planları. TMMOB İzmir Kent Sempozyumu, 131–142.

Yeum, C. M., Dyke, S. J. ve Ramirez, J., 2018. Visual data classification in post-event building reconnaissance. *Engineering Structures*, **155**, 16–24.

Zhai, W. ve Peng, Z. R., 2020. Damage assessment using Google Street View: Evidence from Hurricane Michael in Mexico Beach, Florida. *Applied Geography*, **123**, 102252.

İnternet kaynakları

1-<https://www.xenonstack.com/blog/data-science/log-analytics-deep-machine-learning-ai> (02.09.2022)

2-<https://developer.nvidia.com/cuda-toolkit-archive> (07.09.2022)

3-<https://unitar.org/maps/map/1639> (31.08.2022)

AKÜ FEMÜBİD 23 (2023) 025601 (438-447)

AKU J. Sci. Eng. 23 (2023) 025601 (438-447)

DOI: 10.35414/akufemubid.1133802

Araştırma Makalesi / Research Article

Geri Dönüşüm Agregalı Betonların Çevresel Etki Değerlendirmelerinin Yapılması

Muhammed ULUCAN^{1,*}, Kürşat Esat ALYAMAÇ¹¹İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, TÜRKİYE

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: mulucan@firat.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7629-6846>
kealyamac@firat.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3226-4073>

Geliş Tarihi: 23.06.2022

Kabul Tarihi: 02.03.2023

Öz

Anahtar kelimeler

Geri dönüşümlü beton
agregası;
Deprem;
İnşaat yıkıntı atığı;
Yaşam döngüsü analizi

Bu çalışma, 24 Ocak 2020 Elazığ-Sivrice depremi sonrasında kontrollü bir şekilde yıkılan binalardan ortaya çıkan geri dönüştürülmüş beton agregaları kullanılarak üretilen geri dönüşüm iri agregalı betonların (GDİAB) ve doğal agregalı betonların (DAB) çevresel etki sonuçlarını karşılaştırmayı amaçlamaktadır. Bu amaçla 12 farklı beton serisi üretilmiş ve çevresel etki değerlendirmeleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar yapılırken çevresel etki kategorilerinden Enerji Tüketimi, Küresel Isınma Potansiyeli, Atık Üretimi ve Abiyotik Tükenme ele alınmıştır. Üretilen betonların çevresel etki karşılaştırmalarını yapabilmek için dört farklı senaryo geliştirilmiştir. Senaryolar incelendiğinde geri dönüşümlü beton agregalarının kullanımının büyük çevresel faydalar sağladığı görülmüştür. Deprem sonrası ortaya çıkan milyonlarca ton atık malzeme ve yeni inşa edilen binalar göz önüne alındığında, atık malzemelerin geri dönüştürülmesinin büyük önem taşıdığı bir kez daha ortaya çıkmıştır.

Environmental Impact Assessment of Recycled Aggregate Concretes

Abstract

Keywords

Recycled concrete
aggregate;
Earthquake;
Construction and
demolition waste;
Life cycle assessment

This study aims to compare the environmental impact results of recycled coarse aggregate concrete (RCAC) produced using recycled concrete aggregates (RCA) that emerged the demolished buildings in a controlled manner after January 24, 2020, Elazığ-Sivrice earthquake, recycled coarse aggregate concrete (RCAC), and natural aggregate concrete (NAC). For this purpose, 12 different concrete series were produced, and their environmental impact assessments were compared. While making comparisons, Energy Consumption, Global Warming Potential, Waste Generation, and Abiotic Depletion, which are environmental impact categories, were discussed. Four different scenarios were developed to make environmental impact comparisons of the produced concretes. When the scenarios were examined, it was seen that the use of recycled concrete aggregate provides great environmental benefits. Considering the millions of tons of waste materials and newly constructed buildings that emerged after the earthquake, it has once again emerged that recycling waste materials is of great importance.

1. Giriş

Dünyada artan insan nüfusu nedeniyle çevresel bozulma, tüm dünyanın karşı karşıya olduğu en kritik sorunlardan biridir (Peña *et al.*, 2022). Ayrıca nüfus artışındaki patlama ile inşaat ve sanayi sektöründeki üretim ciddi bir çevresel tehdide yol açmıştır (González-Quintero *et al.*, 2021). Bu nedenle sürdürülebilirliğin sağlanması büyük önem taşımaktadır. Toplumlar, sürdürülebilirlik nedenleriyle üretim ve tüketimin döngüsellğine daha fazla ilgi göstermektedir. Örneğin, inşaat sektörü dünya çapında yıllık kaynak tüketiminin neredeyse %50'sinden sorumludur (Oberle *et al.*, 2019). Ayrıca en bakir hammadde tüketen ve en fazla atık üreten sektörlerden biridir (Huuhka and Kolkwitz, 2021). 2011'de 37 gigaton metalik olmayan mineral malzeme çıkarılmıştır ve 2060'ta 86 gigaton'a yükselmesi beklenmektedir (Meglin *et al.*, 2021). Özellikle son yıllarda kentsel dönüşüm projeleri ve depremler nedeniyle birçok bina yıkılmış ve yerine yenileri yapılmıştır. Bu nedenle, büyük miktarlarda inşaat ve yıkıntı atıkları (İYA) ortaya çıkmaktadır. Çalışmalar, kişi ve gün başına 1,68 kg İYA'nın meydana geldiğini göstermektedir (Kaza *et al.*, 2018). Doğal kaynakların yüksek tüketimi ve yüksek İYA ortaya çıkması göz önüne alındığında, çevre, doğal kaynaklar ve ekosistemler yüksek baskı altındadır (OECD., 2020; Pomponi and Moncaster, 2017).

Beton, inşaat sektöründe ve dünya çapında en yaygın kullanılan yapı malzemesidir ve esas olarak çimento, kum ve agregalardan oluşur (Demir *et al.*, 2022; Marinković *et al.*, 2010). Bu malzemeler arasında betonda en fazla yeri agregalar kaplamaktadır (Guo *et al.*, 2018; Ulas *et al.*, 2019). Bu nedenle, beton üretiminde İYA sonrası elde edilen geri dönüştürülmüş beton agregalarının (GDBA) kullanılması, atıkla ilgili sorunların üstesinden gelmenin en iyi yollarından biri olarak kabul edilmektedir (Borghi *et al.*, 2018; Ram *et al.*, 2020). İnşaat sektöründe sürdürülebilirliği sağlamak için son yıllarda GDBA'ların kullanımı artmış ve çalışmaların odak noktası haline gelmiştir (Kisku *et al.*, 2017). Bu nedenle betonda GDBA'ların kullanılması, İYA'nın yeniden kullanımını sağlamak ve doğal kaynak tüketimini azaltmak açısından oldukça avantajlıdır (Wijayasundara *et al.*, 2018). Ek olarak, doğal agregaların GDBA'larla yer değiştirilerek kullanılması enerji tüketimini, karbon

emisyollarını ve çevre kirliliğini de azaltmaktadır (Majhi *et al.*, 2018).

Daha önceki çalışmalarda GDBA içeren betonların mekanik özelliklerini inceleyen birçok çalışma bulunmaktadır (Medina *et al.*, 2014). Ancak karışımlar tasarlanırken sadece mekanik özellikler değil aynı zamanda çevresel etkiler de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle çevresel etkileri dikkate alan bir çalışma gereklidir. Dolayısıyla Elazığ-Sivrice depremi sonucu ortaya çıkan GDBA'lar kullanılarak üretilen betonların yaşam döngüsü değerlendirmelerinin yapılması ve bu betonların çevresel etkilerinin karşılaştırılması büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışma, 24 Ocak 2020 Elazığ-Sivrice depremi sonrasında kontrollü bir şekilde yıkılan binalardan ortaya çıkan GDBA'lar kullanılarak üretilen betonların ve doğal agrega kullanılarak üretilen betonların (DAB) çevresel özelliklerini incelemeyi ve karşılaştırmayı amaçlamaktadır. Bu amaçla 12 seri beton numune üretilmiş ve yaşam döngüsü analizleri (YDA) yapılmıştır. YDA'lar uygulanırken 4 farklı senaryo dikkate alınmış ve enerji tüketimi (ET), küresel ısınma potansiyeli (KIP), atık üretimi (AÜ) ve abiotik tükenme (AT) incelenmiştir. Bu senaryolar sonucunda GDBA kullanımının önemli çevresel faydalar sağlayacağı görülmüştür.

2. Materyal ve Metot

2.1 Malzemeler

Bu çalışmada, TS EN 197-1 standardına uygun olarak üretilmiş, 28 günlük basınç dayanımı 48.3 MPa olan CEM I 42.5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Bu çimento, Elazığ Çimento fabrikasından temin edilmiştir. Çimentoya ait fiziksel ve kimyasal özellikler Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri (%).

Kimyasal özellikler	Çimento
CaO	63,19
SiO ₂	19,07
Fe ₂ O ₃	3,72
Al ₂ O ₃	4,82
SiO ₃	2,94
Na ₂ O	0,39
K ₂ O	0,62
MgO	1,83
Cl-	0,01
Çözünmeyen kalıntı	0,56
Kızdırma kaybı	3,43
Fiziksel özellikler	
Özgül yüzey (cm ² /g)	3838
Özgül ağırlık (g/cm ³)	3,13
Priz başlangıcı (dakika)	135
Priz sonu (dakika)	215

Beton karışımlarında agrega olarak Elazığ-Sivrice depremi sonrası yıkılan bir binadan elde edilen GDBA'lar kullanılmıştır. Binanın yıkılması sonrası ortaya çıkan beton kütleleri, konkasörde kırıcılar yardımıyla parçalanarak farklı boyutlardaki GDBA haline getirilmiştir. GDBA'lar 0-4, 4-16, 16-31.5 mm'lik silolarda ince, iri-1 ve iri-2 malzeme olarak sınıflandırılmış ve Fırat Üniversitesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarına getirilmiştir. Daha sonra GDBA'ların fiziksel deneyleri laboratuvarda yapılmış ve sonuçlar Çizelge 2'de verilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan GDBA'ların elde edilme aşamaları Şekil 1'de verilmiştir. Öncelikle yıkılan bir binadan ortaya çıkan beton kütleleri bir kepçe yardımıyla alınmıştır (Şekil 1.a). Ardından bu beton kütleleri bir kamyonla doldurularak Elazığ-Karayazı bölgesinde bulunan bir beton santraline götürülmüştür (Şekil 1.b). Burada beton kütleleri bir konkasör yardımıyla kırılarak farklı boyutlarda GDBA'lar elde edilmiştir (Şekil 1.c). Elde edilen GDBA'lar Şekil 1.d'de verilmiştir.



Şekil 1. GDBA'ların elde edilme aşamaları
Tüm beton karışımlarında su azaltıcı kimyasal katkı olarak CHRYSO Optima 280 - SC3 süper akışkanlaştırıcısı kullanılmıştır. Beton karışımlarına ait veriler Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 2. GDBA'ların fiziksel deney sonuçları.

Özellik	İnce	İri-1	İri-2
Metilen mavisi	1,50	-	-
Los Angeles aşınma (LA)	-	-	22,8
Doygun özkül ağırlık	2,48	2,69	2,73
Kuru özkül ağırlık	2,45	2,66	2,70
Su emme (%)	9,8	4,2	3,6

Çizelge 3. Beton serilerine ait karışım oranları

Seri Adı	Su/Çimento	Çimento	Su	Kimyasal Katkı	Doğal Agrega			Geril DönüŖümlü Agrega			Slump (cm)
					İnce	İri-1	İri-2	İnce	İri-1	İri-2	
DAB-1	0,35	300	105,0	6,0	629,7	636,8	855,4	0,0	0,0	0,0	9
DAB-2	0,45	300	135,0	3,3	605,8	612,6	822,9	0,0	0,0	0,0	13
DAB-3	0,35	350	122,5	5,3	603,0	609,8	819,2	0,0	0,0	0,0	10
DAB-4	0,45	350	157,5	2,5	575,1	581,6	781,2	0,0	0,0	0,0	14
DAB-5	0,35	400	140,0	6,8	576,3	582,8	782,9	0,0	0,0	0,0	11
DAB-6	0,45	400	180,0	2,4	544,4	550,5	739,5	0,0	0,0	0,0	16
GDİAB-1	0,35	300	105,0	6,0	629,7	0,0	0,0	0,0	636,8	861,8	9
GDİAB-2	0,45	300	135,0	3,8	605,8	0,0	0,0	0,0	612,6	829,0	14
GDİAB-3	0,35	350	122,5	5,6	603,0	0,0	0,0	0,0	609,8	825,2	12
GDİAB-4	0,45	350	157,5	2,8	575,1	0,0	0,0	0,0	581,6	787,0	16
GDİAB-5	0,35	400	140,0	4,4	576,3	0,0	0,0	0,0	582,8	788,6	14
GDİAB-6	0,45	400	180,0	2,0	544,4	0,0	0,0	0,0	550,5	745,0	18

2.2 Yaşam döngüsü analizi (YDA)

EN ISO 14044 standardına göre, üretilen betonların çevresel etkisini analiz etme tekniklerinden biri yaşam döngüsü analizidir (EN ISO 14044, 2006). YDA metodolojisi ISO 14040 standardında detaylı bir şekilde açıklanmaktadır (EN ISO 14040, 2006). YDA yardımıyla ürünlerin üretim aşamasının başlangıcından sonuna kadar meydana gelen her aşamada ortaya çıkan çevresel etkiler detaylı bir şekilde incelenmektedir.

2.2.1. Amaç ve Kapsam

Bu YDA çalışmasının amacı Elazığ-Sivrice depremi sonrası oluşan milyonlarca ton atığın bertarafını sağlamak ve üretilecek farklı betonların çevresel etkilerinin karşılaştırmasını yapmaktır. Bu amaçla DAB ile GDİAB'ler üretilmiş ve bu betonların çevresel özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Deprem sonrası binlerce bina yıkılmış ve yıkılan binaların yerine yeni binaların yapımına başlanmıştır. Dolayısıyla çok büyük miktarlarda beton üretilmekte ve ortaya çıkan atıkların beton içerisinde değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaç

doğrultusunda 4 farklı senaryo geliştirilmiş ve bu senaryolara göre YDA'lar yapılmıştır. Geliştirilen senaryolar aşağıda detaylı bir şekilde verilmiştir:

Senaryo 1: Çimento ve katkı maddesi miktarı başta olmak üzere karışım bileşiminden kaynaklanan değişiklikleri dikkate alır. Doğal ve geri dönüştürülmüş beton agregaları için taşıma mesafesi farkı yoktur.

Senaryo 2: Karışım bileşiminden kaynaklanan değişiklikler ile doğal ve geri dönüştürülmüş beton agregaları arasındaki fiyat farkını dikkate alır.

Senaryo 3: Doğal ve geri dönüştürülmüş beton agregaları arasındaki karışım bileşimi ve taşıma farklılıklarından kaynaklanan değişiklikleri dikkate alır.

Senaryo 4: Karışım bileşimi, fiyat farkı ve taşıma farkından kaynaklanan değişiklikleri dikkate alır.

2.2.2. Yaşam döngüsü envanter analizi

ISO 14040-44 serisine göre envanter analizi, üretilen numunelerin çevresel açıdan önemli girdi ve çıktılarını değerlendirmeyi amaçlar (Jain *et al.*, 2020; Wernet *et al.*, 2016). Yaşam döngüsü envanteri, yaşam döngüsünün her aşamasında malzeme ve enerji gibi tüm çevresel girdi ve çıktılarının ayrıntılı bir derlemesinden oluşur (Colangelo *et al.*, 2018).

Elazığ'da agregaların çoğu çevre ilçelerdeki patlatmalardan elde edilmektedir. Bu nedenle agregaların taşınması ve teslimi büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle doğal agregaların üretimi ve Elazığ'a taşınması için gerekli olan malzeme, enerji ve yakıt bilgileri ilgili üreticilerden toplanmıştır. Ayrıca Elazığ'daki geri dönüştürülmüş agrega üreticileri ve literatürdeki veriler dikkate alınarak geri dönüştürülmüş agrega üretimi için gerekli veriler kullanılmıştır. Son olarak, agrega üretimi, çimento üretimi, nakliye mesafesi ve GDBA üretimine dayalı olarak çevresel etkiler hesaplanmıştır (Marinković *et al.*, 2010). Bu çalışma kapsamında çevresel etki değerlendirmeleri yapılırken dikkate alınan veriler Çizelge 4'de verilmiştir.

Bu analizin fonksiyonel birimi 1 m³ beton olarak tanımlanmıştır. Bu bölümün amacı, üretilen farklı betonların çevresel etkilerini karşılaştırmaktır. Ancak çevresel etkilerin karşılaştırılabilmesi için üretilen betonların benzer basınç dayanımlarına sahip olmaları gerektiği vurgulanmıştır (Xiao *et al.*,

Çizelge 6. 1 m³ beton için çevresel etki sonuçları

Seri adı	Senaryo 1,2		Senaryo 3,4		Senaryo 1,2,3,4	
	ET (MJ)	KIP (kg CO ₂)	ET (MJ)	KIP (kg CO ₂)	AT (kg)	AÜ (kg)
DAB-1	1247	267	2002	316	2533	2122
DAB-2	1246	267	1977	314	2480	2041
DAB-3	1445	310	2182	357	2510	2032
DAB-4	1444	310	2153	355	2448	1938
DAB-5	1643	353	2362	399	2489	1942

2016). Yine yapılan araştırmalarda GDİAB'lar ile DAB'lerin aynı basınç dayanımına sahip olabilmesi için GDİAB'lerin çimento miktarlarının yaklaşık olarak %10 civarında artırılması gerektiği tespit edilmiştir (Gutiérrez, 2004; Poon and Lam, 2008). Bu nedenle, bu çalışmada GDİAB'lerin çimento dozajları %10 artırılarak yaşam döngüsü analizleri gerçekleştirilmiştir. Katkı içeriğindeki farklılıklar oldukça az olduğundan katkı maddelerinin çevresel etkileri ihmal edilmiştir. YDA yapılırken dikkate alınan taşıma mesafeleri ve malzemelerin taşındığı kamyon tipleri Çizelge 5'de verilmiştir.

Çizelge 4. Yaşam döngüsü analizinin çeşitli aşamaları için envanter analiz verileri

	Çimento Üretimi	Doğal Agregası Üretimi	GDBA Üretimi	Beton üretimi (1 m ³)	Ulaşım (tkm)	
					Ağır kamyon	Orta-Ağır Kamyon
ET (MJ)	3,985359	0,01478	0,01818	20,06894	1,5409	3,2667
KIP (g)	861,2028	1,377926	1,694905	5698,210	110,770	234,850
AÜ (kg)	-	1	-1	-	-	-
AT (kg)	-	1	-	-	-	-

Çizelge 5. Ulaşım senaryosu

	Taşıma mesafesi (km)	Taşıma tipi
Doğal agrega	90	Orta-Ağır Kamyon
Gerİ dönüşümlü agrega	5	Orta-Ağır Kamyon
Çimento	110	Ağır Kamyon
Beton	5	Beton Mikseri ^a

^a Orta-ağır kamyonu eşdeğer olduğu varsayılır

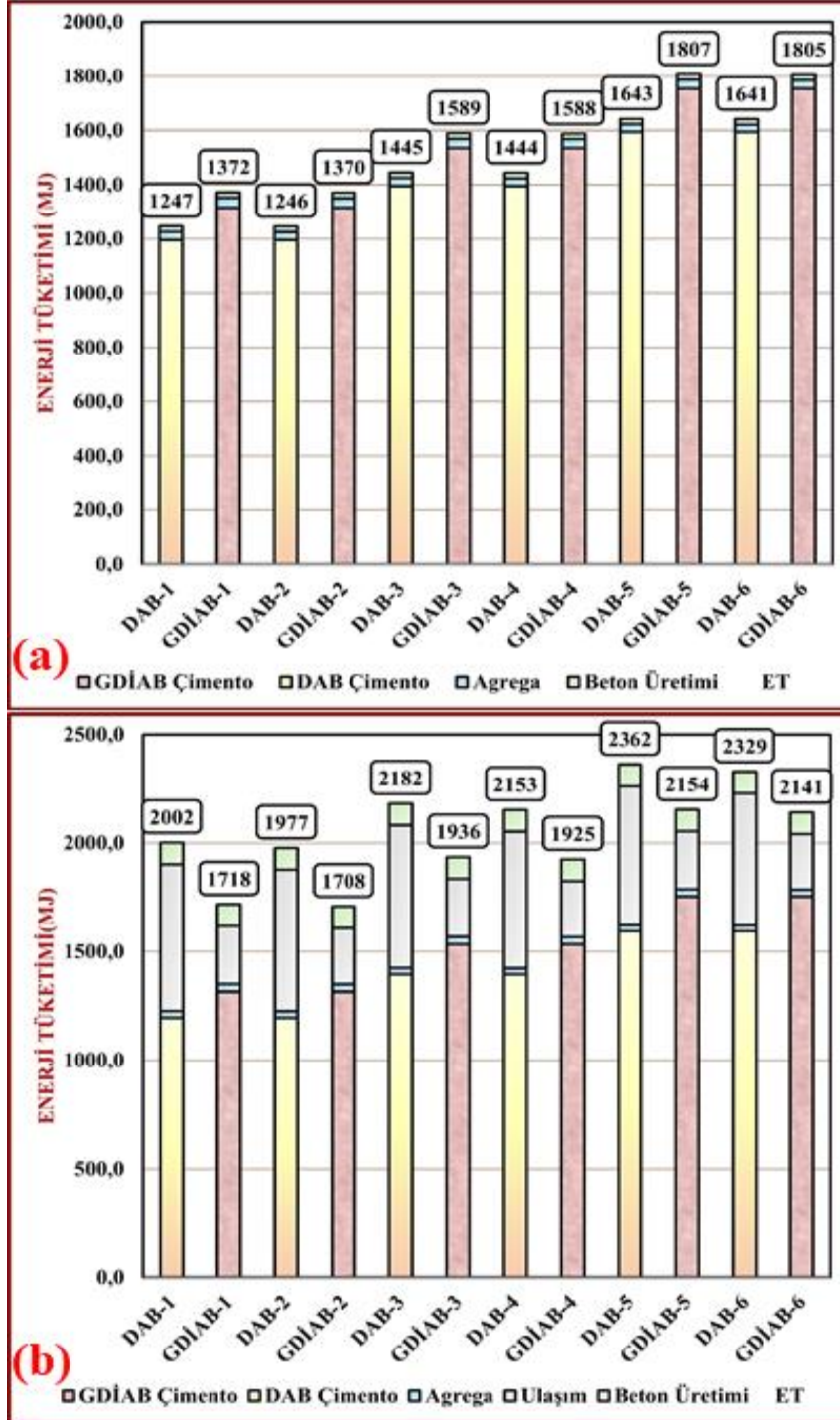
3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmanın temel amacı, Elazığ-Sivrice depremi sonrasında ortaya çıkan İYA'nın bertaraf edilmesini sağlamak ve üretilen betonların çevresel etki sonuçlarının karşılaştırılmasıdır. Bu amaçla deprem sonrası ortaya çıkan GDBA'lar kullanılarak farklı beton serileri üretilmiş ve bunların çevresel etkileri farklı senaryolar için değerlendirilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen çevresel etki sonuçları Çizelge 6'da verilmiştir.

DAB-6	1641	353	2329	396	2417	1834
GDiAB-1	1372	293	1718	312	1071	630
GDiAB-2	1370	293	1708	312	1075	606
GDiAB-3	1589	341	1936	360	1117	603
GDiAB-4	1588	340	1925	359	1121	575
GDiAB-5	1807	388	2154	407	1161	576
GDiAB-6	1805	388	2141	406	1167	544

DAB ve GDiAB'lar için detaylı YDA'lar yapılmış ve çevresel etki sonuçları belirlenmiştir. Farklı

senaryolara göre elde edilen ET sonuçları Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Farklı senaryolara göre ET sonuçları.

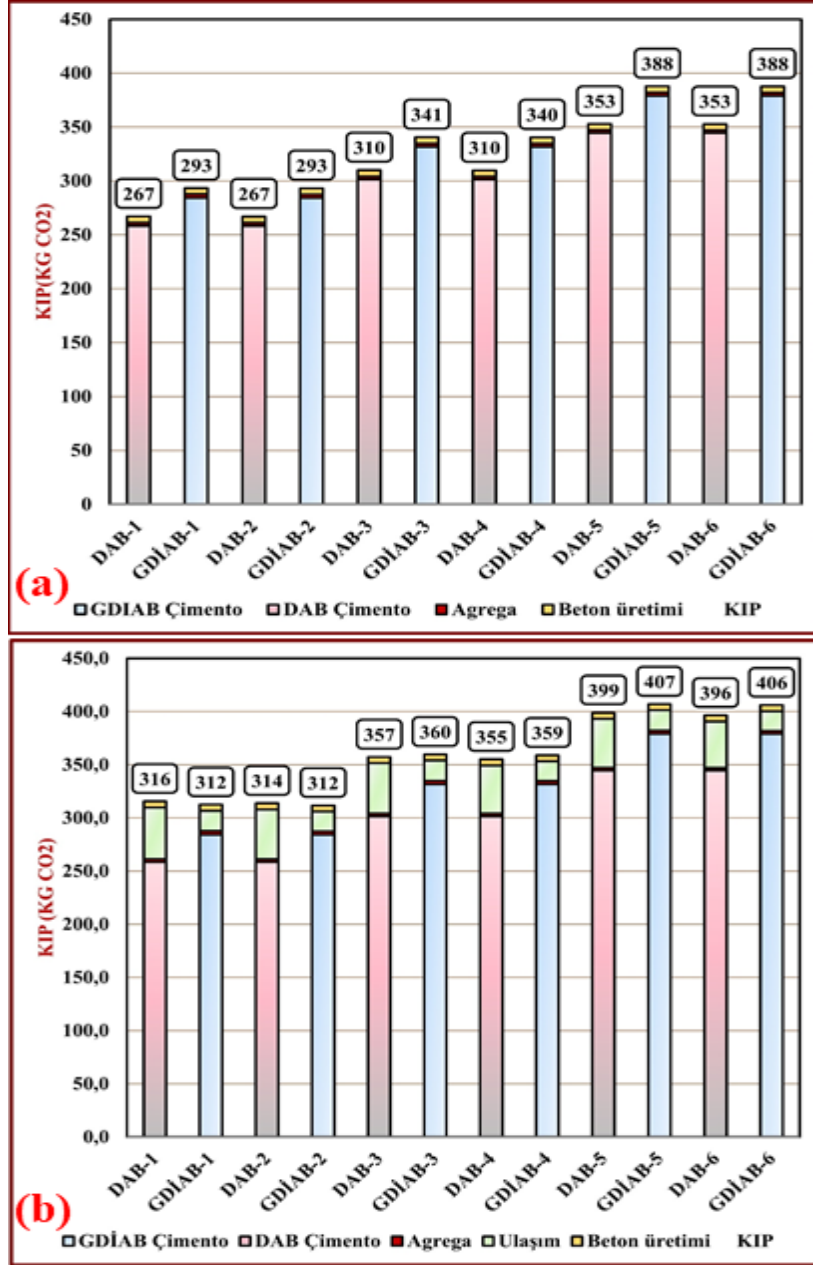
Şekil 2.a'da senaryo 1 ve 2'ye göre elde edilen ET sonuçları verilmiştir. Buradan DAB'lerin ET değerlerinin GDiAB'lerden daha düşük olduğu açıkça

görülmektedir. Bunun en büyük nedeni aynı dayanıma sahip olabilecek GDiAB'ler için çimento dozajının artırılması gerektiğidir. Örneğin DAB-3 ile

GDİAB-3 karşılaştırıldığında ET değerlerinin sırasıyla 1445-1589 MJ olduğu görülmektedir. Şekil 2.b ise senaryo 3 ve 4'e göre ET değerlerini göstermektedir. Buradan ET değerlerinde büyük farklılıklar olduğu görülmektedir. Bunun en büyük nedenlerinden biri ise taşımadan kaynaklı mesafe farklılıklarının dikkate alınmasıdır. Yine DAB-3 ile GDİAB-3 karşılaştırıldığında ET değerlerinin 2182-1936 MJ

olduğu görülmektedir. Bu da taşıma mesafesinin de ET değerleri üzerinde oldukça etkili olduğunu göstermektedir. Yine yapılan çalışmalarda benzer sonuçlar elde edilmiştir (Fraj and Idir, 2017; Ulucan and Alyamac, 2022).

DAB ve GDİAB'lar için farklı senaryolara göre elde edilen çevresel etki sonuçları Şekil 3'de verilmiştir.



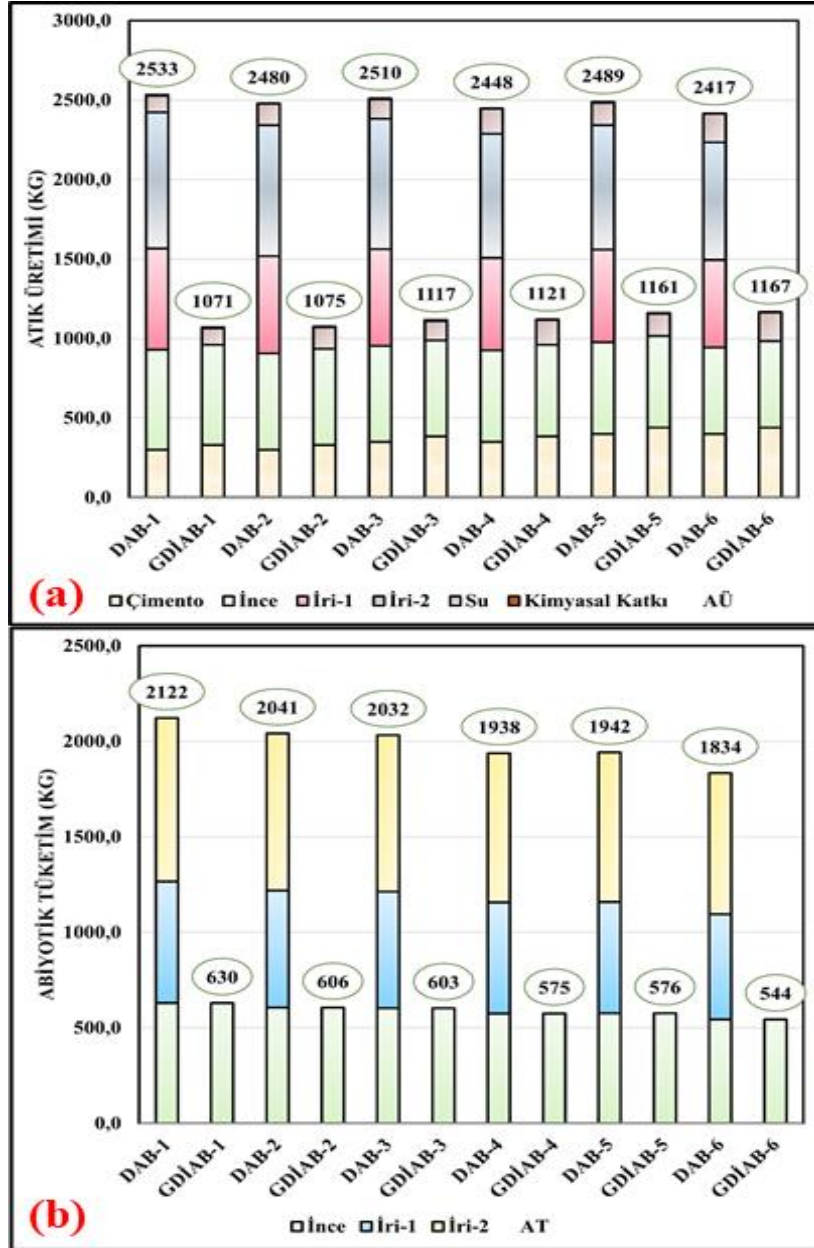
Şekil 3. Farklı senaryolara göre KIP sonuçları.

Şekil 3.a senaryo 1 ve senaryo 2'ye göre KIP değerlerini göstermekte ve DAB'lerin KIP değerlerinin GDİAB'lerden daha düşük olduğu açıkça görülmektedir. Yine KIP değerleri üzerinde çimentonun oldukça büyük bir etkisinin olduğu görülmektedir. Yapılan araştırmalarda da buna benzer sonuçlar görülmektedir (Proske *et al.*, 2014).

Örneğin DAB-2 ile GDİAB-2 karşılaştırılırsa KIP değerlerinin sırasıyla 267-293 kg CO₂ olduğu tespit edilmiştir. Şekil 3.b senaryo 3 ve senaryo 4'e göre KIP değerlerini göstermektedir. Burada farklı sonuçların elde edildiği görülmektedir. Bunun temel nedeni ise taşıma parametresinin dikkate alınmasıdır. Yine DAB-2 ile GDİAB-2 karşılaştırılacak

olursa KIP değerlerinin sırasıyla 314-312 kg CO₂ olduğu açıkça görülmektedir. Bu da taşıma parametresinin KIP değerleri üzerinde de etkili olduğunu göstermektedir. Yine yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir (Xiao *et al.*, 2018).

DAB ve GDİAB'lar için farklı senaryolara göre elde edilen atık üretimi ve abiyotik tükenme sonuçları Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 4. Farklı senaryolara göre AÜ ve AT sonuçları.

Şekil 4.a farklı senaryolara göre AÜ değerlerini göstermektedir. Burada DAB ve GDİAB'ler arasında büyük bir farkın olduğu açıkça görülmektedir. Bunun temel nedeni bu çalışmada agrega olarak iri agregaların GDBA, ince agreganın DBA olarak kullanılmasıdır. Örneğin DAB-4 ile GDİAB-4 incelenecek olursa AÜ değerlerinin sırasıyla 2448-1121 kg olduğu görülmektedir. Bu da AÜ değerlerinde yaklaşık %54.2'lik bir azalma olduğunu

göstermektedir. Artan beton üretimi ve agrega tüketimi düşünüldüğünde çevre kirliliğinin azaltılması, atıkların ortadan kaldırılması ve bu atıkların yönetilmesi gibi konular çok daha önemli hale gelmektedir. Özellikle Elazığ-Sivrice depremi buna güzel bir örnek olarak gösterilebilir. Şekil 4.b farklı senaryolara göre AT değerlerini göstermektedir. Burada DAB ve GDİAB'ler arasında yine büyük bir farkın olduğu görülmektedir. Örneğin

DAB-6 ile GDİAB-6 incelenecek olursa AT değerlerinin sırasıyla 1834-544 kg olduğu görülmektedir. Doğal agrega tüketiminin giderek artması ve Elazığ-Sivrice depreminden ortaya çıkan milyonlarca ton İYA'nın ortadan kaldırılması, atık malzeme kullanımının önemini artırmıştır. Bu nedenle, ortaya çıkan GDBA'ların değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Yine araştırmalar, GDBA kullanımının olumlu sonuçları olduğunu göstermiştir (Nuaklong *et al.*, 2016; Ossa *et al.*, 2016).

4. Sonuçlar

Betonun karışım tasarımları yapılırken sadece mekanik özellikler değil aynı zamanda çevresel etkiler de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu çalışmanın temel amacı üretilen farklı betonların çevresel açıdan bir karşılaştırmasını yapmaktır. Çalışmaya ait sonuç ve öneriler aşağıda yer almaktadır:

1. Taşıma parametresi, enerji tüketimi ve küresel ısınma potansiyel değerleri üzerinde etkili parametre olmuştur. Bu nedenle, geri dönüşüm tesisi ile taş ocağı arasındaki mesafe kritik olup, geri dönüştürülmüş agregalı betonun uygunluğu incelenirken taşıma mesafeleri dikkate alınmalıdır.
2. Çalışmada deprem sonrası oluşan atıkları bertaraf etmek ve minimum çevre kirliliğini sağlamak için geri dönüştürülmüş beton agregaları kullanılmıştır. Elazığ-Sivrice depremi sonrası binlerce binanın yeniden inşası ve beton hacminin %70-75'inin agregalardan oluştuğu düşünüldüğünde, bu agregaların kullanılmasının önemli ekonomik, sosyal ve çevresel katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.
3. Çalışmada geri dönüşümlü iri agregaların kullanımı AT ve AÜ değerlerinde çok büyük azalmalara neden olmuştur. Doğal kaynak tüketiminin artması ve beton tüketiminin giderek yaygınlaşması geri dönüşümlü beton agregalarının kullanımını daha da önemli hale getirmektedir.
4. Deprem riskinin yüksek olduğu yerleşim bölgelerinde olası yıkıcı depremler oluşmadan önce inşaat ve yıkım atıkları için atık yönetim sistemi oluşturulmalıdır. Böylece önemli teknik, çevresel ve ekonomik kazanımlar elde edilebilir.

Teşekkür

Bu çalışma, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından "MF.21.52" kodlu proje ile desteklenmiştir.

5. Kaynaklar

- Borghi, G., Pantini, S., Rigamonti, L., 2018. Life cycle assessment of non-hazardous Construction and Demolition Waste (CDW) management in Lombardy Region (Italy). *J. Clean. Prod.* **184**, 815–825.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.287>
- Colangelo, F., Petrillo, A., Cioffi, R., Borrelli, C., Forcina, A., 2018. Life cycle assessment of recycled concretes: A case study in southern Italy. *Sci. Total Environ.* **615**, 1506–1517.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.107>
- Demir, T., Ulucan, M., Alyamac, K.E., 2022. Determination of Early Age Strength of High Strength Concretes Using RSM Method. *Fırat Univ. J. Eng. Sci.* **34**, 105–114.
<https://doi.org/10.35234/fumbd.972829>
- EN ISO 14040, 2006. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework.
- EN ISO 14044, 2006. Environmental management: life cycle assessment; Principles and Framework. ISO.
- Fraj, A. Ben, Idir, R., 2017. Concrete based on recycled aggregates—Recycling and environmental analysis: A case study of paris' region. *Constr. Build. Mater.* **157**, 952–964.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.059>
- González-Quintero, R., Bolívar-Vergara, D.M., Chirinda, N., Arango, J., Pantevez, H., Barahona-Rosales, R., Sánchez-Pinzón, M.S., 2021. Environmental impact of primary beef production chain in Colombia: Carbon footprint, non-renewable energy and land use using Life Cycle Assessment. *Sci. Total Environ.* **773**, 145573.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145573>

- Guo, Z., Tu, A., Chen, C., Lehman, D.E., 2018. Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of concrete building blocks incorporating recycled concrete aggregates. *J. Clean. Prod.* **199**, 136–149. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.069>
- Gutiérrez, A., 2004. Influence of recycled aggregate quality on concrete properties, in: *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures*. RILEM Publications SARL, pp. 545–553.
- Huuhka, S., Kolkwitz, M., 2021. Stocks and flows of buildings: Analysis of existing, demolished, and constructed buildings in Tampere, Finland, (2000–2018). *J. Ind. Ecol.*
- Jain, S., Singhal, S., Pandey, S., 2020. Environmental life cycle assessment of construction and demolition waste recycling: A case of urban India. *Resour. Conserv. Recycl.* **155**, 104642. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104642>
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., Van Woerden, F., 2018. *What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank Publications. <https://doi.org/https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>
- Kisku, N., Joshi, H., Ansari, M., Panda, S.K., Nayak, S., Dutta, S.C., 2017. A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. *Constr. Build. Mater.* **131**, 721–740. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.029>
- Majhi, R.K., Nayak, A.N., Mukharjee, B.B., 2018. Development of sustainable concrete using recycled coarse aggregate and ground granulated blast furnace slag. *Constr. Build. Mater.* **159**, 417–430. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.118>
- Marinković, S., Radonjanin, V., Malešev, M., Ignjatović, I., 2010. Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. *Waste Manag.* **30**, 2255–2264. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.012>
- Medina, C., Zhu, W., Howind, T., de Rojas, M.I.S., Frías, M., 2014. Influence of mixed recycled aggregate on the physical–mechanical properties of recycled concrete. *J. Clean. Prod.* **68**, 216–225. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.002>
- Meglin, R., Kytzia, S., Habert, G., 2021. Regional circular economy of building materials: Environmental and economic assessment combining Material Flow Analysis, Input-Output Analyses, and Life Cycle Assessment. *J. Ind. Ecol.* <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jiec.13205>
- Nuaklong, P., Sata, V., Chindaprasirt, P., 2016. Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties. *J. Clean. Prod.* **112**, 2300–2307. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.109>
- Oberle, B., Bringezu, S., Hatfield-Dodds, S., Hellweg, S., Schandl, H., Clement, J., 2019. *Global resources outlook: 2019*. International Resource Panel, United Nations Envio. <https://doi.org/https://doi.org/10.1787/9789264307452-en>
- OECD., 2020. *Environment at a Glance 2020*. OECD Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1787/19964064>
- Ossa, A., García, J.L., Botero, E., 2016. Use of recycled construction and demolition waste (CDW) aggregates: A sustainable alternative for the pavement construction industry. *J. Clean. Prod.* **135**, 379–386. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.088>

- Peña, L.V.D.L., Taelman, S.E., Prétat, N., Boone, L., Van der Biest, K., Custódio, M., Lucas, S.H., Everaert, G., Dewulf, J., 2022. Towards a comprehensive sustainability methodology to assess anthropogenic impacts on ecosystems: Review of the integration of Life Cycle Assessment, Environmental Risk Assessment and Ecosystem Services Assessment. *Sci. Total Environ.* **808**, 152125. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152125>
- Pomponi, F., Moncaster, A., 2017. Circular economy for the built environment: A research framework. *J. Clean. Prod.* **143**, 710–718. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.055>
- Poon, C.S., Lam, C.S., 2008. The effect of aggregate-to-cement ratio and types of aggregates on the properties of pre-cast concrete blocks. *Cem. Concr. Compos.* **30**, 283–289. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.10.005>
- Proske, T., Hainer, S., Rezvani, M., Graubner, C.-A., 2014. Eco-friendly concretes with reduced water and cement content—Mix design principles and application in practice. *Constr. Build. Mater.* **67**, 413–421. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.066>
- Ram, V.G., Kishore, K.C., Kalidindi, S.N., 2020. Environmental benefits of construction and demolition debris recycling: Evidence from an Indian case study using life cycle assessment. *J. Clean. Prod.* **255**, 120258. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120258>
- Ulas, M.A., Alyamac, K.E., Ulucan, Z.C., 2019. Influence of Aggregate Gradation on the Workability, Mechanical Properties and Cost of Steel Fiber-Reinforced Concrete. *Adv. Civ. Eng. Mater.* **8**, 209–223. <https://doi.org/10.1520/ACEM20190009>
- Ulucan, M., Alyamac, K.E., 2022. A holistic assessment of the use of emerging recycled concrete aggregates after a destructive earthquake: Mechanical, economic and environmental. *Waste Manag.* **146**, 53–65. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.04.045>
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., Weidema, B., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *Int. J. Life Cycle Assess.* **21**, 1218–1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>
- Wijayasundara, M., Mendis, P., Crawford, R.H., 2018. Integrated assessment of the use of recycled concrete aggregate replacing natural aggregate in structural concrete. *J. Clean. Prod.* **174**, 591–604. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.301>
- Xiao, J., Ma, Z., Ding, T., 2016. Reclamation chain of waste concrete: A case study of Shanghai. *Waste Manag.* **48**, 334–343. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.09.018>
- Xiao, J., Wang, C., Ding, T., Akbarnezhad, A., 2018. A recycled aggregate concrete high-rise building: Structural performance and embodied carbon footprint. *J. Clean. Prod.* **199**, 868–881. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.210>

AKÜ FEMÜBİD 23(2023) 025602 (448-458)

AKU J. Sci. Eng. 23(2023) 025602 (448-458)

DOI: 10.35414/akufemubid.1146658

Araştırma Makalesi / Research Article

Tuzlu Su Etkisindeki Geomembranların Ara Yüzey Kayma Davranışlarının İncelenmesi

İnci Develioğlu¹, Hasan Fırat Pulat^{2*}^{1,2} İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir.Sorumlu yazar e-posta*: hfirat.pulat@ikcu.edu.tr.
e-posta: inci.develioğlu@ikcu.edu.tr.ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8298-7106>
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-6594-8095>

Geliş Tarihi: 21.07.2022

Kabul Tarihi: 02.03.2023

Öz

Yapı temellerinin tasarımında, kayma tahkikinin önemi birçok yönetmelik ve akademik çalışmada vurgulanmıştır. Hesaplamalar sırasında zemin özellikleri ve uygulama koşulları dikkate alınırken yalıtım amacıyla kullanılan ve etkili bir ara yüzey elemanı olan geomembranların kayma davranışları göz ardı edildiği taktirde ve geomembran ile yapı elemanı arasındaki kayma mukavemetinin tasarımda kullanılan kayma direncinden daha düşük olması durumunda önemli problemlerle karşılaşılabilir. Olası can ve mal kayıplarının önüne geçebilmek için sistemde var olan tüm ara yüzeylerin dikkatle irdelenmesi gerekir. Bu çalışmada, iki farklı geomembran ile İzmir, Karşıyaka, Mavişehir sahil şeridinden alınan deniz suyu etkisindeki killi zeminin ara yüzey kayma davranışı incelenmiştir. Polivinil klorür (PVC) geomembranın kalınlıkları 1.5 ve 3.0 mm ve TPO geomembranın kalınlığı 1.5 mm dir. Ara yüzey kayma dayanımı parametreleri orta ölçekli direk kesme deneyleri ile belirlenmiştir. Direk kesme deneyleri 0.5 molar (0.5M) tuzlu suda 4, 8 ve 16 ay kür edilmiş ve kür edilmemiş geomembranlar ile gerçekleştirilmiştir. Zemin – TPO ara yüzeyi en büyük kayma dayanımı ve sürtünme açısına sahipken en düşük kayma dayanımı ve sürtünme açısının – PVC/1.5 ara yüzeyine aittir. Tuzlu suda kür edildikten sonra ara yüzey sürtünme açısı en fazla azalan geomembran 1.5 mm PVC iken en az azalan geomembran 3.0 mm PVC olmuştur.

Anahtar kelimeler

Geomembran;
Ara yüzey kayma dayanımı; Tuzlu su;
Orta ölçekli direk kesme deneyi

Investigation of the Interface Shear Behavior of Geomembranes Under the Influence of Salt Water

Abstract

In the design of construction foundations, the importance of shear verification has been emphasized in many codes and academic studies. Considering the soil properties and application conditions during the calculations, if the shear behavior of geomembranes, which is an effective interface element and used for insulation, is ignored, and if the shear strength between the geomembrane and the structural element is lower than the shear resistance used in the design, significant problems may be encountered. In order to prevent possible loss of life and property, all interfaces in the system should be carefully examined. In this study, the interface shear behavior between two different geomembranes and the clayey soil taken from the coastal part of İzmir province, Karsiyaka district, Mavişehir was investigated. Geomembrane types are polyvinyl chloride (PVC) and thermoplastic polyolefin (TPO). The thickness of the TPO geomembrane is 1.5 mm, while the thickness of the PVC geomembrane is 1.5 and 3.0 mm. Interface shear strength parameters were determined by medium-scale direct shear tests. Direct shear tests were carried out with uncured geomembranes and cured in 0.5 molar saltwater for 4, 8, and 16 months. While the soil – TPO interface has the highest shear strength and friction angle, the soil – PVC/1.5 interface has the lowest shear strength and friction angle. The same situation was obtained for geomembranes cured in saltwater. After curing in salt water, the geomembrane whose interface friction angle decreased the most was 1.5 mm PVC, while the least decreased geomembrane was 3.0 mm PVC.

Keywords

Geomembrane;
Interface shear strength; Saltwater;
Medium scale direct shear test

1. Giriş

Geomembranlar (GM'ler), çeşitli sıvı ve gazların akışını en aza indirmede oldukça etkili olduklarından, depolama alanlarında ve diğer geoteknik yapılarda sızdırmazlık bariyeri olarak yaygın olarak kullanılmaktadır (Chai vd. 2005, McCartney ve Zornberg 2009, Abdelaal vd. 2014). GM ve zeminin farklı özellikleri nedeniyle, GM – zemin ara yüzeyindeki gerilmeler ve deformasyonlar oldukça karmaşıktır ve ara yüzey, yenilmenin meydana geldiği yerde zayıf bir düzlem haline gelebilir (Mitchell vd. 1990, Koerner ve Soong 2000, Feng vd. 2007, Qian vd. 2011, Bonnour vd. 2015, Sabiri vd. 2020, Chen vd. 2021).

İnşaat projelerinde temel tasarımı yapılırken yapı temelinin üzerine oturduğu zeminin kayma dayanımı parametreleri girdi olarak kullanılmaktadır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde (2018) yüzeysel temeller ve dayanma yapıları için kayma tahkiki hesaplamasında zemin-temel ara yüzeyi için $\tan\delta$ katsayısının kullanılması gerektiğini belirtilmiştir. Bu değer farklı beton türleri için 0.4 ile 0.6 arasında değişmektedir. Ancak önceki yıllarda yapılan çalışmalar göstermiştir ki bazı durumlarda sızdırmazlık amacıyla kullanılan geomembran (GM) ile zemin arasında oluşan ara yüzeyin $\tan\delta$ değeri zemin-temel ya da zemin-zemin ara yüzeylerinkinden oldukça düşüktür. Bu gibi durumlarda zeminin kayma dayanımı parametrelerinin kullanılması projeyi oldukça riskli hale getirmektedir. Ayrıca GM'ler uzun yıllar boyunca farklı kimyasal özelliklerdeki yer altı sularına, farklı sıcaklıklara ve yüksek normal gerilmelere maruz kalmaktadır.

GM – zemin ara yüzey kayma dayanımı üzerine çalışmalar 1980'li yılların başlarında yapılmıştır. Ancak bu çalışmalar akademik düzeyde kalmış ve projelerde ara yüzey kayma dayanımı bir parametre olarak kullanılmamıştır. Ancak 1988 yılında ABD'nin California eyaletinde bulunan Kettleman Hills atık depolama tesisinde meydana gelen göçme nedeniyle birçok araştırmacı GM – zemin ara yüzey davranışı üzerinde çalışmalar yapmaya başlamıştır (Seed vd. 1988, Mitchell vd. 1990, Seed vd. 1990, Byrne vd. 1992). Ancak çalışmaların sınırlı kalması,

yönetmelik ve standartlarda bu konu ile ilgili net bir bilgi olmaması nedeniyle günümüzde hala mühendisler, ders kitaplarında (Bowles 1997, Das 2007) önerildiği gibi ara yüzey sürtünme açısını elde ederken genellikle içsel sürtünme açısını ($1/2$ veya $2/3$) azaltır. Bazı araştırmacılar, çalışmalarında bu katsayıların $2/3$ 'ten küçük, hatta $1/2$ 'den küçük olabileceğini belirlemişlerdir, bu nedenle farklı zeminler ve farklı geomembranlar arasındaki ara yüzey davranışının ayrıntılı olarak incelenmesi gerekmektedir (Rinne 1989, O'Rourke ve Druschel 1990, Effendi 2011, Punetha vd. 2017). Literatürde geçirgenlik, delinme ve yırtılma ile ilgili birçok çalışma olmasına rağmen, mekanik özellikleri yanal gerilmelerin etkisi altında inceleyen çalışmalar oldukça sınırlıdır. Ayrıca GM'lerin tuzlu su ya da çeşitli kimyasallar içerisinde belirli süre kür edildikten sonra ara yüzey direk kesme deneylerine maruz tutulması ile ilgili çalışmalara rastlanılmamıştır.

Literatürde sadece zemin türünü ya da sadece geomembran türünün ara yüzey kayma davranışı üzerindeki etkisini inceleyen bazı çalışmalar bulunmaktadır. Chai ve Saito (2016) büyük ölçekli direk kesme cihazı ile GM – kil ara yüzeyi kayma mukavemeti davranışını belirlemişlerdir. Bentonit tozu ve kuvars (%30) killi zemin (%70) ile karıştırılmıştır. Çalışmada kullanılan GM türleri polivinil klorür (PVC), polietilen (PE) ve yüksek yoğunluklu polietilendir (HDPE). Direk kesme deneyleri 50, 80 ve 100 kPa normal gerilmeler altında gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları PVC – killi zemin ara yüzeyinin maksimum adezyon değerine sahip olduğunu göstermiştir. Bentonit ve diğer tüm GM'ler arasındaki ara yüzey sürtünme açısı oldukça düşüktür (3° - 4°). Bentonitten çıkan su, direk kesme deneyi sırasında ara yüzeyde biriktiğinden, GM ile bentonit partikülleri arasında bir su tabakası oluşur ve bu nedenle ara yüzey sürtünme açısı olması gerekenden daha düşük elde edilir. Ayrıca zeminin kayma dayanımı, ara yüzey kayma dayanımından yaklaşık %55 daha büyük elde edilmiştir. Efendi (2011) farklı türdeki GM'ler (pürüzsüz HDPE, çok pürüzsüz VLDPE, PVC) ile Ottawa kumunun ara yüzey kayma mukavemeti davranışlarını incelemiştir. GM kalınlıkları sırasıyla 2.03, 1.52 ve

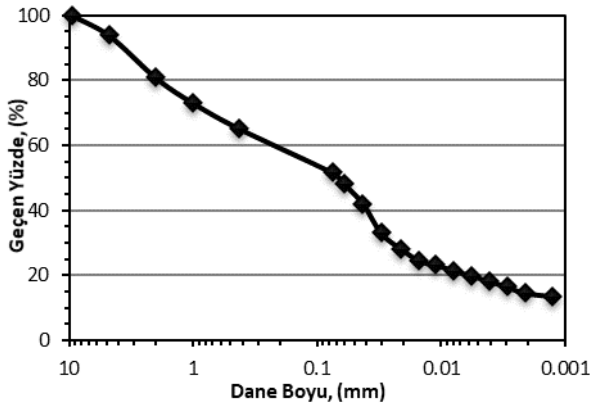
1.52 mm dir. Ara yüzey kayma dayanımı parametreleri halka kayma testi ile 50 kPa ile 200 kPa arasında değişen normal gerilme değerleri altında belirlenmiştir. Elde edilen sonuçların arasında değerlendirme yapmak amacıyla üretkenlik oranı $[E] (\tan\delta/\tan\phi)$ türetilmiştir. Çok sert ve pürüzsüz bir yüzeye sahip olan HDPE, %34 ile 45 arasında değişen değerlerle en düşük E değerlerine sahip olmuştur. Nispeten daha yumuşak yüzeyli VLDPE ile yapılan testlerde, Ottawa kumunun %44 ila 59'u arasında daha yüksek bir oran mobilize edilmiştir. PVC için E, 50 kPa ila 223 kPa arasındaki normal gerilmede Ottawa kumunun %70 ila 97'si arasında değişmiştir. Sonuç olarak, pürüzsüz GM'lerin ara yüzey kayma dayanımlarının normal gerilme seviyelerine bağlı olduğu tespit edilmiştir. Abdelaal vd. (2014) katı atık depolama sahası sızıntı sıvısının oksidasyon indüksiyon süresi (OIT) ve geomembranın fiziksel özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sızıntı sıvısı, kentsel katı atık depolama tesisi sızıntı sıvısını temsil edecek şekilde laboratuvarında çeşitli kimyasalların karıştırılmasıyla elde edilmiştir. Toplamda 5 adet sızıntı sıvısı hazırlanmıştır (L1, L2, L3, L4, L5). L1 bir katı atık depolama tesisinin sızıntı suyunu tam olarak temsil etmektedir. Diğerlerinin ise kimyasal miktarları azaltılmıştır. L1 e L3 içerisinde tuz bulunurken diğerlerinde bulunmamaktadır. Geomembranlar farklı sıcaklıklarda (22, 40, 55, 70, 85 °C) yaklaşık 108 ay boyunca bu sızıntı sıvılarının içerisinde tutulmuştur. Kür periyodunu tamamlayan numunelere ergime indeksi, gerilme-çatlak direnci ve OIT testleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda, GM'nin mekanik özelliklere en fazla zarar veren sıvıların L1 ve L3 olduğu en fazla zarar verenin ise L1 olduğu belirlenmiştir. Burada tuz içeriğinin büyük bir etki yarattığı görülmektedir. L1 sıvısında kür edilen numunelerde, 4. ayın sonunda OIT değerinde 85 °C'de %98, 55 °C'de %40 azalma görülmüştür. 55 °C'de ergime indeksinde 25 ay sonra neredeyse 0.8'e (1.0'den) ulaşan bir düşüş olmuş ve ardından değerler 75 aylık inkübasyondan sonra zamanla ilk değerlere yükselmiştir. Diğer sıcaklıklarda da benzer eğilimler elde edilirken, 55 °C'de 80 ay, 70 °C'de 40 ay ve 85 °C'de 12 ay sonunda gerilme-çatlak direncinde keskin bir düşüş gözlenmiştir.

Bu çalışmada, orta ölçekli direk kesme cihazı kullanılarak zemin ile GM arasındaki ara yüzey sürtünme açısı belirlenmiştir. GM olarak PVC ve TPO kullanılmıştır. PVC ve TPO genellikle bina temellerinde bohçalama amacıyla kullanıldığından zemin türü olarak yerleşimin çok yoğun olduğu İzmir ili, Karşıyaka ilçesi, Mavişehir mahallesinden alınan killi zemin kullanılmıştır. Ayrıca zeminin temin edildiği bölge kıyı şeridine yakın olduğu için deniz suyu yer altı suyuna infiltre olabilmekte ve yer altı suyundaki tuz miktarı artabilmektedir. Uzun süreler bu tuza maruz kalan GM'lerin mekanik ve kimyasal özellikleri bozulabilmektedir. Bu durumu temsil etmesi amacıyla 0.5M tuzlu su hazırlanmış ve GM'ler bu tuzlu suda 4, 8 ve 16 ay boyunca kür edilmiştir. Öncelikle zeminin geoteknik indeks parametreleri ve içsel sürtünme açısı (ϕ) belirlenmiştir. Daha sonra, kür edilmemiş ve kür edilmiş GM'ler ile zeminler arasında oluşan ara yüzeylerin sürtünme açıları (δ) belirlenmiştir. Bu çalışma ile birlikte farklı kalınlıktaki ve türdeki GM'ler ile yerleşim yerlerinde sıkça rastlanılan bir zemin türünün arasındaki ara yüzey kayma davranışı belirlenmiştir. Ayrıca literatürde daha önce hiç çalışılmamış ve bu konuda açık bulunan, tuzlu su içerisinde kür edilmiş GM'ler ile direk kesme deneyleri gerçekleştirilmiş ve bu belirsizlik giderilmeye çalışılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Zemin

Çalışmada, İzmir ili, Karşıyaka ilçesi, Mavişehir mahallesinden elde edilen düşük plastisiteli kil (CL) zemin kullanılmıştır ve makalede yerel zemin (YZ) olarak adlandırılmıştır. Bu zeminin tercih edilme nedeni PVC ve TPO GM'lerin genellikle yapıların temellerinde bohçalama amacıyla kullanılmasıdır. Kuru ve ıslak elek analizi deneylerinden elde edilen dane dağılım grafiği Şekil 1'de gösterilmiştir (ASTM D6913).



Şekil 1. Yerel zemin dane dağılım grafiği

Çeşitli laboratuvar deneylerinden ve USCS sınıflandırma sisteminden elde edilen zeminin geoteknik indeks özellikleri ise Tablo 1'de listelenmiştir (ASTM D854, ASTM D4318, ASTM D698, ASTM D422, ASTM D2487).

Tablo 1. Yerel zemin geoteknik indeks özellikleri

Parametre	Yerel Zemin (YZ)
Özgül ağırlık, G_s	2.6
Likit limit, LL (%)	30.7
Plastik limit, PL (%)	21.2
Maks. kuru birim hacim ağırlık, $\gamma_{dry,max}$ (kN/m ³)	18.9
Optimum su içeriği, w_{opt} (%)	11.3
USCS class	CL

2.2. Geomembranlar

Bu çalışmada 1.5 mm kalınlığında PVC ve TPO, 3.0 mm kalınlığında PVC GM kullanılmıştır. Her iki GM türü de aynı amaçla (temel tabanında bohçalama ve çatılarda yalıtım) kullanılmaktadır. Ancak PVC Türkiye'de daha çok kullanılmakta ve talep fazla olduğu için daha çok üretilmektedir. TPO'nun üretim maliyeti PVC'ye göre daha düşüktür ve üretimi sırasında çevreye zararı PVC'ye göre oldukça düşüktür. Buna rağmen dünya ile kıyaslandığında Türkiye'de kullanımı oldukça sınırlıdır ve talep az olduğu için daha yüksek ücretlere satılmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada PVC ile TPO'nun kıyaslanması amaçlanmıştır. PVC GM, sentetik hammaddelerden yapılmış, sıvı ve ısı yalıtımı için kullanılan koruyucu bir tabakadır. Petrokimya tesislerinde yağ ve tuzdan üretilen bir polimer türüdür. PVC hammaddesinin yumuşatıcılar, stabilizatörler (güçlendiriciler) ve çeşitli katkı maddeleri ile bir mikserde karıştırılması,

uygun sıcaklıkta bir ekstrüzyon sistemi yardımıyla işlenmesi ve homojen bir şekilde şekillendirilmesi ile üretilirler. Çalışmada kullanılan 1.5 ve 3.0 mm PVC'nin temel özellikleri Tablo 2'de listelenmiştir.

Tablo 2. PVC geomembran temel özellikleri

Temel özellikler	Birim	1.5 mm PVC	3.0 mm PVC
Yırtılma direnci	N	150	250
Ek yeri dayanımı	N/5cm	800	1000
Çekme direnci	N/mm ²	15	15
Kopma uzaması	%	250	250
Su geçirmezlik	-	Tam	Tam
Yaşlandırma sonrası su geçirmezlik	-	Tam	Tam
Kimyasallara dayanım sonrası su geçirmezlik	-	Tam	Tam
Yangına tepki	-	Sınıf E	Sınıf E
Darbeye karşı direnç	mm	700	1500
Statik yüklere karşı direnç	kg	20	20

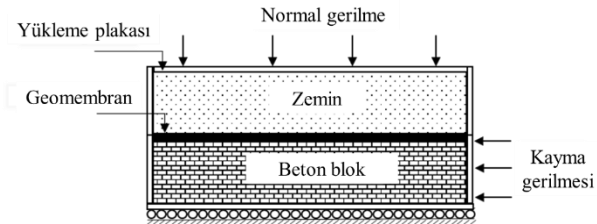
Termoplastik Polyolefin (TPO) atmosfer koşullarına ve UV ışınlarına dayanıklı zamanla yaşlanma veya sertleşme yapmayan temel bohçalama, yeşil çatı, metal çatı ve ters çatı yalıtımında kullanılan cam tülü keçe takviyeli sentetik su yalıtım örtüsüdür. Literatürde FPO (esnek Polyolefin) adıyla da anılmaktadır. İçeriğinde PVC veya plastifiyan içermediğinden çevreye zararlı madde yaymaz bu nedenle PVC GM'ye göre oldukça çevre dostu bir üründür. Çalışmada kullanılan 1.5 mm TPO'nun temel özellikleri Tablo 3'te listelenmiştir.

Tablo 3. TPO geomembran temel özellikleri

Temel özellikler	Birim	Değer
Kalınlık	mm	1.5
Yırtılma direnci	N	350
Ek yeri dayanımı	N/5 cm	300
Çekme direnci	N/mm ²	20
Kopma uzaması	%	15
Su geçirmezlik	-	Tam
UV radyasyon, yüksek sıcaklık ve su ile uzun süreli yaşlandırma	-	Sınıf 0
Yangına tepki	-	Sınıf E
Darbeye karşı direnç	mm	450
Statik yüklere karşı direnç	kg	20

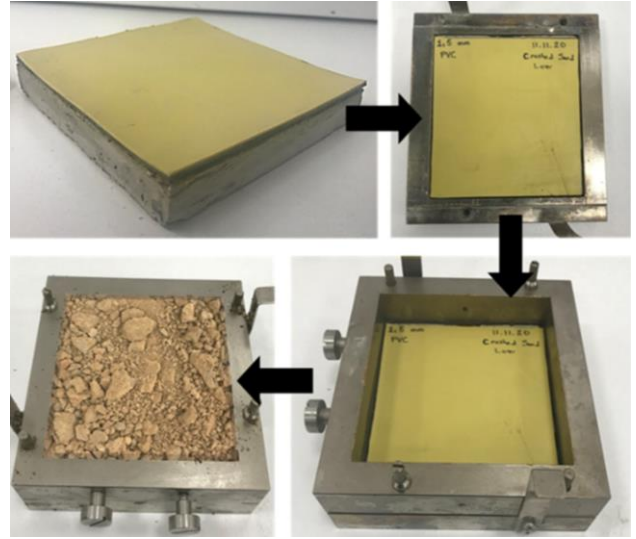
2.3. Orta ölçekli direk kesme deneyleri

Laboratuvar deneylerinin ilk aşamasında, zeminin içsel sürtünme açısı, ASTM D3080'e göre geleneksel direk kesme deneyi ile 100 x 100 mm boyutlarında direk kesme kutusu kullanılarak belirlenmiştir. Literatürde bu boyutlara sahip cihazlara orta ölçekli direk kesme cihazı adı verilmiştir (Dadkhah vd. 2010, Sobol vd. 2015, Mohapatra vd. 2016, Zahran ve Naggar 2020). Zemin – GM ara yüzeylerinin ara yüzey sürtünme açıları (δ) ise yine orta ölçekli direk kesme cihazı kullanılarak ASTM D5321'e göre elde edilmiştir. Ara yüzey direk kesme deneylerinin şematik gösterimi Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Zemin – GM ara yüzey direk kesme deneyi kurulumu

Ara yüzey direk kesme deneylerinde her bir numune için ayrı ayrı direk kesme kutusunun alt kısmının birebir boyutlarına sahip beton bloklar üretilmiş ve bu beton blok alt kutuya yerleştirilmiştir. Alt kısımda rijit bir blok kullanılmadığı takdirde normal kuvvet etkisi ile alt kısımda oturma meydana gelir ve bu nedenle GM ara yüzeyde sabit kalmaz. GM'nin deney boyunca ara yüzeyde sabit kalmasının tek yolu alt kısımda uygulanan normal kuvvet ile oturma yapmayacak bir malzeme kullanılmasıdır. Ayrıca her bir deney için beton bloğun döküm aşamasında kalıbın alt yüzeyine GM yerleştirilmiş ve beton GM'nin üstüne dökülmüştür. Böylece GM'lerin kalınlıkları farklı da olsa tüm deneylerde GM'ler tam ara yüzeyde yer almıştır. Alt kutuya yerleştirilen beton ve GM'den sonra üst kutuya ise zemin yerleştirilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Ara yüzey direk kesme deneyleri numune hazırlama aşamaları

Optimum su içeriğinde hazırlanan numuneler maksimum kuru birim hacim ağırlık sıklığında direk kesme kutusuna yerleştirilmiştir. Deney sırasında numunelerin %100 doymun olması amaçlanmıştır bu nedenle deneyden önce numuneler yaklaşık iki saat su içerisinde bekletilmiştir. Deney sonrasında numunelerin su içerikleri belirlenmiş ve su içeriklerinde %1 ile %4 aralığında bir azalma olduğu görülmüştür.

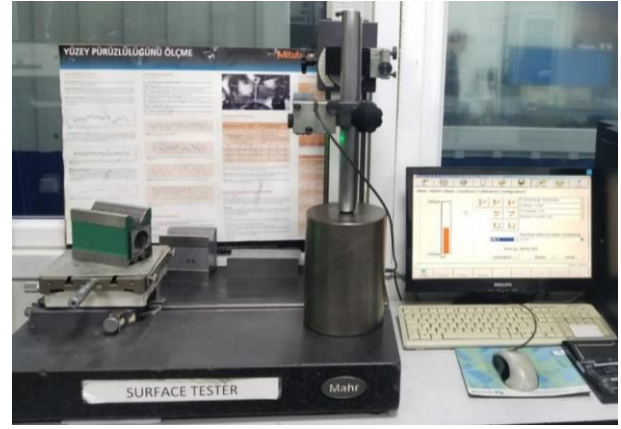
Direk kesme deneylerinin I. aşamasında, tuzlu suya maruz kalmamış GM'ler ve boşluk sıvısı olarak musluk suyu kullanılmıştır. Deneylerin II. aşamasında, GM'ler 4 ay boyunca 0.5M tuzlu suda tutulmuş ve daha sonra direk kesme deneylerinde bu GM'ler kullanılmıştır. Deneylerin III. ve IV. aşamasında ise direk kesme deneyleri bu kez 8 ve 16 ay 0.5M tuzlu suda beklemiş GM'ler ile gerçekleştirilmiştir. Orta ölçekli direk kesme deneyleri, 49, 98 ve 196 kPa'lık normal gerilme değerleri altında gerçekleştirilmiştir. Deneyler, kullanılan zeminin geçirgenliğinin düşük olması nedeniyle, aşırı boşluk suyu basınçlarının oluşmasını engellemek amacıyla 0.1 mm/dk'lık bir kesme hızıyla gerçekleştirilmiştir (Chai ve Saito 2016, Zhou vd 2020, Shi vd 2020). Oluşturulan ara yüzeyler ve gerçekleştirilen direk kesme deneyleri Tablo 4'te özetlenmiştir.

Tablo 4. Ara yüzeyler ve direk kesme deneyleri

Zemin türü	GM türü	GM kalınlığı	Kür süresi
CL	PVC	1.5 mm	0, 4, 8, 16
		3.0 mm	0, 4, 8, 16
	TPO	1.5 mm	0, 4, 8, 16

2.4. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri

Yüzey pürüzlülüğü ilk olarak, Koerner vd. (1986) tarafından imalat kalite kontrolü ve inşaat kalite güvencesi için dokusal bir indeks veya dokusal bir tanımlayıcı olarak belirtilmiştir. Bununla birlikte, günümüzde yüksek hassasiyetli ölçüm teknikleri, GM'lerin yüzey pürüzlülük ölçümlerinin sadece GM'ler için kalite tanımlayıcıları olmadığını, aynı zamanda çeşitli zemin – GM ara yüzey mekanizmalarıyla ilişkili olabileceğini kanıtlamıştır. GM yüzey pürüzlülüğünü ölçmek için kullanılan Optik Profilometre yöntemi (OPM), Gokhale ve Underwood'un (1990) teorik gelişmelerine ve Gokhale ve Drury'nin (1990) deneysel çalışmalarına dayanmaktadır. Numunelerin yüzey pürüzlülüğü, GM yüzeyinde tuzlu suyun ve kayma sırasında zeminin neden olduğu hasarı belirlemek için direk kesme testleri sonrasında bir Optik Profilometre (OPM) cihazı ile ölçülmüştür. Optik profilometre hızlı, tahribatsız ve temassız bir yüzey pürüzlülük ölçüm tekniğidir. Optik profilometre, bir lambadan gelen ışığın bir ışın ayırıcı tarafından iki yola ayrıldığı bir mikroskop türüdür. Bir yol, ışığı test edilen yüzeye, diğer yol ise ışığı bir referans aynasına yönlendirir. OPM analizi TOTOMAK Anonim Şirketinde Mahr marka profilometre cihazı ile yapılmıştır (Şekil 3). GM'nin tam orta kısmında 4 cm²'lik bir alandan hem kesme yönünde hem de kesme yönüne dik olarak ölçümler yapılmıştır. İki ölçümün ortalaması alınarak R_{maks} değeri hesaplanmıştır.

**Şekil 4.** Optik profilometre cihazı

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Geleneksel direk kesme deneyi bulguları

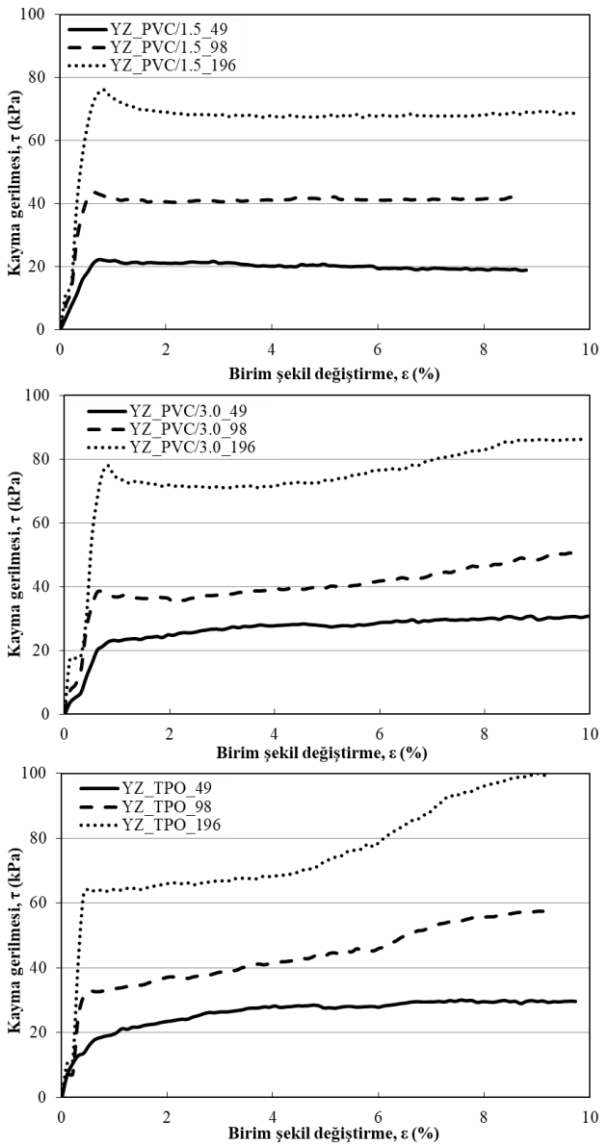
YZ'nin kayma dayanımı parametrelerini belirlemek amacıyla, maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriğinde hazırlanan numune ile üç normal gerilme (49, 98, 196 kPa) altında geleneksel direk kesme deneyi (zemin – zemin ara yüzeyi) gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda, YZ'nin başlangıç boşluk oranı (e_0) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) sırasıyla **0.416 ve 34.9°** elde edilmiştir.

3.2. Kür edilmemiş numunelerin ara yüzey direk kesme deneyi bulguları

GM türü ve kalınlığının zemin – GM ara yüzey kayma davranışı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla ara yüzey direk kesme deneyleri yapılmıştır. Deneylerin tutarlılığının kontrolü için her bir numuneden iki adet deney yapılmıştır, iki deney sonucunda tutarsızlık gözlemlendiği takdirde ek deneyler yapılmış ve sonuçlar bu şekilde elde edilmiştir.. YZ – PVC/1.5, YZ – PVC/3.0 ve YZ – TPO ara yüzeylerinin kayma gerilmesi – birim şekil değiştirme grafikleri Şekil 4'te gösterilmiştir.

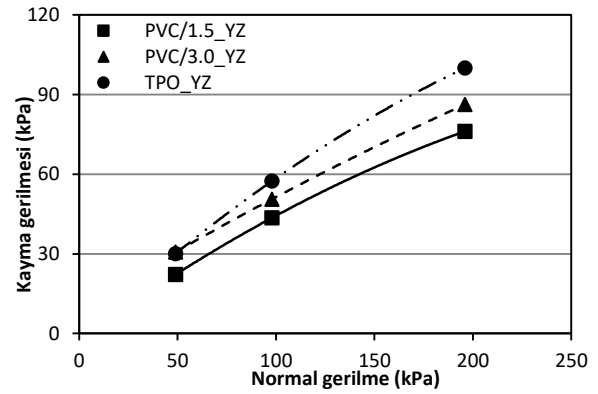
Şekil 4 incelendiğinde, PVC'ler arasında kalın olanın kayma dayanımının daha yüksek olduğu görülmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda da aynı türde farklı kalınlıklardaki GM'lerde kalın olanın daha yüksek kayma mukavemetine sahip olduğu belirlenmiştir (Hsieh ve Hsieh 2003, Ari ve Akbulut 2022, Araujo vd. 2022). Bunun nedeni zemin danelerinin kalın GM yüzeyine daha rahat

gömülmesi ve belirli bir gömülmeden sonra zemin – GM ara yüzeyinin zemin – zemin ara yüzeyine dönüşmesidir. Bu davranış YZ_PVC/3.0_196 yüklemesinde net bir şekilde görülmektedir, yaklaşık %6 birim şekil değiştirme değerinden sonra kayma gerilmesi birden artış göstermiştir. Bu durum aynı zamanda kayma gerilmesi-birim şekil değiştirme grafiklerinin geleneksel grafiklerden farklı olmasını da açıklamaktadır. Aynı kalınlıkta farklı türdeki iki GM kıyaslandığında ise TPO'nun PVC'de daha yüksek kayma dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Bu durum TPO'nun PVC'ye göre daha sert olması ayrıca Tablo 2 ve 3'teki bilgiler karşılaştırıldığında TPO'nun yırtılmaya karşı direnci ve çekme gerilmesinin PVC'ye kıyasla daha yüksek olması ile açıklanabilir.



Şekil 5. Kür edilmemiş numunelerin kayma gerilmesi – birim şekil değiştirme eğrileri

Zemin – PVC ve zemin – TPO ara yüzeylerinin kayma gerilmesi – birim şekil değiştirme grafiklerinden elde edilen Mohr-Coulomb yenilme zarfları Şekil 6'da gösterilmiştir. Mohr-Coulomb zarfları incelendiğinde zarfların lineer değil parabolik olduğu görülmektedir. Literatürde yapılmış çalışmalarda da kohezyonlu zeminler – GM ara yüzeylerinin kayma zarfları parabolik elde edilmiştir (Stark ve Peoppel 1994, Esterhuizen vd. 2001, Stark vd. 2005, Fleming vd. 2006). Başlangıçta normal gerilme arttıkça kayma gerilmesi de artmaktadır ancak daha yüksek normal gerilmelerde bu artış düşük normal gerilmelerdeki kadar yüksek değildir. Bunun nedeni zaman geçtikçe numunenin %100 doygunluğa yaklaşması ve konsolidasyonsuz – drenajsız (UU) davranışı göstermesidir (Esterhuizen vd. 2001).

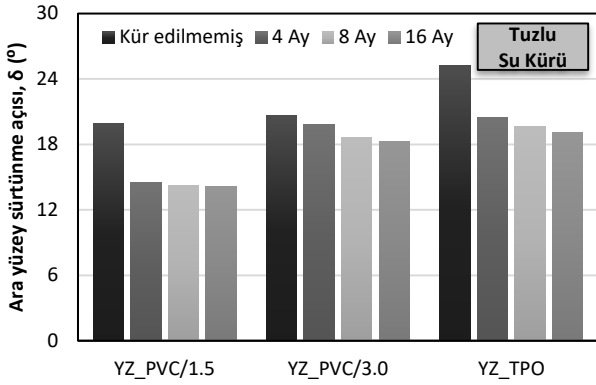


Şekil 6. Zemin – PVC (PVC/1.5_YZ, PVC/3.0_YZ) ve zemin – TPO (TPO_YZ) ara yüzeylerinin Mohr-Coulomb yenilme zarfları

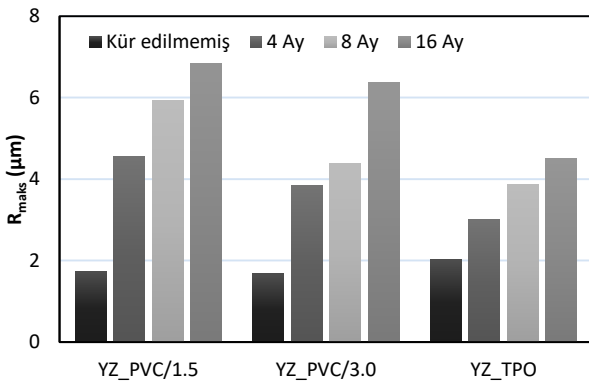
3.3. Kür edilmiş numunelerin ara yüzey direk kesme deneyi bulguları

Kıyı şeridinde yakın inşa edilen yapı temellerinde boğçalama amacıyla kullanılan GM'ler zamanla yer altı suyunda bulunan tuz nedeniyle zarar görebilirler. Bu amaçla GM'ler 4, 8 ve 16 ay boyunca hava almayan kaplarda 0.5M tuzlu su içerisinde kür edilmişler ardından ara yüzey direk kesme deneylerine tabi tutulmuşlardır. Ayrıca GM'ler üzerinde zeminin sürtünmesi nedeniyle oluşan deformasyonlar OPM cihazı ile ölçülmüş ve R_{maks} değerleri elde edilmiştir. Kür edilmiş numunelerin

ara yüzey sürtünme açıları ve R_{maks} değerleri Şekil 7 ve 8'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Kür edilmiş GM'lerin ara yüzey sürtünme açıları



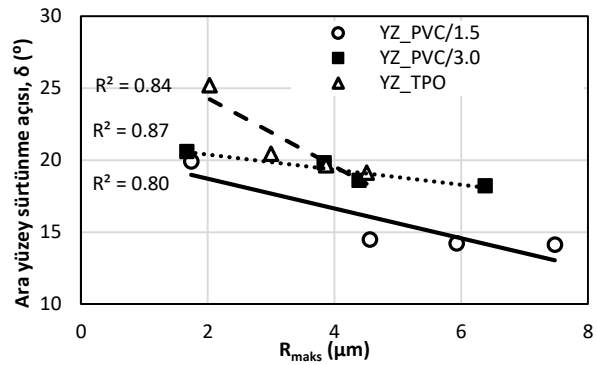
Şekil 8. Kür edilmiş GM'lerin R_{maks} değerleri

Ara yüzey sürtünme açılarındaki kür süresi arttıkça bir azalma trendi olduğu görülmektedir (Şekil 7). Kür edilmemiş ve 16 ay kür edilmiş numuneler kıyaslandığında ara yüzey sürtünme açılarındaki azalmanın sırasıyla %29, 12 ve 24 olduğu belirlenmiştir. Aynı tür farklı kalınlıklardaki iki GM karşılaştırıldığında ise kalın GM'nin tuzlu sudan negatif yönde daha fazla etkilendiği görülmektedir. Farklı türde ve aynı kalınlıktaki iki GM karşılaştırıldığında ise PVC'nin TPO'ya göre tuzlu suya karşı direncinin daha az olduğu görülmüştür. Ülkemizde en sık kullanılan GM türü PVC dir. PVC'nin tuzlu suya karşı olan direncinin TPO'ya göre daha düşük olması ve TPO'nun üretiminin daha çevre dostu olması nedeniyle PVC GM yerine TPO GM tercih edilmesi daha doğru olacaktır.

GM'ler tuzlu su vb. kimyasallara maruz kaldıklarında oksidatif bozunma oluşmaya başlar. Viebke vd. (1994) ve Hsuan ve Koerner (1998) oksidatif bozunmayı 3 aşamalı bir süreç olarak

tanımlamışlardır. İlk aşamada mühendislik özelliklerinde önemli bir değişim olmaz. İkinci aşamada oksidatif bozunmanın başladığı zamandır ve antioksidanlar tükendiği zaman başlar. Üçüncü aşamada ise oksidasyona bağlı olarak GM'nin fiziksel ve mekanik özelliklerinde önemli değişiklikler görülür. Rowe ve Shoaib (2017) çalışmalarında farklı GM türlerini 36 ay boyunca tuzlu su içerisinde bekletmiş ve oksidatif bozunma sürelerini (OIT) ölçmüşlerdir. Deney sonuçlarına göre 4. ay sonunda OIT yaklaşık %16, 8. ay sonunda yaklaşık %24, 16. ay sonunda ise yaklaşık %38 azalmıştır. Mills vd. (2019) tuzlu su içerisinde yüksek sıcaklıkta (90°C) HDPE GM'yi kür etmişler ve OIT ölçümü yapmışlardır. Deney sonuçlarında 4. ay sonunda OIT'in yaklaşık %48, 8. ay sonunda yaklaşık %76, 16. ay sonunda ise yaklaşık %80 azaldığı belirlenmiştir. Bu çalışmada tuzlu suda kür edilen numunelerin ara yüzey sürtünme açılarındaki azalmanın nedeni de GM'de oluşmuş olabilecek oksidatif bozunma ile açıklanabilir. Şekil 8 incelendiğinde, ara yüzey sürtünme açısı en yüksek olan 4 ay kür edilmiş numunelerin R_{maks} değerlerinin en düşük olduğu, ara yüzey sürtünme açısı en düşük olan 16 ay kür edilmiş numunelerin R_{maks} değerlerinin en yüksek olduğu görülmektedir. Bu da oksidatif bozunmanın fiziksel yönde bir göstergesi olmuştur.

Ara yüzey sürtünme açıları ile R_{maks} değerleri arasında bir korelasyon oluşturmak amacıyla Şekil 9 elde edilmiştir.



Şekil 9. Ara yüzey sürtünme açısı – R_{maks} ilişkisi

Şekil 9'da görüldüğü üzere ara yüzey sürtünme açısı – R_{maks} korelasyonunun R^2 değerleri 1'e oldukça yakın elde edilmiştir. Bu eğrilerden elde edilen üç adet denklemin katsayılarının ortalaması alınmış ve bir denklem elde edilmiştir (Denklem 1).

$$\delta = -1.31R_{maks} + 23.76 \quad (1)$$

Denklem 1 kullanılarak ara yüzey sürtünme açısı girdi olarak alınıp tahmini R_{maks} değerleri ve hata payları hesaplanmış ve Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Tahmini R_{maks} değerleri ve hata payları

Ara yüzey		Kür süresi			
		0	4	8	16
YZ_PVC/1.5	R _{maks} tahmin	2.94	7.07	7.28	7.33
YZ_PVC/3.0		2.41	3.01	3.93	4.22
YZ_TPO		-1.10	2.52	3.13	3.53
YZ_PVC/1.5	Hata değeri	1.20	2.51	1.35	-0.15
YZ_PVC/3.0		0.74	-0.83	-0.46	-2.16
YZ_TPO		-3.13	-0.48	-0.74	-0.98

Hata paylarının 0.15 ile 3.13 aralığında değiştiği belirlenmiştir. Sonraki çalışmalarda deney sayısının arttırılması hata paylarını minimuma indirebilir ve daha kesin bir denklem elde edilmesini sağlayabilir.

4. Sonuç

Bu çalışmada zemin – GM ara yüzeyinin kayma dayanımı davranışı incelenmiştir. Zemin – GM ara yüzey sürtünme açıları orta ölçekli direk kesme cihazı ile belirlenmiştir. GM türü ve kalınlığının ara yüzey kayma davranışı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amacıyla aynı tür (PVC) farklı kalınlıkta (1.5 ve 3.0 mm) ve farklı tür (PVC ve TPO) aynı kalınlıkta (1.5 mm) üç farklı GM kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre en büyük kayma dayanımı ve sürtünme açısı zemin – TPO ara yüzeyinde elde edilmiştir. En düşük kayma dayanımı ve sürtünme açısı ise zemin – PVC/1.5 ara yüzeyinde elde edilmiştir. Aynı durum tuzlu suda kür edilmiş GM'ler için de geçerlidir. Ancak tuzlu sudan en fazla zarar gören GM 1.5 mm PVC iken en az zarar gören 3.0 mm PVC dir. Yani aynı kalınlıkta TPO PVC ye göre tuzlu suya karşı daha dayanıklıdır. Aynı tür GM'ler içinde ise kalın olan tuzlu suya karşı daha dirençlidir. Elde edilen bu çıkarımlar yapılan yüzey pürüzlülük deneyleri ile de desteklenmiştir.

Bu çalışmadan çıkarılacak en önemli sonuç, kıyı şeridinde yakın inşa edilen yapılarda, temelde bohçalama amacıyla kullanılan PVC ve TPO'nun ara

yüzey sürtünme açısında 16 ay sonunda en az %12 en fazla %29 luk bir azalma olduğudur. Bu nedenle bundan sonra yapılacak çalışmalarda ve projelerde bu azalma göz önünde bulundurulmalı ve yalnızca zeminin kayma dayanımı parametrelerine göre projelendirme yapılmamalıdır. Ayrıca günümüzde, ülkemizde bohçalama amacıyla PVC çok sık tercih edilmektedir. Ancak çalışma sonucu göstermiştir ki TPO'nun ara yüzey kayma dayanımı parametreleri daha yüksektir.

Teşekkür

Katkıları ve yardımları için "TOTOMAK Makina ve Yedek Parça Sanayi ve Ticaret Anonim" ve "BTM" şirketlerine teşekkür ederiz. Bu çalışma TUBITAK 2211-A eğitim burs programı kapsamında desteklenmektedir.

5. Kaynaklar

- Abdelaal, F., Rowe, R.K. and Brachman, R.W.I., 2014. Brittle rupture of an aged HDPE geomembrane at local gravel indentation under simulated field conditions. *Geosynthetic International*, **21(1)**, 1-23.
- Araujo, G.L.S., Sanchez, N.P., Palmeira, E.M. and Almeida, M.G.G., 2022. Influence of micro and macroroughness of geomembrane surfaces on soil-geomembrane and geotextile-geomembrane interface strength. *Geotextiles and Geomembranes*, **50(4)**, 751-763.
- Ari, A. and Akbulut, S., 2022. Evaluation of sand–geomembrane interface behavior using discrete element method. *Granular Matter*, **24(1)**, 1-9.
- ASTM D2487-17, 2017. Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System), ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- ASTM D3080/3080M-11, 2012. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- ASTM D422-63 (2007)e2, 2016. Standard test method for particle-size analysis of soils (Withdrawn 2016), ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.

- ASTM D4318-17e1, 2018. Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- ASTM D5321/5321M – 20, 2020. Standard Test Method for Determining the Shear Strength of Soil – Geosynthetic and Geosynthetic – Geosynthetic Interfaces by Direct Shear, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- ASTM D6913/D6913M-17, 2017. Standard test methods for particle-size distribution (Gradation) of soils using sieve analysis, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- ASTM D698-12, 2014. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)), ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- ASTM D854-14, 2016. Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- Bonnour, H., Barral, C. and Touze-Foltz, N., 2015. Altered geosynthetic clay liners: effect on the hydraulic performance of composite liners. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, **19(9)**, 1155-1176.
- Bowles, J.E., 1997. Foundation analysis and design. Fifth edition, McGraw-Hill.
- Byrne, J.R., Kendall, J. and Brown, S., 1992. Cause and Mechanism of Failure of Kettleman Hills Landfill B19, Phase IA. *Geotechnical Special Technical Publication*, **2**, 1188-1215.
- Chai, J.C., Miura, N. and Hayashi, S., 2005. Large-scale tests for leachate flow through composite liner due to geomembrane defects. *Geosynthetic International*, **12(3)**, 134–144.
- Chai, J.C. and Saito, A., 2016. Interface shear strengths between geosynthetics and clayey soils. *International Journal of Geosynthetic and Ground Engineering*, **2(19)**, 3-9.
- Chen, W., Xu, T. and Zhou, W., 2021. Microanalysis of smooth Geomembrane–Sand interface using FDM–DEM coupling simulation. *Geotextiles and Geomembranes*, **49**, 276-288.
- Dadkhah, R., Ghafoori, M., Ajalloeian, R. and Lashkaripour, G.R., 2010. The effect of scale direct shear test on the strength parameters of clayey sand in Isfahan City, Iran. *Journal of Applied Science*, **10(18)**, 2027-2033.
- Das B.M., 2007. Principles of foundation engineering. Sixth edition, Thomson.
- Effendi, R., 2011. Interface friction of smooth geomembranes and Ottawa sand. *Info Teknik*, **12(1)**, 61-72.
- Esterhuizen, J.J.B., Filz, G.M. and Duncan, J.M., 2001. Constitutive behavior of geosynthetic interfaces. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **127**, 834–840.
- Feng, S.J., Chen, Y.M. and Gao, G.Y., 2007. Analysis on translational failure of landfill along the underlying liner system. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, **29(1)**, 15-20.
- Fleming, I.R., Sharma, J.S. and Jogi, M.B., 2006. Shear strength of geomembrane–soil interface under unsaturated conditions. *Geotextiles and Geomembranes*, **24**, 274–284.
- Gokhale, A.M. and Drury, W.J.A., 1990. General Method for Estimation of Fracture Surface Roughness: Part II. Practical Considerations. *Metallurgical Transactions A*, **21A**, 1201-1207.
- Gokhale, A.M. and Underwood, E.E.A., 1990. General Method for Estimation of Fracture Surface Roughness: Part I. Theoretical Aspects. *Metallurgical Transactions A*, **21A**, 1193-1199.
- Grubb, D., Cheng, S. and Diesing, W., 1999. High altitude exposure testing of geotextiles in the Peruvian Andes. *Geosynthetic International*, **6(2)**, 119-144.
- Hsieh, C. and Hsieh, M.W., (2003). Load plate rigidity and scale effects on the frictional behavior of sand/geomembrane interfaces. *Geotextiles and Geomembranes*, **21(1)**, 25-47.
- Hsuan, Y. and Koerner, R., 1998. Antioxidant depletion lifetime in high density polyethylene geomembranes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **124(6)**, 532-541.

- Koerner, R.M., Martin, J.P. and Koerner, G.R., 1986. Shear strength parameters between geomembranes and cohesive soils. *Geotextiles and Geomembranes*, **4(1)**, 21-30.
- Koerner, R.M. and Soong, T.Y., 2000. Stability assessment of ten large landfill failures. *Advances in transportation and geoenvironmental systems using geosynthetics*, 1–38.
- Mccartney, J.S. and Zornberg, J.G., 2009. Analysis of a large database of GCL-geomembrane interface shear strength results. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **135(2)**, 209-223.
- Mills, A., Fraser, B. and Beaumier, D., 2019. Long-term performance of HDPE geomembranes exposed to a high temperature brine solution. *Geosynthetics Conference, Houston, Texas*.
- Mitchell, J.K., Seed, R.B. and Seed, H.B., 1990. Kettleman Hills waste landfill slope failure. I: Liner-System Properties. *Journal of Geotechnical Engineering*, **116(4)**, 647-668.
- Mohapatra, S.R., Mishra, S.R., Nithin, S. and Rajagobal, K., 2016. Effect of Box Size on Dilative Behaviour of Sand in Direct Shear Test. *Indian Geotechnical Conference, Chennai, India*, **16**, 111-118.
- O'Rourke, T.D. and Druschel, S.J., 1990. Shear Strength Characteristics of Sand-Polymer Interfaces. *Journal of Geotechnical Engineering*, **116(5)**, 451-469.
- Punetha, P., Mohanty, P. and Samanta, M., 2017. Microstructural investigation on mechanical behavior of soil – geosynthetic interface in direct shear test. *Geotextiles and Geomembranes*, **45**, 197-210.
- Qian, X.D., Shi, J.Y., Hui, L. and Zhu, Y.B., 2011. Failure interface behavior of multilayer landfill liner system. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, **33(6)**.
- Rinne, N.F., 1989. Evaluation of Interface Friction between Cohesionless Soils and Common Construction Materials. Master Science Thesis, Civil Engineering Department of University of British Columbia, Vancouver, Canada, 90.
- Rowe, R.K. and Shoaib, M., 2017. Effect of brine on long-term performance of four HDPE geomembranes. *Geosynthetic International*, **24(5)**, 508-523.
- Sabiri, N.E., Caylet, A., Montillet, A., Le Coq, L. and Durkheim, Y., 2020. Performance of nonwoven geotextiles on soil drainage and filtration. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* **24(5)**, 670-688.
- Seed, R.B., Mitchell, J.K. and Seed, H.B., 1988. Slope Stability Failure Investigation: Landfill Unit B-19, Phase I-A, Chemical Waste Management, Inc. Facility, Kettleman Hills, California. *Report of Investigation, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley*, June 29.
- Seed, R.B., Mitchell, J.K. and Seed, H.B., 1990. Kettleman Hills Waste Landfill Slope Failure. II: Stability Analyses. *Journal of Geotechnical Engineering*, **116(4)**, 669-690.
- Shi, J., Shu, S., Qian, X. and Wang, Y., 2020. Shear strength of landfill liner interface in the case of varying normal stress. *Geotextiles and Geomembranes*, **48**, 713-723.
- Sobol, E., Sas, W. and Szymanski, A., 2015. Scale effect in direct shear tests on recycled concrete aggregate. *Studia Geotechnica et Mechanica*, **37(2)**, 45-49.
- Stark, T.D. and Poeppl, A.R., 1994. Landfill liner interface strengths from torsional-ring-shear tests. *Journal of Geotechnical Engineering*, **120**, 597–615.
- Stark, T.D., Niazi, F.S. and Keuscher, T.C., 2015. Strength envelopes from single and multi-geosynthetic interface tests. *Geotechnical and Geological Engineering*, **33**, 1351-1367.
- TBDY, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Resmi Gazete, Tarih: 18 Mart 2018, Sayı: 30364, 2018.
- Viebk, J., Elble, E., Ifwarson, M. and Gedde, U.W., 1994. Degradation of unstabilized medium-density polyethylene pipes in hot-water applications. *Polymer Engineering Science*, **34(17)**, 1354-1361.
- Zahran, K. and El Naggar, H., 2020. Effect of Sample Size on TDA Shear Strength Parameters in Direct Shear Tests. *Transportation Research Record*, **2674(9)**, 1110-1119.
- Zhou, L., Zhu, Z., Yu, Z. and Zhang, C., 2020. Shear Testing of the Interfacial Friction Between an HDPE Geomembrane and Solid Waste. *Materials*, **13**, 1-16.

Basınçlı Döküm Yöntemiyle Üretilmiş Mg-Cu Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Güven YARKADAŞ¹, Hüseyin ŞEVİK^{1*}

¹ Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Müh, Mersin Türkiye

e-posta¹: guvenyarkadas@gmail.com

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-2065-412X>

Sorumlu yazar e-posta¹: sevik@mersin.edu.tr

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-4592-2768>

Geliş Tarihi: 08.06.2022

Kabul Tarihi: 02.03.2023

Öz

Bu çalışmada, saf magnezyum metaline farklı ağırlık oranlarında bakır (%1, 2 ve 4) ilaveli alaşımlar kontrollü atmosfer ortamında soğuk kamaralı basınçlı döküm yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen alaşımların mikro yapı çalışmaları, için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla sertlik ve çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. SEM görüntülerinde saf magnezyuma Cu ilavesi ile tane sınırlarında Mg₂Cu intermetalikliği olduğu gözlenmiştir. Sertlik ve akma mukavemeti değerlerinin bakır oranı arttıkça yükseldiği, çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerlerinin ise ağırlıkça %2 Cu değerine kadar arttığı %4 bakır ilavesinde ise bu değerlerin bir miktar düştüğü tespit edilmiştir. Farklı sıcaklık ve gerilim değerlerinde yapılan sürünme testleri sonucu bakır ilavesinin artması ile sürünme direncinin arttığı elde edilen "n" ve "Q" değerlerinden sürünme mekanizmasının dislokasyon tırmanması olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler

Magnezyum alaşımları;
Bakır; Mekanik özellikler; Sürünme

Investigation of Mechanical Properties of Mg-Cu alloys produced by pressure die casting method

Abstract

In this study, the addition of different amount of copper (1, 2 and 4wt.%) to pure magnesium were produced by high pressure die casting under controlled atmosphere. The scanning electron microscope (SEM) was used for microstructural analysis and hardness and tensile testing machine were used for determining mechanical properties. Mg₂Cu inter metallic phase were observed through the grain boundaries on the SEM microstructural analysis. While the hardness and yield strength increased with increasing of the addition of Cu alloying element, the tensile strength and elongation raised until the addition of 2wt.% Cu and then slightly decreased. As a result of the creep tests performed at different temperature and stress, it was observed that the creep resistance increased with the increase of copper addition, and from the obtained "n" and "Q" values, it was determined that the creep mechanism was dislocation climbing.

Keywords

Magnesium alloys;
Copper; Mechanical properties; Creep.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Malzeme bilimi araştırmacılarının en önemli motivasyonlarından birisi mevcut sistemlerde kullanılan malzemelerle aynı işi yapacak daha hafif malzemeler geliştirmektir. Özellikle havacılık, savunma ve otomotiv sektörü söz konusu olduğunda magnezyum alaşımları son zamanlarda üzerinde en çok durulan malzemelerdendir (Akgün,

2018; Gökçe, 2020; Demir, 2019; Mayyas, 2012; Blawert, 2004; Pekgülyüz 2003). Kitlesel üretimi çelikten sonra başlayan alüminyum alaşımları zaman içerisinde geliştirilerek özellikle havacılık ve mobil uygulamalarda önemli oranda çeliğin yerini almıştır, magnezyum alaşımlarının geliştirilmesi ile de magnezyum çelik ve alüminyum alaşımlarının yerine kullanılma potansiyeli doğmuştur. Magnezyum çelikten %77 alüminyumdan ise %33 daha hafiftir. Spesifik mukavemeti ise bu üçü

arasında en yüksek olanıdır (Li 2007; Pekgülyüz 2013; Friedrich 2001). Son yıllarda yoğunluk avantajından daha etkin yararlanabilmek için mekanik özellikleri daha iyi magnezyum alaşımlarının geliştirilmesi için yoğun olarak çalışılmaktadır. Özellikle günümüzde Mg-Al, Mg-Al-Zn alaşım sistemleri üzerine birçok çalışma yapılmış ve endüstriyel kullanımı mevcut AM60(Mg-6Al-0.3Mn), AZ91(Mg-9Al-1Zn) alaşımları geliştirilmiştir. Bununla birlikte, 125 ° C'nin üzerindeki sıcaklıklarda düşük sürünme direnci nedeniyle özellikle otomotiv endüstrisinde bu alaşımlar efektif kullanılmamaktadır (yüksek alüminyum içeriği, interdentritik $Mg_{17}Al_{12}$ tane sınırı fazı oluşturur ki 120°C üstündeki uygulama sıcaklıklarında mukavemeti düşürür) (Pekgülyüz 2003; Pekgülyüz 2013). Bu nedenle son yıllarda kalay, bizmut, antimon, bakır, nadir elementler alaşım elementi olarak saf magnezyuma ilave edilmekte, ikili, üçlü alaşımlar elde edilerek yenilikçi alaşımlar geliştirilmeye çalışılmaktadır (Jiang 2015; Malik 2017; Zhu 2008; Sun 2018; Zhang 2011). Örneğin, saf magnezyuma farklı oranlarda kalay ilavesi gerçekleştirilmiş ve ağırlıkça %5'e kadar kalay ilavesi bu alaşımların çekme mukavemetini ve sürünme direncini arttırmaktadır. Buna karşın, Alüminyum ve/veya Çinko elementi içeren alaşımlarda korozyon direncini düşürmektedir. Günümüzde halen bu alaşımlar ticari bir değer kazanamamıştır ve araştırmacılar bu alaşımların çeşitli kombinasyonları üzerine çalışmalarını sürdürmektedirler. Son yıllarda yapılan çalışmalar sonucunda Mg-Sn ikili alaşım sistemine çeşitli oranlarda kalsiyum (Ca) ilavesi ile dökülebilirlik ve sürünme direncinde önemli gelişmeler elde edilmiştir (Liu 2007; Poddar 2012; Baghani 2020; Khalilpour 2016). Youngqing ve arkadaşlarının yapmış olduğu bir başka çalışmada ise Mg-%5Sn alaşımına bakır ilavesinin sürünme direncini iyileştirdiği rapor edilmiştir. Yapılan çalışmalar nihai sonuca ulaşamadığı için halen endüstriyel kullanım için yenilikçi magnezyum alaşımı ortaya konmamıştır. Bundan dolayı bu çalışmada magnezyuma ağırlıkça %1-2 ve 4 bakır ilave edilerek mikroyapısal değişim ve saf magnezyumun oda ve yüksek sıcaklıkta mekanik özelliklerine etkileri irdelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, saf magnezyum metaline farklı ağırlık oranlarında bakır (%1, 2 ve 4) ilaveli alaşımlar kontrollü atmosfer ortamında soğuk kamaralı basınçlı döküm yöntemi ile üretilmiştir. Bakır ilavesinin saf magnezyum metalinin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Mikro yapı incelenmesi, sertlik ve çekme dayanımı ayrıntılı olarak incelenmiş ve sonuçlar irdelenmiştir.

Ergitme işlemi için indüksiyon ergitme fırını (1.5kW gücünde) kullanılmıştır. Ergitme işlemi esnasında oksitlenmeyi önlemek için koruyucu atmosfer olarak %96 CO₂ ve %4 SF₆ (sülfürhekzaflorid) gaz karışımı kullanılmıştır. Alaşımlar saf magnezyum ve saf bakır kullanılarak elde edilmiştir. Alaşımların üretimi için her bir eriyik 750 °C sıcaklıkta 10 dakika bekletilmiştir. Bekleme gerçekleştirildikten sonra koruyucu gaz ortamında 100 Ton kapama gücüne sahip 76KN'luk soğuk kamaralı basınçlı döküm cihazında üretimler gerçekleştirilmiştir. Kullanılan kalıp 200 °C sıcaklığa ısıtılmış ve her bir üretimden 4 adet çekme ve sürünme çubuğu elde edecek şekilde dizayn edilmiştir. (Şekil 1.)



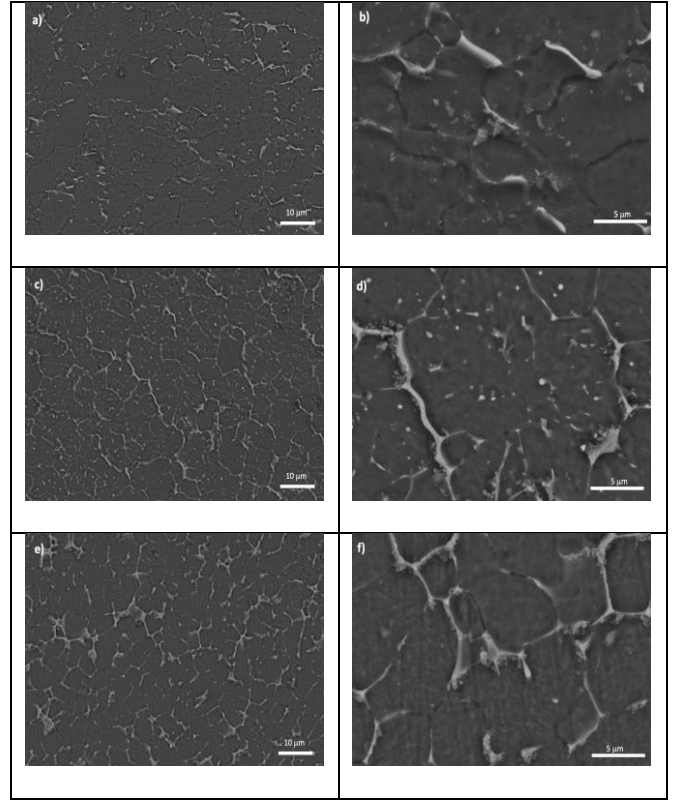
Şekil 1. Döküm numuneleri

Metalografik örnekler her bir kalıptan aynı pozisyondan olacak şekilde alınmış ve standart metalografik yöntemlere uygun şekilde hazırlanmıştır. Mikroyapı incelemeleri için Taramalı elektron mikroskobu (SEM JEOL 6060LV) kullanılmıştır.

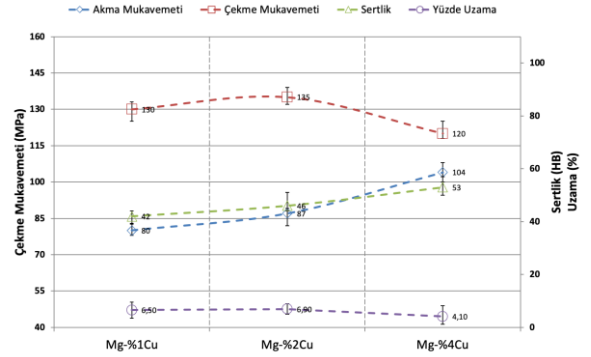
Üretilen alaşımların makro sertlik deneyleri Brinell sertlik (HB) skalasında Brooks marka sertlik cihazı (31.25/2.5/30) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir alaşım örneğinin sertliği okunan on değer ortalaması şeklinde alınmıştır. Üretilen alaşımların çekme ve sürünme deneyleri 10 KN'luk RAAGEN marka çekme cihazında yapılmıştır. Çekme testleri oda sıcaklığında ve çekme hızı 0.2 mm/min olarak gerçekleştirilmiştir. Her bir numunenin mukavemeti ve yüzde uzama değerlerinin hesaplanması için 4 adet numune kullanılmış ve elde edilen değerlerin ortalaması sonuç olarak kabul edilmiştir. Sürünme deneyleri 10 KN'luk sürünme cihazında gerçekleştirilmiştir. Deney koşulları 30-40 ve 50 MPa gerilme değerleri ve 150, 175 ve 200°C sıcaklık olarak belirlenmiştir. Her bir deney şartı 4 defa tekrarlanarak ortalaması alınmıştır.

3. Bulgular

Mg-Cu ikili denge diyagramı göz önüne alındığı zaman, Mg içerisinde oda sıcaklığında bakır çözünürlüğünün olmadığı görülmekte, bu nedenle Mg-Cu ikili alaşımları Mg_2Cu intermetalığı içermektedir (ASM Handbook). Mg-1Cu, Mg-2Cu ve Mg-4Cu alaşımlarının mikroyapı görüntüsü Şekil 2(a-f)'de görülmektedir. Şekil 2'den görüldüğü gibi, saf magnezyuma Cu ilavesi ile tane sınırlarında Mg_2Cu intermetalığı oluşmuştur. Ağırlıkça %2 Cu ilavesiyle Mg_2Cu intermetalığı bazı yerlerde tane sınırları boyunca oluştuğu görülmektedir. Ağırlıkça %4 Cu ilavesinde ise ilave olarak Mg_2Cu intermetalığının levhasal bir şekilde de oluştuğu görülmektedir (Şekil 2(e)). Ayrıca basınçlı döküm yöntemiyle üretilen alaşımların tane boyutları kendi içerisinde farklılıklar göstermektedir. Bu çalışmada da her üç alaşımların mikroyapısında bazı yerlerinde daha büyük tanelerin varlığına rastlanmıştır.



Şekil 2. a-b) Mg-%1Cu, c-d) Mg-%2Cu ve e-f) Mg-%4Cu alaşımlarının SEM görüntüsü.



Şekil 3. Alaşımların sertlik, akma, çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerleri

Bakır ilaveli alaşımların sertlik, akma ve çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerleri Şekil 3'de görülmektedir. Mg-%1Cu, Mg-%2Cu ve Mg-%4Cu alaşımlarının sertlik değeri 42, 46 ve 53 Brinell olarak bulunmuştur. Akma mukavemeti değerleri sırasıyla 80, 87, 104 MPa, çekme mukavemeti ise 130, 135 ve 120 MPa olarak bulunmuştur. Yüzde uzama ise %6.5, 6.9 ve 4,1 olarak tespit edilmiştir. Ağırlıkça %2Cu ilavesiyle çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerlerinde artış gözlenmiş fakat daha fazla bakır

ilavesi ile her iki değerinde düştüğü gözlenmiştir. Tan ve ark. yapmış olduğu çalışmada Mg alaşımına ağırlıkça %2.5 Cu ilavesi gerçekleştirmiş ve çekme mukavemeti değerini 145 MPa, yüzde uzama değerini de %8.1 olarak rapor etmiştir (Tan 2021).

Bakır ilavesi ile sertlik ve akma mukavemetinin artışının ana nedenleri tane boyutundaki azalma ve tane sınırında ikincil intermetalik miktarının artışı olarak değerlendirilebilir. Tane boyutunun azalmasıyla tane sınırları artmış ve dislokasyon hareketlerini kısıtlamıştır. Ayrıca mevcut intermetalik miktarının artması da dislokasyon hareketlerini engelleyici görev görmüştür. Fakat ağırlıkça %4 Cu ilavesi ile ikincil intermetalik morfolojisinin levha yapısına dönüşmesi ve tane sınırları boyunca kesintisiz oluşması çatlak oluşumu ve ilerlemesinde baskın rol oynamış ve bu durumun hem çekme mukavemeti hem de yüzde uzama değerlerinin düşmesine neden olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 3.1. 50MPa ve farklı sıcaklıklarda ((a) 150°C, (b) 175°C ve (c) 200°C) Mg-xCu alaşımların sürünme deney sonuçları.

(a) 150°C	Mg-%1Cu	Mg-%2Cu	Mg-%4Cu
Sürünme hızı (1/Saniye)	6.4x10 ⁻⁵	1.3x10 ⁻⁵	0.8x10 ⁻⁵
Kırılma zamanı (saat)	47.9	83.1	143.5
(b) 175°C			
Sürünme hızı (1/Saniye)	2.3x10 ⁻³	0.84x10 ⁻³	6.4x10 ⁻⁴
Kırılma zamanı (saat)	32.23	49.37	87.3
(c) 200°C			
Sürünme hızı (1/Saniye)	2,15x10 ⁻²	6.47x10 ⁻³	2.11x10 ⁻³
Kırılma zamanı (saat)	0.37	2.65	8.12

Bakır ilaveli Mg alaşımına farklı sıcaklık ve 50 MPa sabit gerilmede yapılan sürünme deneyi sonucu elde edilen sürünme hızı ve kırılma zamanı verileri tablo 3.1'de gösterilmektedir. Tablo 3.1'de görüldüğü gibi Mg-%1Cu alaşımının 150°C sıcaklıkta

sürünme hızı 6.4×10^{-5} (s⁻¹) ve kırılma zamanı 47.9 saat olarak bulunmuştur. Mg-%2Cu ve Mg-%4Cu alaşımları için ise sürünme hızı sırasıyla 1.3×10^{-5} ve 0.8×10^{-5} , kırılma zamanı ise 83.1 ve 143.5 saat olarak elde edilmiştir. Elde edilen değerlerden görüldüğü üzere, bakır ilavesi ile sürünme direncinde iyileşme görülmüştür. Benzer sonuçlar 175°C ve 200°C sıcaklık ve 30MPa gerilim altında da elde edilmiştir.

Literatür incelendiği zaman sürünme mekanizmalarından difüzyon sürünmesi genel olarak magnezyum alaşımlarında görülen bir mekanizma değildir. Buna karşın, esas öneme sahip olan dislokasyon sürünmesi ve tane sınırı kaymasıdır (Pekgülyüz 2013; Luo 2004)

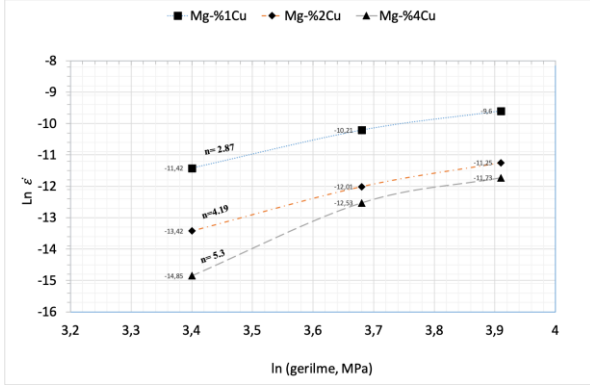
Tane sınırı kayması yüksek sıcaklıklarda tane sınırlarının kısmi ergimesi veya yumuşaması ile ilişkilidir. Bu durum sınır fazlarının düşük ısı direncinden ve sınır alanlara yakın dağılmış veya karmaşık oluşlarından ve yerel çözünen/çökelti bileşenleri ve dislokasyonlardan dolayı meydana gelir. Tane sınırı kayması esnasında, taneler birbiri üzerinde herhangi bir deformasyon oluşturmadan kayarlar. Tane sınırı kayması alüminyum içeren magnezyum döküm alaşımlarının düşük sürünme direnci için ana sorun olarak görülür.

Dislokasyonlar malzemenin plastik deformasyonuna neden olur. Dislokasyon genel olarak oda sıcaklığında malzeme içerisindeki çeşitli bariyerlerin (çökeltiler, tane sınırları, diğer dislokasyonlar gibi) önünde birikerek deformasyon sertleşmesine neden olurlarken, yüksek sıcaklıklarda, dislokasyonlar bu bariyerleri dislokasyon tırmanması ana mekanizması vasıtasıyla aşarlar.

Yüksek gerilme (20-100MPa) ve sıcaklık(100-250°C) değerlerinde Mg alaşımlarının sürünme hızı ($\dot{\epsilon}$) aşağıdaki Arrhenius denklemi ile tanımlanır. Aktivasyon enerjisi "Q" sabit gerilmede $\ln(\dot{\epsilon})$ 'e karşı $1/T$ eğrisi ile hesaplanır.

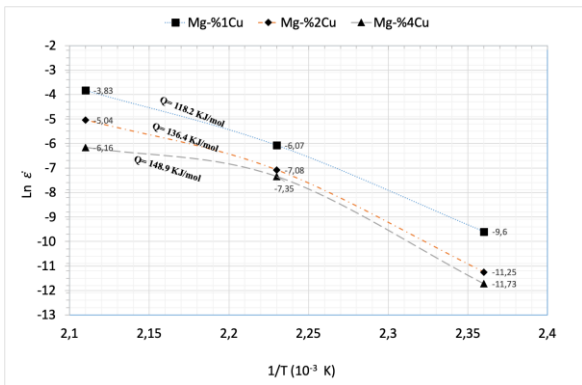
$$\dot{\epsilon} = A \cdot \sigma^n \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

Burada A malzeme sabiti, Q sürünme için aktivasyon enerjisi, R gaz sabiti (8.314 J/mol.K⁻¹), T mutlak sıcaklık ve “n” gerilime üssü olarak tanımlanır[5].



Şekil 4. 150°C sıcaklıkta için Mg-xCu alaşımlarının ln (ε) ‘e karşı 1/T eğrisi. (Plot of ln ε vs. ln σ for determining the stress exponent for the Mg-xCu alloys at 150°C.)

Şekil 4. 150°C sıcaklıkta deneysel alaşımların “n” değerini hesaplamak için ln (ε) ‘e karşı 1/T eğrisini göstermektedir. Şekil 4’den elde edilen “n” değerleri Mg-%1Cu, Mg-%2Cu ve Mg-%4Cu alaşımları için sırasıyla 2.87, 4.19 ve 5.3 olarak bulunmuştur. Şekil 5’de 30 MPa gerilme altında farklı sıcaklıklarda (150, 175 ve 200°C) deneysel alaşımların Arrhenius eğrileri görülmektedir. Arrhenius eğrileri kullanılarak Mg-%1Cu, Mg-%2 Cu ve Mg-%4Cu alaşımları için hesaplanan aktivasyon enerjileri sırasıyla 118.2, 136.4 ve 148.9 kJ/mol’dür.



Şekil 5. 50 MPa gerilme altında farklı sıcaklıklarda (150, 175 ve 200°C) Mg-xCu alaşımlarının Arrhenius eğrileri.

Arrhenius curves of Mg-xCu alloys at different temperatures (150, 175 and 200°C) under 50 MPa stress.

Şekil 5.’de görüldüğü gibi, Mg-%1Cu alaşımı için elde edilen aktivasyon enerji değeri (50 MPa/150-200°C şartlarında) yayınım sürünmesi (pipe difüzyon(92kJ/mol)) veya cross slip (100kJ/mol) ve magnezyum latis self-difüzyon (135 kJ/mol) değerleri arasında bulunmuştur. Bakır ilavesinin artması ile aktivasyon enerjisi değerleri ise her iki mekanizmadan daha yüksek bulunmuştur. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar literatür ile uyumlu olmak ile beraber artan bakır ilavesi ile etkin sürünme mekanizmasını belirlemek bir miktar güçlük oluşturmaktadır (Pekgülyüz 2003; Luo 2004; Nami 2010; Zhang 2017). Çünkü genel olarak yüksek gerilim üssü (6 ve daha üstü) power-law breakdown(güç kanunu) rejimini baskın kılar (Mo 2018) fakat bakır ilaveli Mg alaşımlarından elde edilen gerilim üssü değerleri “6” değerinden daha küçüktür. Buna karşın aktivasyon enerjileri self difüzyon değerinden yüksektir. Yongqing ve ark. yapmış oldukları çalışmada Mg-5Sn alaşımına ağırlıkça %1 Cu ilave etmişler ve 175°C sıcaklıkta 35-75 MPa gerilim aralığında gerçekleştirdikleri sürünme deneyleri sonucunda gerilim üssünü 2.92 olarak bulmuşlardır. Yongqing ve ark. elde ettiği sonuçlar neticesinde baskın sürünme mekanizmasını dislokasyon tırmanması ve tane sınırı kayması olarak rapor etmişlerdir. Sonuç olarak, bu çalışma da bakır ilaveli Mg alaşımlarının sürünme özelliklerinde etkin mekanizma muhtemelen dislokasyon tırmanması olarak tanımlanabilir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada saf magnezyum metaline farklı ağırlık oranlarında bakır ilave edilmiş ve çeşitli Mg-Cu alaşımları soğuk kamaralı basıncılı döküm ile üretilmiştir. Elde edilen alaşımlara mikroyapı analizi ve mekanik testler uygulanmıştır. Sonuç olarak, saf magnezyum metaline Cu ilavesi ile tane sınırlarında Mg₂Cu intermetalığının oluştuğu gözlenmiştir. Bakır ilavesi magnezyum metalinin sertlik ve akma mukavemetini iyileştirirken ağırlıkça %2 Cu

ilavesinden sonra hem çekme mukavemeti hem de yüzde uzama değerleri azalma eğilimi göstermiştir. Sürünme direncinin ise bakır ilavesi artması ile iyileştiği gözlenmiştir.

5. Kaynaklar

- ASM Handbook, Alloy Phase Diagrams v.3, pp. 305-1108, 1999.
- Akgün M., Demir H., Çiftçi İ., 2018. Mg₂Si partikül takviyeli magnezyum alaşımlarının tornalanmasında yüzey pürüzlülüğünün optimizasyonu. *Politeknik Dergisi*, **21**, 645-650.
- Baghani A., Khalilpour H., Miresmaeili S., 2020. Microstructural evolution and creep properties of Mg-4Sn alloys by addition of calcium up to 4 wt.%. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* **30**, 896-904.
- Blawert C., Hort N, Kainer K. U., 2004. Automotive applications of magnesium and its alloys. *Transactions Indian Institute Metal*, **57**, 397-408.
- Demir İ. D. K., Uygur İ., AZ63 Magnezyum Alaşımının Korozyon Direncine Kriyojenik İşlemin Etkisi. *Journal of Advanced Technology Science*, **8**, 1-8, 2019.
- Friedrich H, Schumann S, 2001. Research for a “new age of magnesium” in the automotive industry. *Journal of Materials Processing Technology*, **117** (3): 276-281, 2001.
- Gökçe A., 2020. Toz Metalurjisi Yöntemiyle Mg-Sn Alaşımı Üretimi ve Karakterizasyonu. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, **8**, 112-119.
- Jiang Z. , Jiang B. , Zeng Y., Dai J. , Pan F., 2015. Role of Al modification on the microstructure and mechanical properties of as-cast Mg-6Ce alloys. *Materials Science and Engineering A*, **645**, 57-64.
- Mayyas A., Qattawi A., Omar M., Shan D., 2012. Design for sustainability in automotive industry: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **16**, 1845-1862.
- Malik K. N. B., 2017. Effect of high-pressure die casting on casting on structure and properties of Mg-5Al-0.4Mn-xRE (x=1, 3 and 5 wt.%) experimental alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, **694**, 841-847.
- Khalilpour H., Miresmaeili S., Baghani A., 2016. The microstructure and impression creep behavior of cast Mg-4Sn-4Ca alloy. *Materials Science and Engineering A*, **652**, 365-369.
- Liu H., Chen Y., Tang Y., Wei S., Niu G., 2007. The microstructure, tensile properties and creep behaviour of as-cast Mg-(1-10)%Sn alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, **440**, 122-126.
- Li S., Tang B., Zeng D., 2007. Effects and mechanism of Ca on refinement of AZ91D alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, **437**, 317-327.
- Luo, A.A. 2004. Recent magnesium alloy development for elevated temperature applications. *International Materials Review*, **49**, 13-40.
- Mo, N., Tan, Q., Bermingham, M., Huang, Y., Dieringa, H., Hort, N., Zhang, M., 2018. Current development of creep-resistant magnesium cast alloys: A review. *Materials and Designs* **155**, 422-442.
- Nami, B., Razavi, H., Mirdamadi, S., Shabestari, S.G., Miresmaeili, S. M. 2010. Effect of Ca and Rare Earth Elements on Impression Creep Properties of AZ91 Magnesium Alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, **41**, 1973-82.
- Pekguleryuz M. O. , Kaya A., 2003. Creep resistant magnesium alloys for powertrain applications. *Advanced Engineering Materials*, **12**, 866-878.
- Pekguleryuz, M. Kainer K., Kaya A. (Eds.). 2013. Fundamentals of Magnesium alloys Metallurgy, Woodhead Publishing, Cambridge, sayfa: 173, 301-302, 317, 322.
- Poddar P., Sahoo K., Mukherjee S., Ray A., 2012. Creep behaviour of Mg-8%Sn and Mg-8%Sn-3%Al-1%Si alloys. *Materials Science and Engineering A*, **545**, 103-110.
- Sun S. H., Sun B. Z., 2018. Investigation of structure, morphology and orientation of precipitates in Mg-Bi alloy. *Materials Characterization*, **140**, 129-133.
- Tan W. , Li T., Li S. , Fang D. , Ding X. , Sun J., 2021. High strength-ductility and rapid degradation rate of as-

cast Mg-Cu-Al alloys for application in fracturing balls. *Journal of Materials Science and Technology*, **94**, 22-33.

Yongqing T., Yungui C., Sufen X., Wucheng D., Chunming W., Xia L., 2014. Microstructure, mechanical properties and compressive creep behavior of as-cast Mg-5Sn-(0-2)Cu alloys. *Rare Metal Materials and Engineering*, **43**, 1291-1295.

Zhu S. M., Gibson M. A. , Nie J. F., Easton M. A. , Abbott T. B, 2008. Microstructural analysis of the creep resistance of die-cast Mg-4Al-2RE alloy. *Scripta Materials*, **58**, 477-480.

Zhang J., Leng Z. , Zhang M. , Meng J. , Wu R. , 2011. Effect of Ce on microstructure, mechanical properties and corrosion behaviour of high-pressure-die-cast Mg-4Al-based alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, **509**, 1069-1078.

Zhang D., Bu F., Li X., Guan K. 2017. Effects of minor Sr addition on the microstructure, mechanical properties and creep behaviour of high pressure die casting AZ91-0.5RE based alloy. *Materials Science and Engineering A*, **693**, 53-59.

AKÜ FEMÜBİD 23 (2023) 025702 (466-473)

AKU J. Sci. Eng. 23 (2023) 025702 (466-473)

DOI: 10.35414/akufemubid.1143362

Araştırma Makalesi / Research Article

Ni₂VAI Bileşiğinin Mekanik, Elastik ve Termodinamik Özelliklerinin İncelenmesi

Tahsin ÖZER¹, Nihat ARIKAN²¹Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Bahçe Meslek Yüksekokulu, Bahçe, Osmaniye, Türkiye.²Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Osmaniye, Türkiye.Sorumlu yazar e-posta¹: tahsinozer@osmaniye.edu.tr. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0344-7118>e-posta²: nihatarikan@osmaniye.edu.tr. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8028-3132>

Geliş Tarihi: 12.07.2022

Kabul Tarihi: 24.03.2023

Öz

Bu çalışmada teknolojik öneme haiz Heusler ailesinden Ni₂VAI bileşiğinin yapısal, mekanik ve termodinamik özellikleri ilk prensipler yöntemi ile teorik olarak incelenmiştir. Öncelikle bileşiğin temel durumunu ve en düşük enerji seviyesini belirlemek için yapısal optimizasyon yapılmış, yapısal optimizasyon neticesinde elde edilen optimize parametreler kullanılarak elastik sabitler hesaplanmıştır. Hesaplanan örgü parametresi önceki çalışmalar ile uyum içerisinde. Ayrıca belirlenen elastik sabitler mekanik kararlılık kriterlerini karşıladığından elastik modül, Vicker sertliği, erime sıcaklığı, Debye sıcaklığı, ses hızları, minimum termal iletkenlik ve anizotropi incelenmiştir. Çalışılan malzemenin Vicker sertliği ve sünek/kırılgan doğası analiz edilmiştir. Ayrıca iç enerji, titreşim enerjisi, entropi ve özgül ısı kapasitesi 0-800 K sıcaklık aralığında değerlendirilmiştir. Hesaplamalarda açık kaynak Quantum Espresso yazılımı ve bu yazılım ile dağıtımı yapılan thermo_pw paketi tercih edilmiştir. Yapılan çalışma ile Ni₂VAI bileşiğinin mekanik kararlı, sünek, anizotrop ve yumuşak olduğu görüldü.

Anahtar kelimeler

Heusler bileşikler; L₂₁-
tipi Ni₂VAI; Mekanik
özellikler; Elastik
modülü; Anizotropi;
Termodinamik
özellikler;

Investigation of Mechanical, Elastic and Thermodynamic Properties of Ni₂VAI Compound

Abstract

In this study, the structural, mechanical, and thermodynamic properties of Ni₂VAI compound from Heusler family, which has technological importance, were investigated theoretically by first principles method. Firstly, structural optimization was performed to determine the ground state and lowest energy level of the compound, and elastic constants were calculated using the optimized parameters obtained as a result of structural optimization. The calculated lattice parameter agrees with previous studies. In addition, elastic modulus, Vicker hardness, melting temperature, Debye temperature, sound velocities, minimum thermal conductivity and anisotropy were investigated since the determined elastic constants meet the mechanical stability criteria. The Vicker hardness and ductile/brittle nature of the studied material were analyzed. In addition, internal energy, vibrational energy, entropy, and specific heat capacity were evaluated in the temperature range of 0-800 K. In calculations, open-source Quantum Espresso software and thermo_pw package distributed with this software were preferred. With the study, it was seen that the Ni₂VAI compound was mechanically stable, ductile, anisotropic, and soft.

Keywords

Heusler compounds;
L₂₁-type Ni₂VAI;
Mechanical properties;
Elastic modulus;
Anisotropy;
Thermodynamic
properties;

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Sahip oldukları özellikler ile araştırmacıların ilgisini çeken Heusler bileşikleri tam Heusler, yarım Heusler, Çeyrek Heusler ve ters Heusler olmak üzere farklı sınıflarda gruplandırılmışlardır. Tam Heusler

bileşikleri A₂YZ formundadır. A geçiş metalleri, Y geçiş veya Lantanitlerden Z ise ana grup elementlerinden oluşur (Arıkan & Öztürk, 2021). Heusler alaşımların ideal kristal yapısı kübik L₂₁ yapıdır (Wang & Tung, 2020). Tam Heusler sınıfında

yer alan Ni₂VAI bileşiği, L₂₁ tipi kübik yapıda ve Fm-3m (no:225) uzay gurubunda bulunmakta olup, Al atomları 4a (0, 0, 0) Wyckoff, Ni atomları 8c ($\frac{1}{4}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{4}$) Wyckoff ve V atomları 4b ($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{2}$) Wyckoff konumunda bulunurlar. Birim hücrede 8 Ni, 4 V ve 4 tane de Al olmak üzere 16 atom vardır (Shi vd., 2019; Wen vd., 2017).

Heusler alaşımlarını tasarlamak, hazırlamak ve özelliklerini geliştirmek için bir takım deneysel ve/veya teorik çalışmalar yapılmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda Heusler alaşımların ferro manyetik özelliklerinin yanında yarı metalik, ferro manyetik şekil hafıza etkisi ve topolojik yalıtkan gibi fiziksel özelliklere sahip oldukları bildirilmiştir (Luo vd., 2016). Ni-Ti-Al alaşımları yüksek sıcaklık dayanımı, sürünme dayanımı, oksidasyon ve korozyon dayanımı ve düşük yoğunluk nedeni ile potansiyel yüksek sıcaklık malzemeleridir (Shi vd., 2019). Üçlü Heusler L₂₁-faz bileşiklerinden Ni₂XAl'a Ti ilavesinin yüksek sıcaklıkta sürünme mukavemetini büyük oranda arttığı rapor edilmiştir (Lin & Freeman, 1992). Ni₂VAI'ın özgül ısı, kohezif özellikleri ve elektronik yapısı deneysel ve teorik olarak araştırılmıştır. Ayrıca basıncın Ni₂VAI'ın süper iletkenliği, bulk modülü, Debye sıcaklığı ve ısı kapasitesi üzerine etkisi teorik olarak incelenmiştir (Lin & Freeman, 1992; da Rocha vd., 1999; Wen vd., 2017). Erime sıcaklığı, serbest enerji, titreşim enerjisi ve entropi gibi termodinamik özellikler üzerine yapılan deneysel veya teorik çalışmaya rastlanılmamıştır.

Seramik ve polimer malzemeler ile kıyaslandığında metaller, sahip oldukları yüksek mukavemet ve kırılma tokluklarından dolayı yük taşıma uygulamaları için daha uygundur (Niinomi, 2002; Staiger vd., 2006). Gelişen teknoloji ile günümüzde bir takım implant malzemeler üretilmektedir. İmplant malzemelere entegre olarak kullanılan biyo malzemeler bazen de izole edilmiş malzeme olarak da kullanılabilir. İmplant malzemelerde istenen özellikler biyo uyumluluk, mekanik özellikleri ve imalat olarak gruplandırılabilir. Biyo uyumlulukta malzemenin vücut dokusu ile birbirine olumsuz bir etki yaratmadan bir arada bulunabilmesidir. Olumsuz etkilerin varlığı/yokluğu in vitro ve in vivo ortamda yapılan birtakım çalışmalar ile tespit edilebilmektedir. İmalattan

beklenen malzemenin seri üretime uygun olması, ham maddeye erişimin kolay olması ve en nihayetinde uygun maliyet unsurlarını oluşturmaktadır. Mekanik özelliklerden akla ilk gelen ve teorik olarak da deneysel verilere çok yakın değerlerde hesaplanabilen elastikiyet, süneklik ve sertliktir. Yapılan işin doğası gereği zamandan ve kaynaktan tasarruf edebilmek için, malzemenin beklenen mekanik özelliklere haiz olması gerekmektedir. Doğal kemiğin sertliğine yakın ve toksin olmayan bazı alaşımların geliştirilmesi son zamanlarda aktif bir araştırma konusu olmuştur. Yapılan bu çalışma ile yeni malzeme arayışlarına katkı yapılması amaçlanmıştır.

Heusler alaşımları, sahip oldukları çok çeşitli özellikleri nedeni ile önemli bir araştırma konusu olmuşlardır. Bu malzemeler olgunlaşıp ticari uygulamalara daha yakın hale geldikçe mekanik özellikleri hem işlenmeleri hem de nihai kullanım için önemli bir aktör haline gelir (Everhart & Newkirk, 2019). Bu çalışmada, Anizotropi, Vicker sertliği, sünek/gevreklik gibi mekanik özelliklerinin yanında serbest enerji, titreşim enerjisi, entropi ve ısı sığasının sıcaklık ile değişimi, Debye sıcaklığı, erime sıcaklığı ve termal iletkenliği ilk prensipler yöntemi ile teorik olarak araştırılacaktır.

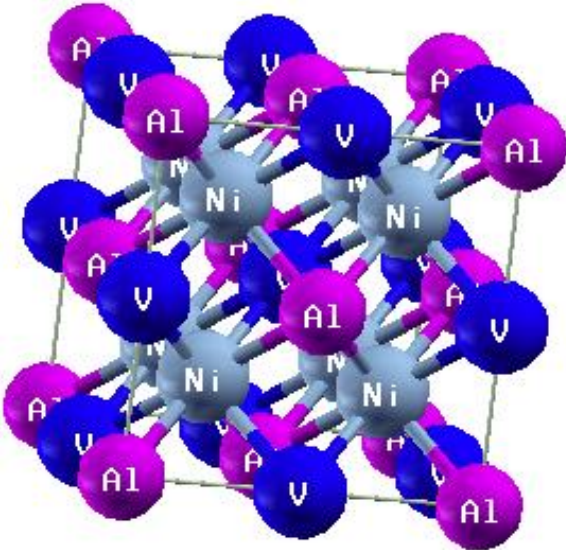
2. Materyal ve Metot

Bileşiğin temel durumunu ve en düşük enerji seviyesini tespit edebilmek için BFGS algoritması (Fischer & Almlöf, 1992) kullanılarak yapısal optimizasyon gerçekleştirildi. Optimize parametreler kullanılarak XCrySDen yazılımı (Kokalj, 2003) ile görselleştirilen birim hücre Şekil 1.'de verilmiştir. Yapısal optimizasyon işleminde optimize Ecut, EcutRho ve k-grid değerleri sırası ile 420 Ry, 1680 Ry ve 5×5×5 kullanıldı. Tüm enerji hesaplamalarında açık kaynak kodlu Quantum Espresso (QE) (Giannozzi vd., 2009), elastik hesaplarında QE paketinde dağıtımı yapılan thermo_pw scripti ile gerçekleştirildi. Enerji hesaplamaları pc'ler, optimizasyon ve elastik sabitlerin hesabında UHEM bilgisayarları kullanıldı. Al, Ni ve Ti atomlarının valans elektron konfigürasyonları sıra ile 3s² 3p¹, 3d⁸ 4s² ve 3s² 3p⁶ 3d² 4s². Valans elektronları ile iyonik çekirdek

arasındaki etkileşimi temsil etmek için QE internet sitesinden temin edilen Ultrasoft (USPP) ve PBESOL tipi fonksiyonel psödo potansiyel dosyaları tercih edildi.

3. Bulgular ve Tartışma

Yapısal optimizasyona, deneysel 5,803 Å (Wen vd., 2017) örgü ve diğer optimize hesaplama parametre değerleri kullanılarak başlanmış, BFGS algoritması ile yapılan yapısal optimizasyon neticesinde örgü sabiti 5,734 Å olarak tahmin edilmiştir. Hesaplanan bu değer ulaşılabilen literatür verileri ile Çizelge 1.'de kıyaslanmıştır. Çizelge 1.'den de açıkça görüleceği üzere; bulunan sonuç, diğer teorik ve deneysel veriler ile uyum içerisinde. Tahmin edilen 5,734 Å değerindeki örgü sabiti Wen ve ark., (2017)'in rapor ettiği deneysel değer ile kıyaslandığında %1,19 farklı olduğu görülmektedir. Bu fark teorik çalışmalar için kabul edilebilir limitler dahilindedir.



Şekil 1. Ni₂VAI bileşiğinin birim hücresi.

3.1. Mekanik Kararlılık ve Elastik Modül

Malzemenin kararlılığı, sertliği, anizotropluğu gibi birtakım özellikleri hakkında, elastik sabitleri bilgi vermektedir. Mekanik özellikleri hakkında bilgi veren elastik sabitler, deneysel olarak ölçülebildiği gibi teorik olarak da büyük doğruluk oranları ile hesaplamak mümkündür. Çalışılan malzeme hakkında bilgiler yeterince olgunlaştıkça ve uygulamaya safhasına yaklaştıkça mekanik özellikler

önem arz etmektedir. Optimize örgü sabiti ve diğer hesaplama parametreleri kullanılarak L₂₁ tipi kübik yapıda Ni₂VAI bileşiğinin elastik sabitleri hesaplanarak ulaşılabilen literatür verileri ile Çizelge 1.'de verilmiştir.

Çizelge 1. L₂₁ tipi kübik yapıda Ni₂VAI bileşiği için hesaplanan örgü parametresi ve elastik sabitler.

Referans	a(Å)	C ₁₁ (GPa)	C ₁₂ (GPa)	C ₄₄ (GPa)
Bu çalışma	5,739	225,3	189,2	119,5
Teori (GGA) ^a	5,81	201,8	171,1	110,8
Deneysel ^a	5,803			

a (Wen vd., 2017)

Kübik yapıdaki malzemelerin elastik sabitleri C₁₁, C₁₂ ve C₄₄ olmak üzere üç tane bağımsız elastik sabit ile karakterize edilmektedir. Bir bileşiğin mekanik olarak kararlı olabilmesi için elastik sabitlerinin Born kararlılık kriterlerini (Beckstein vd., 2001)

$$C_{11} > 0, C_{44} > 0, C_{11} > |C_{12}|,$$

$$(C_{11} + 2C_{12}) > 0 \quad (1)$$

sağlaması gerekmektedir. Üzerinde çalışılan Ni₂VAI bileşiğinin kararlılık kriterlerini sağlamasından dolayı bu bileşiğin mekanik olarak kararlı olduğu söylenebilir. Mekanik olarak kararlı olan bileşiklerin elastik sabitleri kullanılarak Bulk modül,

$$B_V = B_R = (C_{11} + 2C_{12})/3 \quad (2)$$

Shear modül,

$$G_V = \frac{C_{11} - C_{12} + 3C_{44}}{5} \quad G_R = \frac{5(C_{11} - C_{12})C_{44}}{4C_{44} + 3(C_{11} - C_{12})}$$

$$G = \frac{G_R + G_V}{2} \quad (3)$$

Young modül,

$$E = 9BG/(3B + G) \quad (4)$$

Poisson oranı,

$$\nu = \frac{3B - 2G}{2(3B + G)} \quad (5)$$

hesaplanabilir. Eşitliklerde geçen "V" alt indisi Voigt, "R" alt indisi Reuss yaklaşımını göstermektedir. Yukarıda verilen eşitlikler yardımı ile hesaplanan elastik modüllerin değerleri ulaşılabilen literatür verileri Çizelge 2.'de kıyaslanmıştır.

Çizelge 2. Ni₂VAI bileşiğinin Bulk, Young ve Shear modülleri, Poisson oranı.

	Bu çalışma	Teori (GGA)	Deney
Bulk (<i>GPa</i>)	201,24	181,3 ^a	
Shear (<i>GPa</i>)	<i>G_V</i>	78,89	
	<i>G_R</i>	36,73	
	<i>G</i>	57,81	52,2 ^a
Young (<i>GPa</i>)	158,27	142,8 ^a	
<i>G/B</i>	0,287	0,288 ^a	
Poisson	0,369	0,37 ^b	
Cauchy basıncı (<i>GPa</i>)	69,76	62,33 ^b	
Vicker sertliği (<i>GPa</i>)	1,98		
Yousef	5,05	4,57 ^a	
Tian	3,93		
<i>A^U</i>	5,739	6,428 ^a	
Anizotropi	<i>A_Z</i>	6,632	7,218 ^a
	<i>A_E</i>	1,918	
Ses hızı (m/s)	ϑ_m	3271,4	6210 ^b
	ϑ_s	2902,3	12220 ^b
	ϑ_t	6368,1	5510 ^b
Debye Sıcaklığı (K)	427,6	506,42 ^b	411 ±4,7 ^c
Minimum termal iletkenlik	Clarke	1,112	
	Cahill	1,306	
	Long	0,871	

^a (Wen vd., 2017), ^b (Sreenivasa Reddy & Kanchana, 2014), ^c (da Rocha vd., 1999)

G/B oranı, Cauchy basıncı ve Poisson oranına bakılarak malzemenin sünek(ductile)/kırılgan (brittle) doğası hakkında bilgi edinilebilir. *G/B* oranı için kritik değer 0,5'tir. Bu kritik değerden küçük ise sünek büyük ise kırılgan davranış sergiler. *G/B* değeri 0,287 olarak hesaplandığından sünek karakterde olduğu söylenebilir. Poisson oranı için bu kritik değer 0,26'dır. Hesaplanan bu oran 0,369 olduğundan malzeme sünek karakterdedir. Sünek doğaya sahip malzemelerin Cauchy basıncı pozitifdir. Hesaplanan pozitif Cauchy basıncı da *G/B* ve Poisson oranları ile ulaşılan yargıyı desteklemektedir.

3.2. Vicker Sertliği ve Anizotropi

Young, Shear ve Bulk modüllerinin değerlerinin büyüklüğü malzemenin sertliğinin bir göstergesi olarak kullanılabilir. Bu değerlerin büyük olması malzemenin sertliğine işaret eder. Bu çalışma ile çalışılan malzemenin Bulk modülü (201,24), Young modülü (158,27) ve Shear modülü (57,81) *GPa* olarak hesaplanmıştır. Malzemenin sertliği hakkında daha tatmin edici bilgiler alınabilmesi için Vicker sertliği (Chen vd., 2011), Yousef (Yousef vd.,

2006) ve Tian (Tian vd., 2012) modelleri geliştirilmiştir.

$$H_v = 2(k^2G)^{0.585} - 3 \quad (6)$$

$$H_v = \frac{(1-2\theta)E}{6(1+\theta)} \quad (7)$$

$$H_v = 0,92 k^{1,137} G^{0,708} \quad (8)$$

Bu eşitlikler yardımı ile Vicker sertliği sırası ile 1,98, 5,05, 3,93 *GPa* olarak tahmin edilmiştir. Hesaplanan Vicker sertliği 10 *GPa*'nın altında olduğundan yumuşak malzeme olduğu söylenebilir.

Malzeme bilimi ve mühendislik uygulamaları bakımından malzemenin anizotropisi önem arz etmesinden dolayı Ni₂VAI bileşiğinin anizotropisi incelenmiştir. Anizotropi, evrensel anizotropi (*A^U*) (Ranganathan & Ostoja-Starzewski, 2008), Chung-Buessem anizotropi (*A_G*) (Buessem & Chung, 1968), Zener anizotropi (*A_Z*) (Nye, 1985), elastik anizotropi faktörü (*A^E*) (Every, 1980) şeklinde ifade edilebilmektedir. İzotropik kristallerde *A_Z*=1, *A^U*=0 ve *A^E*=0 olur. Sıfır ve birden sapmalar anizotropiğin bir göstergesidir. Bu çalışma ile *A_Z*(6,632), *A^U*(5,739) ve *A^E*(1,918) bulunduğundan Ni₂VAI bileşiğinin anizotropik olduğu söylenebilir. Okuyucunun anizotropikleri daha rahat görebilmesini sağlamak için ELATE yazılımı (Gaillac vd., 2016) yazılımı ile görselleştirilerek Şekil 2.'de verilmiştir. Şekil 2.'den de bileşiğin anizotrop olduğu açıkça görülmektedir.

3.3. Termodinamik Özellikler

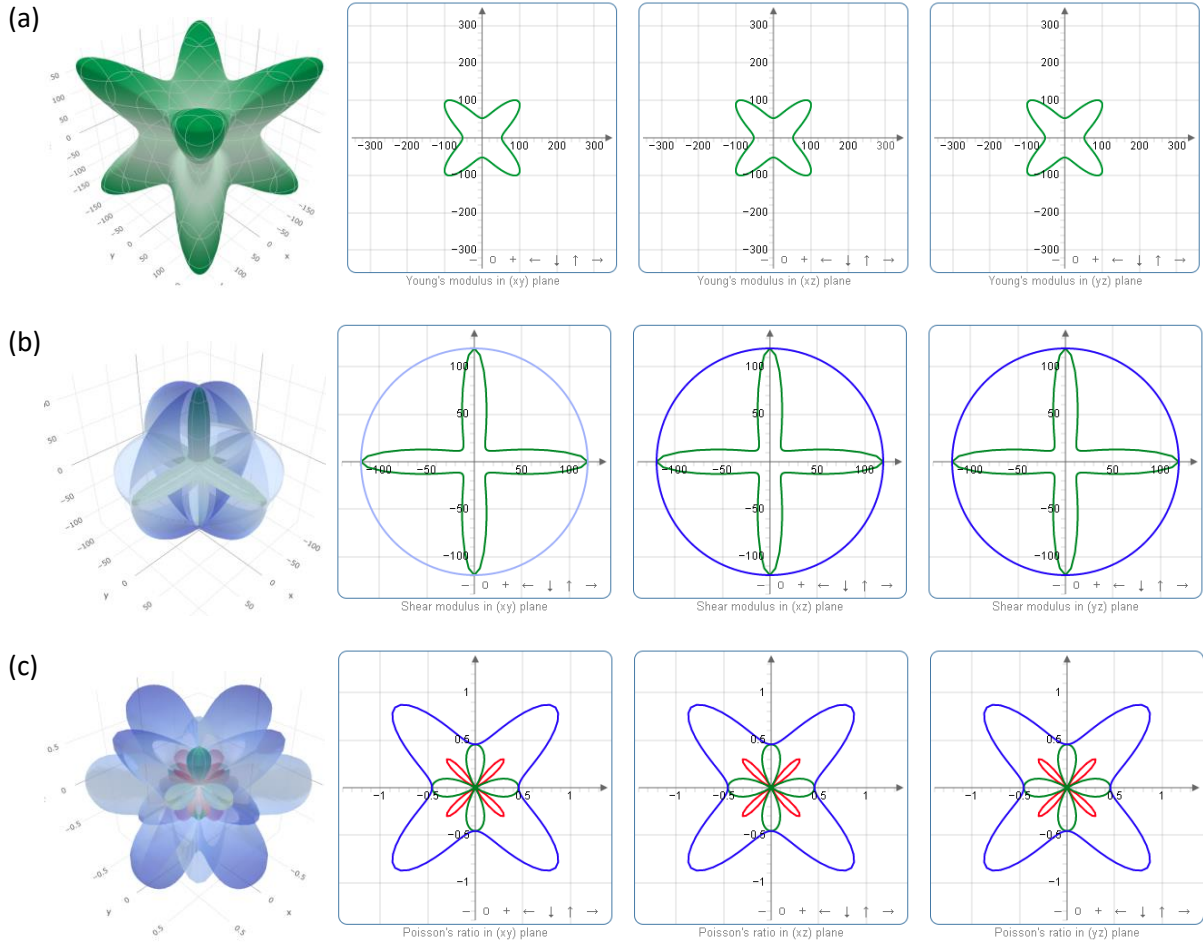
Elastik sabitleri ve bulk modülü ile erime sıcaklığı tahmin edilebilmektedir (Fine vd., 1984; Özer, 2018).

$$T_m = 560.4 + 7.805C_{11} - 3.094C_{12} - 1.086C_{44} \quad (9)$$

$$T_m = 553 + 5.91 C_{11} \quad (10)$$

$$T_m = 607 + 9.3 B \quad (11)$$

Ni₂VAI bileşiğinin erime sıcaklığı 1603 K (Eşitlik 9); 1884 K (Eşitlik 10), 2478 K (Eşitlik 11) olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2. Ni₂VAI bileşiğinin anizotropisinin 2/3D boyutta görselleştirilmesi, (a) Young modülü, (b) Shear modülü, (c) Poisson oranı

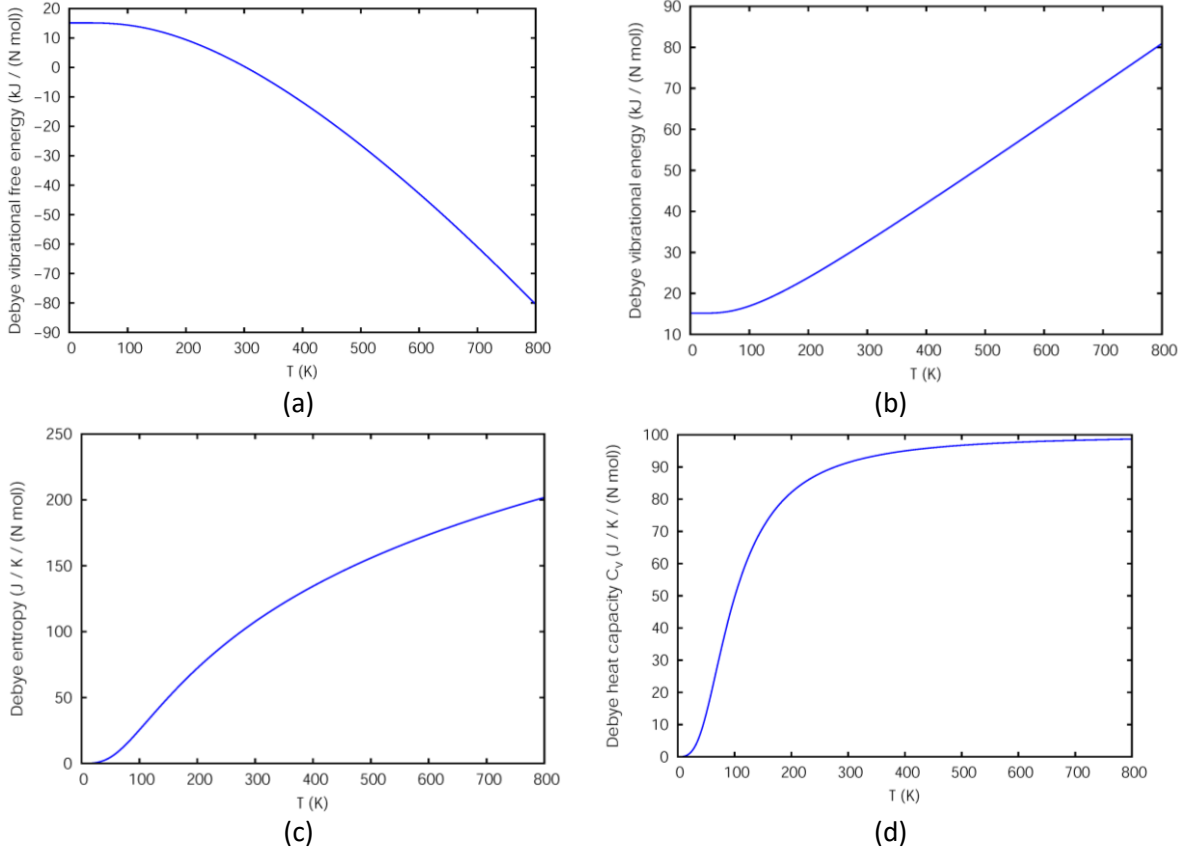
Malzemeler için bir diğer önemli özellik Debye sıcaklığıdır. Debye sıcaklığı, erime sıcaklığı, termal iletkenlik, sertlik vs özellikler ile yakından ilişkilidir. Bir malzemenin Debye sıcaklığının büyük olması termal iletkenliğin ve erime sıcaklığının da büyük olacağına işaret etmektedir (Gencer & Surucu, 2019). Debye sıcaklığı, ısı sığasının doyum noktasına ulaşmaya başladığı yer ve bir materyal için en yüksek frekans modunun uyarıldığı sıcaklık değeri olarak vasıflandırılmaktadır. Debye sıcaklığı ortalama ses hızından teorik olarak hesaplanabilmektedir (Anderson, 1963; Schreiber, 1973). Literatürde verilen eşitlikler kullanılarak hesaplanan Debye sıcaklığı 427,6 K, ortalama ses hızı (\bar{v}_m) 3271,4 m/s, enine ses hızı (\bar{v}_s) 2902,3 m/s, boyuna ses hızı (\bar{v}_t) 6368,1 m/s'dir. Hesaplanan Debye sıcaklığı Rocha ve ark. (1999) deneysel çalışmadaki bildirilen değere çok yakındır. Diğer teorik çalışmalardan bir miktar farklı olması kullanılan yazılım farkından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Kristallerin minimum termal iletkenliklerini hesaplayabilmek için Clarke (Clarke, 2003), Cahill (Cahill vd., 1992) ve Long (Long vd., 2015) ampirik bağıntılar önermiştir. Önerilen bu eşitlikler yardımı ile Ni₂VAI bileşiğinin minimum

termal iletkenlikleri 1,112 (Clarke model), 1,306 (Cahill model) ve 0,871 (long model) W m⁻¹ K⁻¹ olarak hesaplanmıştır.

Quantum-Espresso yazılımı ile dağıtımı yapılan thermo_pw yazılımı ile bileşiğin termodinamik özelliklerine optimize yapıya stres uygulanarak kuasi harmonik Debye modeli ile 0-800 K aralığında bakıldı. Şekil 3.a'da görüleceği üzere serbest enerjinin sıcaklığa bağlı değişiminde, artan sıcaklık ile ters orantılı bir azalmanın olduğu görülebilir. Şekil 3.b'de ise titreşim enerjisinin sıcaklıkla değişim eğrisi görülmektedir. Burada artan sıcaklıkta titreşim enerjisinde de bir artış söz konusudur. Netice itibarı ile, sıcaklığın artması titreşim enerjisinin artışına, serbest enerjinin azalmasına sebep olmaktadır. Şekil 3.c'de verilen entropi-sıcaklık değişim eğrisinden de görüleceği üzere artan sıcaklıkla entropideki artış beklenen bir sonuçtur. Isı sığasının sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 3.d'de verilmiştir. Isı sığası-sıcaklık değişim eğrisinde sıcaklık arttıkça ısı sığasındaki artışı ve yüksek sıcaklıklara doğru

kaydığında da Dulong-Petit limiti (Petit & Dulong, 1819) olarak adlandırılan 3NR (N birim hücredeki

atom sayıları, R gaz sabiti) değerine yaklaştığı görülmektedir.



Şekil 3. Ni₂VAl bileşiğinin kuasi harmonik Debye modeli ile 0-800 K aralığında, (a) serbest enerjinin, (b) titreşim enerjisinin, (c) entropinin, (d) ısı kapasitesinin sıcaklıkla değişim eğrisi.

4. Sonuç

Heusler ailesinden Ni₂VAl bileşiğinin temel durumu ve en küçük enerji seviyesine ulaşmak için yapısal optimizasyonu gerçekleştirilerek örgü sabiti literatürde verilen deneysel değerden %1,19 farklı 5,734 Å olarak tahmin edilmiştir. Optimize değerler kullanılarak kübik sistemlerin C_{11} , C_{12} ve C_{44} bağımsız elastik sabitleri hesaplandı. Hesaplanan bu değerler mekanik kararlılık kriterlerini sağladığından bileşiğin mekanik olarak kararlı olduğu söylenebilir. Mekanik kararlı bileşiğin elastik modülleri, Vicker sertliği, anizotropisi incelendi. Yapılan Cauchy basıncı, Pugh oranı ve Poisson oranı hesapları, incelenen materyalin sünek davranışa sahip olduğunu göstermiştir. Young, shear ve Bulk modülleri sıra ile 158,27, 57,81 ve 201,24 GPa hesaplandı. Üç farklı modele göre hesaplanan Vicker sertliğinin ortalaması 3,65 GPa olduğundan yumuşak bir

malzemedir. Yapılan detaylı izotropi analizlerinden anizotropik olduğu görüldü. 1000 K üzeri erime sıcaklığına sahip olduğundan yüksek sıcaklık uygulamalarına potansiyel aday malzemedir. Ortalama ses hızından Debye sıcaklığı 427,6 K tahmin edildi. Bu tahmin Rocha ve ark.(1999)'un bildirdiği 411K değerine çok yakındır. Elde edilen sonuçların teorik literatür verilerinden, kullanılan yazılım farkından kaynaklı olduğu düşünülen, bir miktar farklılık olmakla birlikte genel olarak uyum içerisinde olduğu görüldü.

Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan hesaplama kaynakları Ulusal Yüksek Başarımlı Hesaplama Merkezi'nin (UHeM), #1012332022 # numaralı desteğiyle, sağlanmıştır. Ayrıca yapılan bu çalışma, "Ni₂XAl (X=Ni, Zn, Ti, Cu, V, Sc) Bileşiklerinin Yapısal ve Mekanik Özelliklerinin İlk Prensipler Yöntemi ile İncelenmesi" isimli "OKÜBAP-2022-PT1-007" numaralı proje ile

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir.

5. Kaynaklar

- Anderson, O. L., 1963. A simplified method for calculating the debye temperature from elastic constants. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, **24**, 909–917.
- Arıkan, N., Öztürk, A. İ., 2021. Ab Initio Calculation of Mechanical and Thermodynamic Properties of Ag₂ScAl Compound. *Journal of Kadiri Faculty of Applied Sciences*, **1**, 116-126.
- Beckstein, O., Klepeis, J. E., Hart, G. L. W., Pankratov, O., 2001. First-principles elastic constants and electronic structure of α -Pt₂Si and PtSi. *Physical Review B*, **63**, 134112.
- Buessem, D. H., Chung, W. R., 1968. Anisotropy in Single-Crystal Refractory Compounds (F. W. Vahldiek S. A. Mersol (ed.); 1st editio). Springer US.
- Cahill, D. G., Watson, S. K., Pohl, R. O., 1992. Lower limit to the thermal conductivity of disordered crystals. *Physical Review B*, **46**, 6131.
- Chen, X.-Q., Niu, H., Li, D., Li, Y., 2011. Modeling hardness of polycrystalline materials and bulk metallic glasses. *Intermetallics*, **19**, 1275–1281.
- Clarke, D. R., 2003. Materials selections guidelines for low thermal conductivity thermal barrier coatings. *Surface and Coatings Technology*, **163–164**, 67–74.
- da Rocha, F. S., Fraga, G. L. F., Brandão, D. E., da Silva, C. M., & Gomes, A. A., 1999. Specific heat and electronic structure of Heusler compounds Ni₂TAl (T=Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta). *Physica B: Condensed Matter*, **269**, 154–162.
- Everhart, W., Newkirk, J., 2019. Mechanical properties of Heusler alloys. *Heliyon*, **5**, e01578.
- Every, A. G., 1980. General closed-form expressions for acoustic waves in elastically anisotropic solids. *Physical Review B*, **22**, 1746.
- Fine, M. E., Brown, L. D., Marcus, H. L., 1984. Elastic constants versus melting temperature in metals. *Scripta Metallurgica*, **18**, 951–956.
- Fischer, T. H., Almlöf, J., 1992. General methods for geometry and wave function optimization. *The Journal of Physical Chemistry*, **96**, 9768–9774.
- Gaillac, R., Pullumbi, P., Coudert, F.-X., 2016. ELATE: an open-source online application for analysis and visualization of elastic tensors. *Journal of Physics: Condensed Matter*, **28**, 275201.
- Gencer, A., Surucu, G., 2019. Investigation of structural, electronic and lattice dynamical properties of XNiH (X = Li, Na and K) perovskite type hydrides and their hydrogen storage applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, **44**, 15173–15182.
- Giannozzi, P., Baroni, S., Bonini, N., Calandra, M., Car, R., Cavazzoni, C., Ceresoli, D., Chiarotti, G. L., Cococcioni, M., Dabo, I., Dal Corso, A., De Gironcoli, S., Fabris, S., Fratesi, G., Gebauer, R., Gerstmann, U., Gougoussis, C., Kokalj, A., Lazzeri, M., ... Wentzcovitch, R. M., 2009. QUANTUM ESPRESSO: A modular and open-source software project for quantum simulations of materials. *Journal of Physics Condensed Matter*, **21**, 39.
- Kokalj, A., 2003. Computer graphics and graphical user interfaces as tools in simulations of matter at the atomic scale. *Computational Materials Science*, **28**, 155–168.
- Lin, W., & Freeman, A. J., 1992. Cohesive properties and electronic structure of Heusler L21-phase compounds Ni₂XAl (X=Ti, V, Zr, Nb, Hf, and Ta). *Physical Review B*, **45**, 61–68.

- Long, J., Shu, C., Yang, L., Yang, M., 2015. Predicting crystal structures and physical properties of novel superhard p-BN under pressure via first-principles investigation. *Journal of Alloys and Compounds*, **644**, 638–644.
- Luo, H., Xin, Y., Liu, B., Meng, F., Liu, H., Liu, E., Wu, G., 2016. Competition of L₂₁ and XA structural ordering in Heusler alloys X₂CuAl (X = Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni). *Journal of Alloys and Compounds*, **665**, 180–185.
- Niinomi, M., 2002. Recent metallic materials for biomedical applications. *Metallurgical and Materials Transactions A*, **33**, 477–486.
- Nye, J., 1985. Physical properties of crystals: their representation by tensors and matrices. Oxford University Press.
- Özer, T., 2018. Determination of melting temperature (H. Demirkaya, M. Canbulat, A. Pular, M. Eraslan, B. Direkci (ed.); ss. 87–99). 4th International Congress on Multidisciplinary Studies.
- Petit, A. T., Dulong, P. L., 1819. Recherches sur quelques points importants de la théorie de la chaleur. İçinde *Annales de chimie et de physique* (ss. 395–413).
- Ranganathan, S. I., Ostoja-Starzewski, M., 2008. Universal Elastic Anisotropy Index. *APS*, **101**, 5.
- Schreiber, E., 1973. *Elastic constants and their measurement*. McGraw-Hill Book Company.
- Shi, J., Zheng, A., Lin, Z., Chen, R., Zheng, J., Cao, Z., 2019. Effect of process control agent on alloying and mechanical behavior of L₂₁ phase Ni–Ti–Al alloys. *Materials Science and Engineering: A*, **740–741**, 130–136.
- Sreenivasa Reddy, P. V., Kanchana, V., 2014. Ab initio study of Fermi surface and dynamical properties of Ni₂XAl (X = Ti, V, Zr, Nb, Hf and Ta). *Journal of Alloys and Compounds*, **616**, 527–534.
- Staiger, M. P., Pietak, A. M., Huadmai, J., Dias, G., 2006. Magnesium and its alloys as orthopedic biomaterials: A review. *Biomaterials*, **27**, 1728–1734.
- Tian, Y., Xu, B., Zhao, Z., 2012. Microscopic theory of hardness and design of novel superhard crystals. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, **33**, 93–106.
- Wang, Y.-K., Tung, J.-C., 2020. Structural, electronic and magnetic properties of Ni₂XAl (X = V, Cr, Mn, Fe, and Co) Heusler alloys: An ab initio study. *Physics Open*, **2**, 100008.
- Wen, Z., Zhao, Y., Hou, H., Wang, B., Han, P., 2017. The mechanical and thermodynamic properties of Heusler compounds Ni₂XAl (X = Sc, Ti, V) under pressure and temperature: A first-principles study. *Materials & Design*, **114**, 398–403.
- Yousef, E. S., El-Adawy, A., El-KheshKhany, N., 2006. Effect of rare earth (Pr₂O₃, Nd₂O₃, Sm₂O₃, Eu₂O₃, Gd₂O₃ and Er₂O₃) on the acoustic properties of glass belonging to bismuth–borate system. *Solid State Communications*, **139**, 108–113.

AKÜ FEMÜBİD 23 (2023) 025703 (474-486)

AKU J. Sci. Eng. 23 (2023) 025703 (474-486)

DOI: 10.35414/akufemubid.1173661

Araştırma Makalesi / Research Article

Borlanmış DIN 1.2738 Kalıp Çeliğinin Yüzey Özelliklerinin ve Borlama Kinetiğinin İncelenmesi

İlyas TÜRKMEN¹¹ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Türkiye

Sorumlu yazar e-posta: ilyas.turkmen@cbu.edu.tr

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5424-5412>

Geliş Tarihi: 13.09.2022

Kabul Tarihi: 14.03.2023

Öz

Bu çalışmada ticari borlama karışımlarına alternatif olabilecek ve borik asit içeren bir borlama karışımı kullanılarak DIN 1.2738 plastik kalıp çeliği 1123, 1173 ve 1223 K sıcaklıklarında ve 3, 6 ve 9 saat sürelerinde borlanmıştır. Borlama işlemleri sonrasında altlık malzemelerin yüzeyinde oluşan borür tabakasının morfolojisi ve kalınlığı optik ve taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Testere dışı morfolojisinde, malzeme yüzeyine homojen dağılmış ve yaklaşık olarak 33 ile 148 µm aralığında değişen kalınlık değerine sahip tabakalar elde edilmiştir. X-ışını kırınımı ve enerji dağılımlı x-ışını spektroskopisi analizleri ile borür tabakasının kimyasal analizi yapılmıştır. Sadece Fe₂B fazı içeren tek fazlı bir borür tabakası oluşumu tüm numunelerde tespit edilmiştir. Borlanmış numunelere difüzyon kinetiği ile ilgili hesaplamalar yapılarak büyüme kinetiği parametreleri elde edilmiştir. Bu parametreler kullanılarak bir ampirik denklem elde edilmiştir. Bu denklem ile borür tabaka kalınlığının farklı işlem parametrelerine bağlı olarak tahmin edilebilirliği üzerine çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca işlem parametreleri değerlendirilerek bir regresyon modeli oluşturulmuş ve borür tabaka kalınlığının tahmini için alternatif bir denklem daha elde edilmiştir. Altlık malzeme için aktivasyon enerjisinin değeri 204,07 kJ/mol olarak tahmin edilmiştir. Sıcaklık ve zamanın bir fonksiyonu olarak borür tabakasının kalınlığını tahmin etmek için kontur diyagramları çizilmiştir. Borür tabakalarının yapışma karakteristiği Daimler-Benz Rockwell-C adhezyon testi ile incelenmiştir. Sonuç olarak altlık malzeme ile borür tabakaları arasındaki ara yüzey bağının sağlam olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler

Kutu Borlama; DIN 1.2738; Borik Asit; Difüzyon Kinetiği; Regresyon Analizi, Rockwell C Adhezyon Test

Investigation of Surface Properties and Boronizing Kinetics of Boronized DIN 1.2738 Mold Steel

Abstract

In this study, DIN 1.2738 steel was boronized at temperatures of 1123, 1173 and 1223 K and for 3, 6 and 9 hours using a boronizing mixture containing boric acid, which can be an alternative to commercial boronizing mixtures. The morphology and thickness of the boride layer formed on the surface of the substrates after boronizing processes were investigated by OM and SEM. The boride layers with a saw-tooth morphology, homogeneously distributed on the surface of the material and with thicknesses ranging from approximately 33 to 148 µm were obtained. Chemical analysis of the layer was performed by XRD and EDS analyses. The formation of a single-phase layer containing only Fe₂B phase was detected in all samples. The growth kinetic parameters were obtained by making calculations about the diffusion kinetics of the boronized samples. An empirical equation was obtained using these parameters. With this equation, the studies were carried out on the predictability of layer thickness depending on different process parameters. In addition, a regression model was created by evaluating the process parameters and another equation was obtained for the estimation of the layer thickness. The value of activation energy for the substrate was estimated as 204.07 kJ/mol. Contour diagrams were drawn to estimate the thickness of the layer as a function of temperature and time. The adhesion characteristics of the layers were investigated by the Daimler-Benz Rockwell-C adhesion test. As a result, it was determined that the interfacial bond between the substrate material and the layers was strong.

Keywords

Powder-Pack Boronizing; DIN 1.2738; Boric Acid; Diffusion Kinetics; Regression Analysis; Rockwell C Adhesion Test

1. Giriş

Kalıpla üretim, seri üretim yöntemlerinden biri olarak endüstriyel alanda kabul görmüş yöntemlerden biridir. Kalıplar sayesinde çeşitli malzemelere şekiller verilerek çok çeşitli ürünler üretilebilmektedir. Dövme, döküm, ekstrüzyon, enjeksiyon kalıplarının üretiminde malzeme olarak genellikle takım çelikleri kullanılmaktadır. Teknolojideki gelişimin ve rekabetin her geçen gün arttığı günümüzde kalıplardan istenen özelliklerin ve performans beklentilerinin artması kalıpların üretiminde kullanılan çelik malzemelerin özelliklerindeki beklenti ve istekleri de artırmaktadır. Bu özellikler kalıpların kullanım amaçlarına göre farklılık göstermekle birlikte aşınmaya ve korozyona karşı yüksek direnç ile işleme kabiliyetinin yüksek olması gibi özellikler öncelikle en çok arzu edilen temel özelliklerdir. Bunlar direkt olarak kalıp malzemesinin kimyasal kompozisyonu, ısıl işlem geçmişi, üretim yöntemi vb. gibi faktörlere bağlıdır. Plastik kalıp çelikleri; aşınmaya, basmaya ve korozyona karşı iyi dayanım gösteren, işlenebilirlik kabiliyetleri çok iyi olan ve içeriğinde C, Si, Mo, Mn, Cr, Ni ve V gibi çeşitli alaşım elementlerinin bulunduğu alaşımlı çelik malzemelerdir. Yüzeysel sertleşebilen, ön sertleştirilmiş, çekirdeğe kadar sertleşebilen, nitrasyon ve korozyona dayanımlı çelikler olmak üzere plastik kalıp çelikleri beş grupta ifade edilmektedir. Ön sertleştirilmiş plastik kalıp çeliklerinden biri olan DIN 1.2738 (AISI P20+Ni) çeliği plastik enjeksiyon ve ekstrüzyon kalıplarında sıklıkla tercih edilmektedir (Erdem 2021, Öztürk 2021).

Demir esaslı malzemelerde alaşım elementlerinin varlığı ve bunların miktarındaki değişimlerle istenilen özellikler elde edilebilmektedir. Ancak malzemenin yüzey performansının önemli olduğu durumlarda ve yüzey özelliklerinin (tribolojik (aşınma, sürtünme), mekanik (sertlik, yorulma), oksidasyon ve korozyon özellikleri gibi) geliştirilmesi gereken durumlarda yüzey işlemleri ön plana çıkmaktadır. Yüzey işlemleri genellikle yüzey dönüşüm ve kaplama işlemleri olarak ikiye ayrılmaktadır ve borlama işlemi yüzey dönüşüm işlemlerinden biri olarak tanımlanmaktadır.

Borlama işlemi ile malzeme yüzeyinde oluşturulan borür tabakaları sayesinde yüzey sertliği önemli seviyede artırılırken, aşınma ve korozyon dayanımı da geliştirilebilmektedir. Birçok borlama yöntemi (sıvı, gaz, plazma borlama vb.) olmasına rağmen gerek güvenli ve kolay bir şekilde uygulanabilmesi gerek işlem maliyetinin düşük olması nedeniyle diğer yöntemlere göre kutu borlama yöntemi daha çok tercih edilmektedir. Bu yöntemde toz formda borlama karışımları kullanılırken işlem yüksek sıcaklıklara dayanıklı kutularda genellikle 700-1050°C sıcaklıklarında ve 1-12 saat işlem sürelerinde gerçekleştirilmektedir. Çoğunlukla patentlenmiş ticari borlama karışımları (EKabor vb.) borlama işlemlerinde tercih edilirken daha düşük maliyetli alternatif karışımlar da geliştirilerek borlama işlemlerinde kullanılmaktadır. Türkmen, ticari bir borlama karışımı olan ve sıklıkla kullanılan Ekabor II ile geliştirdiği borik asit içeren alternatif borlama karışımının maliyetini karşılaştırmış ve alternatif karışımın maliyetinin ticari ürünün maliyetinin yaklaşık 1/3'ü olduğunu tespit etmiştir (Türkmen 2018).

DIN 1.2738 çeliğinin kimyasal kompozisyonuna yakın içeriğe sahip DIN 1.2842, DIN 1.4849, AISI P20, AISI H13 ve AISI D2 gibi çeliklere uygulanan borlama işlemleri ve bunların sonuçları literatürde yer almaktadır (Uslu *et al.* 2007, Kabadayı 2013, Kara *et al.* 2016, Topuz 2016, Keddama *et al.* 2017, Kayalı *et al.* 2018). Bu çalışmalarda genellikle ticari borlama karışımlarının kullanıldığı, çalışmaların genellikle 850-1050°C sıcaklıklarında ve 2-8 saat aralıklarındaki işlem sürelerinde gerçekleştirildiği görülmektedir. Borlama sonrası altlık malzeme yüzeyinde esas olarak demir borür (FeB, Fe₂B) oluşumlarının gözlemlendiği ancak alaşım içeriğine bağlı olarak MnB ve CrB gibi fazların varlığı da tespit edildiği ifade edilmektedir. Keddama ve arkadaşları ile Kara ve arkadaşları borlama işlemi ile AISI P20 çeliğinin tribolojik özelliklerinin geliştiğini ortaya koymuşlardır (Kara *et al.* 2016, Keddama *et al.* 2017). Kayalı ve arkadaşları yaptıkları testler sonucunda borlama uygulaması ile AISI P20 çeliğinin aşınma ve korozyon direncinin arttığını tespit etmişlerdir (Kayalı *et al.* 2018).

Bu çalışmada borik asit içeren bir borlama karışımı hazırlanıp kullanılarak DIN 1.2738 çeliği kutu borlama yöntemiyle borlanmıştır. Borlama sonrası malzeme yüzeyi XRD ve EDS gibi genel kimyasal karakterizasyon yöntemleri ile incelenmiş, OM (optik mikroskop) yardımıyla detaylıca mikroyapısal açıdan incelenmiştir. Borür tabakasının büyüme kinetiği incelenmiş büyüme hızı sabiti ve aktivasyon enerjisi değerleri belirlenmiştir. Borür tabaka kalınlığının tahmin edilebilmesi için ampirik ve regresyon denklemleri elde edilmiştir. Elde edilen borür tabakalarının adezyon kalitesi (davranışı) Rockwell C adezyon testleri ile incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, plastik enjeksiyon kalıplarının üretiminde yaygın olarak kullanılan DIN 1.2738 çeliği borlama işleminde altlık malzeme olarak kullanılmıştır.

Çizelge 1. Borlama işleminde kullanılan altlık malzemenin kimyasal kompozisyonu

Malzeme	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu	Fe
DIN 1.2738	0,3 6	0,2 6	1,4 4	1,7 1	0,2 3	1,0 2	0,1 0	Kala n

Altlık malzemenin kimyasal kompozisyonu (Çizelge 1) optik emisyon spektrometresi yardımıyla tespit edilmiştir. Silindirik şekildeki malzeme $\varnothing 15 \times 10$ mm boyutlarında kesilmiş ve borlama işlemlerinde kullanılmıştır. Borlama işleminden önce numune yüzeyleri 400-2000 gritlik zımpara kağıtları kullanılarak zımparalanmış ve sırasıyla saf su ve etanol kullanılarak ultrasonik banyoda temizlenmiştir. Böylelikle borlama işlemleri öncesinde tüm numuneler için standart bir yüzey kalitesi elde edilmiştir. Ayrıca bor elementinin difüzyonuna engel olabilecek muhtemel kirlilikler de temizlenmiştir.

2.1. Borlama İşlemi

Çelik numuneler 1123, 1173 ve 1223 K sıcaklıklarında ve 3, 6 ve 9 saat sürelerinde kutu borlama yöntemiyle borlanmıştır. Borlama işleminde kullanılmak üzere ticari olmayan ve bor

kaynağı olarak borik asit içeren bir borlama karışımı kullanılmıştır.

Çizelge 2. Borlama karışımının içeriği ve işlem parametreleri

Numuneler	Sıcaklık (K)	Süre (Saat)	Borlama Karışımı (Ağ. %)
A3		3	
A6	1123	6	
A9		9	
B3		3	
B6	1173	6	%72,5 SiC + %22,5 H ₃ BO ₃ + %5 KBF ₄
B9		9	
C3		3	
C6	1223	6	
C9		9	

Borlama işlemi parametreleri, borlama karışımını oluşturan tozlar ve bunların karışımdaki oranları Çizelge 2’de görülmektedir. Borlama karışımında bor kaynağı olarak borik asit (H₃BO₃), aktivatör olarak potasyum tetrafloroborat (KBF₄) ve seyreltici olarak ise silisyum karbür (SiC) tozları yer almaktadır. Bu tozlar belirtilen oranlarda bir araya getirilmiş ve homojen bir karışım sağlanabilmesi için karıştırıcıda yeterince karıştırılmıştır.

Hazırlanan numuneler silindirik çelik bir kutu içerisinde borlama tozu karışımına gömülmüştür. Her işlemde 3 çelik numune borlanmıştır. Kutu, kül fırını içerisine yerleştirilmiş ve atmosferik koşullar altında Çizelge 2’de ifade edilen sıcaklık ve sürelerde borlama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Proses tamamlandığında kutu soğuması (oda sıcaklığına gelmesi) için fırın içerisinde bekletilmiştir.

2.2. Karakterizasyon Teknikleri

Borlanmış numuneler düşey kesitinden kesilip sıcak kalıplama yöntemiyle kalıplandıktan sonra zımparalama ve parlatma işlemlerine tabi tutulmuştur. Numuneler zımparalandıktan sonra 1 μm ’luk alümina (Al₂O₃) süspansiyon kullanılarak parlatılmıştır. Son aşamada numuneler mikroyapısal inceleme öncesinde %3 ‘lük Nital çözeltisi kullanılarak dağlanmışır. Hazırlanan numuneler optik mikroskop (Nikon LV 100) ile incelenmiştir. Borür tabakalarının kalınlığı optik mikroskop ile entegre çalışan Clemex görüntü analiz yazılımı kullanılarak ölçülmüştür. Borür tabakasının kimyasal yapısı XRD ve EDS analizleri ile tespit edilmiştir. Borür tabakasının faz yapısı

XRD analizi (Panalytical Empyrean) ile tespit edilmiştir. Dalgaboyu $\lambda = 1.5405 \text{ \AA}$ olan $\text{CuK}\alpha$ ışınımının (radyasyonu) kullanıldığı bu analizde tarama aralığı 2θ : 20° - 90° seçilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen piklerin hangi fazları temsil ettiği X'Pert HighScore Plus programı yardımıyla belirlenmiştir. Seçilen borlanmış numunenin (B6) kesitindeki farklı bölgelerde EDS yöntemiyle alansal elementel analizler yapılarak bor ve diğer elementlerin varlığı araştırılmıştır. Borür tabakalarının yapışma kalitesini belirlemek üzere VDI 3198 standardına (Vidakis *et al.* 2003) uygun olarak Daimler-Benz Rockwell C adhezyon testleri yapılmıştır. Seçilen numunelerin yüzeylerine bu teknik ile vickers uç yardımıyla 150 kg'lık yük uygulanarak tabaka üzerinde 3 farklı bölgede hasar oluşturulmuştur. Oluşturulan bu hasar izlerinden uygun olan seçilerek SEM'de detaylıca görüntülenmiştir. Standartta belirtilen adhezyon (yapışma) kalitesi kriterlerine göre değerlendirmeler yapılarak tabakanın uygun olup olmadığı tespit edilmiştir.

2.3. Difüzyon Kinetiği

Borlama işlemi difüzyonel bir işlemdir. Borür tabakasının büyüme kinetiği (borür tabakasının kalınlığı) borlama ortamının ve altlık malzemenin kimyasal bileşimine ve özellikle borlama işleminin gerçekleştirildiği işlem sıcaklığına ve süresine bağlı olduğu bilinmektedir (Allaoui *et al.* 2006, Campos-Silva *et al.* 2013). Borlanmış çelik malzemelerde borür tabakasının büyüme kinetiği genellikle bor elementinin Fe_2B ve/veya FeB fazlarına difüzyonu ile kontrol edilmektedir. DIN 1.2738 çeliği için bor aktivasyon enerjisinin tespiti için aşağıda belirtilen varsayımlar göz önüne alınmıştır:

- Büyüme kinetiği, Fe_2B tabakasındaki bor difüzyonuyla kontrol edilmektedir.
- Fe_2B fazının çekirdeklenmesi için gerekli kuluçka süresi ihmal edilmiştir.
- Bor atomlarının akışı numune yüzeyine diktir ve böylece borür tabakası büyümektedir.
- Borlama işlemi sırasında borür tabakasındaki bor konsantrasyonu sabit kalmaktadır.

- Tabaka büyümesi parabolik kurala uymaktadır ve borlanan numune kalınlığıyla karşılaştırıldığında borür tabakası çok incedir.

- Borlama işlemi sırasında, numunenin her tarafının aynı sıcaklıkta olduğu ve sıcaklığın sabit olduğu varsayılmaktadır (Türkmen *et al.* 2018).

Büyüme kinetiği çalışmasında, borlanmış numunelerin yüzeyinde oluşan borür tabakalarının kalınlık değerleri, II. Fick Kanunu'ndan türetilen parabolik büyüme kanunu (denklem 1) ve Arrhenius Denklemi (denklem 2) birlikte ele alınarak aktivasyon enerjisi (Q), büyüme hızı sabiti (K), büyüme hızı sabiti faktörü (K_0) gibi borür tabakası büyüme kinetiği parametreleri elde edilmiştir. Ayrıca farklı işlem sıcaklığı ve sürelerinde oluşabilecek borür tabakası kalınlıklarının tahmin edilebilmesi için de bir ampirik denklem elde edilmiştir.

İşlem sıcaklığı ve süresine bağlı olarak borür tabakası kalınlığında meydana gelen artış işlem süresiyle parabolik olarak değişmektedir (denklem 1) (Mathew *et al.* 2014). Borür tabakası kalınlığının karesi zamanın bir fonksiyonu olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$x^2 = Kt \quad (1)$$

K parametresi, difüzyon katsayısı (D) ve konsantrasyon gradyanını içeren büyüme hızı sabitidir. Büyüme hızı sabiti (K) difüzyon katsayısına (D) bağlıdır. Büyüme hızı sabiti ve sıcaklık arasındaki ilişki Arrhenius denklemiyle (denklem 2) ifade edilebilir (Boonplook *et al.* 2014):

$$K = K_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

K_0 : büyüme hızı sabiti faktörü, Q: aktivasyon enerjisi (J/mol), R: gaz sabiti (J/molK), T: sıcaklık (K). Denklem 2'nin her iki tarafının doğal logaritması alındığında aşağıda belirtilen denklem 3 elde edilmektedir:

$$\ln K = \ln K_0 + \left(-\frac{Q}{RT}\right) \left(\frac{1}{T}\right) \quad (3)$$

İlk olarak farklı işlem sıcaklığı ve sürelerinde elde edilen borür tabakası kalınlığı değerlerinin

karesinin borlama süreleri ile değişim grafiği (x^2-t) çizilmiştir. Burada elde edilen eğriler doğrusaldır ve eğimi K değerlerini vermektedir. Sonrasında $\ln K$ 'nın $1/T$ ile değişim grafiği çizilmiş ve elde edilen eğrinin yine bir doğru olduğu görülmüştür. Bu doğrunun eğimi $-Q/R$ değerini vermektedir. Bu değerden aktivasyon enerjisi (Q) hesaplanmıştır. Doğrunun $\ln K$ eksenini kestiği nokta ise $\ln K_0$ değerini vermektedir. Buradan da K_0 değeri elde edilmiştir (Barut vd. 2014).

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Mikroyapısal İncelemeler

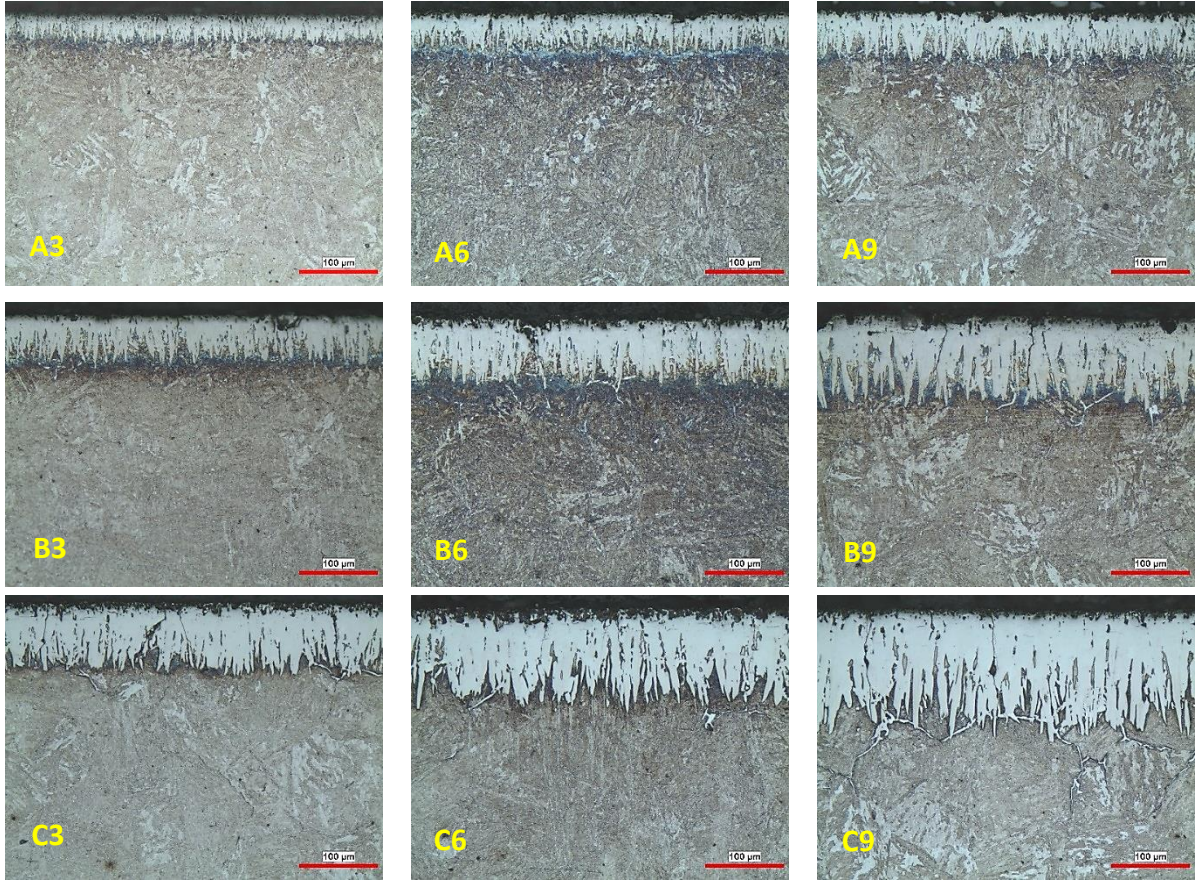
Farklı işlem parametrelerinde (Çizelge 2) gerçekleştirilen borlama işlemleri sonucunda elde edilen borlanmış numuneler optik mikroskop ile görüntülenerek mikroyapısal açıdan incelenmiştir. Şekil 1 incelendiğinde, tüm numunelerin yüzeyinde borür tabakası oluşumu gözlemlenmekle beraber genel olarak kesit görüntülerine bakıldığında borür tabakası ve matris bölgesi olmak üzere iki farklı bölgenin varlığı görülmektedir. Borür tabakalarının tüm yüzeyde homojen olarak yer aldığı ve testere dışı morfolojisinde olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanında tüm numunelerde tek fazlı (Fe_2B) bir borür tabakası oluşumu gözlemlenmiştir.

Literatürdeki benzer çalışmalarda mikroyapı görüntüleri incelendiğinde borlanan alaşımsız ya da düşük alaşımlı çeliklerin yüzeylerinde oluşan borür tabakasında eğer çift fazlı (Fe_2B+FeB) bir tabaka oluşumu durumu var ise tabakalar arasında bir kontrast farkı olduğu görülmektedir. FeB tabakası Fe_2B tabakasının üzerinde yer almaktadır ve daha koyu bir renktedir (Allaoui *et al.* 2006, Türkmen and Yalamaç 2022). Tabaka mikroyapısal açıdan bu şekilde incelendiğinde kimyasal analiz yapmadan da tabakanın tek ya da çift fazlı olduğu hakkında yorum yapılabilmektedir. Bu çalışmada da bu sonuçlara göre tüm numunelerde tek fazlı bir tabaka oluşumu görülmektedir.

Testere dışı morfolojisi özellikle borlanmış çelik malzemelerin yüzeyinde oluşan borür tabakaları

için karakteristik bir sonuç olarak ifade edilmektedir. Bor atom yoğunluğu Fe_2B 'nin hacim merkezli tetragonal kafes yapısında [001] doğrultusu boyunca maksimumdur. Borun kafes difüzyonunun bu doğrultu boyunca daha kolay olması nedeniyle Fe_2B kristalleri büyüme yönü olarak bu doğrultuyu tercih etmektedir. Borür tabakalarının büyümesi anizotropik bir yapıya sahiptir ve difüzyon esaslı bir işlem olarak ifade edilmektedir. Böylece daha yüksek işlem sıcaklıkları ve süreleri Fe_2B kristallerinin bu morfolojide kalması için zorlamaktadır (Palombarini and Carbuicchio 1987). Testere dışı morfolojisi; işlem sıcaklığı ve süresi gibi özellikler ile birlikte altlık malzemenin sahip olduğu alaşım elementlerine ve bunların miktarına da bağlıdır. Borür tabakası ve altlık malzeme arasında iyi bir bağlantı ve yapışma sağlayan bu morfolojik yapı genellikle alaşımsız ve düşük alaşımlı çeliklerin borlanması sonucunda elde edilmektedir (Medvedovski 2016, Türkmen and Yalamaç 2022).

Ortalama borür tabakası kalınlıklarının tespiti için borlanmış numunelerin borür tabaka kalınlıkları optik mikroskop yazılımı yardımıyla ölçülmüştür. Ölçüm sonuçlarının yüksek doğrulukta olması için tabakanın farklı bölgelerinden olmak kaydıyla çok sayıda ölçüm alınarak sonuçlar elde edilmiştir. Ölçüm sonuçlarının doğruluğu için tabakanın farklı bölgelerinden 20'den fazla ölçüm alınması gerektiği belirtilmektedir (Kaouka *et al.* 2013). Çizelge 5'de verilen, numunelere ait borür tabakalarının ortalama kalınlık değerleri incelendiğinde, genel olarak işlem sıcaklığı ve süresindeki artışa bağlı olarak tabaka kalınlıklarının arttığı görülmektedir. C9 numunesinin en kalın borür tabakasına (148,19 μm), A3 numunesinin ise kalınlık değeri en düşük tabakaya (33,94 μm) sahip olduğu tespit edilmiştir. İşlem sıcaklığı, işlem süresi, altlık malzemenin kimyasal içeriği ve borlama karışımı gibi prosese ait etmenlerin borlama işleminde borür tabaka kalınlığını etkileyen önemli faktörler olduğu ifade edilmektedir (Ozbek *et al.* 2004, Allaoui *et al.* 2006).



Şekil 1. Farklı işlem parametrelerinde borlanan numunelerin düşey kesitlerinden alınan optik mikroskop görüntüleri (200X büyütme)

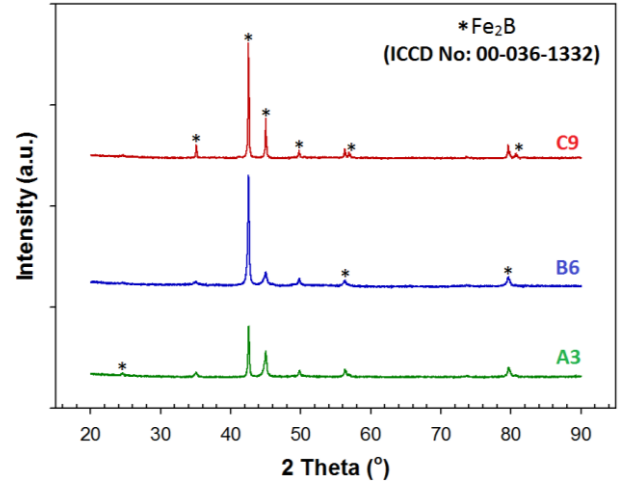
3.2. Borür Tabakasının Kimyasal Analizi

Borür tabakasındaki mevcut borür fazlarının tespiti için seçilen borlanmış numunelere x ışınları kırınımı (XRD) analizi yapılmıştır. A3, B6 ve C9 numunelerine yapılan XRD analizi sonucuna ilişkin XRD paternleri Şekil 2’de verilmiştir. Elde edilen analiz sonucuna göre borür tabakasında sadece tek bir fazın (Fe_2B) varlığı tespit edilmiştir. Bu sonuç mikroyapısal inceleme sonucunda ortaya konan kanıyı doğrulamaktadır. B6 numunesinin düşey kesit SEM görüntüsü ve alansal EDS analiz sonuçları Şekil 3’te görülmektedir. EDS analizleri ile özellikle borür tabakasında bulunan muhtemel elementlerin (Fe, B) varlığı ve bunların konsantrasyonları incelenmek istenmiştir.

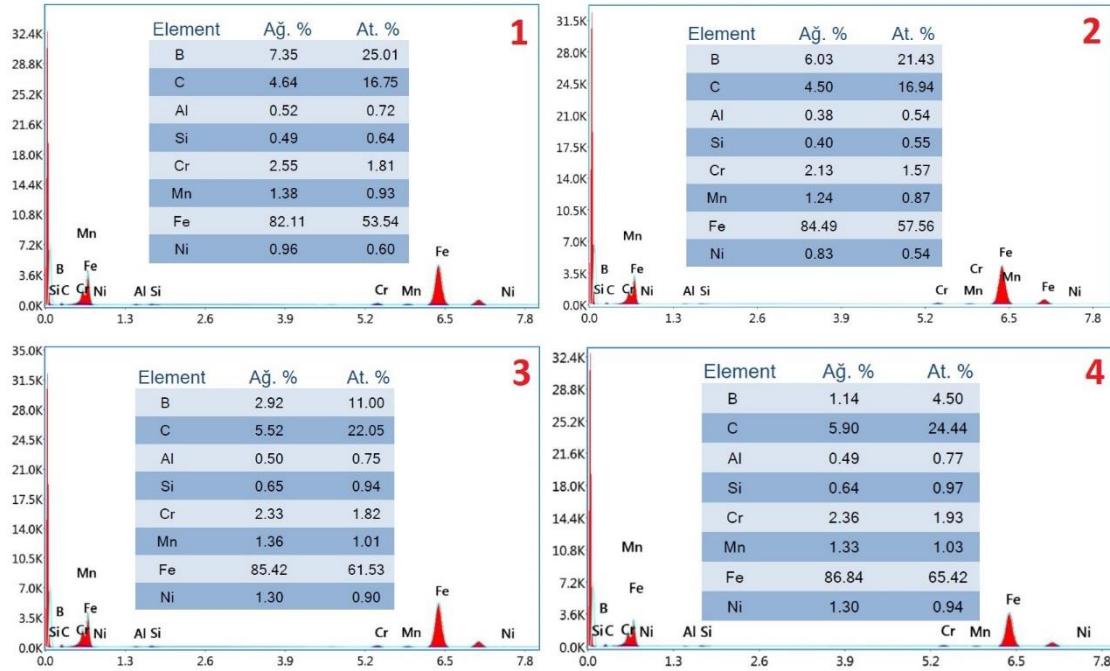
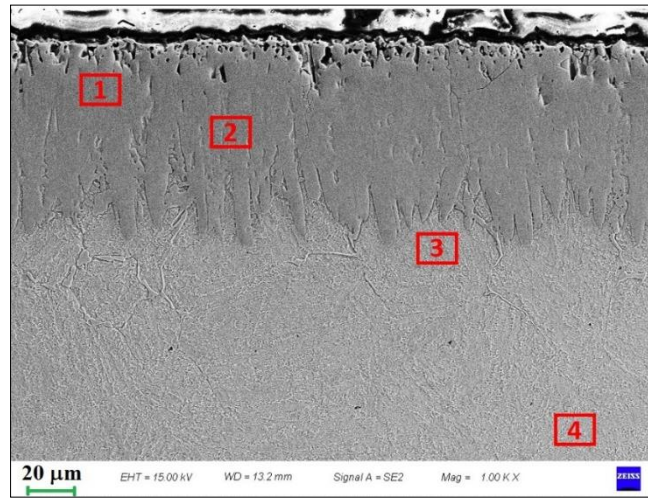
Tabaka üzerinden alınan 1 ve 2 nolu bölgelere ilişkin sonuçlar incelendiğinde B elementinin varlığı tespit edilmiştir. Tabakada bulunması beklenmeyen C, Si ve Al gibi elementlerin de tabakada bulunduğu görülmektedir. Ancak numune hazırlığı sırasında zımparalama işleminde

kullanılan SiC aşındırıcı kağıtlar ve parlatma işleminde kullanılan alümina (Al_2O_3) süspansiyondan kaynaklı olarak meydana gelen muhtemel kirlenmeden dolayı bu sonucun ortaya çıktığı düşünülmektedir. Fe_2B fazının teorik olarak ağırlıkça %8,83 oranında bor elementi içerdiği bilinmektedir (Kayalı 2013). Tabakada tespit edilen ağırlıkça B elementi miktarları (%7,35 ve %6,03) bu değere çok yakındır ve tabakada Fe_2B fazının varlığını doğrulamaktadır. Difüzyon olayının başladığı yüzeyden matrise doğru (1→4) borür tabakası incelendiğinde bor elementinin miktarında giderek bir azalma görülmektedir. Ayrıca matris bölgesinde gerçekleştirilen analizlere bakıldığında çok az miktarda bor elementi varlığı söz konusudur. Tabakanın hemen altındaki bölgede (3) borür tabakasından bu bölgeye düşük miktarlarda da olsa B elementi difüze olabilmektedir. Matris bölgesinde (4) tespit edilen çok az miktardaki B elementi varlığı ise mikroyapısal inceleme öncesinde gerçekleştirilen

numune hazırlığı neticesinde yaşanan kirlilik ve bulaşmalardan kaynaklı olduğu düşünülmektedir. 3 ve 4 nolu analizlerde elde edilen diğer kantitatif elementel analiz sonuçlarının altlık malzemenin iç yapısındaki elementel kompozisyon (Çizelge 1) dağılımına yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 2. A3, B6 ve C9 numunelerine ait x ışınları kırınımı analiz paternleri

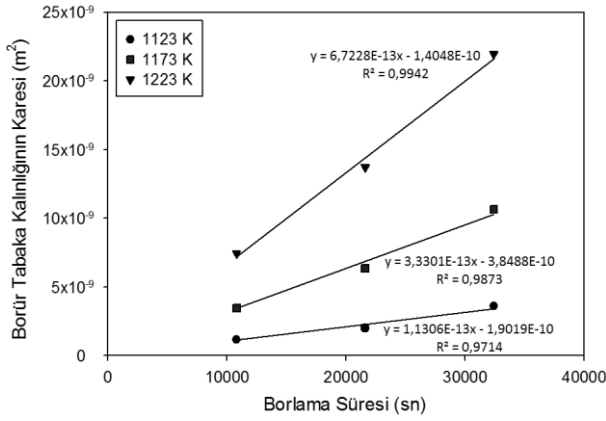


Şekil 3. B6 numunesine ait kesit SEM görüntüsü ve EDS analizi

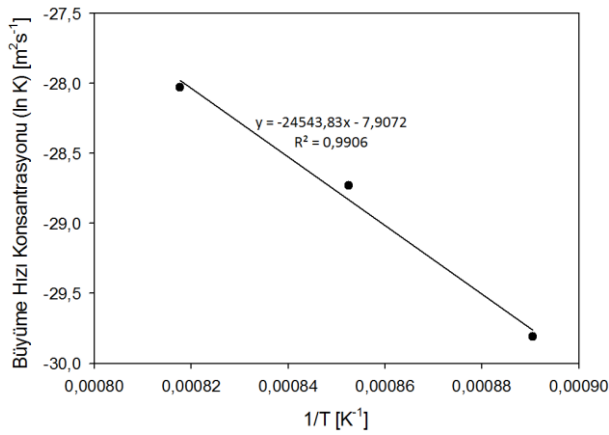
3.3. Borür Tabakası Büyüme Kinetiği

1123, 1173 ve 1223 K sıcaklıklarında ve 3, 6 ve 9 saat sürelerinde borlanmış numunelerin deneysel

tabaka kalınlığı değerleri (Çizelge 5) tespit edildikten sonra bu değerlerin karesinin borlama süreleri ile değişim grafiği çizilmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Borür tabaka kalınlıklarının karesinin borlama süresiyle değişimi



Şekil 5. Borlanmış numunelerin lnK-1/T diyagramı

İşlem parametrelerine bağlı olarak borür tabakası kalınlığında meydana gelen artışın işlem süresiyle yaklaşık olarak parabolik bir değişim gösterdiği Şekil 4 'te anlaşılmaktadır. Şekil 4'teki grafik incelendiğinde elde edilen eğrilerin doğrusal olduğu ve eğimi K değerlerini (büyüme hızı sabiti) verdiği görülmektedir. Çizelge 3'te bu diyagram ile belirlenen K değerleri verilmiştir. Borlama sıcaklığının artışı ile birlikte difüzyon işlemi hızlanmakta buna bağlı olarak borür tabakası kalınlığı artmaktadır. Büyüme hızı sabiti (K) değerleri incelendiğinde sıcaklık artışına bağlı olarak bu değer de artış gösterdiği görülmektedir.

Şekil 5'te lnK'nın 1/T ile değişim grafiği verilmiştir. Grafikte elde edilen eğri bir doğrudur ve eğimi -Q/R değerini vermektedir. Bu değerden aktivasyon enerjisi (Q) hesaplanabilmektedir. Doğrunun lnK eksenini kestiği nokta ise lnKo

değerini vermektedir buradan büyüme hızı sabiti faktörü (Ko) elde edilmektedir.

Çizelge 3'te DIN 1.2738 çeliği için K, Ko ve Q değerleri birlikte verilmiştir. Aktivasyon enerjisi değeri 204,07 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. Bor difüzyonu için aktivasyon enerjisi değerlerinin farklı çelikler ve borlama metotları için karşılaştırılmasına ilişkin veriler Çizelge 4'te yer almaktadır. Bor aktivasyon enerjisi değerinin; borlama yöntemi, borlama karışımı ve altlık malzemenin kimyasal bileşimi gibi faktörlere bağlı olduğu ifade edilmektedir. Ayrıca borür tabakası büyüme kinetiği değerlerinin doğruluğunu doğrudan etkilemektedir (Gómez-Vargas *et al.* 2017, Türkmen and Yalamaç 2018). Hesaplanan aktivasyon enerjisi değeri literatürdeki değerler ile karşılaştırıldığında sonuçların birbirine yakın olduğu görülmektedir.

Çizelge 3. Borlanmış altlık malzemeye ait borür tabakası büyüme kinetiği değerleri

Malzeme	Büyüme Hızı (Oran) Sabiti (K) [m ² /s] x 10 ⁻¹³			Ko [m ² /s] x 10 ⁻⁴	Aktivasyon Enerjisi (Q) [kJ/mol]
	1123K	1173K	1223K		
DIN 1.2738	1,1306	3,3301	6,7228	3,6816	204,07

Çizelge 4. Farklı borlama metodu ve altlık malzemelere göre bor difüzyonu için aktivasyon enerjisi değerlerinin karşılaştırılması

Malzeme	İşlem Sıcaklığı (K)	Borlama Yöntemi	Tabakadaki Fazlar	Aktivasyon Enerjisi (kJ/mol)	Referanslar
AISI P20	1073-1223	Kutu	FeB+Fe ₂ B	200	(Uslu <i>et al.</i> 2007)
AISI P20	1123-1223	Kutu	FeB+Fe ₂ B	256,485	(Kayalı 2015)
AISI P20	1123-1223	Kutu	Fe ₂ B	194,3	(Ortiz 2015)
AISI 1045	1123-1273	Kutu	Fe ₂ B	180	(Dominguez <i>et al.</i> 2017)
SAE 1020	1123-1223	Kutu	Fe ₂ B	183,2	(Zuno-Silva <i>et al.</i> 2014)
AISI H13	1073-1223	Sıvı	FeB+Fe ₂ B+CrB	244,37	(Türkmen and Yalamaç 2018)
AISI 1045	1193-1273	Pasta	Fe ₂ B	226,7	(Taktak 2006)
DIN 1.2738	1123-1223	Kutu	Fe ₂ B	204,07	(Campos <i>et al.</i> 2005)
					Bu çalışma

Kinetik difüzyon teorisi yardımıyla borür tabakası kalınlığını tahmin etmek için bir ampirik denklem elde edilebilmektedir. Ampirik denklem (denklem 4) denklem 1 ve 2'nin birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Belirli bir borlama sıcaklığı ve süresi için borür tabakası kalınlığının tahmin

edilebilmesi için kullanılacak ampirik denklem (denklem 5) Q ve Ko değerlerinin denklemde yerine yazılmasıyla elde edilmiştir.

$$x = \sqrt{Ko} \sqrt{t \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)} \quad (4)$$

$$x = \sqrt{3,682E^{-4}} \sqrt{t \exp\left(\frac{204069,67}{RT}\right)} \quad (5)$$

[T: K, t: sn]

3.4. Bir Regresyon Modeli ile Borür Tabakası Kalınlığının Tahmini

Borür tabakası büyüme kinetiği çalışmalarında oluşturulan ampirik denklemlerin yanında tabaka kalınlığının tahmini ve işlemin kontrolü için zamanın ve sıcaklığın kuadratik ve etkileşimli terimlerine sahip çoklu bir lineer regresyon modeli elde edilmekte ve kullanılmaktadır. Çalışmada, zaman (t) ve sıcaklık (T) faktörlerinin her biri üç seviyede olacak şekilde tam faktöriyel tasarım (3²) borür tabakası kalınlığını (x) tahmin etmek için uygulanmıştır. Regresyon modeli istatistiksel bir yazılım programı (Minitab 17) kullanılarak elde edilmiştir. Regresyon denklemi denklem 6'da verilmiştir.

$$x_{(t,T)} = 127 - 0,543T - 48,06t + 0,05988Tt + 0,000497T^2 + 0,1269t^2 \quad (6) \quad [T: ^\circ\text{C}, t: \text{saat}]$$

Ampirik ve regresyon denklemleri ile elde edilen tahmini borür tabakası kalınlığı değerleri ile deneysel sonuçlar Çizelge 5'te birlikte verilmiştir. Ayrıca 1198 K sıcaklıkta ve 4,5 saat süreyle gerçekleştirilen borlama işlemi ile bir doğrulama testi de gerçekleştirilmiştir. Doğrulama testi sonucu ile tahmini sonuçların birbiriyle tutarlı olduğu görülmektedir ve oluşturulan denklemlerin yüksek doğrulukta sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

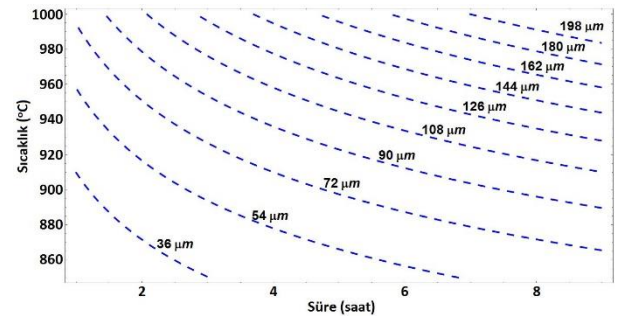
Çizelge 5. Ampirik ve regresyon denklemleriyle tahmin edilen tabaka kalınlığı değerleri ile deneysel tabaka kalınlığı sonuçları

Tabaka Kalınlığı (µm)

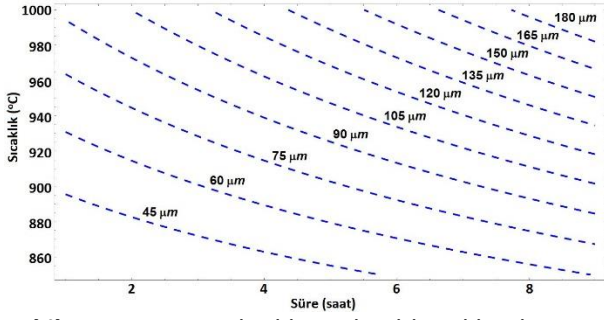
Test No	İşlem Sıcaklığı (K)	İşlem Süresi (saat)	Deneysel Değerler	Ampirik Denklem ile Elde Edilen Tahmini Değerler	Regresyon Denklemi ile Elde Edilen Tahmini Değerler
1	1123	3	33,94	35,80	34,19
2	1123	6	44,83	50,63	46,13
3	1123	9	59,95	62,01	60,35
4	1173	3	58,71	57,04	59,51
5	1173	6	79,61	80,66	80,43
6	1173	9	103,15	98,79	103,64
7	1223	3	86,25	87,48	87,31
8	1223	6	117,23	123,72	117,22
9	1223	9	148,19	151,53	149,41
Doğrulama Testi	1198	4,5	83,66	86,90	85,52

Deneysel veriler ile ampirik denklem ve regresyon denklemi ile yapılan tahminler karşılaştırıldığında R² determinasyon katsayısı değerleri sırasıyla %99,2 ve %99,9 olarak hesaplanmıştır. Yüksek R² yüzde değerleri tahmini ve deneysel sonuçların birbirine çok yakın olduğunu göstermektedir.

Denklem 5 ve 6 ile Şekil 6 ve 7'deki kontur diyagramlar çizilmiştir. Kontur diyagramları, verilen çeşitli işlem sıcaklıkları ve süreleri için borür tabaka kalınlığını tahmin etmek için kullanılabilir. Endüstriyel uygulamalarda kullanmak üzere bu diyagramların faydalı bir referans olabileceği ifade edilmektedir (Türkmen 2018).



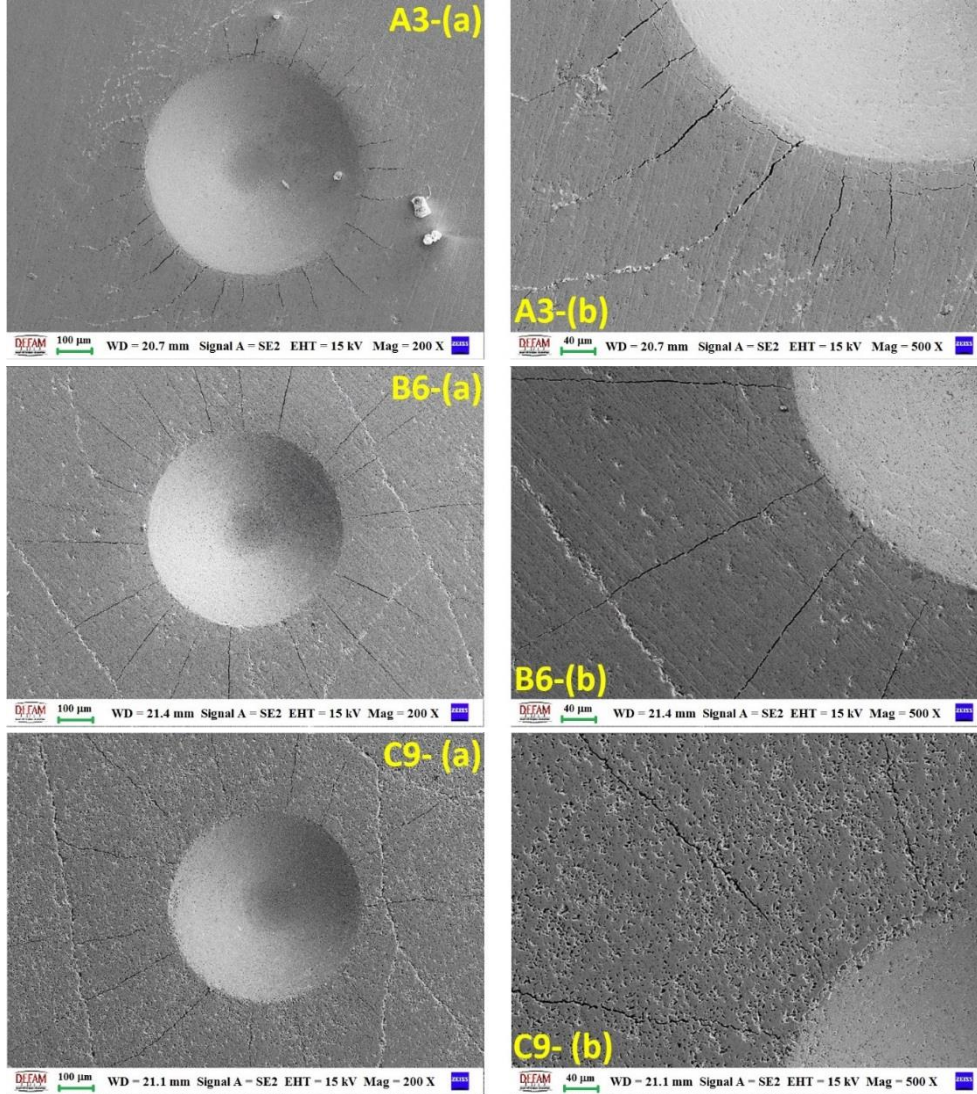
Şekil 6. Ampirik denklemle elde edilen kontur diyagramı



Şekil 7. Regresyon denklemi ile elde edilen kontur diyagramı

3.5. Rockwell-C Adezyon Testi

Borlama işlemleri ile elde edilen borür tabakalarının üzerinde geliştiği altlık malzeme ile olan adezyonu yüzey işleminin başarılı olup olmadığı konusunda karar vermek adına önemli bir kriterdir. Daimler-Benz Rockwell C adezyon testi ile kalitatif olarak yapılan değerlendirmeler bu konuda kabul edilebilir sonuçlar vermektedir.



Şekil 8. A3, B6 ve C9 numunelerinin Rockwell C adezyon testi sonrası indentasyon izlerinin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri a) 200 X, b) 500 X

Farklı işlem sıcaklıkları ve sürelerinde borlanan A3, B6 ve C9 nolu numunelere Rockwell C adezyon testleri uygulandıktan sonra yüzeyde oluşturulan izlerden uygun olan seçilerek SEM’de görüntülenmiştir. Şekil 8’de indentasyon izlerinin farklı büyütmelerde SEM görüntüleri verilmiştir. Genel olarak iz bölgeleri incelendiğinde, sadece

izlerin çevresinde iz kraterine dik doğrultuda bulunan radyal çatlak oluşumları görülmektedir. Artan işlem sıcaklığı ve süresi ile radyal çatlak uzunluğunun arttığı gözlemlenmektedir. Deleminasyon ya da pullanma şeklinde tabaka ayrılması (deformasyonu) gibi durumlar hiçbir numunede söz konusu değildir. Görüntüler

Daimler-Benz VDI 3198 standardına göre değerlendirildiğinde, altlık malzeme ile borür tabakaları arasındaki ara yüzey bağının güçlü ve standarda göre HF1-HF2 seviyesinde olduğu tespit edilmiştir. Tek fazlı bir borür tabakası varlığının tabaka ile ana malzeme arasındaki yapışma kalitesinde etkili olduğu düşünülmektedir (Türkmen and Yalamaç 2018).

4. Sonuç

Bu çalışmada bor kaynağı olarak borik asit içeren bir borlama karışımı kullanılarak DIN 1.2738 kalıp çeliği kutu borlama yöntemiyle başarılı bir şekilde borlanmıştır. Borür tabakası mikroyapısal ve kimyasal açıdan karakterize edilmiş, büyüme kinetiği ve adezyon davranışı incelenmiştir. Yapılan test ve analizler neticesinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Borlanmış numunelerde yüzeye homojen dağılmış, testere dişi morfolojisinde ve tek fazlı (Fe_2B) borür tabakası oluşumları gözlemlenmiştir. XRD ve EDS analizlerinde borür tabakasının tek fazlı bir yapıya sahip olduğu doğrulanmıştır.
- C9 (1223 K-9 saat) numunesi en kalın borür tabakasına (148,19 μm) sahipken, A3 (1123 K-3 saat) numunesi ise kalınlık değeri en düşük tabakaya (33,94 μm) sahip olduğu tespit edilmiştir. Artan işlem sıcaklığı ve süresi ile birlikte tabaka kalınlığı artmıştır.
- Fe_2B tabakasının büyüme kinetiği parabolik büyüme yasasına uymaktadır. DIN 1.2738 kalıp çeliği için bor aktivasyon enerjisi değeri 204,07 kJ/mol olarak hesaplanmıştır.
- Borür tabakası kalınlığının tahmini için ampirik denklem ve regresyon denklemi elde edilmiştir. Deneysel veriler ile denklemler yardımıyla yapılan tahminler karşılaştırıldığında değerler arasında iyi bir uyum olduğu tespit edilmiştir.
- Rockwell-C yapışma testleri sonucunda borür tabakasının adezyon kalitesi kabul edilebilir bulunmuştur. Tek fazlı borür

tabakası oluşumu bu sonucun elde edilmesinde etkili olmuştur.

Teşekkür

Bu çalışma Manisa Celal Bayar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje Numarası: 2022-030.

5. Kaynaklar

- Allaoui, O., Bouaouadja, N., Saindennan, G., 2006. Characterization of boronized layers on a XC38 steel. *Surface and Coatings Technology*, **201(6)**, 3475-3482.
- Barut, N., Yavuz, D., Kayalı, Y., 2014. Borlanmış AISI 5140 ve AISI 420 çeliklerinin difüzyon ve adezyon davranışlarının incelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **14(1)**, 1-8.
- Boonplook, Y., Juijerm, P., 2014. Prediction of boride thickness on tool steels AISI D2 and AISI H13 using boriding kinetics. *Advanced Materials Research*, **931**, 296-300.
- Campos-Silva, I., Hernandez-Sanchez, E., Rodríguez-Castro, G., Cimenoglu, H., Nava-Sánchez, J. L., Meneses-Amador, A., Carrera-Espinoza, R., 2013. A study of indentation for mechanical characterization of the Fe_2B layer. *Surface and Coatings Technology*, **232**, 173-181.
- Campos, I., Bautista, O., Ramírez, G., Islas, M., De La Parra, J., Zúñiga, L., 2005. Effect of boron paste thickness on the growth kinetics of Fe_2B boride layers during the boriding process. *Applied Surface Science*, **243(1-4)**, 429-436.
- Erdem, E., 2021. Kalıp çeliklerinde aşınma davranışlarının iyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 113.
- Gómez-Vargas, O. A., Keddani, M. and Ortiz-

- Domínguez, M., 2017. Kinetics and tribological characterization of pack-borided AISI 1025 steel. *High Temperature Materials and Processes*, **36(3)**, 197-208.
- Kabadayı, E. 2013. Yüksek krom ve nikelli dökme çeliklerin mekanik ve korozyon özelliklerine yaşlandırma ve borlama ısıl işleminin etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük Üniversitesi, Karabük, 135.
- Kaouka, A., Allaoui, O., Keddama, M., 2013. Growth kinetics of the boride layers formed on SAE 1035 steel. *Matériaux & Techniques*, **101(7)**, 705.
- Kara, R., Çolak, F., Kayali, Y., 2016. Investigation of wear and adhesion behaviors of borided steels. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, **69(6)**, 1169-1177.
- Kayali, Y., 2015. Investigation of diffusion kinetics of borided AISI P20 steel in micro-wave furnace. *Vacuum*, **121**, 129–134.
- Kayali, Y., Barut, N., Talaş, Ş., Büyüksağış, A., 2018. Investigation of corrosion and wear behavior of borided AISI P20 steel in micro-wave furnace. *Materials Research Express*, **6(1)**, 016421.
- Kayali, Y., 2013. Investigation of the diffusion kinetics of borided stainless steels. *The Physics of Metals and Metallography*, **114(12)**, 1061-1068.
- Keddama, M., Elias-Espinosa, M., Ortiz-Domínguez, M., Simón-Marmolejo, I., Zuno-Silva, J., 2017. Pack-boriding of AISI P20 steel: Estimation of boron diffusion coefficients in the Fe₂B layers and tribological behaviour. *International Journal of Surface Science and Engineering*, **11(6)**, 563-585.
- Mathew, M., Rajendrakumar, P. K., 2014. Effect of precarburation on growth kinetics and mechanical properties of borided low-carbon steel. *Materials and Manufacturing Processes*, **29(9)**, 1073-1084.
- Medvedovski, E., 2016. Formation of corrosion-resistant thermal diffusion boride coatings. *Advanced Engineering Materials*, **18(1)**, 11-33.
- Ozbek, I., Sen, S., Ipek, M., Bindal, C., Zeytin, S., Ucisik, A. H., 2004. A mechanical aspect of borides formed on the AISI 440C stainless-steel. *Vacuum*, **73(3-4)**, 643-648.
- Öztürk K. 2021. Plastik kalıp çeliklerinin korozyona karşı korunmasında kutu borlama işleminin etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 124.
- Palombarini, G., Carbucchio, M., 1987. Growth of boride coatings on iron. *Journal of Materials Science Letters*, **6(4)**, 415-416.
- Taktak, S., 2006. A study on the diffusion kinetics of borides on boronized Cr-based steels. *Journal of Materials Science*, **41(22)**, 7590-7596.
- Topuz, P., 2016. DIN 1.2842 çeliğinin borlanması ile oluşan borür tabakası üzerine borlama sıcaklık ve süresinin etkileri. *Journal of Boron*, **1(1)**, 15-19.
- Türkmen, İ. 2018. Farklı bor türleri ile alternatif borlama bileşimlerinin geliştirilmesi ve karakterizasyonu. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, 175.
- Türkmen, İ., Yalamac, E., 2018. Growth of the Fe₂B layer on SAE 1020 steel employed a boron source of H₃BO₃ during the powder-pack boriding method. *Journal of Alloys and Compounds*, **744**, 658-666.

Türkmen, İ., Yalamaç, E., 2022. Effect of Alternative Boronizing Mixtures on Boride Layer and Tribological Behaviour of Boronized SAE 1020 Steel. *Metals and Materials International*, **28(5)**, 1114-1128.

Uslu, I., Comert, H., Ipek, M., Ozdemir, O., Bindal, C., 2007. Evaluation of borides formed on AISI P20 steel. *Materials & Design*, **28(1)**, 55-61.

Vidakis, N., Antoniadis, A., Bilalis, N., 2003. The VDI 3198 indentation test evaluation of a reliable qualitative control for layered compounds. *Journal of Materials Processing Technology*, **143**, 481-485.

Zuno-Silva, J., Ortiz-Domínguez, M., Keddam, M., Elias-Espinosa, M., Damián-Mejía, O., Cardoso-Legorreta, E., Abreu-Quijano, M., 2014. Boriding kinetics of Fe₂B layers formed on AISI 1045 steel. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, **50(2)**, 101-101.

Türkiye Madencilik Sektörü İş Kazalarının Yoğunlaşma Analizleriyle Değerlendirilmesi

Sajaweddin SADİD¹, Adnan KONUK^{2*}

¹ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Müh. Anabilim Dalı, Eskişehir

^{2*} Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

e-posta: qarluq.sadid.2018@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0031-4531>

Sorumlu yazar e-posta*: akonuk@ogu.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9577-6674>

Geliş Tarihi: 26.09.2022

Kabul Tarihi: 21.03.2023

Öz

Madencilik sektörü, minerallerin aranmasından çıkarılması, taşınması ve işlenmesine kadar geçen süreç içerisinde, birçok sağlık ve güvenlik riski taşıyan bir sektördür. Madencilik sektörlerinde çalışanların sağlığı ve güvenliğinin korunması ve önlemlerin alınabilmesi için, meydana gelen iş kazalarının hangi alt sektörlerde yoğunlaştığının belirlenmesi büyük önem arz etmektedir. İki basamaklı NACE sınıflandırmasında madencilik sektörü kömür ve linyit çıkartılması, metal cevher madenciliği, diğer madencilik ve taş ocakçılığı, madenciliği destekleyici hizmet faaliyetleri olmak üzere dört alt sektöre ayrılmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada, dört madencilik alt sektöründe 2001-2020 yılları arasında meydana gelen iş kazaları dikkate alınarak iş kazası yoğunlaşma analizleri gerçekleştirilmiştir. İş kazaları yoğunlaşma analizlerinde, piyasa veya sektörlerde yoğunlaşma ve rekabetsellik düzeyinin ölçülmesi ve analiz edilmesinde yaygın olarak kullanılan çeşitli yoğunlaşma indekslerinden hangisinin daha uygun olduğu araştırıldığında, Gini indeksinin (GI) madencilik sektörü iş kazaları yoğunlaşmasını en iyi açıklayan indeks olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, hesaplanan kaza yoğunlaşma indekslerine göre, Türkiye madencilik sektöründe iş kazalarının yoğunlaşmasının genel olarak yüksek olduğu ve özellikle belirli bir alt sektörde (kömür-liyit madenciliğinde) yoğunlaştığı belirlenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda, Türkiye madencilik alt sektörlerinde iş kazaları yoğunlaşma analizleri sonrasında, meydana gelebilecek iş kazalarının önlenmesi ve azaltılmasında alt sektörlerle yönelik yeni strateji ve politikaların geliştirilebileceği düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler

Madencilikte iş kazaları; Kaza olabilirlik oranı; Kaza yoğunlaşma indeksleri; Regresyon-korelasyon analizi

Evaluation of Occupational Accident in the Turkish Mining Industry by Concentration Analysis

Abstract

The mining industry is a sector that carries many health and safety risks, from the exploration to the extraction, transportation and processing of minerals. In order to protect the health and safety of employees in the mining sectors and to take precautions, it is of great importance to determine in which sub-sectors the occupational accidents are concentrated. In the two-digit NACE classification, the mining industry is divided into four sub-sectors: coal and lignite extraction, metal ore mining, other mining and quarrying, and mining supporting service activities. Therefore, in this study, occupational accident concentration analyzes were carried out, taking into account the occupational accidents that occurred between 2001 and 2020 in four mining sub-sectors. When it was investigated which of the various concentration indexes, which are widely used in measuring and analyzing the concentration and competitiveness level in the market or sectors, is more appropriate in the occupational accident concentration analysis, it has been determined that the Gini index (GI) is the index that best explains the occupational accident concentration in the mining sector. In addition, according to the calculated accident concentration indices, it has been determined that the concentration of occupational accidents in the Turkish mining sector is generally high and especially concentrated in a certain sub-sector (coal-lignite mining). As a result of this study, it is thought that new strategies and policies for sub-sectors can be developed in the prevention and reduction of work-related accidents that may occur after the concentration analyzes of occupational accidents in Turkish mining sub-sectors.

Keywords

Occupational accidents in mining; Accident likelihood rates; Accidents concentration indices; Regression-correlation analysis

1. Giriş

Madencilik sektörü, medeniyetin gelişmesine ve insan yaşamının kolaylaşmasına temel oluşturan tarihin en eski mesleklerinden biri olup, minerallerin keşfi ve aranması, çıkarılması, taşınması ve işlenmesine kadar birçok sağlık ve güvenlik riskine sahip bir sektördür. Doğal hammaddeler birçok endüstrinin bel kemiğini oluşturması nedeniyle, çoğu endüstrinin faaliyetleri bir şekilde madencilik sektörüne bağlıdır. Bu nedenle madencilik, sanayinin ihtiyaç duyduğu hammaddelerin sağlanması için kaçınılmaz önem arz etmektedir. Kömür, metal ve metalik olmayan minerallerin işletilmesini içeren madencilik sektörü, Türkiye dahil dünyanın birçok ülkesi için önemli bir gelir kaynağı ve hayati bir ekonomik sektördür (Keçojevic *et al.* 2007; Domínguez *et al.* 2019; Nguyen *et al.* 2017). Madencilik sektörü, Türkiye dahil olmak üzere dünyanın birçok ülkesinde sağlık ve güvenlik açısından en tehlikeli çalışma ortamlarına sahip olup, meydana gelen iş kazalarından kaynaklanan yaralanma, hastalık, ölüm ve iş günü kayıplarının sıklığı yüksek olduğu için en yüksek maliyetli sektörler arasında yer almaktadır (Keçojevic *et al.* 2007). Madencilik sektörüne yatırım yapılması, doğrudan veya dolaylı istihdam imkanını sağlayarak ülkelerin ekonomik kalkınmasına, sosyal refahın yükselmesine ve yoksulluğun azaltılmasında katkıda bulunmaktadır (Domínguez *et al.* 2019).

Madencilik sektöründe yüksek kaza oranlarının temel nedenleri, çalışma koşullarının güvenli olmaması ve güvenli olmayan davranışlar olduğu bilinmektedir. Güvenli olmayan çalışma koşulları, çalışma ortamı özelliklerine ve çalışma yöntemlerine bağlı olup, maden tasarımı yetersiz olması, öngörülmejen jeolojik koşullar, yetersiz ekipman bakımı, yetersiz izleme veya bu faktörlerin bir birleşiminden oluşabilmektedir. Güvenli olmayan davranışlar ise, temel olarak çalışanların hatalarından kaynaklanmaktadır (Maiti *et al.* 2004).

Madencilik sektörü gibi tehlikeli sektörlerde oluşabilecek iş kazaları ve meslek hastalıklarının risklerini kontrol altına tutulması ve önlenmesi konusunda yoğun olarak sağlık ve güvenlik yönetiminin yürütülmesi ve gereken tedbirlerin arttırılması ve çalışanların eğitilmesi büyük önem kazanmaktadır. Toplumun iş kazaları ve meslek hastalıklarına verdiği tepki ve bunun sonucunda ortaya çıkan finansal maliyetler, iş sağlığı ve güvenliğini önemli bir konu haline getirmiştir (Kokangül v.d. 2017).

Son yıllarda, Türkiye genelinde iş sağlığı ve güvenliği alanında yapılan çalışmaların etkin bir şekilde artması nedeniyle iş kazaları ve meslek hastalıklarının azaldığı görülmektedir. Ancak iş kazalarından kaynaklanan ölüm ve yaralanmalardaki sıklık oranları göz önünde bulundurulduğunda, gelişmiş ülkelere göre daha yüksek olması nedeniyle iş sağlığı ve güvenliği açısından çok iyi bir seviyede olmadığı söylenmektedir (Ceylan 2011, Şen v.d. 2018). Türkiye Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK) sağlık ve güvenlik yıllık istatistik verilerini incelendiğinde, Türkiye’de sektörler arasında madencilik sektörü, 2001-2020 arasında meydana gelen ölüm verilerine göre, 10000 çalışan başına ortalama olarak 0.81 ile en yüksek ölüm oranına sahip olduğu bir sektördür.

İş kazalarının azaltılması ve önlenmesi için yapılan birçok çalışmada istatistiksel olarak standart oranlar (kaza sıklık oranı, kaza olabilirlik oranı ve kaza ağırlık oranı) kullanılarak analiz edilmiştir (S. Lee *et al.* 2020, Ceylan 2012b, Bilim v.d. 2018, Bayraktar v.d. 2018). Bununla birlikte, yoğunlaşma indeksleri kavramından yararlanarak iş kazalarının daha fazla yoğunlaştığı sektörlerin belirlenmesi ve iş sağlığı ve güvenliği tedbirlerinin ilgili sektörlerde yoğunlaştırılmasının sağlanması mümkündür. Madencilikte, belirli bir alt sektörde iş kazaları yoğunlaştığında, o alt sektörün sağlık ve güvenlik açısından incelenmesine öncelik verilmesi gerektirmektedir. Literatür incelemesi sonucunda, bu iddiayı destekleyen birkaç çalışma

bulunmaktadır. S. Lee v.d. (2020) tarafından yapılan çalışmada, Avrupa ülkelerinde ölümlü ve ölümlü olmayan endüstriyel iş kazalarının yoğunlaşma derecesini belirlemek amacıyla kaza sıklık oranı ve yoğunlaşma indekslerinden Hirschman-Herfindahl İndeksi (HHI) kullanılmıştır. B.K. Lee v.d. (2020) tarafından yapılan diğer çalışmada, Kore’de endüstriyel ölümlü ve ölümlü olmayan kazalarının yoğunlaşma düzeyinin değerlendirilmesi için yoğunlaşma oranı (CR), Hirschman-Herfindahl İndeksi (HHI) ve kaza sıklık oranı kullanılmıştır. Bu çalışmada ise, Türkiye madencilik alt sektörleri iş kazalarının yoğunlaşma analiziyle değerlendirilmesi amacıyla öncelikle, piyasa veya sektörlerde yoğunlaşma ve rekabetsellik düzeyini ölçülmesi ve analiz edilmesinde yaygın olarak kullanılan Hirschman-Herfindahl (HHI), Nispi Entropi (NEI), Kapsamlı (CCI), Rosenbluth-Hall-Tediman (RHTI), Hannah-Kay (HKI) ve Gini (GI) yoğunlaşma indeksinden hangisinin daha uygun olduğu araştırılmıştır. Türkiye madencilik sektörü iş kazaları yoğunlaşması analizinde, Türkiye madencilik sektörünün dört alt sektöre (kömür ve linyit madenciliği, metal cevher madenciliği, taşocaklar ve madenciliği destekleyici hizmetler) ayrıldığı dikkate alınarak analizler gerçekleştirilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Materyal

Türkiye madencilik sektörünün dört alt sektörüne ait 2001-2020 yılları arasında meydana gelen iş kazası verileri ve çalışan sayıları Türkiye Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK) internet web sitesinden elde edilmiştir (Çizelge 1). SGK İş Kazası ve Meslek Hastalıkları İstatistiklerinde NACE ekonomik faaliyet kodu çerçevesinde madencilik sektöründe iş kazaları dört alt sektörde (kömür ve linyit çıkartılması, metal cevher madenciliği, diğer madencilik ve taş ocakçılığı, madenciliği destekleyici hizmet faaliyetleri) yayınlanmaktadır.

2.2 Yöntem

2.2.1 İş kazaları yoğunlaşma indekslerinin hesaplanmasında metodoloji ve kaza olabilirlik oranı

Literatürde yoğunlaşma indeksleri, firma veya piyasa yoğunlaşması kavramı ile açıklanmaktadır. Türkiye Madencilik Sektöründe meydana gelen iş kazalarının kaza olabilirlik oranları dikkate alınarak yoğunlaşma indeksleri hesaplanırken “firma” kavramı yerine “Türkiye madencilik sektöründe faaliyet gösteren alt sektörler” ve “piyasa yoğunlaşma düzeyi” kavramı yerine “iş kazası yoğunlaşma düzeyi” kavramı kullanılmaktadır.

Madencilik sektörü iş kazaları yoğunlaşması hesaplamalarında, öncelikle “Kaza olabilirlik oranları hesaplanmıştır.

Kaza olabilirlik oranı (KOO): Sektör veya ulusal düzeyde, bir dönemde meydana gelen ölümlü/ölümlü olmayan iş kazası sayısının aynı dönemdeki çalışanın toplam sayısına bölünmesi ve 1.000, 10.000, 100.000 veya 1.000.000 katsayısı ile çarpılmasıyla elde edilmektedir (Aritan ve Ataman 2017, Bilim v.d. 2018, Bayraktar v.d. 2018, S. Lee et al. 2020). Bu çalışmada ise, 1000 çalışan başına düşen kaza olabilirlik oranları Eşitlik 1’deki gibi hesaplanmıştır.

$$KOO_i = \frac{i'inci\ alt\ sektör\ yıllık\ kaza}{i'inci\ alt\ sektör\ yıllık\ çalışan} \times 1000 \quad (1)$$

Bir yıl içerisinde madencilik sektörü toplam kaza olabilirlik oranı (TKOO) Eşitlik 2’deki gibi hesaplanmaktadır.

$$TKOO = \sum_{i=1}^n KOO_i \quad (2)$$

Bir yıl içerisinde herhangi bir i’inci madencilik alt sektörünün kaza olabilirlik oranı içindeki payı (P_i) ise Eşitlik 3 ile hesaplanmakta olup, yoğunlaşma indekslerinin hesaplanmasında “firma piyasa payı” kavramı gibi kullanılmaktadır.

$$P_i = \frac{KOO_i}{TKOO} \quad (3)$$

Çizelge 1. Türkiye madencilik alt sektörlerinde 2001-2020 yıllarında meydana gelen iş kazaları ve çalışan sayıları (SGK ve SSK İstatistik Yıllıkları).

Yıl	Kömür ve Linyit Çıkarılması		Metal Cevher Madenciliği		Diğer Madencilik ve Taş Ocakçılığı		Madenciliği Destekleyici Hizmet Faaliyetleri	
	İş kazası	Çalışan	İş kazası	Çalışan	İş kazası	Çalışan	İş kazası	Çalışan
2001	7104	42857	367	10258	358	18454	178	8146
2002	6587	42541	281	8798	419	20746	150	9883
2003	5647	38053	242	8552	398	22929	114	10999
2004	5481	38492	307	8512	449	26163	135	10457
2005	6011	40390	231	10485	534	32322	103	11233
2006	6722	43585	239	12254	479	37727	151	11376
2007	6293	43389	296	15122	451	37060	153	10433
2008	5728	49487	280	13984	486	47751	1	1113
2009	8193	51975	322	15987	513	45974	28	1998
2010	8150	50143	350	19711	507	52205	25	3398
2011	9217	51662	449	22197	702	57192	139	4396
2012	8828	50949	421	22518	569	58961	101	5202
2013	11289	48706	1055	24039	1598	60911	244	7125
2014	10026	41058	1030	23422	1557	56250	271	8232
2015	7429	40508	997	22392	1639	59893	271	5948
2016	8274	37582	1037	22991	2045	61489	324	7595
2017	8468	37596	1622	27746	2537	65181	330	7833
2018	8399	35953	1775	28559	2806	60474	734	10085
2019	8983	36436	1756	28188	2435	58320	926	9083
2020	8460	36442	1741	30845	2133	61883	650	10531

2.2.2 Madencilik sektöründe kaza yoğunlaşma indeksleri

Türkiye madencilik sektörü iş kazalarının yoğunlaşma analiziyle değerlendirilmesi amacıyla, toplam kaza olabilirlik oranının içindeki alt sektörlerin payı dikkate alınarak, piyasalarda yoğunlaşma ve rekabet analizinde yaygın kullanılan çeşitli yoğunlaşma indekslerinden HHI, NEI, CCI, RHTI, KHI ve GI yöntemlerinin kullanılabilirliği araştırılmıştır.

a) Hirschman-Herfindahl kaza yoğunlaşma indeksi (HHI)

HHI, hesaplanmasının basit ve yorumlanmasının kolay olması nedeniyle en sık kullanılan yoğunlaşma indekslerinden biridir. HHI 1945'te A.Ö. Hirschman ve 1950'de O.C. Herfindahl tarafından piyasa ve sektörlerdeki yoğunlaşma ve rekabet düzeyinin ölçmek ve analiz etmek için bir yoğunlaşma göstergesi olarak önerilmiştir (Hirschman 1945). HHI, bir piyasa veya sektörde faaliyet gösteren firma paylarının karelerinin toplamının firma payına

bölünmesiyle tanımlanır. Avrupa ve diğer gelişmiş ülkelerde HHI, ekonomi alanında piyasa yoğunlaşma ve rekabetini ölçmesi için bir indeks olarak kabul edilmektedir (S. Lee et al. 2020). HHI genel olarak ulaşım, bilgisayar algoritması, mühendislik ve telekomünikasyon gibi çeşitli alanlarda yoğunlaşma indeksi olarak kullanılmıştır (Susilo and Axhausen 2014, Lu et. al. 2017, S. Lee et al. 2020, B.K. Lee et al. 2020).

HHI, Eşitlik 4'de verilen formül ile hesaplanmaktadır.

$$HHI = \sum_{i=1}^N \left(\frac{P_i}{N} \right)^2 \quad (4)$$

Burada; P_i : madencilik alt sektörlerinin kaza payı ve N : madencilik alt sektörlerinin sayısıdır.

HHI yönteminin ekonomi alanında kullanımlarında piyasa yoğunlaşması, tam rekabet, tekeli rekabet, oligopol ve tekel (monopol) olarak dört farklı tipte sınıflandırmaktadır. HHI yönteminin iş kazaları yoğunlaşmasında kullanımında ise, kaza

yoğunlaşması düşük veya yüksek yoğunlaşma olarak sınıflandırılmaktadır. Piyasa veya iş kazası yoğunlaşmalarındaki sınıflandırma Çizelge 2’de verildiği gibidir (S. Lee et al. 2020).

HHI değeri 0 – 1 arasında değişmektedir. Bir piyasa veya sektörde tüm firmalar aynı büyüklüğe sahip

olduğunda, HHI değeri düşük olup, piyasada tam rekabet olduğunu göstermektedir. Bunu tam tersi ise, piyasadaki firma sayısı azaldığında HHI en yüksek değerine ulaşmakta olup, tekel (monopolcü) piyasa olduğunu göstermektedir (Bikker and Haaf 2002).

Çizelge 2. HHI’ye göre iş kaza yoğunlaşma düzeyi.

Piyasa İçin Yaklaşım		Kaza İçin Yaklaşım	
HHI Değeri	Piyasa Yoğunlaşması	HHI Değeri	Kaza Yoğunlaşması
0.00 < HHI < 0.10	Mükemmel rekabet	Kaza HHI ortalama değerinin altında	Düşük yoğunlaşma
0.10 < HHI < 0.18	Tekelci rekabet		
0.18 < HHI < 0.40	Oligopol	Kaza HHI ortalama değerinin üzerinde	Yüksek yoğunlaşma
0.40 < HHI	Tekelci		

b) Entropi ve Nispi Entropi kaza yoğunlaşma indeksi (EI ve NEI)

Entropi ilk olarak 1948’de Shannon tarafından geliştirilip, iletişim teorisi ve fizik bilimlerinde bir sistemdeki düzensizlik, belirsizlik veya rastgelelik derecesini belirlemek için bir gösterge olarak kullanılmıştır (Horowitz and Horowitz 1968). Son zamanlarda, entropi bir yoğunlaşma göstergesi olarak ekonomi alanlarında, piyasa veya sektörde firmaların paylarını ölçmek ve kontrol etmek için kullanılmıştır. Entropi yoğunlaşma indeksi (EI) değerleri piyasada firma payları ile ters orantılıdır. Entropi yoğunlaşma indeksi değeri, bir piyasa daha çeşitli veya rekabetçi olduğunda daha yüksek ve tekelci piyasa olduğunda daha düşüktür. Dolayısıyla Entropi yoğunlaşma indeksi, HHI’ine göre firmaların göreceli büyüklerine daha duyarlıdır (Kostakoğlu 2015, Brown 2018). Ancak entropi indeksi logaritmik rakamları içerdiğinden dolayı, diğer yoğunlaşma indekslerine göre sıklıkla kullanılmamaktadır.

EI aşağıdaki Eşitlik 5’te verilen formül ile hesaplanmaktadır.

$$EI = - \sum_{i=1}^N P_i \ln P_i \quad (5)$$

Burada; P_i : piyasadaki firma payı veya madencilik alt sektörü iş kazası payı ve N: firma veya madencilik alt

sektörlerü toplam sayısıdır. EI değeri bir sektördeki yoğunlaşma düzeyi yüksek olduğunda düşük ve düşük olduğunda ise yüksektir. Piyasa veya sektörde bir firma olduğunda, EI=0 olarak hesaplanır ve hesaplanabilecek maksimum değer n’nin logaritmasıdır (Brown 2018). Sektörlerde faaliyet gösteren firma sayısı arttıkça EI değeri artmakta, bununla birlikte yoğunlaşma da azalmaktadır. EI’nin maksimum değeri firma sayısına bağlı olduğundan, farklı büyüklükteki iki sektör için yoğunlaşma düzeyini analiz etmek için verimli sonuç elde edilmemesi nedeniyle, standartlaştırılmış Nispi Entropi yoğunlaşma indeksinin (NEI) kullanılması kolay ve avantajlıdır. NEI, bir sektörde faaliyet gösteren alt sektörün sayısını hesaba katarak piyasada firma payının gerçek dağılım derecesini ölçmektedir (Nawrocki and Carter 2010).

NEI, aşağıdaki Eşitlik 6’da verilen formül ile hesaplanmaktadır.

$$NEI = \frac{EI}{\ln N} \quad (6)$$

Burada; EI: Entropi kaza yoğunlaşma indeksi, N: firma veya madencilik alt sektörlerinin toplam sayısı ve $\ln N$: maksimum entropi değeridir. NEI değeri 0-1 arasında değişmektedir. NEI değeri küçük olduğunda, piyasa veya sektörde yoğunlaşma düzeyi yüksek,

bunun tam tersi NEI değeri yüksek olduğunda, piyasa veya sektörün yoğunlaşma düzeyi düşük ve rekabetin yüksek olduğu yorumu yapılmaktadır.

c) Kapsamlı kaza yoğunlaşma indeksi (CCI)

Kapsamlı yoğunlaşma indeksi (CCI), 1970 yılında Horvath tarafından firmaların piyasa payı ile piyasa büyüklüğü arasındaki ilişkiyi inceleyen bir çalışmada geliştirilmiştir (Horvath 1972). CCI ile her bir firmanın piyasa payının nispi dağılımı ve aynı zamanda firmanın mutlak büyüklüğünün hesaplanması nedeniyle, HHI'ye göre daha duyarlı ve kapsamlı bir gösterge olarak nitelendirilmektedir.

CCI, aşağıdaki Eşitlik 7'de verilen formül ile hesaplanmaktadır.

$$CCI = P_1 \sum_{i=2}^N P_i^2 (1 + (1 - P_i)) \quad (7)$$

Burada; P_1 : piyasada en büyük paya sahip firmanın payı veya madencilikte en büyük kaza payına sahip alt sektörün payı, P_i : i 'inci firmaların piyasa payı veya madencilik alt sektörlerinin sırasıyla kaza payı ve N : firmaların veya madencilik alt sektörlerinin toplam sayısıdır. CCI değeri, 0 - 1 arasında değişmekte olup, 0'a yaklaştığında sektörde kaza yoğunlaşma düzeyinin düşük olduğunu ve 1'e yaklaştığında ise sektörde yoğunlaşma düzeyinin yüksek olduğunu söylemek mümkündür.

d) Rosenbluth-Hall-Tideman kaza yoğunlaşma indeksi (RHTI)

Rosenbluth (1961) ile Hall ve Tideman (1967) tarafından sunulan yoğunlaşma indeksleri birbirine benzer indekslerdir (Hall and Tideman 1967, Ediz ve Önder 2019). Rosenbluth-Hall-Tideman indeksi (RHTI), firmaların piyasa payını, büyüklük sıralamasıyla ağırlıklandırılan bir indeks olup, firmaların sektöre giriş çıkışı veya sektördeki firma birleşmeleri sonucunda oluşan etkileri indeks sonucunu etkilemektedir. Ayrıca, firmaların piyasa payı sıralamasındaki yerlerine göre ağırlıklandırıldığından dolayı, indeks değeri küçük

firmalarda değişiklik göstermektedir (Ediz ve Önder 2019).

RHTI aşağıdaki Eşitlik 8'de verilen formül ile hesaplanmaktadır.

$$RHTI = \frac{1}{(2 \sum_{i=1}^N iP_i)} \quad (8)$$

Burada; P_i : firma piyasa payı veya i 'ninci madencilik alt sektörünün kaza payı, N : firma sayısı veya madencilik alt sektörü sayısı ve i : firmaların en büyük piyasa payından en küçüğe veya madencilik alt sektörlerinin en büyük kaza payından en küçüğe sıralanmasıdır. İndeks değeri 0–1 arasında değişmektedir. Sektörde eşit büyüklükte firmalar bulunur ise indeks değeri 0 yaklaşmakta ve yoğunlaşması düşük olarak yorumlanmaktadır. Sektörde eşitsiz büyüklükte firma varsa indeks 1'e yaklaşmakta ve yoğunlaşmanın yüksek olduğu söylenmektedir.

e) Hannah-Kay kaza yoğunlaşma indeksi (HKI)

Hannah ve Kay (1977) tarafından yapılan çalışmada, HHI yönteminin eksiklikleri dikkate alınarak piyasa yoğunlaşmasının ölçülmesi amacıyla yeni bir yöntemi geliştirilmiştir. HKI, temel olarak HHI'nin gelişmiş durumunu veya genel şeklini ifade eder. HKI, sektöre yeni giren ve çıkan firmaların etkilerini yansıtması ve piyasada firmalar arasındaki gelir transferi yapılması için kullanılan bir indekstir (Choo et al. 2018).

HKI aşağıdaki Eşitlik 9'da verilen formül ile hesaplanmaktadır.

$$HKI = \sum_{i=1}^N (P_i^\alpha)^{1/1-\alpha} \quad 0 < \alpha; \alpha \neq 1 \quad (9)$$

Burada; P_i : madencilik alt sektörlerinin kaza payı ve N : madencilik alt sektörlerinin toplam sayısıdır. Piyasa yoğunlaşma analizi çalışmalarında α , firmaların piyasa veya sektöre giriş veya çıkışları ve piyasada farklı firmalar arasında gelir transferinin bir sonucu olarak yoğunlaşma düzeyini yansıtmak için değişiklik gösterebilen bir esneklik parametresidir. α değerinin serbest olarak seçilmesi ve uygun ağırlıklandırılması için firma büyüklüğü dağılımının üst veya alt bölümü

vurgulanmalıdır (Hannah and Kay 1977, Bikker and Haaf 2002). Hannah ve Kay (1977) tarafından belirtildiği gibi, verimli ve uygun bir sonuç elde edilmesi için α değerinin 0.6 - 2.5 arasında olması gerekmektedir. Bu çalışmada, $\alpha = 1.5$ alınarak HKI hesaplanmıştır. HKI değeri, 0-1 arasında değişmekte, 0'a yaklaştıkça piyasa veya sektörde yoğunlaşma düşük ve 1'e yaklaşıyor ise piyasa veya sektörde yoğunlaşma düzeyi yüksek olduğu gözlemlenmektedir.

f) Lorenz eğrisi ve Gini kaza yoğunlaşma indeksi (GI)

Lorenz eğrisi, 1905'te M. O. Lorenz tarafından geliştirilip, ekonomik değişkenlerin dağılımının eşitsizliği veya tektüzeliğinin kontrol edebilmesi ve aynı zamanda çeşitli sektörlerin ve piyasaların yoğunlaşmasının analiz edilmesi için başarıyla kullanılabilen grafiksek bir araçtır (Dimić and Paunović 2019). Lorenz eğrisi, ülke düzeyde gelirlerin en düşük dağılımdan en yüksek dağılıma sıralanmasıyla ve birikimli toplam nüfus yüzdesine göre koordinat sistemi ile çizilir (Öztürk ve Aktar 2009, Dimić and Paunović 2019).

Gini indeksi, 1912'de Corrado Gini tarafından geliştirilmiş olup, Lorenz eğrisinin mantığını izleyen bir yöntemdir. Gini indeksinin Lorenz eğrisi ile hesaplanması, ekonomi, sağlık ve mühendislik gibi çeşitli alanlarda yoğunlaşma indeksi olarak kullanılan bir yöntem olmasını sağlamıştır (Lipczynski et al. 2017).

Gini indeksi matematiksel olarak aşağıdaki Eşitlik 10'da verilen formül ile hesaplanmaktadır.

$$GI = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_i}{0.5 (N+1) \sum_{i=1}^n P_i} \right\} - 1 \quad (10)$$

Burada, P_i : sırasıyla madencilik alt sektörlerinin kaza payı ve N : madencilik alt sektörü toplam sayısıdır. Gini yoğunlaşma indeks değeri 0 - 1 arasında değişmektedir. Gini yoğunlaşma indeks değeri 0 ise iş kazalarının madencilik alt sektörlerinde eşit olarak dağıldığını ve yoğunlaşma düzeyinin düşük olduğunu,

Gini yoğunlaşma indeks değeri 1'e yaklaştıkça ise madencilik alt sektörlerinde iş kazalarının eşitsiz olarak dağıldığı ve belirli bir sektörde yoğunlaştığını söylemek mümkündür.

g) Yoğunlaşma indekslerinin temel özellikleri

Literatür incelenmesi sonucunda, piyasada rekabetselik ve yoğunlaşma analizlerinde yaygın olarak kullanılan yoğunlaşma indekslerinin (HHI, NEI, CCI, RHTI, HKI ve GI) Türkiye madencilik alt sektörlerinde iş kazaların yoğunlaşması analizinde kullanılması durumunda, ilgili indekslerin yoğunlaşma aralığının, indeks ile yoğunlaşma arasındaki ilişkinin ve temel özelliklerinin Çizelge 3'te verildiği gibi olabileceği değerlendirilmiştir.

2.2.3 Regresyon-korelasyon analizi

Bu çalışmada, Türkiye madencilik sektöründe hesaplanan iş kazaları yoğunlaşma indeksleri ile toplam kaza olabilirlik oranı arasında güçlü ilişki bulunup bulunmadığının incelenmesi amacıyla basit doğrusal regresyon analizi yöntemi kullanılmıştır.

Basit doğrusal regresyon analizinde, normal dağılıma sahip sayısal bir bağımlı değişken ile normal dağılıma sahip bir diğer bağımsız değişken arasında ilişki bulunup bulunmadığı araştırılır. Bağımlı değişken ile bağımsız değişken arasındaki ilişki, doğrusal bir fonksiyon ile ifade edilmekte olup, modeli Eşitlik 11'de verilmiştir.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i \quad (11)$$

Burada; Y_i bağımlı değişken olup iş kazaları yoğunlaşma indekslerini, X_i bağımsız değişken olup iş kazalarının toplam kaza olabilirlik oranını göstermektedir. Modelde gösterilen β_0 regresyon doğrusunun Y ekseninin kestiği nokta olup, sabit hata ölçüsüdür. β_1 regresyon doğrusunun eğimi veya regresyon katsayısıdır. ε ise rastgele hata terimidir.

Çizelge 3. İş kazaları yoğunlaşması analizlerinde kullanılacak indekslerin temel özellikleri.

Yoğunlaşma İndeksi	Yoğunlaşma İndeks Aralığı		İndeks ve Yoğunlaşma Arası İlişki	Temel Özellikleri
	Yoğunlaşma Yok (Alt Sektörlerde Eşit Dağılım)	Bir Sektörde Tam Yoğunlaşma (Dağılım Eşitsizliği)		
Hirschman-Herfindahl İndeksi (HHI)	0	1	+	Tüm alt sektörleri dikkate alır, hesaplanması ve yorumlanması kolaydır. Zamanla yeni alt sektör eklenmesine karşı duyarlıdır ve alt sektör sayısı zamanla değiştiğinde yanıltıcı sonuçlar verebilir.
Nispi Entropi Yoğunlaşma İndeksi (NEI)	1	0	-	Alt sektörlerde iş kazalarının birlikte meydana gelmediği durumlara uygundur. Alt sektör sayısını ve büyüklüklerini dikkate aldığından, iş kazaları yoğunlaşması payının gerçek dağılım derecesini ölçer. Sekörel belirsizlikleri hakkında da bilgi verir.
Rosenbluth-Hall-Tideman İndeksi (RHTI)	0	1	+	Alt sektörlerin birleşmeleri (aynı firmaların farklı alt sektörlerde de faaliyet göstermesi) sonucu oluşan etkiler, endeks sonucuna yansımaktadır. Alt sektörler sayısına duyarlıdır. Ayrıca, alt sektörlerin iş kazası payına göre sıralamasını dikkate aldığından, iş kazası payı küçük olan alt sektörlerle duyarlıdır.
Kapsamlı Yoğunlaşma İndeksi (CCI)	0	1	+	Madencilik sektöründeki her bir alt sektörün payının nispi dağılımı ve mutlak büyüklüğünü dikkate alması nedeniyle, nispi farklılık ve mutlak büyüklüğe duyarlıdır. Madencilik sektöründeki en büyük alt sektörün payını ağırlıklı olarak ele alan bir yöntemdir.
Hannah-Kay İndeksi (HKI)	0	1	+	Madencilik sektörüne yeni alt sektörlerin giriş veya çıkışının etkilerini analiz etmeye yardımcıdır. Küçük alt sektörlerin etkisi daha önemlidir. α ağırlık katsayısı küçük alındığında küçük alt sektörlerin, büyük alındığında ise büyük alt sektörlerin önemi artar.
Gini Yoğunlaşma İndeksi (GI)	0	1	+	Madencilik sektöründeki alt sektörlerin sayısını, iş kazası payı sıralamasını ve iş kazalarındaki sektörel eşitsizliği dikkate almaktadır.

3. Bulgular

3.1 Türkiye madencilik sektöründe kaza olabilirlik oranları

Türkiye madencilik alt sektörlerinde 2001-2020 yılları arasında meydana gelen iş kazalarının kaza olabilirlik

oranları (1000 kişi başına düşen kaza sayısı) hesaplanmış olup, sonuçları Çizelge 4'de gösterilmiştir.

Çizelge 4. Türkiye madencilik alt sektörlerinde kaza olabilirlik oranları.

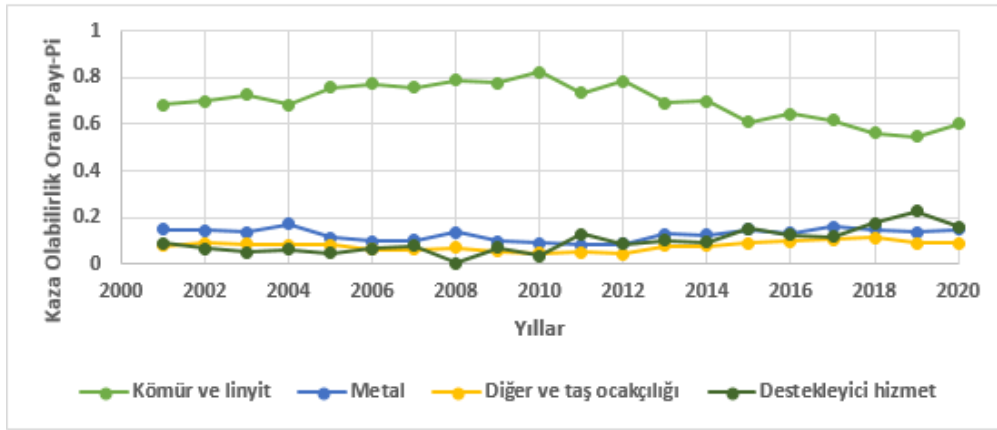
Yıl	Kömür ve Linyit Çıkarılması	Metal Cevher Madenciliği	Diğer Madencilik ve Taş Ocakçılığı	Madenciliği Destekleyici Hizmet Faaliyetleri	TKOO
2001	165.76	35.77	19.40	21.85	242.78
2002	154.83	31.93	20.19	15.17	222.15
2003	148.39	28.29	17.35	10.36	204.41
2004	142.39	36.06	17.16	12.91	208.53
2005	148.82	22.03	16.52	9.16	196.54
2006	154.22	19.5	12.69	13.27	199.70
2007	145.03	19.57	12.16	14.66	191.44
2008	115.74	20.02	10.17	0.89	146.84
2009	157.63	20.14	11.15	14.01	202.94
2010	162.53	17.75	9.71	7.35	197.36
2011	178.41	20.22	12.27	31.62	242.53
2012	173.27	18.69	9.65	19.41	221.03
2013	231.77	43.88	26.23	34.24	336.76
2014	244.19	43.97	27.68	32.92	348.76
2015	183.39	44.52	27.36	45.56	300.84
2016	220.15	45.10	33.25	42.66	341.18
2017	225.23	58.45	38.92	42.12	364.74
2018	233.61	62.15	46.40	72.78	414.94
2019	246.54	62.15	41.75	101.94	452.53

2020	232.15	56.44	34.46	61.72	384.78
------	--------	-------	-------	-------	--------

TKOO: Toplam kaza olabilirlik oranı.

2001-2020 yılları arası için hesaplanan toplam kaza olabilirlik oranında Türkiye madencilik alt sektörlerinin payları (P_i - %) Şekil 1'de verildiği gibidir. Şekil 1'den de görüldüğü gibi, Türkiye madencilik alt sektörleri arasında kaza olabilirlik oranında en büyük paya kömür ve linyit çıkarılması sahiptir. Kömür ve linyit çıkarılmasının kaza olabilirlik oranındaki payı 2001-2010 yılları arasında artış eğiliminde iken, 2010 yılından sonra ise düşüş

eğilimine girmiştir. Türkiye madencilik sektöründe faaliyet gösteren metal cevher madenciliği, diğer ve taş ocakçılığı ve destekleyici hizmetler alt sektörlerinin toplam kaza olabilirlik oranı içindeki payı kömür ve linyit çıkarılmasına göre daha düşük olmakla birlikte, kömür ve linyit çıkarılmasının tam tersine 2001-2010 yılları arasında düşüş eğilimi gözlenirken 2010 yılından sonra ise artış eğilimi gözlenmektedir.



Şekil 1. 2001-2020 yılları arasında toplam kaza olabilirlik oranının içinde Türkiye madencilik alt sektörlerinin payları (P_i).

3.2 Madencilik sektöründe iş kazaları yoğunlaşma indekslerinin hesaplanması

Türkiye madencilik alt sektörlerinde 2001-2020 yılları arasında meydana gelen iş kazaları yoğunlaşmasının değerlendirilebilmesi için sektörlerin toplam kaza olabilirlik oranı içindeki payları ele alınarak HHI, NEI, CCI, RHTI, HKI ve GI yoğunlaşma indeksleri hesaplanmıştır (Çizelge 5).

Türkiye madencilik sektöründe, 2001-2020 yılları arasında hesaplanan yoğunlaşma indeksleri bağımsız değişken ve toplam kaza olabilirlik oranları (TKOO) bağımlı değişken olarak tanımlanarak, değişkenler arasında doğrusal bir ilişki bulunup bulunmadığını tespit etmek ve en uygun yoğunlaşma indeksini belirlemek için MINITAB-14 istatistik yazılımı ile basit doğrusal regresyon analizi yapılmıştır. Yoğunlaşma

indeksleri ile TKOO arası basit regresyon analizi sonuçları çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 5'den de görüldüğü gibi, HHI değerleri 0.375-0.690 aralığında değiştiğinden ve yıllık HHI değerleri 0.25'den büyük ($HHI > 0,18$) olduğundan, Türkiye Madencilik sektöründe iş kazası yoğunlaşmasının genel olarak yüksek olduğu ve iş kazalarının belirli bir sektörde (kömür ve linyit çıkarılması) yoğunlaştığını söylemek mümkündür. Çizelge 4 ve 5'den de görülebileceği gibi, Türkiye madencilik sektöründe TKOO değerleri 2001-2008 yılları arasında azalış ve 2008 yılından sonra artış gösterirken, HHI değeri 2001-2010 yılları arasında artış kaydetmiş ve 2010 yılından sonra ise azalmaya başlamıştır. TKOO ve HHI arasında ters bir ilişki ($r = -0.871$) bulunmakta olup, TKOO artarken HHI azalmaktadır (Çizelge 6).

Türkiye madencilik sektörü için 2001-2020 yılları arasında hesaplanan NEI değerleri 0.467-0.836 aralığında değişmekte olup (Çizelge 5), NEI değerleri sıfırdan büyük ($NEI > 0$) olduğundan, iş kazalarının belirli bir alt sektörde tam olarak yoğunlaşmadığı anlaşılmaktadır. NEI ile TKOO arasında aynı yönlü bir ilişki olup, aralarındaki ilişkinin korelasyon katsayısı ($r = 0.877$)'dir (Çizelge 6). Türkiye madencilik sektöründe 2001-2010 yılları arasında hesaplanan TKOO ve NEI azalırken, 2010 yılından sonra artış kaydetmiştir (Çizelge 4 ve 5). NEI yöntemine göre 2010 yılından sonra Türkiye Madencilik Sektöründe iş kazası yoğunlaşmasının azalmaya başladığı söylenebilir.

Türkiye madencilik sektörü için 2001-2020 yılları arasında CCI değerleri 0.684-0.846 aralığında değişmekte olup (Çizelge 5), CCI değerleri birden küçük ($CCI < 1$) olduğundan, iş kazalarının belirli bir alt sektörde tam olarak yoğunlaşmadığı anlaşılmaktadır. CCI ile TKOO arasında ters yönlü bir ilişki olup, aralarındaki ilişkinin korelasyon katsayısı ($r = -0.882$)'dir (Çizelge 6). Türkiye madencilik sektöründe TKOO değerleri 2001-2008 yılları arasında azalış ve 2008 yılından sonra artış gösterirken, CCI değeri 2001-2010 yılları arasında artış kaydetmiş ve 2010 yılından sonra ise azalmaya başlamıştır (Çizelge 4 ve 5).

Türkiye madencilik sektörü için 2001-2020 yılları arasında RHTI değerleri 0.334-0.630 aralığında değişmekte olup (Çizelge 5), RHTI değerleri birden küçük ($RHTI < 1$) olduğundan, iş kazalarının belirli bir alt sektörde tam olarak yoğunlaşmadığı yorumlanmaktadır. RHTI ile TKOO arasında ters yönlü bir ilişki olup, aralarındaki ilişkinin korelasyon katsayısı ($r = -0.896$)'dir (Çizelge 6). Türkiye Madencilik Sektöründe TKOO değerleri 2001-2008 yılları arasında azalış ve 2008 yılından sonra artış gösterirken, RHTI değeri 2001-2008 yılları arasında artış kaydetmiş ve 2010 yılından sonra ise azalmaya başlamıştır (Çizelge 4 ve 5).

Türkiye madencilik sektörü için 2001-2020 yılları arasında HKI değerleri 0.838-0.916 aralığında değişmekte olup (Çizelge 5), HKI değerleri bire yaklaştığından ($HKI \rightarrow 1$), iş kazalarının belirli bir alt sektörde yoğunlaşma eğiliminde olduğu yorumu yapılmaktadır. HKI ile TKOO arasında ters yönlü bir ilişki olup, aralarındaki ilişkinin korelasyon katsayısı ($r = -0.881$)'dir (Çizelge 6). Türkiye madencilik sektöründe TKOO değerleri 2001-2008 yılları arasında azalış ve 2008 yılından sonra artış gösterirken, HKI değerleri 2001-2010 yılları arasında artış kaydetmiş ve 2010 yılından sonra ise azalmaya başlamıştır (Çizelge 4 ve 5).

Türkiye madencilik sektörü için 2001-2020 yılları arasında GI değerleri 0.345-0.600 aralığında değişmekte olup (Çizelge 5), GI değerleri sıfıra yaklaştığından ($GI \rightarrow 0$), iş kazalarının alt sektörler arasında eşit dağılıma eğiliminde olduğu ve belirli bir alt sektörde tam yoğunlaşmanın gözlemlenmediği yorumu yapılmaktadır. GI ile TKOO arasında ters yönlü bir ilişki olup, aralarındaki ilişkinin korelasyon katsayısı ($r = -0.902$)'dir (Çizelge 6). Türkiye madencilik sektöründe TKOO değerleri 2001-2008 yılları arasında azalış ve 2008 yılından sonra artış gösterirken, GI değerleri 2001-2008 yılları arasında artış kaydetmiş ve 2010 yılından sonra ise azalmaya başlamıştır (Çizelge 4 ve 5). Türkiye madencilik sektöründe 2001-2020 yılları arasında hesaplanan GI ile toplam kaza olabilirlik oranının (TKOO) karşılaştırılması Şekil 2'de verildiği gibidir.

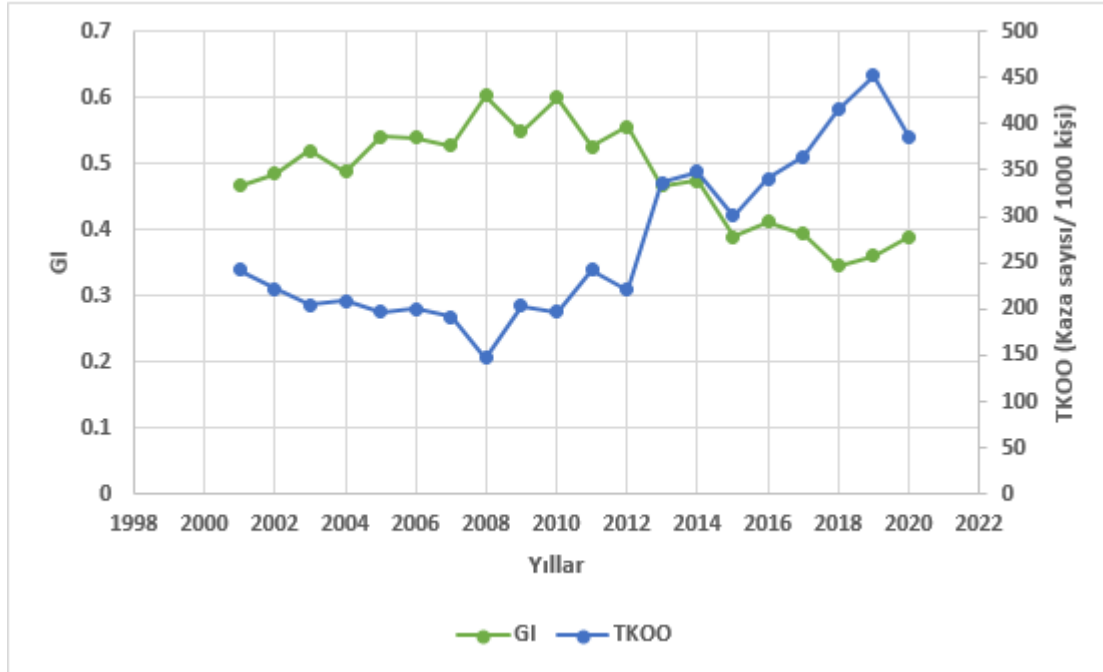
TKOO ve yoğunlaşma indeksi değerleri arasında yapılan basit doğrusal regresyon analizi sonucunda, tüm yoğunlaşma indeksleri ile TKOO değerleri arasında güçlü ve anlamlı regresyon ilişkilerinin var olduğu belirlenmiştir. Ancak, TKOO ve GI arasındaki regresyon ilişkisinin korelasyon katsayısı $r = -0.902$ ve $F = 78.44$ değerinin, diğer yoğunlaşma indeksleri ile TKOO değerleri arasındaki ilişkilerden daha büyük olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 5. Türkiye madencilik sektöründe 2001-2020 yılları arası için hesaplanan iş kazaları yoğunlaşma indekslerinin değerleri.

Yıl	HHI	NEI	CCI	RHTI	HKI $\alpha = 1.5$	GI
2001	0.502	0.693	0.751	0.464	0.875	0.466
2002	0.519	0.672	0.760	0.485	0.880	0.485
2003	0.556	0.625	0.780	0.521	0.891	0.520
2004	0.507	0.679	0.758	0.489	0.877	0.488
2005	0.595	0.582	0.799	0.543	0.901	0.540
2006	0.614	0.564	0.807	0.541	0.905	0.539
2007	0.594	0.588	0.797	0.521	0.900	0.527
2008	0.645	0.487	0.832	0.630	0.916	0.603
2009	0.621	0.555	0.811	0.546	0.907	0.549
2010	0.690	0.467	0.846	0.625	0.925	0.600
2011	0.568	0.613	0.786	0.465	0.894	0.525
2012	0.631	0.541	0.816	0.535	0.910	0.556
2013	0.509	0.688	0.753	0.458	0.877	0.466
2014	0.521	0.674	0.759	0.468	0.880	0.474
2015	0.425	0.785	0.708	0.389	0.852	0.390
2016	0.459	0.748	0.725	0.416	0.862	0.412
2017	0.432	0.778	0.711	0.410	0.854	0.394
2018	0.383	0.835	0.684	0.357	0.839	0.345
2019	0.375	0.836	0.686	0.334	0.838	0.361
2020	0.419	0.791	0.706	0.383	0.851	0.389

Çizelge 6. Türkiye madencilik sektöründe, 2001-2020 yılları arası için elde edilen kaza yoğunlaşma indeksleri ile TKOO arasındaki regresyon analiz sonuçları.

Değişkenler		Regresyon Katsayıları ve Anlamlılığı			Standar t Hata	Korelasyon Katsayısı ve Anlamlılığı		
Bağımsız X	Bağımlı Y	β_0 ve β_1	t-değeri	p-değeri	S	r	F-değeri	p-değeri
TKOO	HHI	0.7733	22.64	0.000	0.0463	-0.871	56.68	0.000
		-0.0009	-7.53	0.000				
TKOO	NEI	0.3613	8.94	0.000	0.0548	0.877	60.22	0.000
		0.0011	7.76	0.000				
TKOO	CCI	0.8950	51.72	0.000	0.0235	-0.882	63.32	0.000
		-0.0005	-7.95	0.000				
TKOO	RHTI	0.7028	25.67	0.000	0.0371	-0.896	73.60	0.000
		-0.0008	-8.58	0.000				
TKOO	HKI	0.9517	102.33	0.000	0.0126	-0.881	62.17	0.000
		-0.0003	-7.88	0.000				
TKOO	GI	0.6956	27.41	0.000	0.0344	-0.902	78.44	0.000
		-0.0008	-8.86	0.000				



Şekil 2. Türkiye madencilik sektöründe 2001-2020 yılları arasında hesaplanan GI ile TKOO karşılaştırılması

4. Tartışma

Yoğunlaşma indekslerin hesaplanması sonucunda, Türkiye madencilik sektöründe meydana gelen iş kazalarının genel olarak yoğunlaşma düzeyinin yüksek olduğu ve belirli bir alt sektörde (kömür ve linyit madenciliğinde) yoğunlaştığı görülmektedir. Madencilik sektöründe hesaplanan toplam kaza olabilirlik oranı ile kaza yoğunlaşma indeksleri arasında ilişki olup olmadığını ve nasıl bir ilişki olduğunun incelenmesi için basit doğrusal regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Basit doğrusal regresyon analiz sonucunda, hesaplanan toplam kaza olabilirlik oranı ile tüm kaza yoğunlaşma indeksi arasında güçlü ve anlamlı ilişki bulunduğunu belirlenmiştir. Ancak toplam kaza olabilirlik oranı (TKOO) ile Gini yoğunlaşma indeksi (GI) arasındaki regresyon ilişkisinin korelasyon katsayısı ($r = -0.902$, $F = 78.44$ ve $p = 0.000 > 0.05$) değeri dikkate alındığından, kaza yoğunlaşma indeksleri ile TKOO değerleri arasındaki ilişkilerde GI'nın diğer yöntemlerden daha güçlü ve anlamlı olduğu görülmüştür (Çizelge 6).

Türkiye madencilik sektöründe faaliyet gösteren dört alt sektörde 2001-2020 yılları arasında meydana gelen iş kazalarının dikkate alınmasıyla hesaplanan Gini yoğunlaşma indeksi (GI) değeri 0.345–0.600 aralığında değişmektedir. Elde edilen GI değerlerine göre, 20 yıl içerisinde Türkiye madencilik sektöründeki alt sektörlerde iş kazalarının yoğunlaşmasının yüksek olduğu ve eşitsiz olarak dağılırarak belirli bir alt sektörde (kömür ve linyit madenciliğinde) yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Endüstriyel iş kazalarının yoğunlaşma düzeyinin değerlendirilmesi için B.K. Lee et al. (2020) ve S. Lee et al. (2020) tarafından yapılan çalışmalarda, Kaza Sıklık Oranı, Yoğunlaşma Oranı (CRM) ve Herfindahl-Hirschman İndeksi (HHI)'nin kullanılması önerilmiş ve Sıklık Oranı ve Yoğunlaşma Oranının ekonomik yapı ve sanayileşme oranına göre değişiklik gösterdiği belirlenmiştir. Yapılan bu çalışmada ise Türkiye madencilik alt sektörlerinde iş kazası yoğunlaşmasını en iyi GI yönteminin açıkladığı tespit edilmiştir. Bunun nedeninin, Türkiye madencilik sektörünün dört alt sektörden oluşması, iş kazası payı

sıralamasında ve iş kazalarındaki sektörel eşitsizlikte, kömür ve linyit sektörünün ağırlıklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Madencilik sektörü gibi tehlikeli sektörlerde meydana gelebilecek iş kazalarının önlenmesi, çalışanların sağlığı ve güvenliğini korunması amacıyla yapılacak iş kazaları yoğunlaşma analizlerinde, değişen ekonomik büyüme koşullarına ve sektörlerin yeniden sınıflanması durumuna göre, farklı yoğunlaşma indeksleri kullanılmasının araştırılmasının büyük önem kazandığını söylemek mümkündür. Ayrıca, madencilik sektöründe ölüm ve ölümlü olmayan iş kazaları için ayrı ayrı yoğunlaşma analizleri gerçekleştirilerek, ölüm ve ölümlü olmayan iş kazaları için farklı güvenlik stratejilerinin geliştirilmesi ve uygulanması gerekebilecektir.

5. Sonuç

Madencilik sektörü, tüm dünyada olduğu gibi Türkiye’de de iş sağlığı ve güvenliği açısından en tehlikeli sektörlerden birisidir. Madencilik sektöründeki iş kazaları, çalışma hayatındaki en önemli sorunlardan biri olarak maddi ve manevi kayıplara neden olmaktadır. Türkiye genelinde madencilik ve diğer sektörlerdeki meydana gelen iş kazaları kaza olabilirlik oranı, kaza sıklık oranı ve kaza ağırlık oranı hesaplanarak değerlendirilmektedir. Türkiye madencilik sektöründe faaliyet gösteren alt sektörler arasında kaza olabilirlik oranında ortalama %69.78 ile kömür ve linyit çıkarılmasının en büyük paya sahip olduğu tespit edilmiştir. Kaza olabilirlik oranının hesaplanması sonucunda, Türkiye madencilik sektöründe 2001-2020 yılları arasında ortalama çalışan her 1000 kişiden yaklaşık 271’inin iş kazasına maruz kaldığı belirlenmiştir. 2020 yılında kaza olabilirlik oranı az da olsa düşüşe eğiliminde olduğu tespit edilmekle birlikte, bunun nedeninin de çalışma hayatındaki Covid 19 salgını kısıtlamalarından kaynaklandığı tahmin edilmektedir.

İş kazalarının değerlendirilmesinde sadece kaza olabilirlik, kaza sıklık ve kaza ağırlık oranlarının hesaplanmasıyla iş kazalarının yoğunlaştığı sektörlerin belirlenmesi ve yoğunlaşmaya karşı gerekli önlemlerin alınması mümkün değildir. Türkiye’de şimdiye kadar madencilik sektörünün iş kazalarının yoğunlaşmasının değerlendirildiği her hangi çalışma yapılmadığı tespit edildiğinden, bu çalışmada Türkiye madencilik sektörlerinde iş kazaları yoğunlaşmasının değerlendirilmesinde HHI, NEI, CCI, RHTI, HKI ve GI yöntemlerinin kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Hesaplanan iş kazası yoğunlaşma indekslerine göre, Türkiye madencilik sektöründe iş kazalarının yoğunlaşmasının genel olarak yüksek olduğu ve özellikle belirli bir alt sektörde (kömür ve linyit çıkarılmasında) yoğunlaştığı belirlenmiştir. Toplam kaza olabilirlik oranı (TKOO) ile kaza yoğunlaşma indeksleri arasında yapılan karşılaştırmaya sonucunda, Nispi Entropy İndeksi dışında diğer tüm iş kazası yoğunlaşma indekslerinin TKOO ile ters yönlü ilişki içinde olduğu, TKOO’nun artmasıyla iş kazası yoğunlaşma indekslerinin azaldığı ve TKOO azalmasıyla birlikte kaza yoğunlaşma indekslerinin artış gösterdiği görülmüştür. TKOO ile iş kazası yoğunlaşma indeksleri arasında yapılan regresyon-korelasyon analizi sonucunda da, TKOO ile GI arasındaki ilişkinin diğer yoğunlaşma indekslerine göre daha güçlü ve anlamlı olduğu belirlendiğinden, Türkiye madencilik sektörü iş kazası yoğunlaşmasının analizinde GI yoğunlaşma yönteminin daha etkin bir şekilde kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

GI değeri sıfıra (0) ne kadar yaklaşıyor ise madencilik sektöründe faaliyet gösteren alt sektörler arasında meydana gelen iş kazalarının eşit dağıldığı ve belirli bir alt sektörde yoğunlaşma görülmediği anlamına gelmektedir. Ancak Türkiye madencilik sektörü için 2001-2020 yılları arasında hesaplanan GI değerleri 0.345-0.600 aralığında değişmekte olup, 2010 yılında 0.600 değerine ulaştıktan sonra azalmaya başlamış ve 2018 yılında en düşük 0.345 olduğu belirlenmiştir

(Şekil 2). GI değerlerine göre, Türkiye Madencilik Sektöründe, 2001-2010 yılları arasında iş kazaları kömür ve linyit çıkarılması sektöründe yoğunlaşırken, 2010 yılı sonrasında diğer sektörlerde de yoğunlaşma eğilimi gözlemlenmektedir. Bu durumda, son yıllarda metal cevheri madenciliği ile diğer ve taşocak madenciliğindeki iş kazaları yoğunlaşmasının dikkate alınması ve bu sektörlerde iş kazalarını azaltıcı veya ortadan kaldırıcı yeni strateji ve politikaların geliştirilmesi gerekmektedir.

6.Kaynaklar

- Aritan, A.E. and Ataman, M., 2017. Work Accident Analysis with Accident Rates Calculations. *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, **17(1)**, 239–46. doi: 10.5578/fmbd.51762.
- Bayraktar, B., Uyguçgil, H. ve Konuk, A., 2018. Türkiye Madencilik Sektöründe İş Kazalarını Statistikselsel Analizi. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, **57** (Özelsayısı), 85–90. doi: 10.30797/madencilik.493212.
- Bikker, J.A. and Haaf, K., 2002. Measures of Competition and Concentration in the Banking Industry : A Review of the Literature. *Economic & Financial Modelling*, **9(2)**, 53–98.
- Bilim, N., Dündar S. and Bilim, A., 2018. Ülkemizdeki Maden Sektöründe Meydana Gelen İş Kazası ve Meslek Hastalıklarının Analizi. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, **7(2)**, 423–32.
- Brown, T., 2018. Measurement of Mineral Supply Diversity and Its Importance in Assessing Risk and Criticality. *Resources Policy*, **58(5)**, 202–18. doi: 10.1016/j.resourpol.2018.05.007.
- Ceylan, H., 2011. Türkiye'deki İş Kazalarının Genel Görünümü Ve Gelişmiş Ülkelerle Kıyaslanması. *International Journal of Engineering Research and Development*, **3(2)**, 18–24.
- Ceylan, H., 2012. Analysis of Occupational Accidents
- Bu çalışmanın sonucunda, Türkiye madencilik sektöründe iş kazaları yoğunlaşma indekslerinin sürekli izlenmesinin, meydana gelebilecek iş kazalarının önlenmesi ve azaltılmasında öncelikli alt sektörlerle yönelik yeni strateji ve politikaların geliştirilebilmesine katkı yapacağı düşünülmektedir.
- According to the Sectors in Turkey. *Gazi University Journal of Science*, **25(4)**, 909–918.
- Choo, S.Y., Radam, A., Hassan, A., and Shamsudin, M.N., 2018. Market structure of Malaysian palm oil refining industry. *Asian Academy of Management Journal*, **23(2)**, 125–141. <https://doi.org/10.21315/aamj2018.23.2.6>
- Dimić, M. and Paunović, S., 2019. Concentration Measuring Techniques in Banking Sector- Lorenz Curve and Gini Coefficient. *The Central and Eastern European Online Library*, **(2)**, 137–51. doi: 10.28934/ea.19.52.2.pp137-151.
- Domínguez, C.R., Martínez, I.V., Peña, P.M.P. and Ochoa, A.R., 2019. Analysis and Evaluation of Risks in Underground Mining Using the Decision Matrix Risk-Assessment (DMRA) Technique, in Guanajuato. Mexico, *Journal of Sustainable Mining*, **18(1)**, 52–59. doi: 10.1016/j.jsm.2019.01.001.
- Ediz, Y. ve Önder, K., 2019. İçecek İmalatı Sektörünün Piyasa Yapısı Ve Yoğunlaşma Düzeyi: Türkiye'nin İlk 1000 Sanayi Kuruluşu Üzerine Bir Uygulama. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi* **60(21)**, 25–40. doi: <http://dergipark.gov.tr/dpusbe>.
- Hall, M. and Tideman, H., 1967. Measures of Concentration. *Journal of the American Statistical Association*, **62(317)**, 162–68. doi: 10.1080/01621459.1967.10482897.
- Hannah, L. and Kay, J. A., 1977. Concentration In Modern Industry Theory, Measurement and the U.K. Experience. First Edition, London and Basingstoke,

- The Macmillan Press Ltd.
- Hirschman, A.O., 1945. National Power and the Structure of Foreign Trade. Berkeley, Los Angeles, London, University Of California Press.
- Herfindahl, O.C., 1950. Concentration in the Steel Industry. Doctoral Thesis, Faculty of Political Science, Columbia University, 178.
- Horowitz, A. and Horowitz, I., 1968. Entropy , Markov Processes and Competition in the Brewing Industry. *The Journal of Industrial Economics*, **16(3)**, 196–211.
- Horvath, J., 1972. Suggestion for a Comprehensive Measure of Concentration. *Southern Economic Journal*, **38(4)**, 602–4. doi: <https://www.jstor.org/stable/1056523>.
- Kecojevic, V., Komljenovic, D., Groves, W.A. and Radomsky, M., 2007. An Analysis of Equipment-Related Fatal Accidents in U.S. Mining Operations: 1995-2005. *Safety Science*, **45(8)**, 864–74. doi: 10.1016/j.ssci.2006.08.024.
- Kokangül, A., Polat, U. and Dağsuyu, C., 2017. A New Approximation for Risk Assessment Using the AHP and Fine Kinney Methodologies. *Safety Science*, **91**, 24–32. doi: 10.1016/j.ssci.2016.07.015.
- Kostakoğlu, S.F., 2015. İnternet Servis Sağlayıcıları Piyasasına Yönelik Yoğunlaşma Analizi. *Int. Journal of Management Economics and Business*, **11(25)**, 129–40. doi: <http://dx.doi.org/10.17130/ijmeh.2015.11.25.875>.
- Lee, B.K., Suh, Y. and Chang, S.R., 2020. Index Analysis Approach to Identifying Accident Concentration Level of Korean Industries. *The Korean Society of Safety*, **35(5)**, 59–65. doi: 10.14346/JKOSOS.2020.35.5.59.
- Lee, S., Chang, S.R. and Suh, Y., 2020. Developing Concentration Index of Industrial and Occupational Accidents: The Case of European Countries. *Safety and Health at Work*, **11(3)**, 266–74. doi: 10.1016/j.shaw.2020.05.003.
- Lipczynski, J., Wilson J.O.S. and Goddard, J., 2017. Industrial Organization Competition, Strategy and Policy. Fifth edit. London, New York, Pearson Education Limited.
- Lu, C., Qiao, J. and Chang, J., 2017. “Herfindahl–Hirschman Index Based Performance Analysis on the Convergence Development. *Cluster Computing*, **20(1)**, 121–29. doi: 10.1007/s10586-017-0737-3.
- Maiti, J., Chatterjee, S. and Bangdiwala, S.I., 2004. Determinants of Work Injuries in Mines - an Application of Structural Equation Modelling. *Injury Control and Safety Promotion*, **11(1)**, 29–37. doi: 10.1076/icsp.11.1.29.26305.
- Nawrocki, D. and Carter, W., 2010. Industry Competitiveness Using Herfindahl and Entropy Concentration Indices with Firm Market Capitalization Data. *Applied Economics*, **42(22)**, 2855–63. doi: 10.1080/00036840801964666.
- Nguyen, N.B., Boruff, B. and Tonts, M., 2017. Mining, Development and Well-Being in Vietnam: A Comparative Analysis. *Extractive Industries and Society* **4(3)**, 564–75. doi: 10.1016/j.exis.2017.05.009.
- Öztürk, L. ve Aktar, İ., 2009. Karadeniz Bölgesi İllerinde Kamu Tarım Yatırımları Dağılımının Gini Katsayısı İle Ölçülmesi. *Karadeniz Araştırmaları*, **6(21)**, 113-122–122. doi: 10.17782/ka.31184.
- SGK. Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK) İstatistik Yıllıkları (2007-2020), <https://www.sgk.gov.tr/Istatistik/Yillik/fcd5e59b-6af9-4d90-a451-ee7500eb1cb4/>
- SSK. Sosyal Sigortalar Kurumu (SSK) İstatistik Yıllıkları (2001-2006), <https://www.sgk.gov.tr/Istatistik/Devredilen/eb4b6b6f-f41a-4d49-8690-797141bfcd8d/>
- Şen, M., Dursun, S. ve Murat, G., 2018. Türkiye’de İş Kazaları: Avrupa Birliği Ülkeleri Bağlamında Bir Değerlendirme. *OPUS Uluslararası Toplum Araştırmaları Dergisi*, **9(16)**, 1167–1185. doi: 10.26466/opus.463211.

Susilo, Y.O. and Axhausen, K.W., 2014. Repetitions in Individual Daily Activity–Travel–Location Patterns: A

Study Using the Herfindahl–Hirschman Index. *Transportation* **41**, 995–1011. doi: 10.1007/s11116-014-9519-4.

Cam ve Karbon Elyaf ile Oluşturulan Karma Kompozitlerin Çekme Dayanımlarının Analitik ve Nümerik Araştırılması

Mehmet Çağrı Tüzemen¹

¹ Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik – Mimarlık Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Nevşehir.

e-posta: cagrituzemen@nevsehir.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1746-2864>

Geliş Tarihi: 10.11. 2022 Kabul Tarihi: 21.03.2023

Öz

Anahtar kelimeler

Karma kompozit;
Cam/karbon elyaf;
Mekanik özellikler;
Sonlu elemanlar
analizi; Klasik tabaka
teorisi

Kompozitlerin kullanım alanları arttıkça farklı tip elyafın birlikte kullanıldığı karma kompozitlerin de kullanım alanları genişlemektedir. Karma kompozitler, dayanım ve maliyet birlikte düşünüldüğünde ümit verici bir yaklaşım getirmektedir. Bu çalışmada çeşitli dizilimlerle oluşturulan cam/karbon elyaf karma kompozitlerin çekme ve moment yükü altında dayanımları analitik ve nümerik olarak incelenmiştir. Ayrıca yalın cam elyaf ve yalın karbon elyaftan oluşan kompozitler de karşılaştırma açısından sonlu elemanlar analizine tabii tutulmuştur. Bu kompozitler üzerine gelen yüke karşılık dayanımları klasik tabaka teorisi kullanılarak analitik yaklaşım ile de çözümlenerek sonlu elemanlar analizleri doğrulanmıştır. Yapılan analizler sonucunda kullanılan elyafın çekme dayanımına doğrudan etkisinin olduğu, katman diziliminin ise etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır. Moment yükü altında ise en yüksek çekme yüküne maruz kalan en alt katmanda karbon elyaf kullanımının cam elyafa göre dayanabileceği en yüksek moment yükünü yaklaşık olarak %33 arttırdığı görülmüştür. Aynı yük altında diğer katmanlarda kullanılan elyafın etkisinin ise çok sınırlı kaldığı sonucuna varılmıştır.

Analytical and Numerical Investigation of the Tensile Strength of Hybrid Composites Created with Glass and Carbon Fibers

Abstract

Keywords
Hybrid composite;
Glass/carbon fiber;
Mechanical properties;
Finite elements
analysis; Classical
laminar theory

As the usage areas of composites increase, the usage areas of hybrid composites in which different types of fibers are used together are also expanding. Hybrid composites offer a promising approach when strength and cost are considered together. In this study, the strengths of glass/carbon fiber composites formed with various stacking sequences under tensile and moment load were investigated analytically and numerically. In addition, composites consisting of pure glass fiber and pure carbon fiber were also subjected to finite element analysis for comparison. The finite element analysis was verified by using the classical lamination theory to solve the strengths of these composites against the load with an analytical approach. As a result of the analysis, it was concluded that the fiber used has a direct effect on the tensile strength, but the stacking sequence has no effect. Under the moment load, it was observed that the use of carbon fiber in the bottom layer, which is exposed to the highest tensile load, increases the highest moment load that it can withstand by approximately 33% compared to glass fiber. Under the moment load, it was observed that the use of carbon fiber in the bottom layer, which is exposed to the highest tensile load, increases the highest moment load that it can withstand by approximately 33% compared to glass fiber. It was concluded that the effect of the fiber used in the other layers under the same load was very limited.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Kompozit malzemeler birden fazla farklı kimyasal veya fiziksel özelliklere sahip malzemenin bir araya getirilerek daha üstün fiziksel ve/veya mekanik

özelliklere sahip bir malzeme elde etmek için üretilen malzemelerdir. Bu malzemeler birbiri içerisinde çözünmeden ve atomik bağ oluşturmadan birleşmesiyle kompozit malzemeleri oluşur. Matris ve takviye elemanından oluşan kompozitlerde yükü

taşıyan malzeme takviye elemanıdır. Takviye elemanı olarak cam, karbon, aramid vb. çeşitli elyaflar kullanılmaktadır (Atmaca vd 2021, Eskizeybek vd. 2018, Khakzad vd. 2019, Korkmaz vd. 2022). Bu elyafların mekanik özellikleri ve maliyetleri çeşitlilik gösterdiği için kullanım alanları da farklılaşabilmektedir (Tüzemen, 2022a). Karbon elyafların dayanımı ve elastisite modülü yüksektir ancak cam elyafa göre daha düşük kırılma uzamasına sahiptir (Wang *et al.* 2018). Bu nedenle çekme, eğilme veya darbe gibi çeşitli yükleme koşullarında farklı elyaflara ihtiyaç duyulabilmektedir. Bu durumda karma kompozitler oldukça umut verici yapılar olarak öne çıkmaktadır.

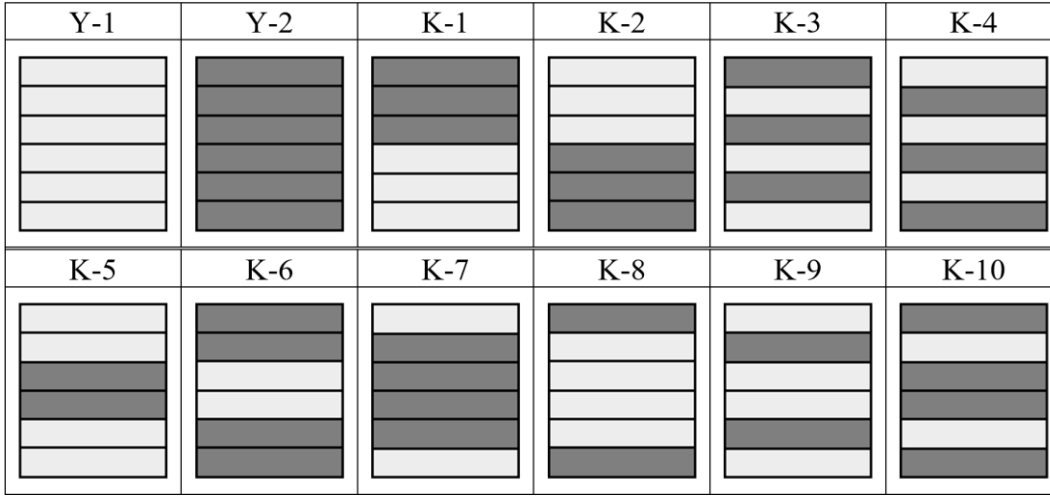
Polimer matrisli karma kompozitler çeşitli elyafların aynı plaka içinde birlikte kullanılmasıyla oluşturulur. Karma kompozitler yalnızca tek bir elyaflın avantajlarını içermekle kalmaz, aynı zamanda iki malzemenin mükemmel fiziksel ve mekanik özelliklerini de sağlayabilir (Wu *et al.* 2018). Karma kompozitler katmanlar arası, katman içi ve birbirine karışmış olacak şekilde tasarlanabilir (Zuo *et al.* 2021). Katmanlar arası karma kompozitlerde her bir katmanda yalnızca bir tür elyaf kullanılır. Polimer matrisli karma kompozitlerde elyaf malzemesi olarak cam (Selver, 2019), karbon (Özsoy, 2022), aramid (Karacor ve Özcanlı, 2022) ve doğal (Erkliğ vd. 2022) elyaflar kullanılabilir. Son yıllarda karma kompozit yapıların mekanik özellikleri ile ilgili çalışmalar artmıştır. Yapılan çalışmalar farklı katman sayıları için tasarıma bağlı olarak karma kompozitlerin kimi mekanik özelliklerinin yalın kompozitlerden daha iyi olabileceğini göstermiştir. Ali ve ark. yaptıkları çalışmada karma kompozit tasarımının yalın kompozitlere göre en yüksek darbe yükünü arttırdığı ancak emilen enerjiyi ve kritik yükü düşürdüğünü bildirmişlerdir (Ali vd. 2020). Pujar ve ark. cam elyaftan oluşan plakaların belirli katmanlarına toplam katmanın %20'si oranında karbon elyaf eklemiş ve yeni karma tasarımların çekme dayanımını yaklaşık olarak %12 ile %37 oranında arttırdığı sonucuna varmışlardır (Pujar *et al.* 2022). Wu vd. yaptıkları çalışmada karma tasarımlardan birinin basma dayanımının onu oluşturan cam ve karbon yalın numunelerden daha yüksek basma dayanımına sahip olduğunu

bildirmişlerdir (Wu vd. 2018). Wang vd. yaptıkları çalışmada tasarladıkları yapılar içerisinde bir karma yapının yalınlar dahil bütün yapılardan daha yüksek darbe dayanımına sahip olduğunu göstermişlerdir. Ancak karma tasarımlar içinde eğme dayanımında onu oluşturan yalın kompozitleri geçecek bir karma kompozit tasarımı bulunmamaktadır (Wang *et al.* 2021). Sonuç olarak karma kompozit yapı tasarımında katman sayısına göre katmanların dizilimi oluşturulması oldukça önem arz etmektedir. Bu sayede karma kompozit yapı aynı katman sayısında kendisini oluşturan elyafların yalın hallerinden daha yüksek mekanik özelliklere sahip olabilmektedir. Böylece yüksek mekanik özelliklere sahip daha düşük maliyetli kompozit malzeme üretimi mümkün olmaktadır.

Bu çalışmanın amacı yalın ve çeşitli elyaf dizilimleriyle oluşturulmuş katmanlar arası karma kompozitlerde katman dizilimlerinin mekanik özelliklere etkisinin araştırılmasıdır. Cam elyaf/epoksi ile karbon elyaf/epoksi'den oluşan yalın ve belirli bir sistematik içinde altı katmandan oluşturulan karma kompozit plakaların analitik ve nümerik olarak çekme ve moment yükü altındaki dayanımları araştırılmıştır. Sonlu elemanlar analizi sonuçları analitik çözüm ile doğrulanmıştır. K-1 ile K-4 arasındaki kompozitlerde cam/karbon elyaf kullanım oranı 1/1 iken K-5 ile K-10 arasındaki ise 1/2 veya 2/1 oranındadır. Böylece karma kompozitlerdeki elyaf kullanım oranlarının etkisi de incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada tek yönlü cam elyaf/epoksi ve tek yönlü karbon elyaf/epoksi kullanılarak yalın ve karma kompozit plakalar oluşturulmuştur. Plakalar toplam kalınlık 1.5 mm olacak şekilde altı katman olarak tasarlanmıştır. Numunelerin uzunluğu 250 mm, genişliği ise 25 mm'dir. Oluşturulan tasarımların kodlama ve dizilişleri Şekil 1'de verilmiştir. K-1, K-2, K-3 ve K-4 karma plakalar kullanılan elyaf malzemeleri açısından simetrik değildir. Kullanılan elyafların x yönündeki kimi mekanik özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Tasarımların tip, kodlama ve dizilişleri (Açık gri cam elyaf, koyu gri ise karbon elyaf katmanı temsil etmektedir).

Çizelge 1. Cam elyaf/epoksi ve karbon elyaf/epoksinin x yönündeki kimi mekanik özellikleri

	Çekme Dayanımı (MPa)	Kayma Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson's Oranı
Cam Elyaf/Epoksi	780	60	35	0.28
Karbon Elyaf/Epoksi	1632	80	123	0.27

2.1 Analitik Yöntem

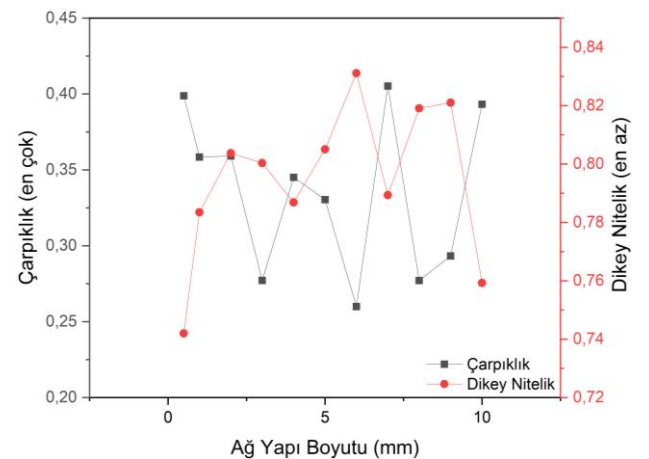
Analitik olarak yalın cam ve yalın karbon elyaftan oluşan plakaların çözümleri yapılmıştır. Böylece sonlu elemanlar analizlerindeki sonuçların doğrulanması yapılabilecektir. Bir uçtan çekme yüküne maruz kalan plakaların üzerinde oluşan gerilmeler bulunmuştur. Bunun için klasik tabaka teorisi kullanılmıştır. Klasik tabaka teorisindeki, bileşke kuvvetler (N_x , N_y , N_{xy}) ve momentler (M_x , M_y , M_{xy}) ile orta yüzey şekil değiştirmeler (ϵ_x^0 , ϵ_y^0 , γ_{xy}^0) ve eğrilikler (K_x , K_y , K_{xy}) arasındaki ilişki Eş. 1'de verilmiştir.

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} & B_{21} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{21} & B_{22} & B_{26} & D_{21} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{pmatrix} \quad (1)$$

2.2 Nümerik Yöntem

Nümerik yöntemde sonlu elemanlar yaklaşımı kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizi Ansys programı kullanılarak yapılmıştır. Plakalar spaceclaim programında kabuk eleman olarak tasarlanmıştır. Tasarlanan plakaya Ansys Workbench programında ACP (Pre) modülü aktarılmış ve ortotropik malzeme tanımlaması

yapılmıştır. Model üzerinde üçgenler yönteminde "quadratic" "element order" kullanılarak ağ yapı oluşturulmuştur. Ağ yapı kalitesi çarpıklık ve dikey nitelik ölçütlerine göre değerlendirilmiştir. Kabul edilebilir en yüksek çarpıklık 0.95 iken kabul edilebilir en düşük dikey nitelik ise 0.15 olmalıdır (Tüzemen, 2022b). Çeşitli ağ yapı boyutlarına bağlı çarpıklık ve dikey nitelik sonuçları Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Ağ yapı boyutuna bağlı çarpıklık ve dikey nitelik. Buna göre gerek en düşük çarpıklık gerekse en yüksek dikey niteliğe sahip olan 6 mm ağ yapı boyutunun analizler için en uygun boyut olduğu sonucuna varılmıştır. Oluşturulan katmanlı yapı

yapısal statik modülüne aktarılmıştır. Bu modülde yapıya bir ucundan mesnetleme uygulanırken diğer ucundan çekme kuvveti ve moment verilerek iki ayrı yükleme durumu altında analizler yapılmıştır. Uygulanan yükleme ve sınır şartları Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmiştir. Yapılan analizlerde Tsai-Wu hasar ölçütü uygulanmıştır. Bu analiz yaklaşımı yalın ve katmanlar arası karma kompozitlerde daha önce denenmiş ve deney sonuçlarıyla %99'un üstünde uyumluluk göstermiştir (Tüzemen, 2022a). Gerek analitik ile nümerik sonuçların birbirini doğrulaması, gerekse detayları verilen nümerik yaklaşımın literatürde deneysel sonuçlarla doğrulanmış olması göz önüne alındığında bu çalışmada deneysel çalışmaya ihtiyaç olmadığını göstermiştir.



Şekil 3. Model üzerinde uygulanan çekme kuvveti ve sınır şartları.



Şekil 4. Model üzerinde uygulanan moment ve sınır şartları.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1 Analitik Çözüm

Nümerik yöntemi doğrulayabilmek için yalın cam ve yalın karbon plakaların analitik çözümü gerçekleştirilmiştir. Çözümde Ansys kütüphanesinden alınan ve Eş. 2-6'da verilen malzeme özellikleri kullanılmıştır. İlk olarak yalın cam plakanın çözümü yapılmıştır.

$$E_1 = 35 \text{ GPa} \quad (2)$$

$$E_2 = 9 \text{ GPa} \quad (3)$$

$$\nu_{12} = 0.28 \quad (4)$$

$$\frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2} \rightarrow \nu_{21} = 0,072 \quad (5)$$

$$G_{12} = 4.7 \text{ GPa} \quad (6)$$

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = 35.72 \text{ GPa} \quad (7)$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = 9.19 \text{ GPa} \quad (8)$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = 2.57 \text{ GPa} \quad (9)$$

$$Q_{21} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = 2.57 \text{ GPa} \quad (10)$$

$$Q_{66} = G_{12} = 4.70 \text{ GPa} \quad (11)$$

Elyaf tek yönlü olup kuvvet doğrultusunda yönlendirilmiştir. Dolayısıyla aralarındaki açığı veren θ değeri sifıra eşit olur.

$$m = \cos \theta = 1, \quad n = \sin \theta = 0 \quad (12)$$

$$\bar{Q}_{11} = Q_{11}m^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{22}n^4 \quad (13)$$

$$\bar{Q}_{22} = Q_{11}n^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{22}m^4 \quad (14)$$

$$\bar{Q}_{12} = Q_{12}(m^4 + n^4) + (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})m^2n^2 \quad (15)$$

$$\bar{Q}_{16} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})nm^3 + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})mn^3 \quad (16)$$

$$\bar{Q}_{26} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})mn^3 + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})nm^3 \quad (17)$$

$$\bar{Q}_{66} = (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{66}(m^4 + n^4) \quad (18)$$

Rijitlik matrisi:

$$|\bar{Q}| = \begin{vmatrix} 35.72 & 2.57 & 0 \\ 2.57 & 9.19 & 0 \\ 0 & 0 & 4.70 \end{vmatrix} 10^3 (MPa) \quad (19)$$

Plakanın uzama rijitliği [A] Eş. 20 ile bulunur.

$$A_{mn} = \sum_{j=1}^N \bar{Q}_{mn} (h_j - h_{j-1}) \quad (20)$$

Katman yüzeylerinin orta düzleme göre konumları Şekil 5'te gösterilmiştir. Plaka simetrik dizilişe sahip olduğu için dengeli plaka denir. Dolayısıyla, A_{16} ve A_{26} sıfıra eşit olur.

$$|A| = \begin{vmatrix} 53.6 & 3.86 & 0 \\ 3.86 & 13.78 & 0 \\ 0 & 0 & 7.05 \end{vmatrix} 10^3 (MPa) \quad (21)$$

Plakanın eğilme-uzama rijitliği [B] Eş. 22 ile bulunur.

$$B_{mn} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \bar{Q}_{mn} (h_j^2 - h_{j-1}^2) \quad (22)$$

Plaka simetrik olduğundan:

$$|B| = 0 \quad (23)$$

Plakanın eğilme rijitliği [D] ise Eş. 24 ile bulunur.

$$D_{mn} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^N \bar{Q}_{mn} (h_j^3 - h_{j-1}^3) \quad (24)$$

$$|D| = \begin{vmatrix} 10 & 0.72 & 0 \\ 0.72 & 2.58 & 0 \\ 0 & 0 & 1.32 \end{vmatrix} 10^3 (MPa) \quad (25)$$

P x eksenini doğrultusunda uygulanan, nümerik analizde Tsai-Wu hasar ölçütüne göre kritik yük olarak bulunan kuvvet ve w ise plakanın genişliği olmak üzere:

$$N_x = \frac{P}{w} = \frac{29250 \text{ N}}{25 \text{ mm}} = 1170 \text{ MPa} \quad (26)$$

Plaka üzerinde dış kuvvet olarak yalnızca x doğrultusunda bir kuvvet olduğundan diğer kuvvetler ve momentler sıfıra eşittir. Bu durumda klasik tabaka teorisine göre:

$$\begin{pmatrix} 1170 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} 53.6 & 3.86 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3.86 & 13.78 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 7.05 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 & 0.72 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.72 & 2.58 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.32 \end{vmatrix} 10^3 \begin{pmatrix} \varepsilon_{x^0} \\ \varepsilon_{y^0} \\ \gamma_{xy^0} \\ K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{pmatrix} \quad (27)$$

$$1170 = (53.6\varepsilon_{x^0} + 3.86\varepsilon_{y^0})10^3 \quad (28)$$

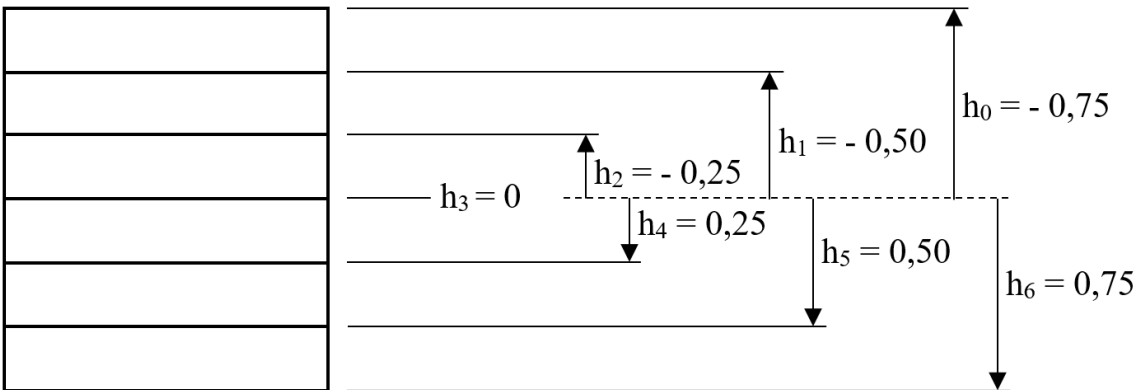
$$0 = (3.86\varepsilon_{x^0} + 13.78\varepsilon_{y^0})10^3 \quad (29)$$

$$0 = (7.05\gamma_{xy^0})10^3 \quad (30)$$

Eşitlikleri elde edilir. Eğer Eş. 28-30 birlikte çözümlerse:

$$\varepsilon_{x^0} = 22.286 \cdot 10^{-3} \quad (31)$$

$$\varepsilon_{y^0} = -6.240 \cdot 10^{-3} \quad (32)$$



Şekil 5. Katman yüzeylerinin orta düzleme göre konumları.

$$\gamma_{xy^0} = 0 \quad (33)$$

Plaka üzerinde herhangi bir eğilme momenti oluşmadığı için eğrilikler sıfıra eşit olur. Orta yüzey şekil değiştirmeler (ε_{x^0} , ε_{y^0} , γ_{xy^0}) ve rijitlik matrisi [\bar{Q}],

gerilme-gerinim ilişkisini veren Eş. 34'te yerine yazılırsa:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = |\bar{Q}| \begin{Bmatrix} \varepsilon_{x^0} \\ \varepsilon_{y^0} \\ \gamma_{xy^0} \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad (34)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{vmatrix} 35.72 & 2.57 & 0 \\ 2.57 & 9.19 & 0 \\ 0 & 0 & 4.70 \end{vmatrix} 10^3 \begin{Bmatrix} 22.286 \\ -6.240 \\ 0 \end{Bmatrix} 10^{-3} \quad (35)$$

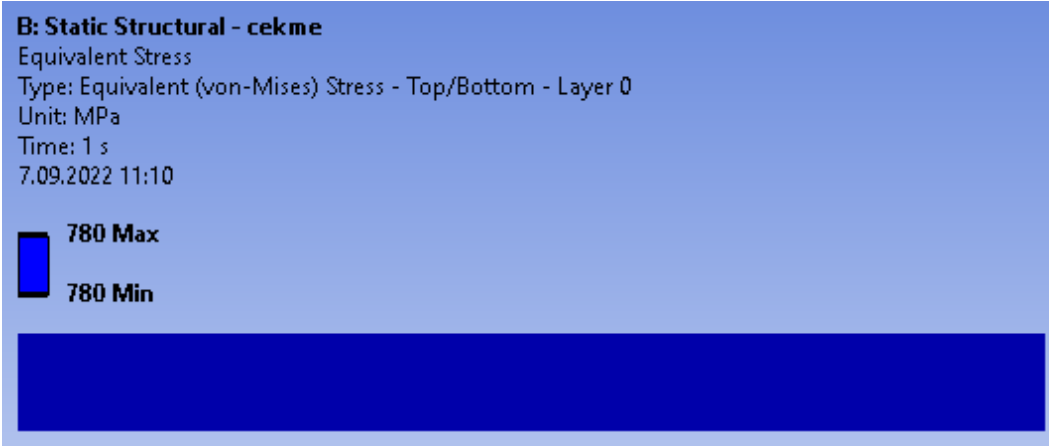
Eşitliği elde edilir. Bu eşitlik çözüldüğünde yalın cam elyaf/epoksiden oluşan Y-1 numunesi için x yönünde uygulanan 29.25 kN'luk bir kuvvete karşılık gelen gerilme şu şekilde bulunur:

$$\sigma_x = 780 \text{ MPa} \quad (36)$$

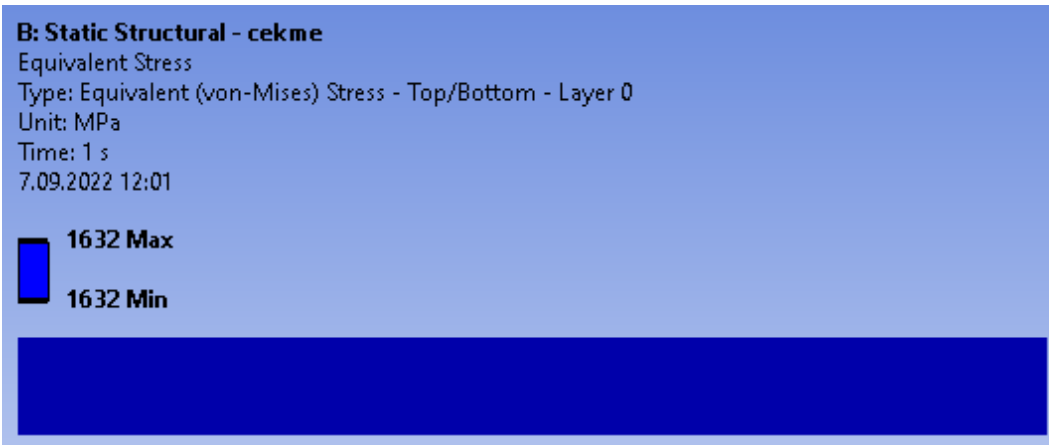
$$\sigma_y = 0 \quad (37)$$

$$\tau_{xy} = 0 \quad (38)$$

Benzer şekilde Tsai-Wu ölçütüne göre kritik yük olan 61.20 kN eksenel kuvvetin uygulandığı analitik çözüm sonucunda yalın karbon elyaf/epoksi (Y-2) kompozit için x doğrultusundaki gerilme ise 1632 MPa çıkmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinde Y-1 ve Y-2 için bulunan gerilmeler sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmiştir. Nümerik olarak bulunan sonuçlar ile analitik çözüm sonuçları birebir aynı sonucu vermiştir. Dolayısıyla sonlu elemanlar analizinde uygulanan yaklaşımın, yükleme ve sınır şartlarının doğru bir şekilde kurulduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 6. Sonlu elemanlar analizinde Y-1 numunesinde çekme yükü altında oluşan gerilme.



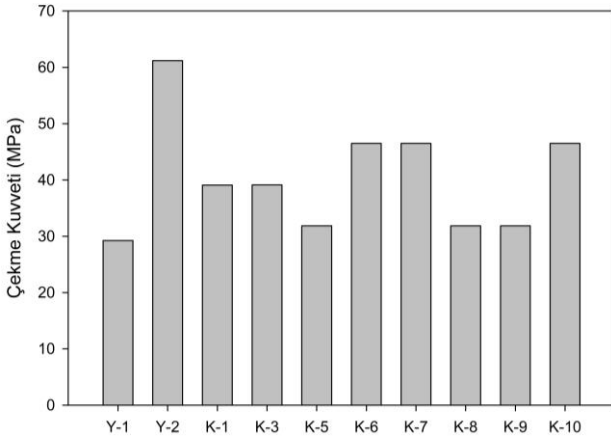
Şekil 7. Sonlu elemanlar analizinde Y-2 numunesinde çekme yükü altında oluşan gerilme.

3.2 Nümerik Çözüm

3.2.1 Çekme kuvveti

Yapılan sonlu elemanlar analizlerinde Tsai-Wu hasar ölçütü kullanılmıştır. Bu ölçüte göre plakalarda hasar oluşturan çekme kuvvetleri Şekil 8'de gösterilmiştir. Beklenildiği üzere plakada hasar oluşabilmesi için

gereken en yüksek kuvvet 61.2 kN ile yalın karbon elyaftan oluşan Y-2 modelinde bulunurken en düşük kuvvet ise 29.25 kN ile yalın cam elyaftan oluşan Y-1 modelinde bulunmuştur. Dört katman karbon elyaftan oluşan K-6, K-7 ve K-10 modellerinde hasar oluşturan kuvvet 46.5 kN olarak bulunmuştur. İki katman karbon elyaftan oluşan K-5, K-8 ve K-9 modellerinde ise bu kuvvet 31.86 kN çıkmıştır. Katmanları bir kat karbon bir kat cam elyaf olacak şekilde sıralanan K-3 modelinde Tsai-Wu ölçütüne göre hasar oluşturan kuvvet 39.13 kN olarak bulunmuştur. K-3 modelindeki gibi üç kat cam üç kat karbon elyaftan oluşan K-1 modelinde de aynı kuvvet hasara yol açmıştır. Elde edilen sonuçlara göre eksenel çekme yüküne maruz kalan karma kompozitlerde hasar oluşturacak kuvveti etkileyen tek etken onu oluşturan katmanlarda kullanılan elyaflardır. Karbon elyafın çekme dayanımının cam elyaftan yüksek olmasından dolayı karma yapı içerisinde daha fazla katmanda karbon elyaf kullanılırsa daha yüksek çekme kuvvetine dayanabileceği söylenebilir.



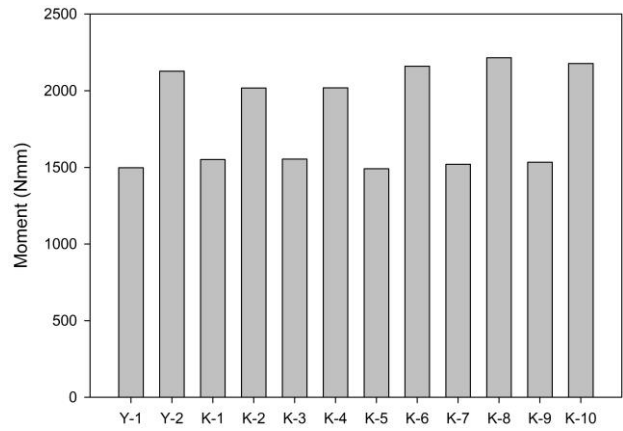
Şekil 8. Tsai-Wu ölçütüne göre plakaların dayanabileceği en yüksek çekme kuvvetleri.

Oluşturulan modellerden K-2 ve K-4 sırasıyla K-1 ve K-3 modellerinin ters dizilimine sahip olduğundan dolayı x ekseninde uygulanacak çekme yükü altında aynı sonuçları vereceğinden Şekil 8'de yer verilmemiştir.

3.2.1 Moment kuvveti

Karma kompozitlerin çekme yükü altındaki davranışları katmanların dizilişinden bağımsız oluşu farklı yükler altında incelenmesinin önemini ortaya

koymaktadır. Bu nedenle modellere moment uygulanarak Tsai-Wu ölçütüne göre ilk hasar oluşumuna neden olan moment değerleri bulunmuştur (Şekil 9). Buna göre en yüksek momente dayanabilecek model 2215 Nmm ile K-8 olmuştur. K-10 ve K-6 plakaları da sırasıyla 2178 Nmm ve 2160 Nmm moment ile yakın bir sonuç vermiştir. Yalın karbon elyaftan oluşan plaka ise 2128 Nmm momente dayabilmiştir. K-4 ve K-2 modellerinde ise sırasıyla 2019 Nmm ve 2018 Nmm momentleri altında ilk hasarlar oluşmuştur. Diğer modeller ise 1500 Nmm civarındaki moment yükleri altında hasara uğramışlardır.



Şekil 9. Tsai-Wu ölçütüne göre plakaların dayanabileceği en yüksek momentler.

Moment yükü altındaki plakaların davranışlarına genel olarak bakıldığında dayanabilecekleri momenti belirleyen en önemli etmenin en yüksek çekme yüküne maruz kalan en alt tabakanın malzemesinin olduğu görülmektedir. En alt tabakasında karbon elyaf olan modeller yaklaşık 2000-2200 Nmm momente dayanabilirken, cam elyaf olan modeller ise 1500 Nmm civarındaki yüklere dayanabilmiştir. En alt tabakasında karbon elyaf bulunan K-8 modeli, K-7 gibi diğer tabakalarda daha fazla karbon elyaf bulunan modelden daha fazla moment yüküne dayanabilmiştir. Bu sonuçlar böyle bir yüklemeye maruz kalacak bir kompozitte iç tabakalardan ziyade en yüksek çekme yüküne maruz kalacak en alt tabakanın malzemesinin önemli olduğunu göstermektedir. Bu nedenle en alt tabakada daha yüksek mukavemete ve rijitliğe sahip karbon elyafın kullanılmasının dayanım açısından daha uygun olacağı düşünülmektedir. Maliyet de

göz önüne alındığında moment yüküne maruz kalacak bir parçanın tasarımında K-8 modeli ön plana çıkmaktadır. Karma kompozit yapılar karşılaştırıldığında ise moment yükü için en uygun karma yapının hem en alt hem de en üst tabakada karbon elyafın kullanıldığı kompozitler olduğu görülmektedir. Sırasıyla üçer katman karbon/cam elyaf ile her bir katmanında sırasıyla karbon/cam kullanılan karma yapılar ise birbirlerine yakın sonuç vermişlerdir.

Modellerin çekme ve moment yükleri altındaki davranışları birlikte değerlendirilirse her ikisine de karşı en uygun yapının yalın karbon elyaftan oluşan Y-2 olduğu görülmektedir. Ancak bütün yapıyı karbon elyaftan üretmek maliyeti arttıracaktır. Özellikle çekme yükü altında biraz daha düşük mukavemet gösterse de K-6 ve K-10 tasarımlarının bu iki kuvvete ayrı ayrı iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Maliyet açısından bakıldığında ise her iki numunede de dört katman karbon elyaf ve iki katman cam elyaf kullanıldığı için bir fark bulunmamaktadır.

4. Sonuç

Bu çalışmada farklı dizilimlerle oluşturulan karma kompozit yapıların çekme ve moment yükü altında mekanik özellikleri analitik ve nümerik olarak incelenmiştir. Yapılan analitik çözüm ile nümerik yaklaşım doğrulanmıştır. Katmanların dizilimlerinin kompozitin çekme yükü altındaki dayanımı etkilemediği, kullanılan elyafın ise dayanımı doğrudan etkilediği sonucuna varılmıştır. Moment yükü altındaki kompozitler için ise bu yük altında en fazla çekme kuvvetine maruz kalacak en alt katmanın karbon elyaf olmasının dayanımını arttırdığı görülmüştür. Diğer katmanlardaki karbon veya cam elyaf sayısının ve diziliminin çok küçük farklılıklar oluşturduğu, dolayısıyla maliyet de hesaba katıldığında cam elyafın kullanımının daha uygun olacağı düşünülmektedir. Bu çalışmada yapılan K-6, K-8 ve K10 karma tasarımlarının yalın kompozitlerden daha yüksek momente dayanabildiği görülmüştür. İleriki çalışmalarda karma kompozitlerin farklı yükler veya birleşik yükler altındaki davranışları incelenebilir. Ayrıca

çeşitli diziliş, katman sayısı, yönelim veya malzeme kullanımının etkisi de incelenebilir.

Teşekkür

Yazar, sonlu elemanlar analizinde sunduğu altyapı için Gazi Üniversitesine teşekkür eder.

5. Kaynaklar

- Ali, H.T., Akrami R., Fotouhi S., Pashmforoush F., Fragassa C., and Fotouhi M., 2020. Effect of the stacking sequence on the impact response of carbon-glass/epoxy hybrid composites. *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, **18(1)**, 069–077.
- Atmaca, B.N., Oruç R., Aşçı G., Yiğit K., Yüzer S., Polat Y., and Ekici B., 2021. Mechanical performance of carbon - aramid fiber-reinforced laminated composites under impact and shear loading. *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A - Applied Sciences and Engineering*, **22**, 19–27.
- Erkliğ, A., Bozkurt Ö.Y., and AL-Tekreeti W.F., 2022. Influence of Nano-Silica on the Mechanical Properties of Jute/Glass Fiber Reinforced Epoxy Hybrid Composites. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, **37(2)**, 399–410.
- Eskizeybek, V., Ulus H., Kaybal H.B., Şahin Ö.S., and Avcı A., 2018. Static and dynamic mechanical responses of CaCO₃ nanoparticle modified epoxy/carbon fiber nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*, **140**, 223–231.
- Karacor, B., and Özcanlı M., 2022. Evaluation of Mechanical Properties of Intraply Hybrid Carbon/Aramid Composite Materials. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, **27(2)**, 537–556.
- Khakzad, F., Tüzemen M.Ç., Salamci E., and Anıl Ö., 2019. The effects on the flexural strength and impact behavior of nanographene ratio of the glass fiber nanocomposite plates. *Polymer Engineering and Science*, **59(10)**, 2082–2091.
- Korkmaz, M., Karakuzu R., and Korkmaz M., 2022. Mechanical characterization and low-velocity impact behavior of flax woven fabric-reinforced polymer composites. *Journal of Composite Materials*, **56(20)**, 3185-3195.

- Özsoy, M.İ., 2022. Investigation of the mechanical properties of carbon and basalt fiber laminated hybrid epoxy composites. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **28(4)**, 499–505.
- Selver, E., 2019. Acoustic Properties of Hybrid Glass/Flax and Glass/Jute Composites Consisting of Different Stacking Sequences. *Tekstil ve Mühendis*, **26(113)**, 42–51.
- Tüzemen, M.Ç., 2022a. Evaluation of tensile properties on glass/carbon fiber epoxy pure, interply, and locally nested intraply hybrid composites. *Polymer Composites*, **43(9)**, 6464-6475.
- Tüzemen, M.Ç., 2022b. Yalın, Katmanlar Arası ve Katman İçi Açılı Cam/Karbon Karma Kompozitlerin Çekme Yükü Altındaki Davranışları. 1, Çoğun, H. Y., Z. Karacagil, and S. Kızılyıldırım, Doğa ve Mühendislik Bilimlerinde Güncel Tartışmalar 4 (Ankara: Bilgin Kültür Sanat Yayınları), 222-230.
- v Pujar, N., Nanjundaradhya N. v., and Sharma R.S., 2022. Experimental investigation of the tensile and modal properties of epoxy based symmetric interlayer glass/carbon hybrid composites. *Materials Research Express*, **9(2)**, 025304.
- Wang, B., He B., Wang Z., Qi S., Zhang D., Tian G., and Wu D., 2021. Enhanced Impact Properties of Hybrid Composites Reinforced by Carbon Fiber and Polyimide. *Fiber Polymers*, **13(16)**, 2599.
- Wang, Q., Wu W., and Li W., 2018. Compression Properties of Interlayer and Intralayer Carbon/Glass Hybrid Composites. *Polymers*, **10(4)**, 343.
- Wu, W., Wang Q., and Li W., 2018. Comparison of Tensile and Compressive Properties of Carbon/Glass Interlayer and Intralayer Hybrid Composites. *Materials*, **11(7)**, 1105.
- Zuo, P., Srinivasan D. v., and Vassilopoulos A.P., 2021. Review of hybrid composites fatigue. *Composite Structures*, **274**, 114358.

Serbest Formlu İnce Cidarlı AA 5083-H111 Alaşımının Frezelenmesinde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkilerini Deneysel ve İstatistiksel Değerlendirilmesi

Uğurcan ÇELİK¹, Barış ÖZLÜ^{2*}, Halil DEMİR³

¹Plascam Plastik Otocam Sanayi ve Ticaret A.Ş., Kalıp Tasarım Bölümü, Gebze/Kocaeli

^{2*}Aksaray Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Aksaray

³Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Karabük

Sorumlu yazar e-posta*: barisozlu@aksaray.edu.tr

Ucelik@plascam.com

hdemir@karabuk.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8594-1234>

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7434-4488>

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9802-083X>

Geliş Tarihi: 18.07.2022

Kabul Tarihi: 02.03.2023

Öz

Anahtar kelimeler
AA 5083-H111 alaşımı;
Serbest form; İnce
cidar; Yüzey
pürüzlülüğü; Taguchi
yöntemi

Bu çalışmada, kuru işleme koşullarında serbest formlu ince cidarlı AA 5083-H111 alaşımın kaplamasız karbür parmak freze ile işlenmesinde cidar kalınlığının, kesme hızının ve ilerleme miktarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin belirlenmesine odaklanmıştır. Ayrıca en düşük yüzey pürüzlülüğü için optimum kesme parametrelerinin belirlenmesinde Taguchi yöntemi ve regresyon analizi uygulanmıştır. Deneysel tasarım Taguchi L32 (21x42) dizinine göre hazırlanmıştır. Deneysel ve analiz sonuçlarına göre, yüzey pürüzlülüğünü en aza indirmek için optimum kesme parametre seviyeleri A2B1C4 (5 mm cidar kalınlığı, 0,05 mm/diş ilerleme miktarı ve 200 m/dak) belirlenmiştir. ANOVA analiz sonucuna göre yüzey pürüzlülüğü üzerine en etkin kesme parametresi %57,14 ile ilerleme miktarı olduğu tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için yapılan regresyon analiz sonuçlarında ikinci derece regresyon analiz sonuçları lineer regresyon sonuçlarına göre gerçek değerlere en yakın sonuçları verdiği görülmüştür.

Experimental and Statistical Evaluation of the Effects of Cutting Parameters on Surface Roughness in Milling of Freeform Thin-Walled AA 5083-H111 Alloy

Abstract

Keywords
AA 5083-H111 alloy,
Free form, Thin wall,
Surface roughness,
Taguchi method

In this study, freeform thin-walled AA 5083-H111 alloy under dry machining conditions focused on determining the effects of wall thickness, cutting speed, and feed rate on surface roughness in machining uncoated carbide end mills. In addition, Taguchi method and regression analysis were applied to determine the optimum cutting parameters for the lowest surface roughness. The experimental design was prepared according to the Taguchi L32 (21x42) array. According to the test and analysis results, optimum cutting parameter levels A2B1C4 (5 mm wall thickness, 0.05 mm/tooth feed rate and 200 m/min) were determined to minimize the surface roughness. According to the ANOVA analysis results, it was determined that the most effective cutting parameter on the surface roughness was the feed rate with 57.14%. In the regression analysis results for the surface roughness, it was seen that the second-order regression analysis results gave the closest results to the true values according to the linear regression results.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Teknolojinin ilerlemesi ve üretim tekniklerinin gelişmesi ile beraber üretim endüstrisinde farklı birçok ürünün imalatında Alüminyum alaşımları

kullanılmaktadır (Mia *et al.* 2018). Alüminyum alaşımları, düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, korozyon direnci, iyi şekillendirilebilirlik ve düşük maliyet özelliklerine sahiptir. Bu nedenle, havacılık, otomotiv, gemi yapımı, plastik kalıplama ve

elektronik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu özellikleri bünyesinde bulundurmaları ve bu kadar yaygın bir kullanım yelpazesine sahip olması nedeni ile Alüminyum alaşımları dünya metal sektöründe çelikten sonra en çok kullanılan mühendislik malzemelerinin ikincisi olmasına neden olmuştur (Il *et al.* 2018, Cheng *et al.* 2020, Özlü 2021). Alüminyum alaşımlı ince duvarlı parçaların işlenmesi sırasında düşük sertlik nedeniyle ince duvarlar elastik olarak deforme olacağı bildirilmiştir (Qin *et al.* 2019). Bünyesinde ince duvar bulduran Alüminyum alaşımlarının işlenmesinde elastik deformasyon yaygın bir sorundur. Özellikle ince duvarlı parçaların işlenmesi sonucu performans değerlendirilmesinde en önemli çıktı parametrelerinden biride yüzey pürüzlülüğüdür. İnce duvarlı parçaların üretilmesinde yüzey pürüzlülüğü değeri, parçanın aşınma direncini, yorulma mukavemetini, korozyon direncini, yağlamayı ve sürtünmeyi doğrudan etkilemektedir (Cagan *et al.* 2020, Vakondios *et al.* 2012). İnce duvarlı ürünler, eklemeli imalat teknolojileri, enjeksiyon kalıplama, dövme, döküm, talaşlı imalat yöntemleri (tornalama, frezeleme, taşlama vb.) veya elektro erozyon işleme ile üretilebilir (Isaev *et al.* 2016). Genellikle ince duvarlı parçaların işlenmesinde en yaygın işleme yöntemlerinden biride frezeleme yöntemidir. Bu nedenle Alüminyum alaşımlı ince duvarlı bileşenlere sahip parçaların işlenmesinde, istenen boyutsal doğruluk ve üstün yüzey kalitesine ulaşmak için optimum kesme parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Bu nedenle bazı araştırmacıların ince duvarlara sahip parçaların işlenmesinde istenen boyutsal doğruluk ve üstün yüzey kalitesine ulaşmaya odaklanarak kesme parametrelerinin optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Shamsuddin *et al.* (2013) çalışmalarında ince duvarlı alüminyum parçaların frezelenmesinde farklı işleme stratejilerinin bir karşılaştırmasına odaklanmıştır. Yüzey pürüzlülüğü, işleme süresi ve duvar kalınlığının doğruluğu ile ilgili sınırlamaların, ince duvarlı parçaların işlenmesinde yüksek verimlilik elde edilmesi açısından çok önemli olduğu sonucuna varmışlardır. Dutta *et al.* (2017) yaptıkları çalışmada, firefly algoritmasını kullanarak

kesme hızı, ilerleme miktarı ve takım çapının değiştirilmesiyle verimli kapalı ince duvarlı cebin işlenmesi için optimal proses parametrelerini incelediler. Deney sonuçlarına dayanarak, takım çapının yüzey pürüzlülüğü üzerine en büyük etkiye sahip olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Qu *et al.* (2017), ince duvarlı parçaların frezelenmesinde kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü için optimum işleme parametrelerini belirlemek ve doğrulamak için bir optimizasyon tekniği uygulamışlardır. Sonuç olarak, kesme kuvvetinin ve yüzey pürüzlülüğünün optimizasyonu için ikinci dereceden polinom modelleri geliştirmişlerdir. Diş başına ilerleme ve kesme derinliğinin artırılması hem kesme kuvvetinin hem de yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olduğunu bildirmişlerdir. Ancak, iş mili hızının artmasının bu iki çıktı hedef üzerinde zıt etki yarattığını belirtmişlerdir. Vukman *et al.* (2020), AA 7075 alaşımında ince duvarlı parçaların frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğünü analiz etmek amacıyla bulanık mantığın geliştirilmesini ve uygulanmasını sunmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü için karşılaştırılan verilerin ortalama sapması %12,3 idi. ANOVA analizine ve bulanık modele dayanarak, minimum yüzey pürüzlülüğünü elde etmek için en iyi işleme stratejisinin Spiral takım yolu olduğu sonucuna varmışlardır. Öte yandan, Zigzag takım yolunda en büyük yüzey pürüzlülüğü ile sonuçlandığını görmüşlerdir. Ayrıca ilerleme miktarı ve et kalınlığı gibi diğer parametrelerin yüzey pürüzlülüğü üzerinde daha az etkisi olduğunu tespit etmişlerdir. Son olarak, girdi parametrelerinin analizi ve mümkün olan en iyi çözümün elde edilmesi amacıyla bulanık mantık uygulamasının başarıyla gerçekleştirildiği sonucuna varmışlardır. Wang *et al.* (2021), ince cidarlı 7075-T651 alüminyum alaşımının mısır nişastası süspansiyonu kullanılarak frezelenmesinde titreşimi bastırarak yüzey kalitesini artırmak için bir dizi kesme deneyi ve teorik simülasyon yapmışlardır. Deneysel ve teorik sonuçlarda mısır nişastasının titreşimi azalttığı ve yüzey pürüzlülüğünü iyileştirdiğini bildirmişlerdir. Oliveira *et al.* (2018), çark ve kanat imalatına katkı sağlamak amacıyla 4 eksenli CNC tezgahında ince cidarlı H13 takım çeliği parçaların frezelenmesinde uygulanan kesme parametrelerinin form hataları ve yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirmişlerdir.

Form hatası üzerine en etkin kesme parametresinin işleme yönü olduğunu kesme parametrelerinin artmasının yüzey pürüzlülüğünü artırdığını rapor etmişlerdir.

Üretim endüstrisinde ve mühendislik uygulamalarında serbest formlu ince cidarlı parçaların üretiminde AA 5083-H111 alaşım yaygın olarak kullanılmaktadır. Genel olarak ince cidarlı alüminyum alaşımların işlenmesinde en büyük sıkıntılardan biri işleme sırasında iş parçasının elastik olarak deforme olmasıdır. Literatürde özellikle ince cidarlı AA 5083-H111 alaşımının işlenmesinde bu sorunun giderilmesi konusunda yapılan çalışmaların sınırlı olduğu görülmüştür.

Bu nedenle yapılan çalışmada AA 5083-H111 alaşımının frezelenmesinde cidar kalınlığının, kesme hızının ve ilerleme miktarının yüzey pürüzlülüğü üzerine etkilerine odaklanmıştır. Ayrıca Taguchi yöntemi ile optimum kesme parametrelerinin belirlenmesinde Sinyal/Gürültü (S/N) oranı, yüzey pürüzlülüğü üzerine en etkin kesme parametresinin tayininde varyans (ANOVA) analizi ve regresyon analizi yapılarak istatistiksel değerlendirmesi yapılmıştır.

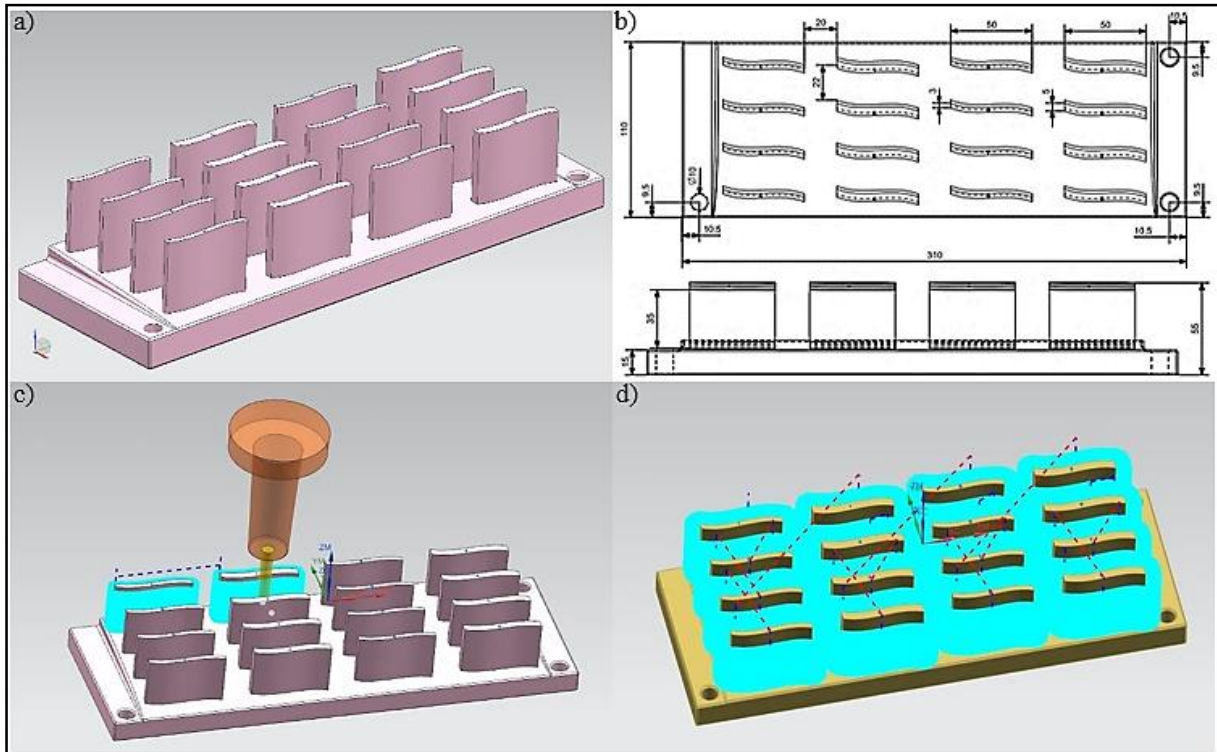
2. Materyal ve Metot

Yapılan çalışmada, iş parçası olarak 130x330x75 mm boylarında iki adet AA 5083-H111 ticari olarak temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan AA 5083-H111 alaşımının kimyasal kompozisyonu Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. AA 5083-H111 alaşımının kimyasal kompozisyonu

Element	% Ağırlık	Element	% Ağırlık
Fe	0,40	Zn	0,25
Si	0,40	Cr	0,21
Cu	0,10	Ti	0,15
Mn	0,48	Al	Kalan
Mg	4,72		

Deneylerde kullanılan numuneler 110x310x55 mm boyutlarında işlenmiştir. İlk olarak işlenecek iş parçasının tasarımı NX programında yapılmıştır. Tasarlanan parçanın CNC işleme merkezinde işlenebilmesi için takım yolu hazırlanmış ve bunun için spiral takım yolu dıştan içe doğru hareket seçilmiştir. Son olarak NC kodları çıkarılmıştır. Şekil 1’de tasarlanan iş parçası, ölçüleri, iş parçası için hazırlanan takım yolu ve görünüşü verilmiştir.



Şekil 1. (a) Tasarlanan iş parçası. (b) Tasarlanan iş parçasının ölçüleri. (c) Takım yolunun hazırlanması. (d) Takım yolunun üst görünüşü.

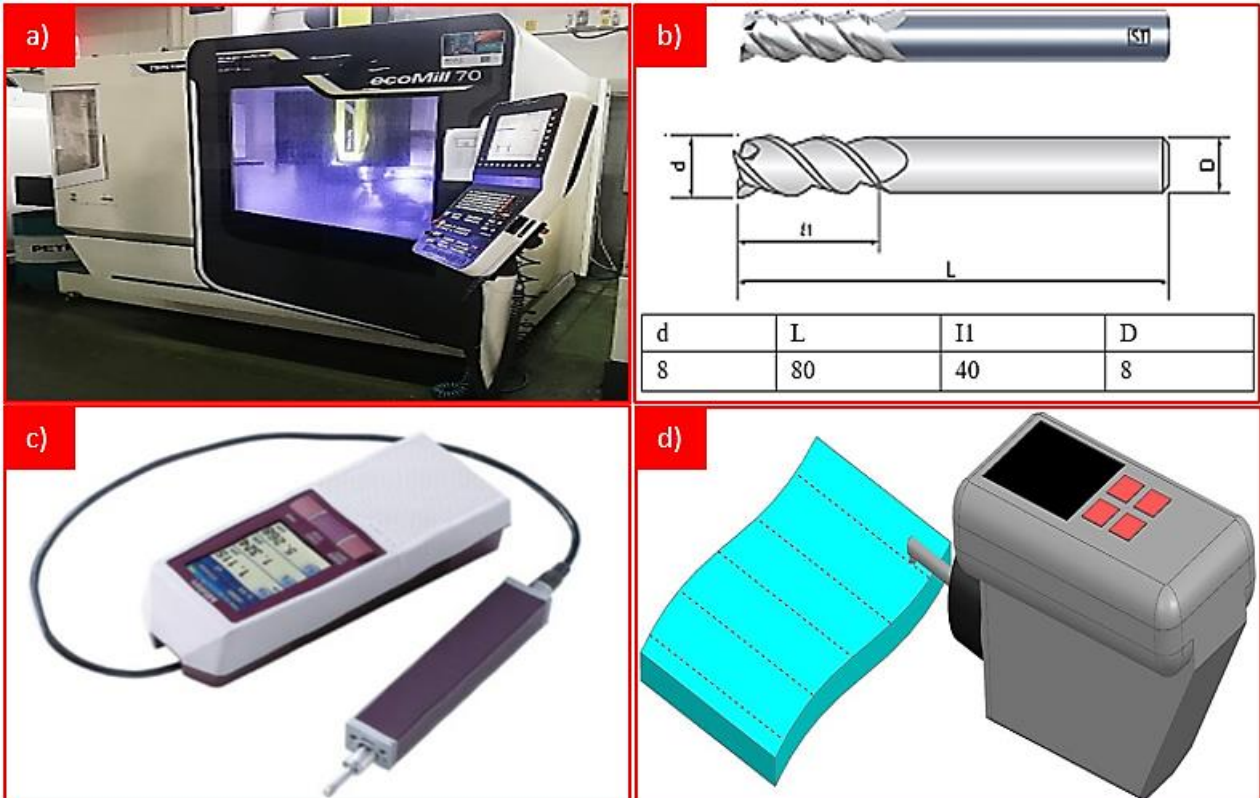
Deneyler 28 kW güce, iş mili maksimum 12000 dev/dak olan Siemens kontrol ünitesine sahip DMG MORI Ecomil 70 5 eksenli CNC işleme merkezinde yapılmıştır. Deneylerde 8 mm çapa sahip dört ağızlı, kaplamasız yekpare karbür parmak freze kullanılmıştır. Deneyler sırasında kesme parametrelerinin ve cidar kalınlığının yüze pürüzlülüğü üzerine etkilerini incelemek için işlenen yüzeylerin pürüzlülükleri Mitutoyo Surface SJ-210 model yüze pürüzlülük cihazı kullanılmıştır. Ölçümlerin sağlıklı yapılabilmesi için iş parçası açılı mengeneye bağlanmıştır. Ölçümler işleme yönüne dik her yüzeyden dört ölçüm yapılmıştır. Elde edilen ölçümlerin aritmetik ortalamaları hesaplanarak ortalama yüze pürüzlülük (Ra) değerleri belirlenmiştir. Şekil 2’de deneylerde kullanılan CNC işleme merkezi, karbür parmak freze ve yüze pürüzlülük cihazı görülmektedir.

Özellikle talaşlı imalat yöntemleri kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda deney sayısını azaltmak, ürün kalitesini artırmak, üretim ve test

maliyetlerini düşürmek için birçok optimizasyon teknikleri kullanılmaktadır. Bu teknikler arasında mühendislik analizlerinde en yaygın kullanılanı Taguchi metodudur. Bu yöntem optimum kesme parametrelerinin belirlenmesinde basit, verimli ve sistematik bir yaklaşım sunar. Bunun için AA 5083-H111 alaşımında ince cidarların frezelenmesinde en düşük Ra değerlerinin belirlenmesi için kesme parametrelerinin optimizasyonu yapılmıştır. Bunun için seçilen kesme parametreleri ve seviyeleri Çizelge 2’de sunulmuştur. Seçilen kesme parametrelerine göre deney tasarımı, Taguchi L32 ($2^1 \times 4^2$) dizinine göre hazırlanmıştır.

Çizelge 2. Frezeleme deneyleri için kesme parametreleri ve seviyeleri

Sembol	Kesme Parametreleri	Seviyeler			
		1	2	3	4
A	Cidar kalınlığı (Ck), mm	3	5	-	-
B	İlerleme Miktarı (f), mm/diş	0,05	0,1	0,15	0,2
C	Kesme Hızı (Vc), m/dk	80	120	160	200



Şekil 2. (a) DMG MORI Ecomill 70 5 eksenli CNC işleme merkezi. (b) Karbür parmak freze ve teknik bilgileri. (c) Mitutoyo Surface SJ-210 model yüzey pürüzlülük cihazı.

3. Bulgular ve Tartışma

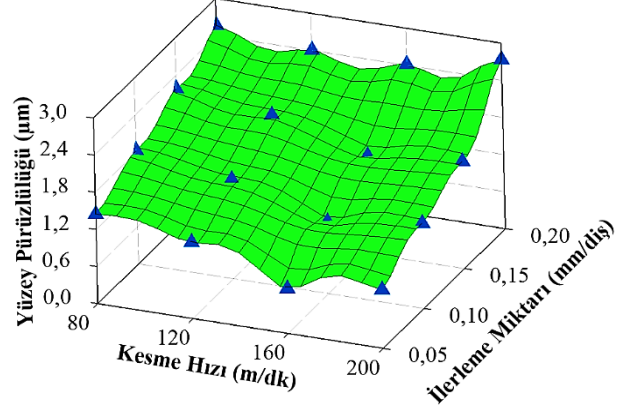
3.1 Yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesi

Günümüzde ince cidarlı bileşenlere sahip serbest biçimli geometriler içeren ürünler özellikle elektronik, otomotiv, havacılık ve uzay sanayinde karmaşık ve pahalı ürünler olarak bulunmaktadır. Özellikle bu parçaların talaşlı imalatla üretilmesinde kesme parametrelerinin uygun seçilmesi üretim sürecini, işlenen parçadaki yüzeylerin durumunu ve imalat maliyetini etkilemektedir (Cheng et al. 2020, Vukman et al. 2020). Bunun için yapılan çalışmada, serbest olarak tasarlanan 3 mm ve 5 mm kalınlığında ince duvarlara sahip parçaların dört farklı kesme hızında ve dört farklı ilerleme miktarında işlenmesi sonucu kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkileri incelenmiştir.

3 mm cidar kalınlığına sahip AA 5083-H111 alaşımının dört farklı kesme hızında ve dört farklı ilerleme miktarında işlenmesi sonucu yüzey pürüzlülüğündeki değişimler Şekil 3'de görülmektedir. 3 mm cidar kalınlığına sahip numunelerin frezelenmesi sonucu Ra değerleri 0,72 μm ile 2,73 arasında değişme göstermiştir. 80 m/dk kesme hızında ve 0,05 mm/diş ilerleme miktarında Ra değeri 1,449 μm ölçülmüştür. Aynı kesme hızında ilerleme miktarının sırası ile 0,1-0,15-0,2 mm/diş çıkarılmasıyla yüzey pürüzlülük değeri sırası ile %26,29, %51 ve %77,09 arttığı görülmüştür. 0,05 mm/diş ilerleme miktarında kesme hızının 120-160-200 m/dk çıkarılmasıyla Ra değeri 80 m/dk kesme hızına göre sırası ile %16, %50,31 ve %34,92 oranlarında azaldığı görülmüştür. 3 mm cidar kalınlığına sahip AA 5083-H111 alaşımının 0,05 mm/diş ilerleme miktarında ve 160 m/dk kesme hızında frezelenmesinde minimum Ra değeri 0,72 μm ölçülürken, maksimum Ra değeri 0,2 mm/diş ilerleme miktarında ve 200 m/dk kesme hızında 2,73 μm olmuştur.

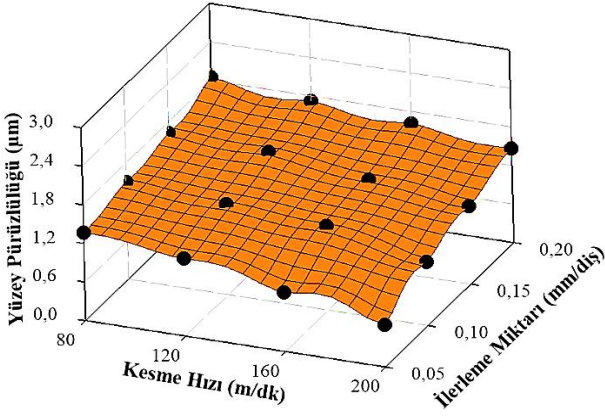
Şekil 4'de 5 mm cidar kalınlığına sahip AA 5083-H111 alaşımının dört farklı kesme hızında ve dört farklı

ilerleme miktarında işlenmesi sonucu yüzey pürüzlülüğündeki değişimler verilmiştir. 5 mm cidar



Şekil 3. 3 mm cidar kalınlığına sahip AA 5083-H111 alaşımının frezelenmesinde kesme hızına ve ilerleme miktarına bağlı yüzey pürüzlülüğü değişimi.

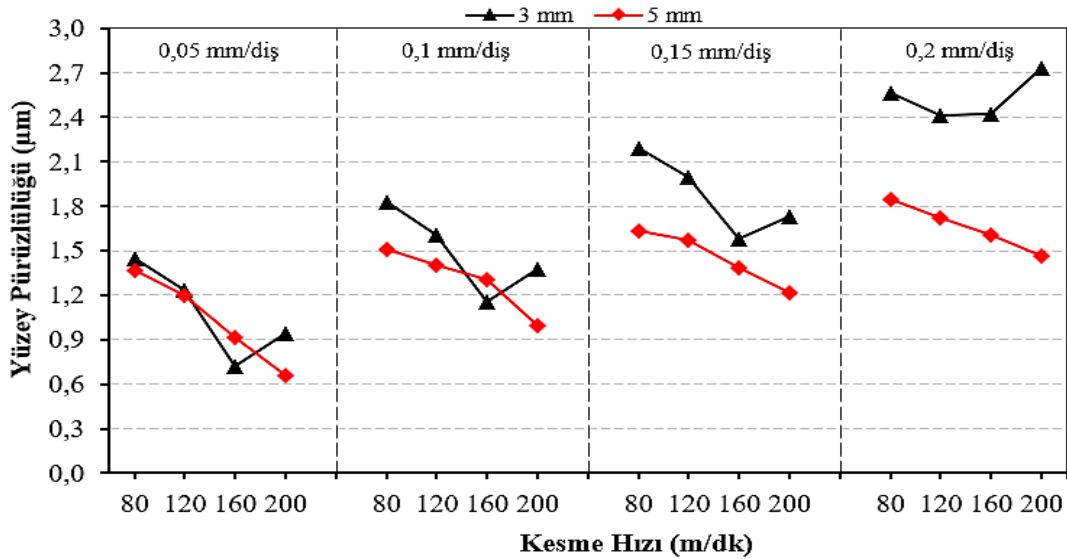
kalınlığına sahip numunelerin frezelenmesinde Ra değerlerinde 0,657 μm ile 1,85 μm arasında değişimler olmuştur. 0,05 mm/diş ilerleme miktarında ve 80 m/dk kesme hızında Ra değeri 1,371 μm ölçülmüştür. Ancak aynı kesme hızında ilerleme miktarının sırası ile 0,1-0,15-0,2 mm/diş çıkarılması ile Ra değeri sırası ile %10,21, %18,9 ve %34,94 artmanın olduğu tespit edilmiştir. 0,05 mm/diş ilerleme miktarında kesme hızının 120-160-200 m/dk çıkarılmasıyla Ra değeri 80 m/dk kesme hızına göre %12,33, %32,97 ve %52 oranlarında azalmanın olduğu görülmüştür. 5 mm cidar kalınlığına sahip AA 5083-H111 alaşımının 0,05 mm/diş ilerleme miktarında ve 200 m/dk kesme hızında frezelenmesinde minimum Ra değeri 0,657 μm ölçülürken, maksimum Ra değeri 0,2 mm/diş ilerleme miktarında ve 80 m/dk kesme hızında 1,850 μm olmuştur.



Şekil 4. 5 mm cidar kalınlığına sahip AA 5083-H111 alaşımının frezelenmesinde kesme hızına ve ilerleme miktarına bağlı yüzey pürüzlülüğü değişimi.

Yapılan çalışmada genel olarak kesme hızının artırılması ile azalan yüzey pürüzlülük değerleri, kesici takım üzerinde BUE oluşum eğiliminin azalması ile açıklanabilir. Alüminyum gibi malzemelerin işlenmesinde yüksek süneklilik kesici takımda BUE oluşum eğilimini artırır. İşleme sırasında kesici takım ucunda oluşan BUE, kararsız yapısı nedeniyle zayıf bir yüzey kalitesine neden olur. Dolayısıyla düşük kesme hızında kesici takım üzerinde meydana gelen BUE yüzey pürüzlülük değerinin artmasına ve zayıf bir yüzey oluşmasına neden olacağı bildirilmiştir. Kesme hızının artırılması ile azalan yüzey pürüzlülüğünü, takım/talaş ara yüzey sıcaklığının artması ile BUE oluşum eğiliminin azalması ile açıklanabilir (Barbosa et al. 2006, Demir and Gündüz 2019).

Şekil 5'de farklı kesme hızlarında ve ilerleme miktarında 3 mm ve 5 mm kalınlığında ince



duvarlara sahip AA 5083-H111 alaşımının frezelenmesinde duvar kalınlığına bağlı Ra değişimi gözükmemektedir. Genel olarak 3 mm ve 5 mm kalınlığında ince duvarlara sahip AA 5083-H111 alaşımının frezelenmesinde kesme hızının artması ile Ra değerleri azalırken ilerleme miktarının artmasıyla Ra değerlerinin artmasına neden olduğu gözlemlenmiştir. Ancak 3 mm cidar kalınlığına sahip AA 5083-H111 alaşımının 160 m/dk kesme hızına kadar işlenmesinde Ra değerinin azaldığı bu noktadan sonra kesme hızının 200 m/dk çıkarılması ile Ra değerinin arttığı görülmüştür.

Deney sonuçlarına göre duvar kalınlığının artması ile yüzey pürüzlülüğünün daha düşük çıktığı Şekil 5'de görülmektedir. Özellikle kesme hızının artması ile ince cidarlı parçalarda yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmektedir. Kesme hızının artması tezgâh fener milinin dönüş hızının (devir sayısının) artmasına neden olmakta buda tezgâh ve iş parçasının titreşiminin artmasına neden olmaktadır. Bu durumun ince cidarlı parçaların titreşimden daha fazla etkilenmesine neden olduğu düşünülmektedir. Genel olarak talaşlı imalat işlemlerinde titreşimin artması yüzey pürüzlülüğünü artmasına neden olduğu bilinmektedir (Şahinoğlu et al. 2017). Literatürdeki bir başka çalışmada titreşim ve pürüzlülük ilişkisi, artan ilerleme miktarı ile helis kanallardaki derinliğin artması, artan ilerleme ile yüzeyden koparılan talaşın derinliğinin dolayısıyla yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olacağı bildirilmiştir (Şahinoğlu and Rafighi 2021).

Şekil 5. AA 5083-H111 alaşımının farklı kesme parametrelerinde frezelenmesinde duvar kalınlığına bağlı yüzey pürüzlülük değişimi.

3.2 Sinyal-Gürültü (S/N) oranının analizi

Yapılan çalışmada en küçük Ra değeri için kesme parametrelerinin optimizasyonunda Taguchi yöntemi seçilmiştir. Taguchi yöntemiyle kesme parametrelerinin optimum seviyelerinin belirlenmesinde Sinyal/Gürültü (Signal-to-Noise, S/N) oranı olarak adlandırılan istatistiksel bir ölçüt kullanılmaktadır. Çalışmanın temel amacı en düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri istendiğinden S/N oranlarının hesaplanmasında kullanılan üç ana karakteristikten biri olan “En Küçük En İyi” yaklaşımı verilmiş ve Eşitlik 1’de verildiği gibi hesaplanmıştır (Özlu *et al.* 2019, Çırakoğlu *et al.* 2021, Uğur *et al.* 2020).

$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum y^2 \right) \quad (1)$$

Deneyler sonucu elde edilen Ra sonuçları ve S/N oranı Çizelge 3’de verilmiştir. Çizelge 3’de verilen Ra değerlerinden faydalanarak ortalama Ra değeri 1,554 µm iken, buna karşılık gelen ortalama S/N değeri -3,367 dB olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3. Yüzey pürüzlülüğü için deney sonuçları ve S/N oranları.

Deney No	Ra (µm)	Ra S/N (dB)	Deney No	Ra (µm)	Ra S/N (dB)
1	1,449	-3,221	17	1,371	-2,741
2	1,232	-1,812	18	1,202	-1,598
3	0,720	2,853	19	0,919	0,734
4	0,943	0,510	20	0,657	3,649
5	1,830	-5,249	21	1,511	-3,585
6	1,605	-4,110	22	1,406	-2,960
7	1,158	-1,274	23	1,306	-2,319
8	1,376	-2,772	24	0,992	0,070
9	2,188	-6,801	25	1,630	-4,244
10	1,998	-6,012	26	1,571	-3,924
11	1,583	-3,990	27	1,383	-2,816
12	1,727	-4,746	28	1,214	-1,684
13	2,566	-8,185	29	1,850	-5,343
14	2,408	-7,633	30	1,720	-4,711
15	2,418	-7,669	31	1,610	-4,137

16	2,730	-8,723	32	1,464	-3,311
----	-------	--------	----	-------	--------

Ra için kesme parametrelerinin optimum seviyelerine ait S/N yanıt tablosu Çizelge 4’de verilmiştir. Çizelge 4’de verilen Ra değerleri için kesme parametrelerinin optimum seviyeleri Şekil 5’deki grafikte verilmiştir. Herhangi bir kesme parametresi için en iyi seviye o kesme parametresinin tüm seviyeleri içerisindeki en büyük S/N oranını ifade etmektedir. Buna göre Ra için optimum seviyeleri veren kesme parametrelere seviyeleri A2B1C4 (5 mm, 0,05 mm/diş ve 200 m/dak) olarak belirlenmiştir (Şekil 5).

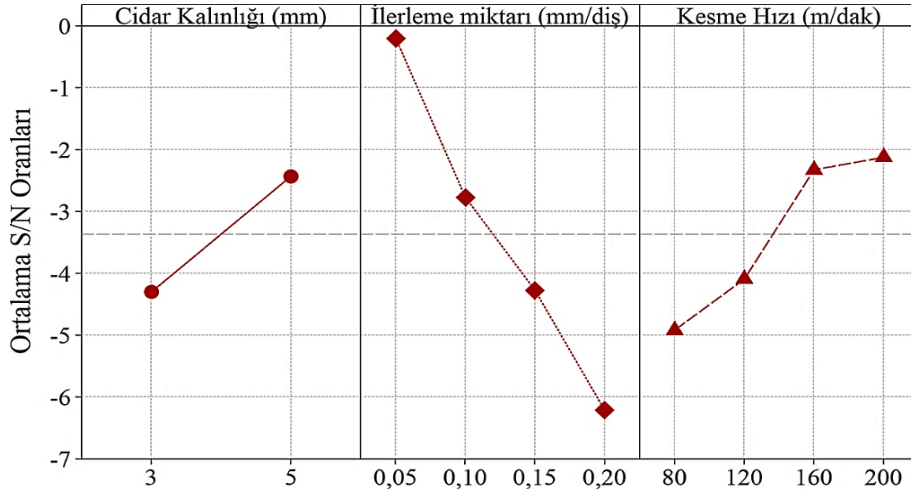
Çizelge 4. Yüzey pürüzlülüğü için S/N yanıt tablosu.

Kesme Parametreleri			
Seviyeler	Ck (mm)	f (mm/diş)	Vc (m/dk)
Seviye 1	-4,302	-0,203	-4,921
Seviye 2	-2,433	-2,775	-4,095
Seviye 3		-4,277	-2,327
Seviye 4		-6,214	-2,126
Delta	1,870	6,011	2,795

3.3 Varyans analizi (ANOVA)

Cidar kalınlığının, ilerleme miktarının ve kesme hızının Ra üzerine etkilerini belirlemek için %95 güven seviyesinde Varyans Analizi (ANOVA) yapılmıştır. Ra için ANOVA analizi sonuçları Çizelge 5’de verilmiştir. Çizelge 5’deki P değeri 0.05’den küçük olması kesme parametrelerinin Ra üzerine etkisini istatistiksel olarak anlamlı olacağını bildirmişlerdir (Çırakoğlu *et al.* 2021, Işık *et al.* 2021, Akgün *et al.* 2021).

Frezeleme deneylerinde kullanılan kesme parametrelerinin Ra üzerine yüzde etki oranlarını Çizelge 5’de verilmiştir. Ra üzerine en etkin kesme parametresi %57,14 ile ilerleme miktarı olmuştur. Bunu sırası ile %14,64 cidar kalınlığı ve %12,34 ile kesme hızı takip etmiştir.



Şekil 5. Yüzey pürüzlülüğü için kesme parametrelerinin S/N oranları ana etki grafiği.

Çizelge 5. Yüzey pürüzlülüğü için ANOVA tablosu.

Kesme Parametreleri	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Değeri	P Değeri	Katkı Oranı (%)
Ck (mm)	1	1,1724	1,1724	22,12	0,000	14,64
f (mm/diş)	3	4,5750	4,5750	28,78	0,000	57,14
Vc (m/dk)	3	0,9882	0,9882	6,22	0,003	12,34
Hata	24	1,2717	1,2717			15,88
Toplam	31	8,0073				100

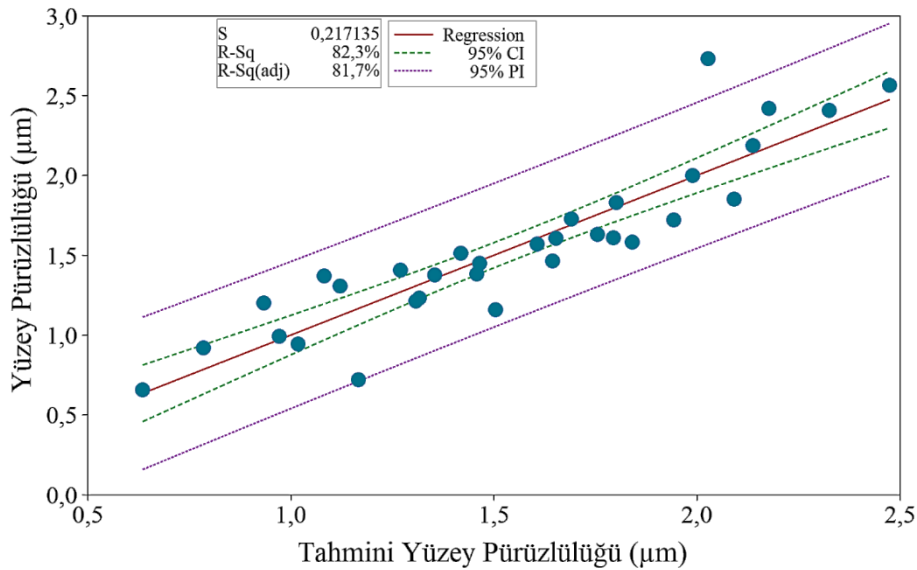
3.4. Regresyon analizi

Deneysel olarak kullanılan kesme parametreleri ile R_a arasındaki ilişkiyi anlamak amacıyla regresyon analizi uygulanmıştır. R_a 'nın tahmini için lineer ve ikinci dereceden regresyon modelleri ayrı ayrı oluşturulmuştur. R_a için elde edilen lineer regresyon modelleri Eşitlik 2'de verilmiştir. Lineer regresyon modeli ile R_a için elde edilen denklem korelasyon katsayısı (R^2) %82,34 hesaplanmıştır. R_a için elde

edilen deney sonuçları ile lineer regresyon modeli kullanılarak elde edilen tahmini sonuçların karşılaştırılması Şekil 6'da verilmiştir.

$$R_a (\mu m) = -2,0 - 0,1914Ck + 6,732f - 0,003725 Vc \quad (2)$$

$$R^2 = \%82,34 \quad R^2 (\text{Düzeltilmiş}) = \%80,44$$



Şekil 6. Yüzey pürüzlülüğü için deney sonuçları ile lineer regresyon modeliyle elde edilen tahmini değerlerinin karşılaştırılması.

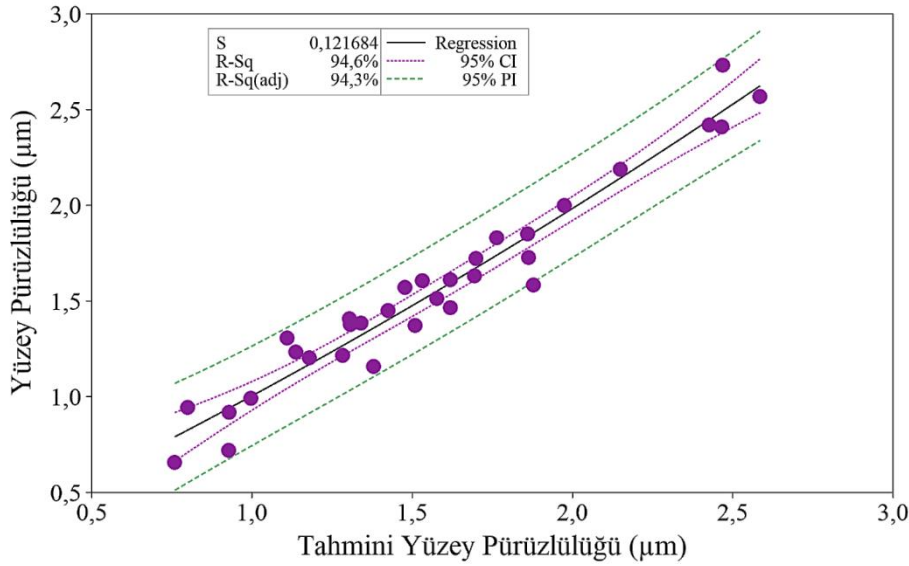
Ancak yapılan analiz %95 güven seviyesinde yapıldığı için elde edilen tahmini Ra değerleriyle gerçek Ra değerleri arasındaki farkın fazla olmasından dolayı kesme parametrelerin etkileşimlerini de kapsayan ikinci dereceden denklem üretilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için daha yüksek tahmin gücünün elde edilmesi amacıyla oluşturulan ikinci dereceden regresyon modeli Eşitlik 3'de görülmektedir. İkinci dereceden regresyon modeli ile yüzey pürüzlülüğü için elde edilen denklem katsayısı (R²) %94,49 hesaplanmıştır.

Yüzey pürüzlülüğü için elde edilen deney sonuçları ile ikinci dereceden regresyon modeli kullanılarak elde edilen tahmini sonuçların karşılaştırılması Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 6 ve Şekil 7 incelendiğinde

gerçek değerlere en yakın sonuçlar ikinci dereceden regresyon modeli ile hesaplanan tahmin değerlerin olduğu görülmüştür.

$$Ra (\mu m) = 1,411 + 0,2181 Ck + 0,01208 Vc + 9,76 f * f + 0,000025 Vc * Vc - 2,698 Ck * f - 0,000516 Ck * Vc + 0,02825 f * Vc \quad (3)$$

$$R^2 = \%94,49 \quad R^2 (\text{Düzeltilmiş}) = \%92,57$$



Şekil 7. Yüzey pürüzlülüğü için deney sonuçları ile ikinci dereceden regresyon modeliyle elde edilen tahmini değerlerinin karşılaştırılması.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, AA 5083-H111 alaşımın kuru koşullarında dört ağızlı kaplamasız yekpare karbür parmak freze ile işlenmesinde cidar kalınlığının, kesme hızının ve ilerleme miktarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin belirlenmesine odaklanmıştır. Ayrıca işleme parametrelerinin optimum değerlerinin belirlenmesinde Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen bulgular şu şekilde özetlenmiştir:

- ❖ 3 mm cidar kalınlığında, 0,05 mm/diş ilerleme miktarında ve 160 m/dak kesme hızında en iyi yüzey pürüzlülüğü 0,72 µm iken 5 mm cidar

kalınlığında, 0,05 mm/diş ilerleme miktarında ve 200 m/dak kesme hızında en iyi yüzey pürüzlülüğü 0,657 µm ölçülmüştür.

- ❖ 3 mm cidar kalınlığında, 0,2 mm/diş ilerleme miktarında ve 200 m/dak kesme hızında en yüksek yüzey pürüzlülüğü 2,73 µm iken 5 mm cidar kalınlığında, 0,2 mm/diş ilerleme miktarında ve 80 m/dak kesme hızında en yüksek yüzey pürüzlülüğü 1,85 µm ölçülmüştür.
- ❖ Yüzey pürüzlülüğünün optimum değerleri için yapılan optimizasyon sonucu kesme parametrelere seviyeleri A2B1C4 (5 mm cidar kalınlığı, 0,05 mm/diş ilerleme miktarı ve 200 m/dak) elde edilmiştir.

- ❖ ANOVA analiz sonucuna göre yüzey pürüzlülüğü üzerine en etkin kesme parametresi %57,14 ile ilerleme miktarı olmuştur. Bunu sırası ile %14,64 cidar kalınlığı ve %12,34 ile kesme hızı takip etmiştir.
- ❖ Yüzey pürüzlülüğü için yapılan regresyon analiz sonuçlarında ikinci derece regresyon analiz sonuçları ($R^2 = \%94,49$), lineer regresyon sonuçlarına ($R^2 = \%82,34$) göre gerçek değerlere en yakın sonuçları verdiği görülmüştür.

Teşekkür

Yapılan çalışmada desteklerini esirgemeyen, bünyesinde bulunan ekipmanların kullanılmasına izin veren PLASCAM A.Ş yönetimine teşekkür ederim.

5. Kaynaklar

- Akgün, M., Demir, H., 2021. Optimization of cutting parameters affecting surface roughness in turning of Inconel 625 superalloy by cryogenically treated tungsten carbide inserts. *SN Applied Sciences*, **3**, 277. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04303-2>
- Barbosa, C., Dille, J., Delplancke, J. L., Rebello, J. M. A., Acselradc, O., 2006. A microstructural study of flash welded and aged 6061 and 6013 aluminum alloys. *Materials Characterization*, **57**, 187-192. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2006.01.002>
- Cagan, S. C., Venkatesh, B., Buldum, B. B., 2020. Investigation of surface roughness and chip morphology of aluminum alloy in dry and minimum quantity lubrication machining. *Materials Today: Proceedings*, **27**, 1122-1126. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.547>
- Cheng, D. J., Xu, F., Xu, S. H., Zhang, C. Y., Zhang, S. W., Kim, S. J., 2020. Minimization of Surface Roughness and Machining Deformation in Milling of Al Alloy Thin-Walled Parts. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, **21**, 1597-1613. <https://doi.org/10.1007/s12541-020-00366-0>
- Çırakoğlu, F., Özlü, B., Demir, H., 2021. Hardox 450 çeliğinin lazerle delinmesinde kesme parametrelerinin delik kalitesi üzerine etkisinin incelenmesi ve kesme parametrelerinin optimizasyonu. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, **8**, 913-923. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.977412>

- Demir, H., Gündüz, S. 2009. The effects of aging on machinability of 6061 aluminium alloy. *Materials & Design*, **30**, 1480-1483. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.08.007>
- Dutta, A., Das, A., Joshi, S. N., 2017. Optimum process parameters for efficient and quality thin wall machining using firefly algorithm. *International Journal of Additive and Subtractive Materials Manufacturing*, **1**, 3-22.
- Il, A., Chatelain, J. F., Lalonde, J. F., Balazinski, M., Rimpault, X., 2018. An experimental investigation of the influence of cutting parameters on workpiece internal temperature during Al2024-T3 milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **97**, 413-426. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1948-3>
- Isaev, A., Grechishnikov, V., Pivkin, P., Kozochkin, M., Ilyuhin, Y., Vorotnikov, A., 2016. Machining of thin-walled parts produced by additive manufacturing technologies. *Procedia CIRP*, **41**, 1023-1026. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.088>
- Işık, R., Özlü, B., Demir, H., 2021. St-37 malzemesinin lazer ile kesme işleminde seçilen parametrelerin etkisinin deneysel ve istatistiksel olarak incelenmesi. *Firat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **33**, 161-171. <https://doi.org/10.35234/fumbd.769716>
- Mia, M., Singh, G. R., Gupta, M. K., Sharma, V. V., 2018. Influence of Ranque-Hilsch vortex tube and nitrogen gas assisted MQL in precision turning of Al 6061-T6. *Precision Engineering*, **53**, 289-299. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2018.04.011>
- Oliveira, E. L., Souza A. F., Diniz, A. E., 2018. Evaluating the influences of the cutting parameters on the surface roughness and form errors in 4-axis milling of thin-walled free-form parts of AISI H13 steel. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering volume*, **40**, 334. <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1250-1>
- Özlü, B., Akgün, M., Demir, H., 2019. AA 6061 Alaşımının tornalanmasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisinin analizi ve optimizasyonu. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **5**, 151-158. <https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2019.02.04>

- Özlü, B., 2021. Experimental and statistical investigation of the effects of cutting parameters on kerf quality and surface roughness in laser cutting of Al 5083 alloy. *Surface Review and Letters*, **28**, 2150093.
<https://doi.org/10.1142/S0218625X21500931>
- Qin, G., Wang, H., Lin, F., Sun, S., Guo, Y., Wu, T., Wu, Z., 2019. A new approach to deformation control of aeronautical monolithic components for aluminum alloy plates based on stress inverse and stress evaluation. *SCIENTIA SINICA Technologica*, **50**, 85-102.
<https://doi.org/10.1007/s12541-020-00366-0>
- Qu, S., Zhao, J., Wang, T., 2017. Experimental study and machining parameter optimization in milling thin-walled plates based on NSGA-II. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **89**, 2399-2409.
<https://doi.org/10.1007/s00170-016-9265-1>
- Shamsuddin, K. A., Ab-Kadir, A. R., Osman, M. H., 2013. A comparison of milling cutting path strategies for thinwalled aluminium alloys fabrication. *The International Journal of Engineering & Science*, **2**, 1-8.
- Şahinoğlu, A., Güllü, A., Dönertaş, M. A., 2017. GGG50 malzemenin torna tezgâhında işlenmesinde kesme parametrelerinin titreşim, ses şiddeti ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisinin araştırılması. *Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, **2**, 67-79.
- Şahinoğlu, A., Rafighi, M., 2021. Machinability of hardened AISI S1 cold work tool steel using cubic boron nitride. *Scientia Iranica*, **28**, 2655-2670.
- Uğur, A., Nas, E., Gökkaya, H., 2020. Investigation of the machinability of SiC reinforced MMC materials produced by molten metal stirring and conventional casting technique in die-sinking electrical discharge machine. *International Journal of Mechanical Sciences*, **186**, 105875.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105875>
- Vakondios, D., Kyratsis, P., Yaldiz, S., Antoniadis, A., 2012. Influence of milling strategy on the surface roughness in ball end milling of the aluminum alloy Al7075-T6. *Measurement*, **45**, 1480-1488.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.03.001>
- Vukman, J., Lukic, D., Borojevic, S., Rodic, D., Milosevic, M., 2020. Application of fuzzy logic in the analysis of surface roughness of thin-walled aluminum parts. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, **21**, 91-102.
<https://doi.org/10.1007/s12541-019-00229-3>
- Wang, S. Q., He, C. L., Li, J. G., Wang, J., 2021. Vibration-free surface finish in the milling of a thin-walled cavity part using a corn starch suspension. *Journal of Materials Processing Technology*, **290**, 116980.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116980>

AKÜ FEMÜBİD 23 (2023) 027201 (523-531)

AKU J. Sci. Eng. 23 (2023) 027201 (523-531)

DOI: 10.35414/akufemubid.1152905

Araştırma Makalesi / Research Article

Işık Yayan Diyot Dizisi ile Işık Mikroskobunda Faz-Kontrast Görüntüleme

Nur Efsan KÖKSAL^{1*}, İlyas ÇANKAYA¹, Esra ŞENGÜN ERMEYDAN¹¹Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye.

*Sorumlu yazar e-posta: nekoks@aybu.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-6046-8014>
e-posta: icankaya@ybu.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-6072-3097>
e-posta: eermeydan@ybu.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5953-4301>

Geliş Tarihi: 02.08.2022 Kabul Tarihi: 02.03.2023

Öz

Anahtar kelimeler

Işık mikroskobu; LED dizisi; Faz-kontrast görüntüleme; 32x32 LED dizisi; eğik aydınlatma

Bu çalışmada, aydınlık-alan, karanlık-alan ve diferansiyel faz-kontrast görüntülerini aynı anda elde edebilen tek-kamerallı bir görüntüleme sistemi, programlanabilir bir ışık yayan diyot (LED) dizisi aracılığıyla farklı aydınlatma modelleri ile birlikte kullanılmıştır. Kullanılan LED dizisi, aydınlatma açılarının esnek bir şekilde modellenmesine olanak sağlamıştır. Sol-sağ, üst-alt ve eğik aydınlatmaların etkisi, hem yanak epitel hücresinde hem de soğan zarı hücresinde detaylı olarak gözlemlenmiştir. Aydınlık-alan, karanlık-alan ve diferansiyel faz-kontrast görüntüleri, 32x32 LED dizisinin desenleri değiştirilerek herhangi bir hareketli parça olmadan elde edilmiştir. Bu nedenle, kullanılan sistem basittir, düşük maliyetlidir ve geleneksel ışık mikroskobu ile uyumludur.

Phase-Contrast Imaging at an Optical Microscope utilizing a Light Emitting Diode Array

Keywords

Optical microscope, LED array; Phase-contrast imaging; 32x32 LED array; oblique illumination

Abstract

In this study, a single-camera imaging system that can simultaneously acquire bright-field, dark-field and differential phase-contrast images is used with different illumination patterns through a programmable light-emitting diode (LED) array. The LED array allows flexible modeling of illumination angles. The effect of left-right, top-bottom and oblique illumination was observed in detail both in the cheek epithelial cell and in the onion membrane cell. Bright-field, dark-field and differential phase-contrast images are obtained without any moving parts by changing the patterns of 32x32 LED array. Therefore, the system used is simple, low-cost and compatible with the conventional light microscopy.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi.

1. Giriş

Bireylerin sağlığı hakkındaki bilgilerin öğrenilmesine olanak sağlayan tanı ve teşhis yöntemleri, doktorlara ve laboratuvar uzmanlarına yardım eden bilgiler sağlar. Teşhis konusundaki standart yöntemler uzun adımlar içerir. Örneğin, kan hücresini kullanarak hastalık teşhis etmek için tam kan sayımı yapan bir cihaz kullanılır. Herhangi bir anormal durum olması halinde cihaz teknisyene uyarı verir. Uyarıdan sonraki adım ise mikroskobik inceleme adıdır. Bazı hallerde, kan yaymadaki hücre morfoloji hakkında yeterli bilgiyi elde edebilmek için ek testler de istenebilir. Kan yayması

gerekliliğini azaltan otomatik kan analiz cihazlarına rağmen kan yayması incelemesi, yaygın olarak anemi gibi hastalıkların ayırıcı tanısının yapılmasında, lenfoma ve lösemi teşhisinde, ileri tetkiklerin önerilmesinde ve bazı enfeksiyonların hızlı teşhisinde hala vazgeçilmez bir araçtır. Muayene için bir kan yayması hazırlamada ise kan hücreleri, metanol eklenerek korunur. Bu işleme *sabitlenme işlemi* adı verilir. Sabitlenmiş kan filmi, çeşitli boya renkleri ile boyanır, böylece hücreler mikroskop aracılığıyla incelendiği zaman tanınabilir. Fakat, boyama işlemi, kan yayması hazırlamada harcanan zamanın ve maliyetin büyük

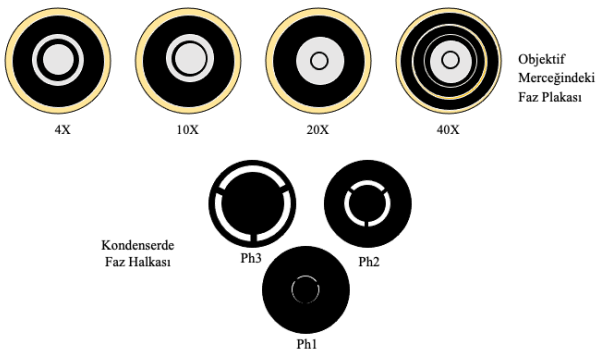
bölümünü oluşturur. İnceleme, kan yaymasından maksimum bilgi elde etmek için deneyimli ve yetenekli bir kişi, bir laboratuvar bilimcisi veya tıbbi olarak kalifiye bir hematolog veya patolog tarafından yapılmalıdır. Bu incelemeler, tüm kantitatif mikroskopi (quantitative mikroskopi) tabanlı yöntemlerin sahip olduğu, düşük verim ve gözlemci özelliği sınırlamalarına sahiptir. Bu nedenle; faz görüntüleme teknolojileri, mevcut klinik iş akışında bu sınırlamaların üstesinden gelme potansiyeline sahiptir. Bu teknikler, hücreleri etiketsiz (label-free) olarak görüntülediği için, boyamaya ayrılan hem zaman hem de kaynaklar korunur. Ayrıca, bu teknolojiler, standart iki aşamalı süreci tek adımlı otomatik mikroskopik analizle değiştirme potansiyeline sahiptir. Faz görüntüleme enstrümanları herhangi mevcut bir mikroskopiye kolayca eklenebilir ve klinik iş akışına entegre etmek için özel bir numune hazırlamaya gerek yoktur (Majeed *et al.* 2017).

Bir faz görüntüleme aracı olan ışık mikroskobu, gözle ayırt edilemeyecek kadar küçük numunelerin incelenmesi ve gözlemlenmesi amacıyla medikal araştırmalarda kullanılan en temel ve en eski bilimsel araçlardan biridir. Çıplak göz ile ayırt edilemeyen küçük ve yoğun numuneleri, net bir şekilde ayırt edilebilir büyük boyutlara dönüştürebilir. Mikroskopik görüntülere daha fazla ayrıntı getirmek ve görünürlüğünü geliştirmek için yüzyılları aşkın bir süredir farklı tekniklerle çalışmalar yapılmaktadır (Abbe, 1873). Bu tekniklerden en yaygın olanı ise kontrast artırıcı tekniklerdir. Işığın, parlaklığın veya rengin absorpsiyonu ile üretilen kontrast, aydınlık-alan mikroskopunda numuneleri görüntülemenin bir aracıdır. Yapılar doğal olarak renkli olabilirler veya yapay olarak kimyasal renkli boyalar gibi kontrast maddeleri eklenerek renklendirilebilirler. Bu kontrast maddeleri, beyaz ışığın bir kısmını absorbe ederken diğer renkleri iletir veya yansıtır. Işığı tamamen veya kısmen absorbe eden bu numuneler *genlik nesnelidir* (amplitude objects). Fakat, özellikle canlı hücreler veya boyasız, çok ince numunelerden kontrast elde edilirken birçok engel ile karşılaşılır. Karşılaşılan en büyük engel ise, ışığın saçılması veya absorbe edilememesidir. Bunlar genelde *şeffaf* veya *faz nesnelidir*. Kimyasal

boyalar veya sabitleyiciler ile öldürerek veya işleyerek numunelerin yapısını değiştirmemek ise çok önemlidir. Faz nesneleri, numune tarafından kırılan ışığın fazını numuneden etkilenmeden geçen sapmasız, doğrudan ışığa kıyasla yaklaşık 1/4 dalga boyu oranında geciktirerek hafif bir şekilde değiştirir. Fakat, bu faz değişimi insan gözünün algılayabileceği bir fark oluşturmaz. Faz değişimi, yalnızca görünür spektrumun renklerine veya farklı ışık yoğunluğu seviyelerine (dalga genliği) daha duyarlıdır. Faz numunelerinde, doğrudan saçılmayan ışık numunenin içinden veya çevresinden sapma olmadan geçer. Bununla birlikte, numune tarafından kırılan ışığın genliği, ışık emici bir nesnede (genlik nesnesinde) olduğu gibi azalmaz, ancak numunenin kırılma indisi veya kalınlığı (veya her ikisi) nedeniyle numune tarafından yavaşlatılır. Yaklaşık 1/4 dalga boyu gerisinde kalan bu kırılan ışık, görüntü düzlemine faz farkıyla gelir, ancak girişimde esasen yoğunlukta azalmaz. Sonuç olarak, görüntünün ayrıntıları neredeyse görünmez kılacak kadar kontrasttan yoksundur (Davidson & Abramowitz, 2002). Kırılma indekslerinin uzaysal değişimden kaynaklanan faz kayması, mikroskopide uzaysal kontrast kaynağı olabilir. Numunenin fazı (θ), numunenin kalınlığının (t) ve kırılma indisinin (n) çarpımı ile belirlenir ($\theta = k_o \cdot (n - n_o) \cdot t$, k_o ışığın boşluktaki dalga vektörüdür.) (G. Popescu *et al.* 2008). Faz-kontrast görüntüleme, şeffaf numunelerdeki faz kaymasını kontrastı artırarak görünür hale getiren bir yöntemdir, etiketsiz bir teknik olması sebebiyle canlı hücrelerin görüntülenmesi başta olmak üzere birçok biyolojik numunenin görüntülenmesinde yaygın olarak kullanılır (Vyas, Li, Lin, Yeh, & Luo, 2022).

Mikroskopide en çok kullanılan görüntüleme yöntemleri; aydınlık-alan (BF) mikroskopisi, karanlık-alan (DF) mikroskopisi ve faz-kontrast (PhC) mikroskopisidir (Karakoç, Ketani & Ketani, 2016, Liu, Tian, Liu, & Waller 2014). Öte yandan, BF görüntüleme, güçlü absorpsiyona sahip numuneleri gözlemlenmek için çok uygundur. BF görüntüleme, etiketlenmemiş hücreler ve ince doku örnekleri gibi yarı saydam örneklerin gözlemlenmesi için uygun değildir, çünkü bu örnekler görünür ışıkta güçlü bir zayıflama sergilemez. DF görüntüleme, numunelerin kenarlarına duyarlı olan ince numunelerin yüksek

kontrastlı görüntülerini üretir. DF görüntüleme, optik görüntüleme sistemlerinin yakalayabileceği maksimum açının ötesinde eğik ışık aydınlatması kullanır, böylece numuneden kırılan ışığı toplarken saçılmamış arka planı en aza indirir. PhC mikroskopisi, doğrudan ışık (direct light) ve kırılan ışık (diffracted light) tarafından üretilen girişim eğrisi kontrastını kaydırarak ilişkili fazı artırır. PhC mikroskopisi, şeffaf ve boyasız biyolojik numuneler için kullanılır. Zernike faz kontrast veya ayrımlı girişim kontrast mikroskobu (DIC), ve *kantitatif faz* örnekleri gibi faz kontrast için bir çok seçenek mevcuttur. Görüntülerin faz bilgisi, yapıların hem kalınlık hem de kırılma indisi hakkında bilgi verir (Gabriel Popescu, 2011, Frits Zernike 1942, F. Zernike 1955). BF mikroskobu, DF mikroskobu ve faz-kontrast görüntüleri, numuneler hakkında detaylı bilgiler sunsa da; faz kontrast görüntüleme, halka şeklindeki yoğunlaştırıcılar ve özel objektif lensler gibi özel optik elemanlar (Şekil.1) ve ayrı bir optik düzenleme gerektirdiğinden bu görüntülerin eşzamanlı olarak alınması geleneksel mikroskoplarda mümkün değildir. Ayrıca, görüntüleme yöntemleri arasındaki dönüşüme zaman ve ek optik elemanlardaki masraflar eşlik eder (Kheireddine, Smith, Nicolau, & Wachsmann-Hogiu 2019, Lee, Ryu, Kim, Jung, & Joo 2015, F. Zernike 1935, Zuo, Sun, Feng, Hu, & Chen 2016). Bahsedilen nedenlerden ötürü, örneğin canlı bir numunenin gerçek zamanlı görüntüsünün BF, DF ve faz-kontrast görüntülemesinin birlikte yapılması geleneksel ışık mikroskoplarında mümkün olmamaktadır.



Şekil 1. Faz kontrast optik elemanları

Mikroskopide, numunenin uygun şekilde aydınlatılması, yüksek çözünürlüklü ve yüksek

kaliteli görüntüler elde etmede önemli bir faktördür. Çoğu modern laboratuvar mikroskobu, ilk olarak 1893'te August Köhler tarafından tanıtılan ve şu anda çoğu mikroskop üreticisi tarafından önerilen *Köhler aydınlatma düzeni* ile donatılmıştır. Son yıllarda daha gelişmiş aydınlatma şemaları da önerilmektedir. Bunlardan birisi de ışık yayan diyotların (LED) kullanıldığı yapılarıdır. LED teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, ışık mikroskopisi için ışık kaynağı olarak LED'lerin kullanılması, maliyeti önemli ölçüde azaltmış ve kullanım avantajları da getirmiştir. Önerilen LED ışık kaynağı sayesinde, BF mikroskopisi, ışığın nümerik açıklığı ile objektif lenslerin nümerik açıklığının eşleşmesi ile elde edilir. DF mikroskopisi, basitçe kenardaki LED'lerin açılması orta kısımdaki LED'lerin kapatılması ile elde edilir. Yani, bu durumda, ışığın nümerik açıklığı objektif lenslerin nümerik açıklığından fazladır. Ayrıca, sırayla her bir LED'i açabilir ve bir dizi numune görüntüsü yakalanabilir. Bu görüntüler, farklı görüş açıları için bilgi içerir ve bu nedenle, numuneyi farklı derinliklere dijital olarak yeniden odaklamak için bunlar sonradan işlenebilir. Bu bahsedilen görüntüleme şemaları, tek bir LED tarama işlemi ile aynı anda gerçekleştirilebilir. Ayrıca, önerilen şemada hiçbir mekanik hareketli parça yoktur, uygun maliyetlidir ve çoğu geleneksel ışık mikroskobu ile de uyumludur (Zheng, Kolner, & Yang, 2011). BF ve DF haricinde ise PhC görüntülerinin bu sistemde ayrıca herhangi bir donanım değişikliği olmadan da elde edilebileceği de gösterilmiştir (Liu *et al.* 2014). Diğer bir deyişle, halihazırdaki geleneksel bir ışık mikroskobu piyasada hazır olarak bulunabilen LED dizisi kullanılarak başka bir donanıma ihtiyaç duymadan, BF görüntülemenin yanında hem DF görüntüleme hem de PhC görüntüleme yapabilme kabiliyeti kazanır. PhC görüntüleme için, tamamlayıcı aydınlatma açılarından yalnızca iki görüntü yakalamanın gerekli olduğu asimetrik aydınlatma diferansiyel faz kontrastı (DPC) kullanılmaktadır (Hamilton & Sheppard 1984, Hamilton, Sheppard, & Wilson 1984). Farklı aydınlatma koşulları altında çekilen üç görüntü (veya beş görüntü), aydınlık-alan, karanlık-alan ve faz-kontrast modunun tümünü elde etmek için yeterlidir. Her iki dik(ey) yön boyunca faz

kontrast elde edilmek isteniliyorsa dört adet görüntü kullanılmalıdır (Liu *et al.* 2014).

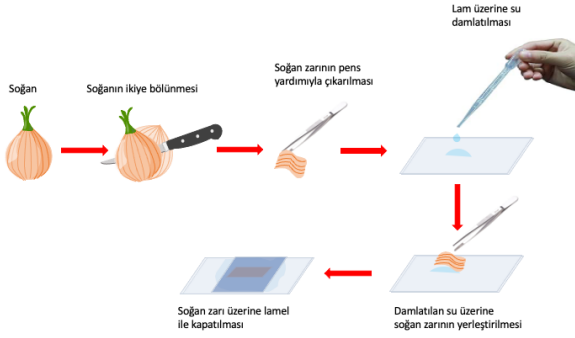
Bu zamana kadar birçok bilim insanı faz görüntüleme üzerine yoğunlaşmıştır ve hala da bu konu üzerine yapılan çalışmalar gelişerek devam etmektedir. İlk olarak Hollandalı fizikçi olan Zernike, 1935'te faz kontrastın mikroskopide kullanımını açıklamıştır. Bu çalışmasıyla kültürdeki canlı hücrelerin düşük kontrast sorununu çözerek Nobel Fizik Ödülü'nü kazanmıştır (F. Zernike, 1935). 1943'te Zeiss fabrikasındaki araştırmacılar, çekirgelerin spermatogenezindeki mayotik bölünmelerin hızlandırılmış bir film kaydı gerçekleşmiştir. Bu film, faz-kontrast mikroskopiye ticari ilgiyi artırmıştır (Masters, 2008). 1956'da Nomarski, kültürdeki canlı hücrelerin kontrastını da geliştiren diferansiyel kontrast mikroskobu icat etmiştir. Bu yöntem *Nomarski girişim veya farksal girişim kontrast (DIC) mikroskopisi* olarak adlandırılır (Nomarski, 1955). Dekkers and de Lang, 1974'te, optik mikroskopide kullanım için bölünmüş-detektöre dayalı bir yöntem önermiştir (Dekkers & de Lang, 1974). Hoffman, 1977'de, hücre zarlarının yakınındaki faz gradyanlarından yararlanarak canlı materyaldeki kontrastı artırmanın başka bir yöntemini tanıtmıştır. Bu teknik şimdi *Hoffman Modülasyon Kontrastı* olarak adlandırılmaktadır ve çoğu modern mikroskopta isteğe bağlı ekipman olarak mevcuttur (Hoffman, 1977). Herman, 2001'de basit bir LED ışık kaynağının birçok uygulamada karmaşık ve pahalı lazer sistemlerinin yerine geçebileceğini göstermiştir (Herman, Maliwal, Lin, & Lakowicz, 2001). 2007'de ise Bormouth, LED aydınlatmanın DIC için yeterli olduğunu göstermiştir (Bormuth, Howard, & Schäffer, 2007). 2008'de Albeanu, LED tabanlı aydınlatma kaynaklarını standart bir geniş alan mikroskobuna bağlamak için basit prosedürler sunmuştur (Albeanu, Soucy, Sato, Meister, & Murthy, 2008). 2011'de, Zheng, daha fazla görüntüleme esnekliği ve işlevselliği elde etmek için bir kondansörün programlanabilir bir LED dizisi aracılığıyla değiştirilebileceğini göstermiştir (Zheng *et al.* 2011). 2014 yılında, Liu ve arkadaşları, dinamik biyolojik örneklerin BF, DF ve PhC görüntülerini gerçek zamanlı olarak aynı anda elde edebilen tek-kamerallı bir görüntüleme sistemini LED dizisi kullanarak herhangi bir hareketli parça kullanmadan

sergilemişlerdir (Liu *et al.* 2014). Tian ve arkadaşları ise aynı yıl, çeşitli aydınlatma açılarıyla deve kılı örneğinin yoğunluk görüntülerini yakalayarak programlanabilir bir LED dizisiyle hesaplamalı-aydınlatmaya dayalı 3-boyutlu DPC mikroskobunu tanıtmışlardır. Önerilen yöntem; basit ve ucuzdur, ayrıca hareketli parça içermemektedir (Tian, Wang, & Waller, 2014). Renk-kodlu ve çoklu-kontrast mikroskop, LED dizisi kullanılarak çeşitli şeffaf biyolojik örneklerin görüntülerinin aynı anda hem BF, hem DF hem de DPC görüntülerini elde etmek için Lee ve arkadaşları tarafından sunulmuştur (Lee *et al.* 2015). 2015 yılına gelindiğinde ise Philips ve arkadaşları, CellScope mobil-mikroskopi platformu için programlanabilir, kubbeli bir LED dizisi donanımı ve yazılımının şeffaf hücrelerin ve mikroorganizmaların etiketsiz görüntülenmesi için faz görüntüleme yöntemlerine olanak sağladığını göstermişlerdir (Phillips *et al.* 2015). 2016 yılında, Chen ve arkadaşları, farklı odak düzlemlerinde asimetrik ve kısmen uyumlu aydınlatma ile görüntüleri yakalayan yeni bir quantitative üç boyutlu faz görüntüleme tekniği önermişlerdir (Chen, Tian, & Waller, 2016). Jung ve arkadaşları, 2017 yılında, akıllı telefon platformunda ince biyolojik örneklerin aydınlık-alan, karanlık-alan ve diferansiyel faz-kontrastlı görüntülerini üretebilen, portatif ve çoklu kontrast mikroskobunu önermişlerdir (Jung *et al.* 2017). 2018 yılında ise, Chen ve arkadaşları, DPC için farklı aydınlatma kaynağı modellerine sahip 4 görüntü kullanarak algoritmik bir kendi kendine kalibrasyon yöntemi önermişlerdir. Bu da dijital olarak sapma düzeltilmesini (aberration correction) sağlar (Chen, Phillips, & Waller, 2018).

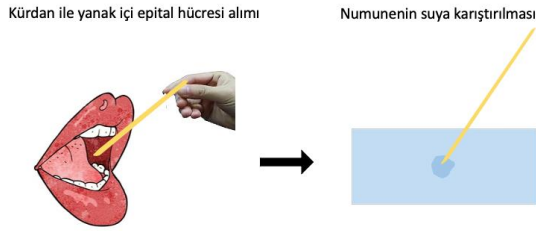
Sunulan çalışmada, düşük maliyetli bir ışık mikroskobunda, programlanabilir 32x32 LED dizisi ile aydınlatılmış ve çoklu-kontrast modelleri kullanılmıştır. Sol-sağ, üst-alt ve eğik aydınlatmaların etkisi hem yanak epitel hücresinde hem de soğan zarı hücresinde detaylı olarak gözlemlenmiştir ve karşılaştırma yapılmıştır. Aynı numunenin BF, DF ve değişik açılardan elde edilen DPC görüntüleri sunulmaktadır.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada mikroskop görüntüsünü incelemek için örnek olarak soğan zarı ve yanak epitel hücreleri seçilmiştir. Soğan zarı numunesi hazırlanırken, öncelikle bir soğan ikiye kesilmiştir. Dış kısımdaki şeffaf ve çok ince soğan zarı pens yardımı ile alınmıştır. Lamel, lam üzerine bir damla su konularak dış kısmı yukarı bakacak şekilde kapatılmıştır. Hazırlanan numune, objektif yardımıyla incelenmeye hazır hale getirilmiştir. Soğan zarı numunesi hazırlama işlemi Şekil 2' de gösterilmiştir.



Şekil 2. Soğan zarı elde etme işlemi

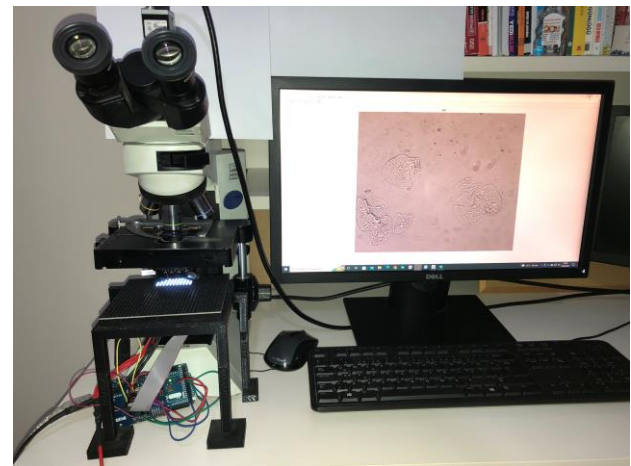
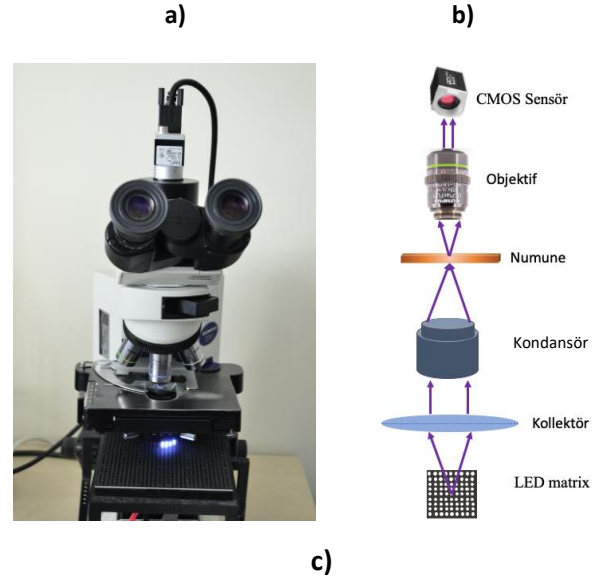


Şekil 3. Yanak epitel hücreleri elde etme işlemi

Şekil 3' te ise yanak içi epitel hücreleri elde etme işlemi gösterilmektedir. Lam üzerine küçük bir damla su damlatılmıştır. Kürdan yanak içine hafif bir şekilde sürülmüştür. Bu sırada yanak içini zedelememeye özen gösterilmiştir. Temiz kürdan yardımı ile yanak içerisinden alınan numune, lam üzerindeki suya karıştırılmıştır. Üzeri lamel ile kapatılarak mikroskop altında incelenmeye hazır hale getirilmiştir.

Şekil 4, geleneksel bir ışık mikroskopunu ve şematik diyagramını (Olympus CX41) göstermektedir. Bu mikroskopun ışık kaynağı çıkartılarak yerine numuneden yaklaşık 58 mm aşağıda olacak şekilde 32x32 LED dizisi (RGB LED Matrix Panel, 4 mm aralıklı, Adafruit 607, A.B.D.) yerleştirilmiştir. 32x32 LED dizisi için Adafruit sürücü devresi kullanılmıştır.

Mikroskopun objektif lensi 20X büyütme oranında, nümerik açıklığı (numerical aperture) 0.40 değerindedir. LED dizisi, Arduino (ATMega 2560, İtalya) ile kontrol edilmektedir. Sony IMX264 CMOS sensöre (çözünürlük 2448 x 2048, çerçeve frekansı (frame rate) 35 fps) sahip Basler acA2440-35uc USB 3.0 kamera, görüntü toplamak için mikroskopun üst kısmına yerleştirilmiştir. Veri Pylon Viewer programı aracılığıyla bilgisayara (Intel(R) Xeon(R) CPU) transfer edilmiştir. Elde edilen görüntüler, herhangi bir görüntü işleme adımı uygulanmamış ham görüntülerdir. Yalnızca, BF ve DPC görüntüleri elde etmek için (1-3) denklemleri MATLAB programı yardımıyla hesaplama işlemi için kullanılmıştır. DF görüntüsü elde etmek için ise herhangi bir hesaplama yapılmamıştır.



Şekil 4. a) Yakın çekim mikroskop, b) LED dizisi ile aydınlatılan ışık mikroskopunun şematik gösterimi ve c) mikroskop sistemi

3. Bulgular

BF, DF ve PhC görüntülerini elde etmek amacıyla farklı LED desenleri ile zaman aralıklı görüntüler elde edilmiştir. Bu LED desenleri Şekil 5'de verilmiştir. Şekil 5.a, aydınlık-alan görüntüleri (BFI) elde etmeyi sağlayan desendir. Şekil 5.b, karanlık-alan görüntüleri (DFI) elde etmek için kullanılan desendir. Objektifin nümerik açıklığı, BF'den DF LED'lerine geçişi tanımlayan dairenin yarıçapını belirler. DF LED'leri ile aydınlatma yapılırken kameraya ulaşan tek ışık, örnekten saçılan ışıktır; bu da bir DF görüntüsü meydana getirir. Şekil 5.c ve Şekil 5.d ise DPC görüntülerini elde etmek için kullanılan LED desenleri gösterir. PhC görüntüsü, sol-sağ ve üst-alt taraftan ışıklandırma ile elde edilen görüntülerin farkının normalize edilmesiyle elde edilir. BF ve DPC görüntüsü elde etmek için aşağıdaki denklemler kullanılır (1-3) (Jung *et al.* 2017),

$$I_{BF} = I_{sol} + I_{sağ} \quad (1)$$

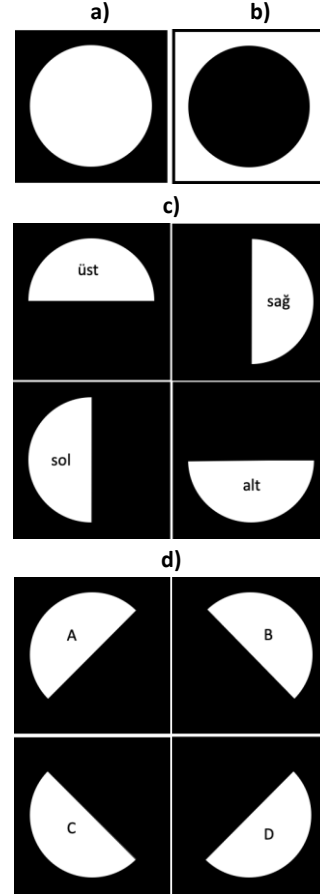
$$I_{DPC,solsağ} = \frac{I_{sol} - I_{sağ}}{I_{sol} + I_{sağ}} \quad (2)$$

$$I_{DPC,üstalt} = \frac{I_{üst} - I_{alt}}{I_{üst} + I_{alt}} \quad (3)$$

I_{BF} , I_{sol} , $I_{sağ}$, $I_{üst}$, I_{alt} , $I_{DPC,solsağ}$ ve $I_{DPC,üstalt}$ sırasıyla aydınlık-alan görüntüsü, sol, sağ, üst, alt aydınlatma ile çekilen görüntüler, sol-sağ DPC ve üst-alt DPC görüntülerini ifade eder.

Yanak epitel hücrelerinin BF, DF ve DPC görüntüleri Şekil 6'da gösterilmektedir. Şekil 6a'daki BF ve Şekil 6b'deki DF görüntülerini incelersek oldukça şeffaf olan yanak epitel hücreleri BF görüntülerde daha iyi gözlemlenirken DF görüntülerde, yanak epitel hücrelerinin gözlemlenmesi mümkün değildir. Çünkü BF görüntüleme, numune kontrastı numunedeki ışığın soğurulmasından gelirken DF görüntüleme, numune kontrastı numune tarafından saçılan ışıktan gelir. Doğal olarak renksiz olan ve şeffaf olan numuneler iyi görülemez. Yanak epitel hücreleri de oldukça şeffaf olduğu için DF ve BF görüntüleme numuneyi gözlemlenmek için yeterli değildir. Şekil 6c ve d ise, tipik olarak, DPC' nin aydınlatmaları, ortogonal yönler boyunca 2 eksenli (yani 4 görüntü) ölçümleri olan tamamlayıcı bir yarım-daire pupil ile tasarlanır. DPC görüntüsünün, desenler dikey yön

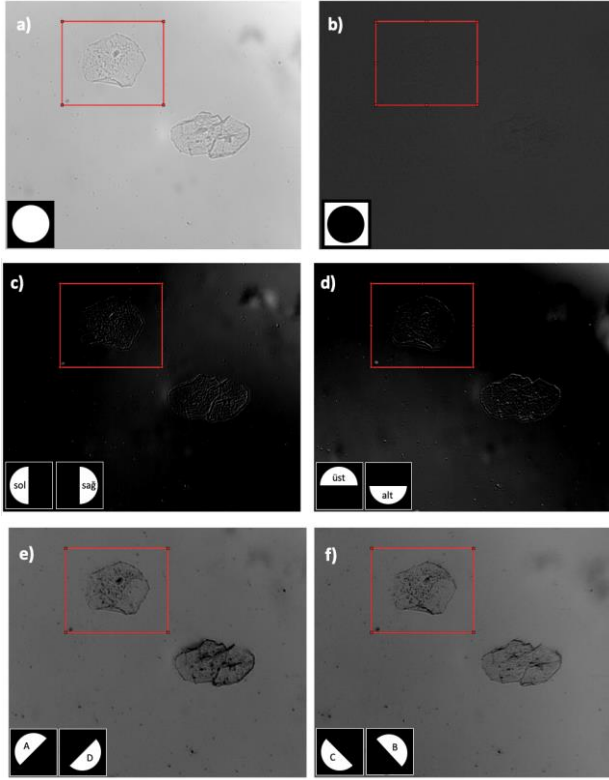
boyunca bölündüğü için yatay yön boyunca bir gölgeleme etkisi gösterdiği görülmektedir (Şekil 6c). Faz kontrast görüntü için hem yatay hem de dikey yönlerde görüntü elde etmek oldukça faydalıdır.



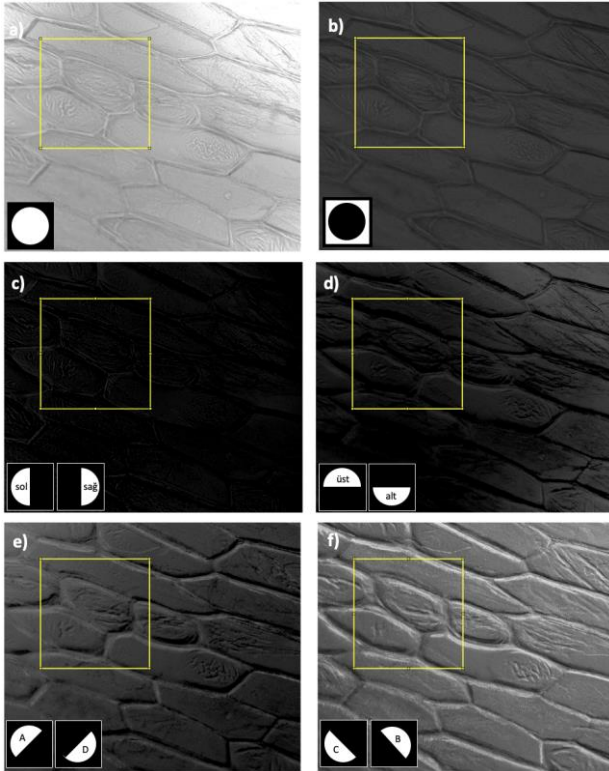
Şekil 5. LED aydınlatma desenleri ile çoklu-kontrast görüntüleri; sırasıyla a) BFI b) DFI, c) üst, sağ, sol ve alt, d) A, B, C ve D.

LED dizisi ile desenlemenin esnekliği sayesinde ilgilenilen özellikleri vurgulamak için istenen herhangi bir asimetri yönü kullanılabilir. DPC tarafından elde edilen faz-kontrast, aydınlatma modellerinin asimetrisinden gelir. Tek bir asimetrik aydınlatma modeli tek başına yakalanan görüntülerde iyi bir faz kontrastı sağlar, ancak her iki modeli birlikte kullanmak bilgiyi quantitative faz ile ilişkilendirmemize izin verir. Faz değişimi olmayan gerçek bir örnek, simetrik bir Fourier düzleme sahiptir ($I_{sol} = I_{sağ}$). Sol ve sağ gibi tamamlayıcı aydınlatma desenine sahip görüntüler, tüm gerçek (absorpsiyon) etkiler için aynı olacaktır. Böylece kaynağın her iki tarafından iki görüntünün çıkarılmasıyla elde edilen kontrast, sadece numunenin faz bilgisinden gelir. Aslında, iki DPC görüntüsünün arasındaki fark, örneğin asimetrik

eksendeki fazın birinci türevi ile doğru orantılıdır (Liu *et al.* 2014, Tian *et al.* 2014).



Şekil 6. İnsan yanak epital hücrelerinin **a)** BFI **b)** DFI **c)** sol ve sağ **d)** üst ve alt **e)** A ve D **f)** B ve C LED desenleri ile aydınlatılmasıyla elde edilen DPC görüntüleri



Şekil 7. Soğan zarı hücrelerinin **a)** BFI **b)** DFI **c)** sol ve sağ **d)** üst ve alt **e)** A ve D **f)** B ve C LED desenleri ile aydınlatılmasıyla elde edilen DPC görüntüleri

Şekil 6c ve Şekil 6d incelendiği zaman, Şekil 6c'de soldan sağa doğru gölgeleme etkisi olduğundan dolayı sol-sağ yönlü detaylar daha belirgindir. Şekil 6d'de ise yukarı-aşağı doğru gölgeleme etkisi olduğundan yukarı-aşağı yönlü detaylar daha belirgindir. Şekil 6e ve f ise eğik açıyla aydınlatma yapılarak elde edilen LED desenlerinin asimetrik modelinden elde edilmiştir. Gölgeleme etkisi Şekil 6e'de, sol üstten sağ alta doğru ve Şekil 6f'de sağ üstten sol alta doğrudur. Eğik açıyla yapılan aydınlatmalarda detaylar daha belirgin olarak gözlemlenebilmektedir. Aynı özellikler Şekil 7'de soğan zarı hücresi için de gözlemlenmiştir.

4. Tartışma ve Sonuç

Özetlemek gerekirse, bu makalede uygun maliyetli, programlanabilir 32x32 boyutlarındaki LED dizisine dayanan mikroskop aydınlatma şemaları önerilmiştir. Önerilen şemalarda faz kontrast görüntüsünü daha detaylı elde edebilmek amacıyla diğer basit modellerin yanında özellikle eğik aydınlatmaya yer verilmiştir. Sonuçlar, bir kişinin, görüntüleri aydınlık-alan, karanlık-alan ve diferansiyel faz-kontrastı aynı anda görselleştirmesini ve karşılaştırmasını sağlamıştır. Elde edilen görüntülere herhangi bir görüntü işleme adımı uygulanmamıştır. LED dizili mikroskop kurulumunun basitliği ve sağladığı çeşitli görüntüleme yetenekleri nedeniyle, LED dizi aydınlatıcısı çeşitli uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışmanın ilerleyen aşamasında, renkli-çoğullamalı aydınlatma ile hem elde edilen görüntülerin kalitesinin artırılması hem de DPC'de daha az görüntü ile sonuca gidilmesi amaçlanmaktadır. Böylece, hem DPC'nin zamansal çözünürlüğü artacak hem de gerçek zamanlı görüntü elde edilmesi olanağı doğacaktır.

Çoklu ölçümler, DPC'nin zamansal çözünürlüğünü azaltır ve yüksek hızlı bir olayın gözlemlenmesini engeller. Görüntüleme verimliliğini artırmak için, renkli LED dizisi ile birlikte bir renkli kamera kullanılarak 4 desenin 2 görüntüye kodlandığı DPC'de renkli-çoğullamalı aydınlatma seçilen

çalışmalar vardır. Ayrıca, üç-modlu aydınlatma kullanarak veya çok-renkli bir filtre ekleyerek tek çekim DPC mekanizmaları geliştirmeye yönelik bazı çalışmalar da yapılmıştır. Bu yöntemler, yakalanan görüntülerin sayısını tek bir pozlamaya indirger; bununla birlikte, faz rekonstrüksiyonu için zayıf faz kontrastına ve zayıf sinyal-gürültü oranına (SNR) yol açar (Fan *et al.* 2019).

Teşekkür

Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Tıbbi Patoloji Anabilim Dalı öğretim üyesi Prof. Dr. Fazlı ERDOĞAN hocamıza mikroskop temininde yapmış oldukları katkılardan ve Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü'ne, AYBU-2018-BAP-4981 numaralı projeye vermiş olduğu maddi destekten dolayı teşekkür ederiz.

5. Kaynaklar

Abbe, E. 1873, Beiträge zur Theorie des Mikroskops und der mikroskopischen Wahrnehmung. *Archiv für mikroskopische Anatomie*, **9 (1)**, 413-468.

Albeanu, D. F., Soucy, E., Sato, T. F., Meister, M., & Murthy, V. N. 2008, LED arrays as cost effective and efficient light sources for widefield microscopy. *PLoS One*, **3 (5)**, e2146.

Bormuth, V., Howard, J., & Schäffer, E. 2007, LED illumination for video-enhanced DIC imaging of single microtubules. *Journal of microscopy*, **226 (1)**, 1-5.

Chen, M., Phillips, Z. F., & Waller, L. 2018, Quantitative differential phase contrast (DPC) microscopy with computational aberration correction. *Opt Express*, **26 (25)**, 32888-32899.

Chen, M., Tian, L., & Waller, L. 2016, 3D differential phase contrast microscopy. *Biomed Opt Express*, **7 (10)**, 3940-3950.

Davidson, M. W., & Abramowitz, M. 2002, Optical microscopy. *Encyclopedia of imaging science and technology*, **2 (120)**, 1106-1141.

Dekkers, N. H., & de Lang, H. 1974, Differential Phase Contrast in a STEM. *Optik*, **41 (4)**, 452-456.

Fan, Y., Sun, J., Chen, Q., Pan, X., Trusiak, M., & Zuo, C. 2019, Single-shot isotropic quantitative phase microscopy based on color-multiplexed differential phase contrast. *APL Photonics*, **4 (12)**, 121301.

Hamilton, D. K., & Sheppard, C. J. R. 1984, Differential phase contrast in scanning optical microscopy. *Journal of Microscopy*, **133 (1)**, 27-39.

Hamilton, D. K., Sheppard, C. J. R., & Wilson, T. 1984. Improved imaging of phase gradients in scanning optical microscopy. *Journal of Microscopy*, **135 (3)**, 275-286.

Herman, P., Maliwal, B., Lin, H. J., & Lakowicz, J. 2001. Frequency-domain fluorescence microscopy with the LED as a light source. *Journal of Microscopy*, **203 (2)**, 176-181.

Hoffman, R. 1977. The modulation contrast microscope: principles and performance. *Journal of Microscopy*, **110 (3)**, 205-222.

Jung, D., Choi, J.-H., Kim, S., Ryu, S., Lee, W., Lee, J.-S., et al. 2017, Smartphone-based multi-contrast microscope using color-multiplexed illumination. *Scientific Reports*, **7 (1)**, 1-10.

Karakoç, Z., Ketani, M. A., & Ketani, Ş. 2016, Mikroskopların çalışma mekanizması ve çeşitleri. *Dicle Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, **1**, 1-6.

Kheireddine, S., Smith, Z. J., Nicolau, D. V., & Wachsmann-Hogiu, S. 2019. Simple adaptive mobile phone screen illumination for dual phone differential phase contrast (DPDPC) microscopy. *Biomed Opt Express*, **10 (9)**, 4369-4380.

Lee, D., Ryu, S., Kim, U., Jung, D., & Joo, C. 2015, Color-coded LED microscopy for multi-contrast and quantitative phase-gradient imaging. *Biomed Opt Express*, **6 (12)**, 4912-4922.

Liu, Z., Tian, L., Liu, S., & Waller, L. 2014, Real-time brightfield, darkfield, and phase contrast imaging in a light-emitting diode array microscope. *J Biomed Opt*, **19 (10)**, 106002.

Majeed, H., Sridharan, S., Mir, M., Ma, L., Min, E., Jung, W., et al. 2017, Quantitative phase imaging for medical diagnosis. *J Biophotonics*, **10 (2)**, 177-205.

- Masters, B. R. 2008, History of the Optical Microscope in Cell Biology and Medicine, *eLS*.
- Nomarski, G. 1955, Microinterféromètre différentiel à ondes polarisées. *J. Phys. Rad.*, **16**, 95-135.
- Phillips, Z. F., D'Ambrosio, M. V., Tian, L., Rulison, J. J., Patel, H. S., Sadras, N., et al. 2015, Multi-Contrast Imaging and Digital Refocusing on a Mobile Microscope with a Domed LED Array. *PLoS One*, **10** (5), e0124938.
- Popescu, G. 2011, *Quantitative Phase Imaging of Cells and Tissues*: McGraw-Hill Education.
- Popescu, G., Park, Y., Lue, N., Best-Popescu, C., Deflores, L., Dasari, R. R., et al. 2008, Optical imaging of cell mass and growth dynamics. *Am J Physiol Cell Physiol*, **295** (2), C538-544.
- Tian, L., Wang, J., & Waller, L. 2014, 3D differential phase-contrast microscopy with computational illumination using an LED array. *Opt Lett*, **39** (5), 1326-1329.
- Vyas, S., Li, A.-C., Lin, Y.-H., Yeh, J. A., & Luo, Y. 2022, Isotropic quantitative differential phase contrast imaging techniques: a review. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **55** (18), 183001.
- Zernike, F. 1935, Phase Contrast, *Z Tech Physik*, **16**, 454
- Zernike, F. 1942, Phase contrast, a new method for the microscopic observation of transparent objects. *Physica*, **9** (7), 686-698.
- Zernike, F. 1955, How I Discovered Phase Contrast. *Science*, **121** (3141), 345-349.
- Zheng, G., Kolner, C., & Yang, C. 2011, Microscopy refocusing and dark-field imaging by using a simple LED array. *Optics Letters*, **36** (20), 3987-3989.
- Zuo, C., Sun, J., Feng, S., Hu, Y., & Chen, Q. 2016, Programmable Colored Illumination Microscopy (PCIM): A practical and flexible optical staining approach for microscopic contrast enhancement. *Optics and Lasers in Engineering*, **78**, 35-47.

Travma Sonrası Stres Bozukluğu (TSSB) Tedavisine Yönelik Moleküler Hedefler ve Yeniden Konumlandırılan İlaçlar

Elif KUBAT ÖKTEM¹¹İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü, İstanbul

e-posta: ekoktem@outlook.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0913-8527>

Geliş Tarihi: 09.09.2022

Kabul Tarihi: 07.03.2023

Öz

Travma sonrası stres bozukluğu (TSSB), fiziksel hasar veya kaygı gibi zihinsel şok içeren bir kazayı takiben görülen travmanın neden olduğu zihinsel bir hastalıktır. Toplumda yaygın olmasına rağmen, TSSB'nin prognozu ve optimal terapötikleri sınırlıdır. Erken müdahale için moleküler hedefler belirsiz kaldığından, daha iyi bir TSSB patogenezinin moleküler temellerinin anlaşılması hastalık prognozunun zorluklarını karşılamak ve bu moleküler hedeflere yönelik teşhis ve tedavi için gereklidir. Strese maruz bırakılan farelerin iki farklı dokusundan elde edilen mikrodizi verilerinin işlenmesi ve analiziyle yapılan bu çalışmada, her iki tip doku için de anlatımı farklılık gösteren genler tespit edilmiş, bu genlerin zenginleştiği yolizleri bulunmuş, bu genlerin protein-protein etkileşim ağları ve bu ağlardaki hub proteinler tespit edilmiştir. Bu hastalıkta anlatımı farklılık gösteren genlerin etkilerini tersini çevirmeye yönelik her iki farklı tip doku için de ayrı ayrı yapılan ilaç yeniden konumlandırma çalışmalarının karşılaştırılması sonucunda; vorinostat, homoharringtonin ve QL-XII-47 TSSB'yi iyileştirmek için yeni ilaç adayları olarak önerilmiştir. Bu ilaçlardan vorinostat'ın, hücrede *HDAC1*, *HDAC2*, *HDAC3*, *HDAC6*, *HDAC7* ve *HDAC8* genlerini hedef aldığı tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler

TSSB; Travma Sonrası
Stres Bozukluğu;
Biyoinformatik; İlaç
Yeniden
Konumlandırma;
Sistem Biyolojisi

Molecular Targets and Repositioned Drugs For the Treatment of Post Traumatic Stress Disorder (PTSD)

Abstract

Post-traumatic stress disorder (PTSD) is a mental illness caused by trauma following an accident involving physical injury or by mental shock such as anxiety. Although it is common in the population, the prognosis and optimal therapies for PTSD are limited. Because the molecular targets for early intervention remain unclear, a better understanding of the molecular basis of the pathogenesis of PTSD is essential to address the challenges of disease prognosis and to diagnose and treat these molecular targets. In this study, performed by processing and analyzing microarray data from two different tissues of mice exposed to stress, genes with differential expression for the two tissue types were identified, the signaling pathways in which these genes are enriched were found, the protein-protein interaction networks of these genes and the hub proteins in these networks were determined. As a result of comparing the drug repositioning studies performed separately for the two different tissue types to reverse the effects of differentially expressed genes, vorinostat, homoharringtonine, and QL-XII-47 were proposed as novel drugs for the treatment of PTSD. Vorinostat, one of these drugs, was also found to target *HDAC1*, *HDAC2*, *HDAC3*, *HDAC6*, *HDAC7*, and *HDAC8* genes in the cell.

Keywords

Post-Traumatic Stress
Disorder;
Bioinformatics; Drug
Repositioning; Systems
Biology

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Travma sonrası stres bozukluğu (TSSB), fiziksel hasar veya kaygı gibi zihinsel şok içeren bir kazayı takiben görülen travmanın neden olduğu zihinsel bir hastalıktır (Stein *et al.* 2014). Bu hastalık kadınlarda,

erkeklerden iki kat daha fazla sıklıkta görülmektedir (Prajwal *et al.* 2022). TSSB, klinik olarak belirgin çalışma veya diğer günlük işlevleri yerine getirmek için azalmış zihinsel yetenek ve kendini ifade edememe ile karakterize bir psikiyatrik bozukluk

olarak tanımlanır. TSSB canlı anılar, geri dönüşler ve kabuslar ile başlar ve bu anılar zamanla kaybolmaz, yıllarca devam edebilir ve hatta yoğunlaşabilir. Bu durumu korku ve güçlü fiziksel duyular izler. TSSB'si olan kişiler anıları bastırmaya veya anıları anımsatan etkinliklerden kaçınmaya çalışırlar. Aşırı çevre uyanıklığı veya beklenmeyen gürültüye duyulan korku ile yine karakterize olan bu hastalık, bireyin kişisel, ailevi, sosyal, eğitimsel, mesleki alanlarda, hayat kalitesini azaltır (Iribarren *et al.* 2005; Rosenfield *et al.* 2018). Stres kaynaklı uyumsuz tepkiler savaş, istismar, kaza, şiddet, doğal afet mağdurlarını etkilemektedir (Muhie *et al.* 2015; Smith *et al.* 2022). Çeşitli travma türleri ve maruz kalma sürelerinin (tek veya epizodik, akut veya kronik stresli olaylar) sadece insanda (O'Donnell *et al.* 2013; van Loey *et al.* 2012) değil; aynı zamanda stress uygulanarak TSSB benzeri fenotip oluşturulan hayvan modellerinde de (Daskalakis *et al.* 2014; Jovanovic *et al.* 2013) travma sonrası stres bozukluğunu (TSSB) tetiklediği gösterilmiştir.

Bu hastalığın prevalansına bakıldığında, Amerika Birleşik Devletleri'nde nüfusun yaklaşık %8'ine TSSB teşhisi konmaktadır (Lee *et al.* 2022). TSSB'nin yaşam boyu yaygınlığı dünya çapında yaklaşık %3,9'dur (Kessler *et al.* 2005). Savaş travmasını takiben yaşam boyu TSSB yaygınlık oranları özellikle yüksek olabilir. Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri gazileri (Vietnam ve sonraki çatışmalar) arasında bu oran yaklaşık %10 ila %30 aralığında değişir (Kang *et al.* 2003).

TSSB'si olan bireyler artmış bazal kalp hızı ve kan basıncı, daha yüksek hipertansiyon ve felç riski, değişmiş trombosit aktivitesi, artmış kan kolesterolü ve trigliserit seviyeleri ile daha yüksek oranda kardiyovasküler hastalık riskine sahiptir (Cho *et al.* 2014; Kibler, 2009; Kubzansky and Koenen, 2009; Pedersen *et al.* 2003; von Känel *et al.* 2011). Yine kalp dokusuna paralel olarak, TSSB beyin yapısındaki korku tepki devresinde anormalliklerle ilişkili heterojen durumlara sebebiyet vermektedir. Beyin bölgelerindeki fonksiyonel değişiklikler, travmatik olayların algılanma ve yorumlanmasında anormalliklere yola açıp, anksiyete bozukluklarına sebep olmaktadır (Albrechet-Souza *et al.* 2013; Antoniadis ve McDonald, 2006; Ashwell ve Ito, 2014;

Belzung *et al.* 2014; Muhie *et al.* 2015). Literatürdeki bu sonuçlar, TSSB fare modelinde kısa süreli strese maruz kalmanın kalp ve beyin dokuları üzerindeki etkilerini incelemeye ilgiyi arttırmaktadır.

Stres kaynaklı TSSB karmaşık, yeterince anlaşılmamış bir sağlık problemidir ve kronik formunda TSSB, vücuttaki birçok sistemi etkileyerek eşlik eden fiziksel hastalıklara da sebebiyet veren psikiyatrik bir hastalıktır. Toplumda yaygın olmasına rağmen, TSSB'nin prognozu ve optimal terapötikleri sınırlıdır. Birincil zorluk, hastalığın erken evrelerinin saptanması, klinik seyirleri ve sonuçlarının tahminidir. Bilinen risk faktörleri olan genetik, epigenetik, endokrin ve demografik (cinsiyet, eğitim, gelir ve sosyal statü) faktörler ve erken travma öyküsü bile bu hastalığın şiddeti veya kronikliği hakkında yeterli bilgi vermemektedir (Xue *et al.* 2015). Ayrıca, yaygın olarak uygulanan ve hekim görüşüne dayalı teşhisler nesnellikten yoksundur (Muhie *et al.* 2017). Seçici serotonin geri alım inhibitörleri olan sertralin ve paroksetin, farklı uluslararası kuruluşlar tarafından bu hastalıkta kullanılmak üzere onaylanmıştır ve bu ilaçlar genellikle olumlu sonuçlar elde etmek için psikoterapi ile birleştirilir. Ancak bu farmakolojik stratejiler sınırlı etkinlik sunar ve TSSB hastalarının yaklaşık yarısında semptomları sona erdirmez (Gasparyan *et al.* 2022).

Anlatımı farklılık gösteren yolak ve genler, önceden var olan genetik ve epigenetik faktörlerle birlikte stress kaynaklı hastalıkların başlangıcına, gelişme ve devamlılığına katkıda bulunur. Bu çalışmadaki amaç, TSSB'ye erken müdahale için moleküler hedeflerin belirlenmesi ve bu hedeflere yönelik terapötiklerin tespitidir. Bu çalışma, TSSB fenotipindeki fare örneklerinde gen ekspresyon profillerini normal fenotipteki örnekleriyle karşılaştırmak için halka açık transkriptom verilerini ve onların biyoinformatik analizlerini içermektedir. Elde edilen bulgularla, ilaç yeniden konumlandırılma çalışması yapılmıştır ve TSSB tedavisi için uygulanabilecek yeni terapötikler önerilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Mikrodizi Verisi

Çalışma için TSSB'yi simüle eden farelerin kalp ve beyin dokularından elde edilen mikrodizi verileri kullanılmıştır. Bu veri setleri, Gene Expression Omnibus veri tabanından (NCBI-GEO), çevrimiçi olarak elde edilmiştir (Barrett *et al.* 2005). TSSB'yi simüle eden farelerin kalp dokularındaki gen ifade profillerini temsil eden GSE52866 (Cho *et al.* 2014), kontrol farelerinden dört numune ve on gün boyunca strese maruz bırakılıp 24 saat dinlendirilen dört numuneden oluşmaktadır. Farelerin beyin dokusundaki gen ifade profilleri, beş kontrol numunesinden ve on gün boyunca strese maruz bırakılıp 24 saat dinlendirilen farelerden alınan beş numuneden oluşan GSE68076 veri setinden sağlanmıştır (Muhie *et al.* 2015). Bu iki veri seti, farklı gün ve dokulardan ek örnekler içerse de, iki veri seti arasında sağlıklı birebir karşılaştırma yapabilmek için, aynı sürede strese maruz bırakılıp, dinlendirilen fareler arasında, literatüre göre travma sonrası stresten en çok etkilenen iki doku olan beyin ve kalp dokularını içeren örnekler seçilmiştir.

2.2. Anlatımı Farklılık Gösteren Gen (DEG) Analizi

Mevcut çalışmada, anlatımı farklılık gösteren genleri (DEG'ler) tanımlamak için önceden geliştirilmiş bir istatistiksel analiz yaklaşımı (Öktem *et al.* 2019) kullanılmıştır. Agilent veri setlerinden gelen veriler, R Bioconductor platformu (sürüm Rx64 3.0.2) (Gentleman *et al.* 2004) içerisindeki GEOquery paketi (Sean and Meltzer, 2007) kullanılarak işlenmiştir ve normalizasyon yöntemi olarak nicel normalizasyon yapılmıştır. Yine aynı platform üzerindeki Mikroarray Veri Seti için Doğrusal Modeller (LIMMA) paketi (Smyth *et al.* 2005), normalleştirilmiş mRNA ekspresyon seviyelerini karşılaştırmak ve DEG'leri belirlemek için kullanılmıştır. LIMMA paketi, Mikrodiziler, protein dizileri, kantitatif polimeraz zincir reaksiyonu (qPCR) ve diğer platformları içeren deneylerden elde edilen verilerin analizi için kullanılır. Bu paket bir dizi istatistiksel prensibi, büyük ölçekli gen ifade çalışmaları için etkili olacak şekilde bütünleştirir. Bu paket her satırın bir geni veya mevcut çalışmayla ilgili başka bir genomik özelliği temsil ettiği ve her sütunun bir RNA örneğine karşılık geldiği bir ifade değerleri matrisi üzerinde, her bir veri satırına doğrusal bir model uydurarak çalışır (Ritchie *et*

al.2015). Yanlış keşif oranını kontrol etmek için Benjamini-Hochberg düzeltmesi kullanılmıştır. DEG'lerin istatistiksel önemine karar vermeye yönelik kat değişiklikleri için 1 kesme değeri ve ayarlanmış bir p değeri için 0,05 kesme değeri kullanıldı. Fare mikrodizilerinden fare genleri, biyolojik veritabanı ağı bioDBnet: dbOrtho (<https://biodbnet-abcc.ncifcrf.gov/db/db2db.php>) ile insan orthologlarına çevrilmiştir (Mudunuri *et al.* 2009). Fare genleri arasından, insan orthologları olanlar tespit edilip, sadece bu orthologlarla sonraki analizlere devam edilmiştir. Literatürde, insandan farklı organizmaların DEG'lerinin tespit edildiği, farklı organizmaların birbirleriyle karşılaştırıldığı, ve insana yönelik ilaç yeniden konumlandırmanın yapıldığı çalışmalar mevcuttur (Alam *et al.* 2020, Öktem *et al.* 2019, Kubat Oktem *et al.*, 2022, Tarifeño-Saldivia *et al.* 2017).

2.3. Fonksiyonel Zenginleştirme Analizi

DEG'lerle önemli ölçüde ilişkili fonksiyonel anotasyonları (biyolojik süreçler, moleküler fonksiyon ve hücrenel bileşenler) belirlemek için ConsensusPathDb (Kamburov *et al.* 2011) kullanılarak yoluzi ve gen ontolojisi (GO) zenginleştirme analizleri yapılmıştır. Anotasyon kaynakları olarak KEGG (Kanehisa *et al.* 2008), Gen Ontolojisi (GO) Biyolojik Süreçler (Ashburner *et al.* 2000; Carbon *et al.* 2021) ve Reactome (Fabregat *et al.* 2016) veri tabanları kullanılmıştır. Gen ontoloji zenginleştirme analizi, (GO) aşırı temsil analizleri kullanılarak yapılmıştır. Analizler için 4. ve 5. seviyelerdeki GO terimleri taranmıştır ve $p < 0.05$ kesme değeri ile zenginleştirilmiş GO terimleri istatistiksel olarak anlamlı kabul edilmiştir.

2.4. Anlatımı Farklılık Gösteren Genler (DEG) Etrafında Protein-Protein Etkileşimi (PPI) Ağ Analizi

DEG'ler, her farklı doku tipi için ayrı bir protein-protein etkileşim ağı (PPI) oluşturmak üzere kullanılmıştır. PPI verilerini almak için BioGrid veri tabanı (sürüm 4.4.210) (Oughtred *et al.* 2019) kullanılmıştır. Elde edilen ağlar Cytoscape (sürüm 3.9.0) kullanılarak görselleştirilmiştir (Shannon *et al.* 2003). Cytoscape programındaki "Cytohubba"

eklentisi, yerel (degree) ve global (betweenness) ölçümleri dahil olmak üzere ağın topolojik özelliklerini belirlemek için kullanılmıştır (Chin *et al.* 2014).

2.5. İlaç Yeniden Konumlandırma

İlaç yeniden konumlandırma analizi, L1000CDS2 veri bankası aracılığıyla ve her doku tipinin DEG'leri girdi olarak kullanılarak, her iki tip doku için de ayrı ayrı yapılmıştır (Duan *et al.* 2016). Benzerlik değerlerini ve istatistiksel anlamlılığı belirlemek için rastgele permütasyon testleri ve Kolmogorov-Smirnov istatistikleri kullanılmıştır. İstatistiksel olarak anlamlı moleküller değerlendirilmiştir. İlaç bilgileri NCBI PubChem'den alınmıştır (Kim *et al.* 2019).

2.6. Yeniden Konumlandırılmış İlaçlar için Tahmini Hedef Genlerin Belirlenmesi

Yeniden konumlandırılan ilaçlar arasında literatürde tahmini hedef genleri var olanların tespiti için daha önce yayınlanmış bir çalışmaya benzer bir yaklaşım (Chen *et al.* 2019) uygulanmıştır. 430.000 bileşik ve 9.6 milyon protein içeren bir protein-bileşik etkileşim veritabanı olan Kimyasalların Etkileşimleri için Arama Aracı (STITCH, stitch.embl.de) ile yeniden konumlandırılan ilaçlar arasından, tahmini hedef

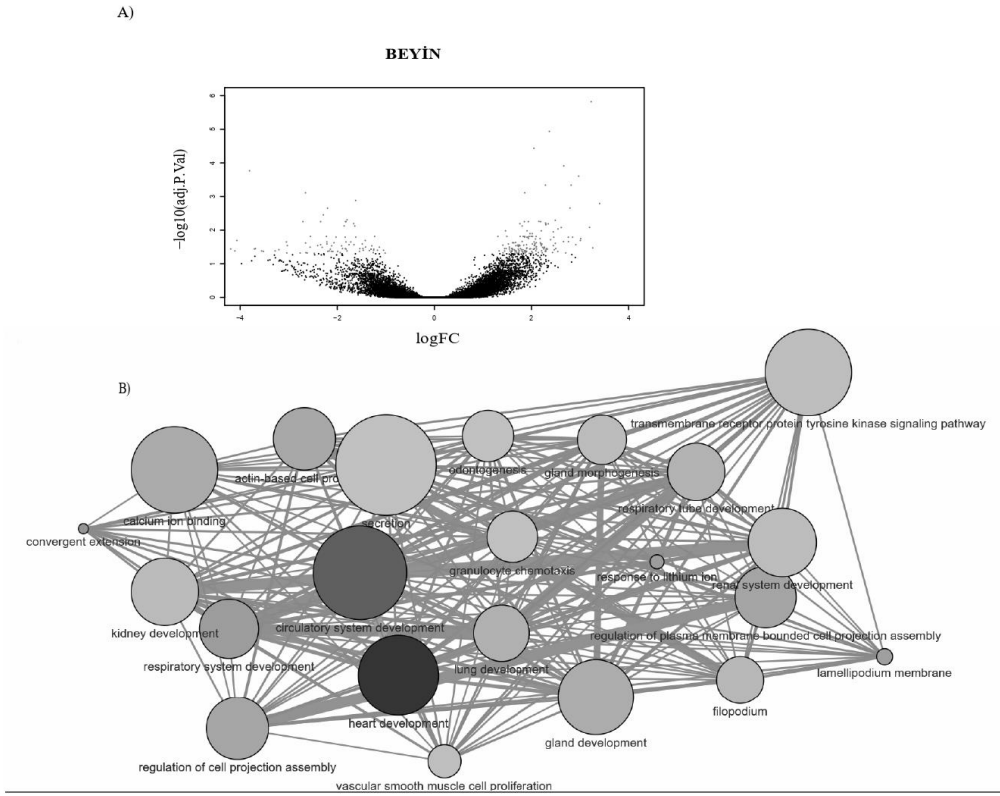
genleri var olanlar tespit edilmiştir (Szkłarczyk *et al.* 2016).

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. TSSB'li Farelerin Farklı Dokularındaki DEG Profilleri:

TSSB'li farelerde gen ekspresyonu değişiklikleri kontrol örnekleriyle karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Her veri seti için volkan grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 1A ve 2A). DEG'ler <1 (aşağı düzenleme için) veya >1 (yukarı düzenleme için) kat değişimi ve ayarlanmış bir p değeri <0.05 kullanılarak belirlenmiştir.

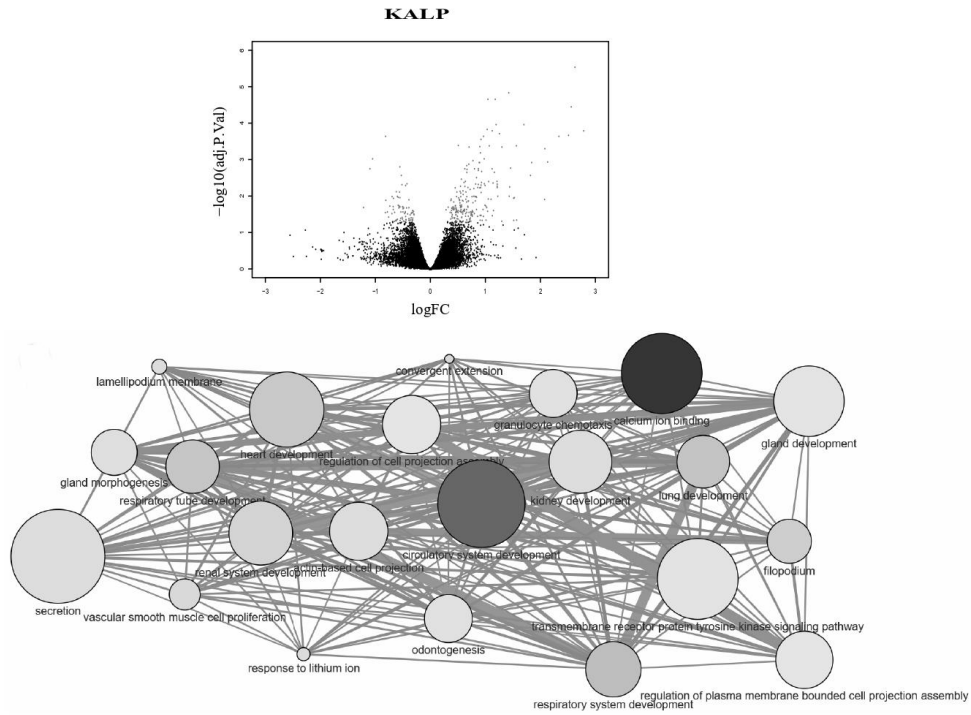
Beyin dokusu için 48'i aşağı, 76'sı yukarı doğru düzenlenen toplam 124 DEG; Kalp dokusu içinse 45'i aşağı, 137 yukarı regüle edilen olmak üzere toplam 182 DEG bulunmuştur (Ek Dosya Tablo 1 ve 2). Anlatımı farklılık gösteren bu DEG'lerin yolizi zenginleştirmelerinde, iki doku için ortak olarak "Reseptör Tirozin Kinazlarla Sinyal Verme" tespit edilmiştir (Ek Dosya Tablo 3 ve 5). Literatürde, yırtıcı ve agresif türdeşe maruz kalma gibi TSSB hayvan modellerinde, kaygı benzeri davranışlara ek olarak, beyin kaynaklı nörotrofik faktör (BDNF)-tirozin kinaz reseptörü B (TrkB) ve serotonerjik reseptörlerin değişiklikleri gözlemlenmiştir (Règue *et al.* 2019).



Şekil 1: Beyin dokusu için DEG ve gen ontolojisi zenginleştirme sonuçları A) TSSB Hastalığına özgü DEG profillerini temsil eden volkan grafikleri, B) Gen ontolojisi zenginleştirme sonuçları

Her iki dokunun gen ontoloji zenginleştirme analizleri (biyolojik süreçler, moleküler fonksiyon ve hüresel bileşenler) karşılaştırıldığında, ortak 22 adet bileşen tespit edilmiştir (Ek Dosya Tablo 4 ve 6, Şekil 1B ve 2B). Bu grafiklerde, gen ontolojisi kategorileri kavram örtüşme grafikleri olarak görselleştirilmiştir. Bu grafiklerde, her düğüm (node) boyutu (içerdiği gen sayısı) ve P değeri (düğüm rengi) olarak kodlanan ayrı bir kavramı temsil etmektedir. İki düğüm eğer üyelerini paylaşıyorlarsa bir ayırıt (edge) ile bağlanmaktadır. Ayırıt genişliği,

düğüm arasındaki göreceli örtüşmeyi (Fowlkes-Mallows indeksine karşılık) yansıtırken, ayırıt rengi (koyuluğu), kullanıcının veri bankasına girdiği genlerin sayısını ("paylaşılan genler") olarak belirtmektedir. Bu görsel, farklı kavram türleri arasındaki ilişkiler hakkında hızlı bir genel bakış sağlamaktadır. Bu bakış açısıyla, her iki dokunun zenginleştirme analizlerinin ortak olan kümesinde, kalsiyum iyonu bağlama ve dolaşım sistemi gelişimi ile ilgili genler p değeri küçüklüğü ve içerdiği gen sayısı bakımından önemli görünmektedir.



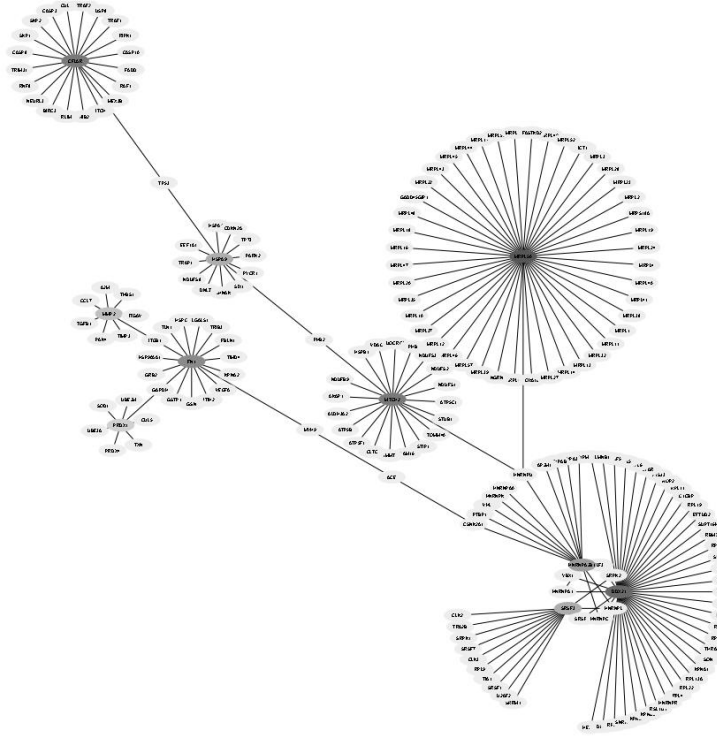
Şekil 2: Kalp dokusu için DEG ve gen ontolojisi zenginleştirme sonuçları A)TSSB Hastalığına özgü DEG profillerini temsil eden volkan grafikleri, B) Gen ontolojisi zenginleştirme sonuçları

3.2. Protein-Protein Etkileşim Ağlarının Analizi

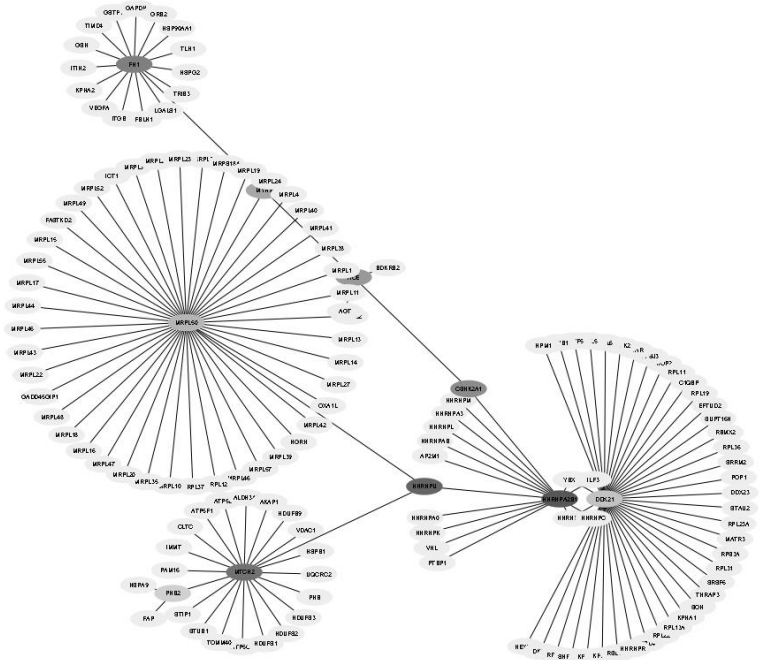
Çalışmada, iki farklı dokunun DEG'lerine dayalı protein-protein ağlarının yapısı analiz edilmiştir. Kalp dokusunun protein-protein ağı, 366 düğümden (node) ve 329 ayrıttan (edge) oluşurken, beyin dokusunun protein-protein ağı, 460 düğümden (node) ve 435 ayrıttan (edge) oluşmuştur. Beyin dokusu için degree ve betweenness

parametrelerine dayalı ortak hubları bulmaya yönelik yapılan Cytohubba analizi, ERBB3, NCOA6, BRAF, PCGF6 ve CDKN1B proteinlerini hub olarak ortaya çıkarırken, kalp dokusu için yapılan aynı analiz MRPL50, DDX21, MTCH2, FN1 ve HNRNPA2B1 proteinlerini hub olarak vermiştir (Şekil 3 ve Şekil 4). Her dokunun hub proteinleri, o dokunun DEG listesinin de ortak öğeleri olarak tespit edilmiştir.

A)

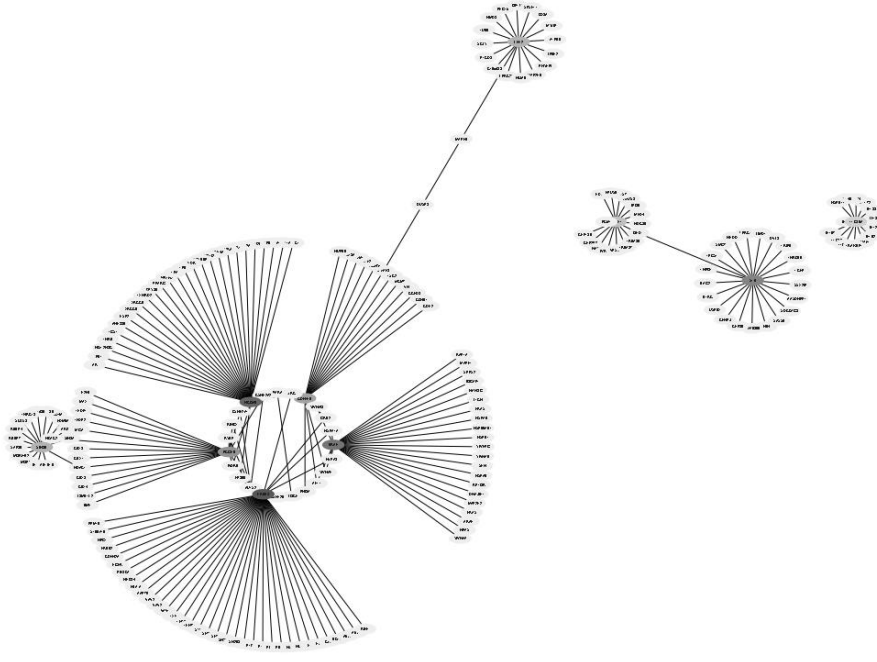


B)

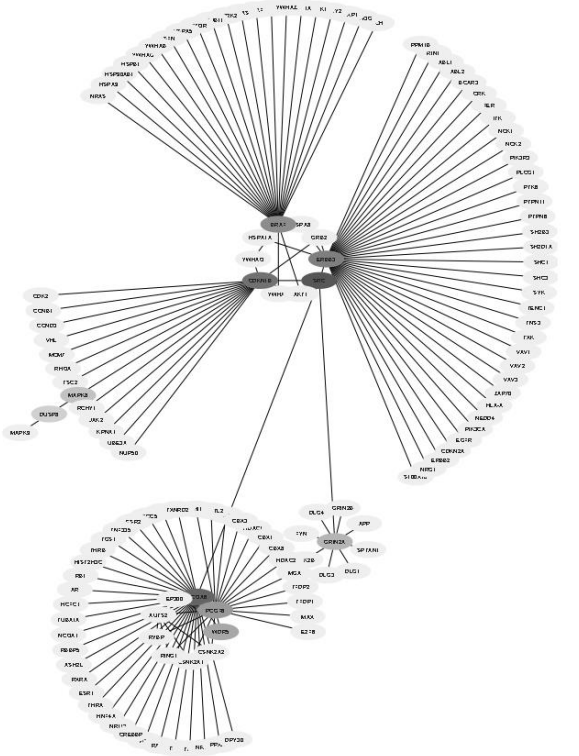


Şekil 3: Kalp dokusu için DEG tabanlı protein-protein etkileşim ağları. Her bir ağın hub'ları, A)degree B)betweenness metrikleri kullanılarak hesaplanmıştır. Hub'ların önemi renklerin daha koyulaşmasıyla doğru orantılıdır.

A)



B)



Şekil 4: Beyin dokusu için DEG tabanlı protein-protein etkileşim ağları. Her bir ağın hub'ları, A)degree B)betweenness metrikleri kullanılarak hesaplanmıştır. Hub'ların önemi renklerin daha koyulaşmasıyla doğru orantılıdır.

3.3. TSSB için Yeniden Konumlandırılmış İlaç Adayları

"ilaç yeniden konumlandırma" terimi, ABD Gıda ve ilaç idaresi tarafından halihazırda onaylanmış olan ilaçlar için yeni terapötik uygulamaların keşfini ifade etmektedir. İlaç yeniden konumlandırma, daha kısa

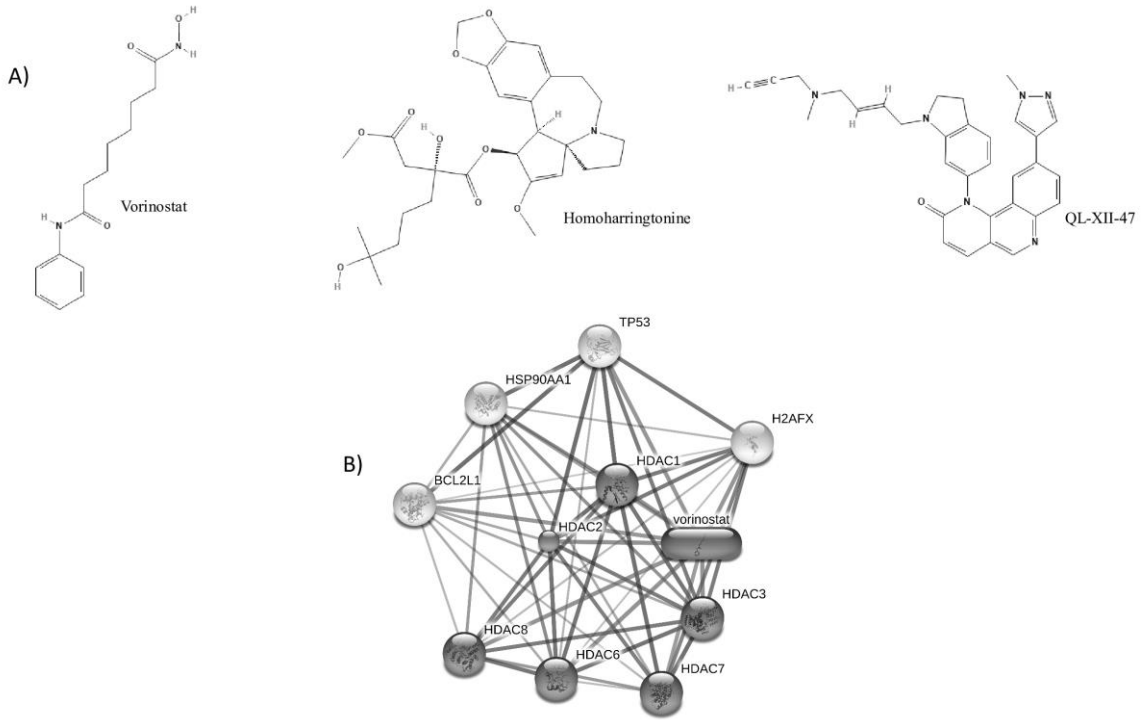
araştırma ve test süreleri ve daha düşük maliyetler nedeniyle yenilikçi ilaç geliştirmeden daha ulaşılabilir ve ekonomiktir. Ayrıca bu yöntem hastaların yeni ilaçlara daha erken ulaşmasına olanak tanımaktadır (Roder and Thomson, 2015). Bu sebeple, çalışmanın bir sonraki adımı olarak, TSSB

tedavisine yönelik ilaçların yeniden konumlandırma yöntemiyle tespiti hedeflenmiştir.

Bu çalışmada, TSSB hastalık senaryosunu tersine çevirebilecek küçük molekülleri araştırmaya yönelik olarak, çalışmanın önceki analizlerinde elde edilen DEG listeleri kullanılarak, her doku tipi için ayrı ayrı ilaç yeniden konumlandırması yapılmıştır. L1000CDS2 veri bankasına beyin dokusu için 48 aşağı regüle ve 76 yukarı regüle DEG uygulanarak, hastalık senaryosunu tersine çeviren, skorlarına göre sıralanmış 50 küçük molekül tespit edilmiştir (Ek Dosya Tablo 7). Aynı analiz kalp dokusunda 45 aşağı regüle ve 137 yukarı regüle DEG için de yapılmıştır. Kalp dokusu için de skorlarına göre sıralanmış 50 adet küçük molekül tespit edilmiştir (Ek Dosya Tablo 8). TSSB'yi iyileştirmeye yönelik her doku için yeniden konumlandırılan 50'şer ilaçtan 3'ünün, homoharringtonin (PubChem ID: 285033), vorinostat (PubChem ID: 5311), ve QL-XII-47 (PubChem ID: 118346216), iki farklı doku tipi için de ortak olduğu bulunmuştur. Bu ilaçlar Şekil 5A'da iki boyutlu yapıları ile gösterilmiştir.

FDA, iki veya daha fazla tirozin kinaz inhibitörüne (TKI) dirençli olan veya tirozin kinaz inhibitörlerini kullanamayan kronik miyeloid lösemili (KML)

kişilerin tedavisi için omacetaxine mepesuccinate olarak da bilinen homoharringtonin ilacını (HHT) onaylamıştır (Alvandi *et al.* 2014). Ayrıca bu ilacın üçlü negatif meme kanserinde kanser önleyici özelliklere sahip olduğu gösterilmiştir (Yakhni *et al.* 2019). Kutanöz T hücreli lenfoma tedavisi için lisanslanan ilk histon deasetilaz inhibitörü (HDI), 2006 yılında sınıf I ve II histon deasetilazların bir inhibitörü olan vorinostat (SAHA)'tır. HDI'ler meme kanseri dahil olmak üzere birkaç kanser hücrelerinin büyümesini durduran potansiyel antikanser ilaçlarıdır (Wawruszak *et al.* 2021). Bir antikanser ilacı kullanımına ek olarak, vorinostat'ın sistemik olarak uygulanmasının, kontrollere kıyasla SPS (tek uzun süreli stres) sıçanlarında korku tükenmesini önemli ölçüde arttırdığı da gösterilmiştir (Matsumoto *et al.* 2013). Ayrıca farelerde bu ilaç H3 ve H4 asetilasyon seviyelerinde önemli artışlara sebep olarak antidepresan benzeri etkiler göstermektedir (KV *et al.* 2018). Literatürdeki bu çalışmalar, bu ilacın TSSB'yi tedavi etmek için yeniden konumlandırılabilir bir ilaç olabileceğini gösterir. QL-XII-47 ile ilgili çalışmalara literatürde rastlanmamıştır.



Şekil 5: ilaç yeniden konumlandırma çalışmaları A) yeniden konumlandırılan ilaçlar B) Vorinostat'ın tahmini hedef genleri TSSB için yeniden konumlandırılan ilaçlar olan homoharringtonin, vorinostat, ve QL-XII-47, bu

3.4. Yeniden Konumlandırılmış İlaçlar için Tahmini Hedef Genler

ilaçların tahmini hedef genlerinin tespiti için analiz edilmiştir. Bu analizlerle, STITCH veri bankası kullanılarak, yeniden konumlandırılan ilaçların potansiyel mekanizmalarının taranması hedeflenmiştir. Analizlerin sonucuna göre vorinostat ilacı için, 10 adet tahmini hedef gen belirlenmiştir. Bu tahmini hedef genler *H2AFX*, *HDAC7*, *HSP90AA1*, *HDAC6*, *HDAC2*, *HDAC3*, *TP53*, *BCL2L1*, *HDAC8* ve *HDAC1*'dir. Diğer 2 ilaç, insanda gen-ilaç etkileşimleri için STITCH veri tabanında bulunamamıştır. Vorinostat, tahmini hedef genleri ile Şekil 5B'de gösterilmiştir. Vorinostat'ın tahmini hedef genleri için zenginleştirilmiş gen ontoloji terimleri Tablo 1-3'te gösterilmiştir.

Gen ontolojisi (GO) zenginleştirme analizine göre, öngörülen hedef genlerin %60'ı (10 proteinden 6'sı) biyolojik süreç kategorisinde histon H3 deasetilasyonunda; hücresel bileşen kategorisinde histon deasetilaz (HDAC) kompleksinde; ve moleküler fonksiyon kategorisinde NAD'ye bağlı histon deasetilaz aktivitesinde (H3-K14'e özgü) zenginleşmişlerdir (Şekil 5B'deki koyu renkli hub proteinler).

Travmatik bir olay, fiziksel zarar içerebilen veya aşırı derecede tehlikeli olarak algılanabilen TSSB'ye neden olabilir. Aşırı travmatik stres, TSSB hastaları tarafından normal psikolojik savunma mekanizmalarının bunaldığı noktaya kadar kendini gösterir. Kendine zarar verme ve travmatik olayı tekrar tekrar yaşama gibi davranışlar, semptomlara sadece birkaç örnektir (Bahari-Javan S *et al.* 2014). Bu süreç esnasında hastalar korkulu hatıralarına sıklıkla maruz kaldıklarında, aynı zamanda kendilerini korunmuş hissettiklerinde, korku hafızasıyla bağlantılı kaygıda azalma gözlemlenebilir (Adshead, 2000; Bisson *et al.* 2013). "Korku tükenmesi" olarak bilinen bu azalma sürecinde literatürde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. HDAC inhibitörleri olan valproat, sodyum bütirat ve trikostatın TSSB model deney hayvanlarında korkunun yok tükenmesini kolaylaştırır (Bahari-Javan S *et al.* 2014). Dolayısıyla, HDAC inhibitör tedavisinin korkunun yok olmasını desteklediğine ve TSSB'yi tedavi etmek için yeni bir terapötik yaklaşım sunabileceğine dair güçlü kanıtlar vardır (Maddox *et al.* 2013). Bununla birlikte, HDAC'lerin korku tükenmesini nasıl organize ettiği hala belirsizdir.

Bunun ortaya çıkarılması için, HDAC'lerin hedeflediği genlere ve yolizlerine yönelik ayrıntılı *in vitro* çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Diğer ilaçlar için öngörülen hedef genler veritabanında bulunamamasına rağmen, vorinostat sonuçları, bu üç ilacın TSSB'deki etkisini ve hedef genlerini/yolizlerini araştırmaya yönelik *in vitro* ve *in vivo* analizler yapmak için cesaret vericidir.

Deneysel doğrulama eksikliği nedeniyle, bu araştırmada kullanılan ilaç yeniden konumlandırma yaklaşımı, ilaç yeniden konumlandırma kanıt düzeyi (DREL) sınıflandırmasında seviye 0 olarak yer almaktadır (Vogrinc and Kunej, 2017). Bu beş seviyeli sınıflandırmaya göre, Seviye 0, *in vitro* veya *in vivo* değerlendirmeler olmaksızın tahminlere atıfta bulunurken, Seviye 4, yeniden konumlandırılan molekül için güvenlik sınırları içindeki dozlarda iyi belgelenmiş klinik sonuçlara atıfta bulunmaktadır. Öte yandan, DREL-0 puanlı çalışmalar, ilaçların yeniden konumlandırılması için benzersiz biyoinformatik yöntemlerin kullanılmasının yanı sıra ek deneysel doğrulama için yeni bileşikler sağladıkları için göz ardı edilmemelidir. Ayrıca, literatürde çeşitli hastalıkları tahmin etmek için DREL-0 kullanan çalışmalar bulunmaktadır (Craddock *et al.* 2015; Grover *et al.* 2015; Xu and Wang, 2016; Zhang *et al.* 2015) Ek olarak, meme ve prostat kanserinde, benzer bir yaklaşım kullanılarak, yeni üretilen ilaçların etkinliğini *in vitro* hücre tahlili ile doğrulayan çalışmalar mevcuttur (Turanli, Karagoz, *et al.* 2019; Turanli, Zhang, *et al.* 2019).

4. Sonuç

Bu çalışmada yapılan TSSB hastalığının dokulardaki etkisinin sistem biyolojisi odaklı transkriptom ve biyolojik ağların bütünleştirici analizleri, hastalık temelli gen ve yol izlerini ortaya çıkarmış; TSSB için yenilikçi ve kesin tedavi yöntemlerinin inşasına yönelik potansiyel ilaç adaylarının bulunmasına ve bu ilaçların hücre içi potansiyel hedef genlerinin belirlenmesine yardımcı olmuştur. Yeniden konumlandırılan bileşiklerin TSSB üzerindeki iyileştirici etkilerini doğrulamak için ek *in vitro* ve *in vivo* deneylerin yapılması şartıyla, bu araştırma, TSSB ile bağlantılı yeni terapötiklerin keşfi yoluyla

mevcut tedavilerin etkinliğini artırma potansiyeline sahiptir.

Çizelge 1. Vorinostat'ın tahmini hedef genleri için zenginleştirilmiş biyolojik süreç gen ontolojisi (gen setindeki sayı > 5)

#pat hway ID	pathway description	matching proteins in the network (labels)
GO.0 0439 33	macromolecular complex subunit organization	H2AFX,HDAC1,HDAC2,HDA C3,HDAC6,HDAC7,HDAC8,H SP90AA1,TP53
GO.0 0068 07	nitrogen compound metabolic process	H2AFX,HDAC1,HDAC2,HDA C3,HDAC6,HDAC7,HDAC8,H SP90AA1,TP53
GO.0 0313 23	regulation of cellular metabolic process	BCL2L1,H2AFX,HDAC1,HDA C2,HDAC6,HDAC7,HDAC8,H SP90AA1,TP53
GO.0 0063 25	chromatin organization	H2AFX,HDAC1,HDAC2,HDA C3,HDAC6,HDAC7,HDAC8,T P53
GO.0 0512 76	chromosome organization	H2AFX,HDAC1,HDAC2,HDA C3,HDAC6,HDAC7,HDAC8,T P53
GO.0 0069 96	organelle organization	H2AFX,HDAC1,HDAC2,HDA C3,HDAC6,HDAC7,HDAC8,H SP90AA1
GO.0 0485 83	regulation of response to stimulus	BCL2L1,H2AFX,HDAC1,HDA C2,HDAC3,HDAC6,HDAC7,H SP90AA1
GO.0 0511 71	regulation of nitrogen compound metabolic process	H2AFX,HDAC1,HDAC2,HDA C6,HDAC7,HDAC8,HSP90AA 1,TP53
GO.0 0903 04	nucleic acid metabolic process	H2AFX,HDAC1,HDAC2,HDA C3,HDAC6,HDAC7,HDAC8,T P53
GO.0 0447 10	single-organism metabolic process	H2AFX,HDAC1,HDAC2,HDA C3,HDAC6,HDAC7,HDAC8,H SP90AA1
GO.0 0485 22	positive regulation of cellular process	H2AFX,HDAC1,HDAC2,HDA C3,HDAC6,HDAC7,HSP90AA 1,TP53
GO.0 0071 54	cell communication	BCL2L1,HDAC1,HDAC2,HDA C3,HDAC6,HDAC7,HSP90AA 1,TP53
GO.0 0070 49	cell cycle	BCL2L1,H2AFX,HDAC1,HDA C3,HDAC8,HSP90AA1,TP53
GO.0 0335 54	cellular response to stress	BCL2L1,H2AFX,HDAC2,HDA C3,HDAC6,HSP90AA1,TP53
GO.0 0485 84	positive regulation of response to stimulus	BCL2L1,H2AFX,HDAC2,HDA C3,HDAC6,HSP90AA1,TP53
GO.1 9025 89	single-organism organelle organization	HDAC1,HDAC2,HDAC3,HDA C6,HDAC7,HDAC8,HSP90AA 1
GO.0 0063 51	transcription, DNA-templated	HDAC1,HDAC2,HDAC3,HDA C6,HDAC7,HDAC8,TP53
GO.0 0313 25	positive regulation of cellular metabolic process	H2AFX,HDAC1,HDAC2,HDA C3,HDAC6,HSP90AA1,TP53
GO.0 0487 31	system development	BCL2L1,H2AFX,HDAC1,HDA C2,HDAC7,HSP90AA1,TP53
GO.0 0709 32	histone H3 deacetylation	HDAC1,HDAC2,HDAC3,HDA C6,HDAC7,HDAC8

GO.0 0801 35	regulation of cellular response to stress	BCL2L1,H2AFX,HDAC3,HDA C6,HSP90AA1,TP53
GO.0 0001 22	negative regulation of transcription from RNA polymerase II promoter	HDAC1,HDAC2,HDAC3,HDA C7,HDAC8,TP53
GO.0 0224 02	cell cycle process	BCL2L1,H2AFX,HDAC3,HDA C8,HSP90AA1,TP53
GO.0 0458 92	negative regulation of transcription, DNA-templated	HDAC1,HDAC2,HDAC6,HDA C7,HDAC8,TP53
GO.0 0430 67	regulation of programmed cell death	BCL2L1,HDAC1,HDAC2,HDA C3,HDAC6,TP53
GO.0 0098 91	positive regulation of biosynthetic process	HDAC1,HDAC2,HDAC3,HDA C6,HSP90AA1,TP53
GO.0 0511 73	positive regulation of nitrogen compound metabolic process	H2AFX,HDAC1,HDAC2,HDA C3,HSP90AA1,TP53
GO.0 0226 07	cellular component assembly	H2AFX,HDAC3,HDAC6,HDA C7,HSP90AA1,TP53
GO.0 0440 85	cellular component biogenesis	H2AFX,HDAC3,HDAC6,HDA C7,HSP90AA1,TP53
GO.0 0071 66	cell surface receptor signaling pathway	BCL2L1,HDAC1,HDAC2,HDA C3,HDAC7,HSP90AA1
GO.0 0096 53	anatomical structure morphogenesis	BCL2L1,HDAC1,HDAC2,HDA C7,HSP90AA1,TP53
GO.0 0313 24	negative regulation of cellular metabolic process	BCL2L1,HDAC1,HDAC2,HDA C6,HDAC7,HDAC8
GO.0 0328 79	regulation of localization	BCL2L1,HDAC3,HDAC6,HDA C7,HDAC8,TP53
GO.0 0099 66	regulation of signal transduction	BCL2L1,HDAC1,HDAC2,HDA C3,HDAC6,HDAC7

Çizelge 2. Vorinostat'ın tahmini hedef genleri için zenginleştirilmiş moleküler fonksiyon gen ontolojisi (gen setindeki sayı > 5)

#pat hway ID	pathway description	matching proteins in your network (labels)
GO.0 0055 15	protein binding	BCL2L1,H2AFX,HDAC1,HDAC2,H DAC3,HDAC6,HDAC7,HDAC8,HS P90AA1,TP53
GO.0 0198 99	enzyme binding	BCL2L1,H2AFX,HDAC1,HDAC2,H DAC3,HDAC6,HDAC7,HSP90AA 1,TP53
GO.0 0167 87	hydrolase activity	HDAC1,HDAC2,HDAC3,HDAC6,H DAC7,HDAC8,HSP90AA1
GO.0 0320 41	NAD-dependent histone deacetylase activity (H3-K14 specific)	HDAC1,HDAC2,HDAC3,HDAC6,H DAC7,HDAC8
GO.0 0081 34	transcription factor binding	HDAC1,HDAC2,HDAC3,HDAC7,H DAC8,TP53

Çizelge 3. Vorinostat'ın tahmini hedef genleri için zenginleştirilmiş hücresel bileşen gen ontolojisi (gen setindeki sayı > 5)

#pat hway ID	pathway description	matching proteins in your network (labels)
GO.0 0432 34	protein complex	BCL2L1,H2AFX,HDAC1,HDAC2,HDAC3,HDAC6,HDAC7,HDAC8,TP53
GO.0 0056 54	nucleoplasm	H2AFX,HDAC1,HDAC2,HDAC3,HDAC6,HDAC8,HSP90AA1,TP53
GO.0 0319 81	nuclear lumen	BCL2L1,HDAC1,HDAC2,HDAC3,HDAC6,HDAC8,HSP90AA1,TP53
GO.0 0444 51	nucleoplasm part	HDAC1,HDAC2,HDAC3,HDAC6,HDAC7,HDAC8,TP53
GO.0 0058 29	cytosol	BCL2L1,HDAC1,HDAC3,HDAC6,HDAC8,HSP90AA1,TP53
GO.0 0432 32	intracellular non-membrane-bounded organelle	BCL2L1,HDAC1,HDAC2,HDAC3,HDAC6,HDAC8,TP53
GO.0 0001 18	histone deacetylase complex	HDAC1,HDAC2,HDAC3,HDAC6,HDAC7,HDAC8

5. Kaynaklar

Adshead, G. (2000). Psychological therapies for post-traumatic stress disorder. *The British Journal of Psychiatry*, **177**, 144–148.

Alam, T., Agrawal, S., Severin, J., Young, R. S., Andersson, R., Arner, E., Hasegawa, A., Lizio, M., Ramilowski, J. A., Abugessaisa, I., Ishizu, Y., Noma, S., Tarui, H., Taylor, M. S., Lassmann, T., Itoh, M., Kasukawa, T., Kawaji, H., Marchionni, L., ... de Hoon, M. J. L. (2020). Comparative transcriptomics of primary cells in vertebrates. *Genome Research*, **30(7)**, 951–961.

Albrechet-Souza, L., Carvalho, M. C., and Brandão, M. L. (2013). D1-like receptors in the nucleus accumbens shell regulate the expression of contextual fear conditioning and activity of the anterior cingulate cortex in rats. *International Journal of Neuropsychopharmacology*, **16(5)**, 1045–1057.

Alvandi, F., Kwitkowski, V. E., Ko, C. W., Rothmann, M. D., Ricci, S., Saber, H., Ghosh, D., Brown, J., Pfeiler, E., Chikhale, E., Grillo, J., Bullock, J., Kane, R., Kaminska, E., Farrell, A. T., and Pazdur, R. (2014). U.S. food and drug administration approval summary: omacetaxine mepesuccinate as treatment for chronic myeloid leukemia. *Oncologist*, **19**, 94–99.

Antoniadis, E. A., and McDonald, R. J. (2006). Fornix, medial prefrontal cortex, nucleus accumbens, and mediodorsal thalamic nucleus: Roles in a fear-based context discrimination task. *Neurobiology of Learning and Memory*, **85(1)**, 71–85.

Ashburner, M., Ball, C. A., Blake, J. A., Botstein, D., Butler, H., Cherry, J. M., Davis, A. P., Dolinski, K., Dwight, S. S., Eppig, J. T., Harris, M. A., Hill, D. P., Issel-Tarver, L., Kasarskis, A., Lewis, S., Matese, J. C., Richardson, J. E., Ringwald, M., Rubin, G. M., and Sherlock, G. (2000). Gene ontology: Tool for the unification of biology. *In Nature Genetics*, **25(1)**, 25–29.

Ashwell, R., and Ito, R. (2014). Excitotoxic lesions of the infralimbic, but not prelimbic cortex facilitate reversal of appetitive discriminative context conditioning: The role of the infralimbic cortex in context generalization. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, **8(FEB)**.

Bahari-Javan, S., Sananbenesi, F., and Fischer, A. (2014). Histone-acetylation: a link between Alzheimer's disease and post-traumatic stress disorder?. *Frontiers in neuroscience*, **8**, 160.

Barrett, T., Suzek, T. O., Troup, D. B., Wilhite, S. E., Ngau, W.-C., Ledoux, P., Rudnev, D., Lash, A. E., Fujibuchi, W., and Edgar, R. (2005). NCBI GEO: mining millions of expression profiles—database and tools. *Nucleic Acids Research*, **33(suppl_1)**, D562–D566.

Belzung, C., Turiault, M., and Griebel, G. (2014). Optogenetics to study the circuits of fear- and depression-like behaviors: a critical analysis. *Pharmacology, biochemistry, and behavior*, **122**, 144–157.

Bisson, J. I., Roberts, N. P., Andrew, M., Cooper, R., and Lewis, C. (2013). Psychological therapies for chronic post-traumatic stress disorder (PTSD) in adults. *The Cochrane database of systematic reviews*, **2013(12)**, CD003388.

Carbon, S., Douglass, E., Good, B. M., Unni, D. R., Harris, N. L., Mungall, C. J., Basu, S., Chisholm, R. L., Dodson, R. J., Hartline, E., Fey, P., Thomas, P. D., Albou, L. P., Ebert, D., Kesling, M. J., Mi, H., Muruganujan, A., Huang, X., Mushayahama, T., ... Elser, J. (2021). The Gene Ontology resource: Enriching a GOld mine. *Nucleic Acids Research*, **49(D1)**, D325–D334.

Chen, Y. T., Xie, J. Y., Sun, Q., and Mo, W. J. (2019). Novel drug candidates for treating esophageal carcinoma: A study on differentially expressed genes, using

- connectivity mapping and molecular docking. *International Journal of Oncology*, **54(1)**, 152–166.
- Chin, C.-H., Chen, S.-H., Wu, H.-H., Ho, C.-W., Ko, M.-T., and Lin, C.-Y. (2014). cytoHubba: identifying hub objects and sub-networks from complex interactome. *BMC Systems Biology*, **8 Suppl 4(Suppl 4)**, S11.
- Cho, J. H. , Lee, I. , Hammamieh, R. , Wang, K. , Baxter, D. , Scherler, K. , Etheridge, A. , Kulchenko, A. , Gautam, A. , Muhie, S. , Chakraborty, N. , Galas, D. J. , Jett, M. , and ood, L. (2014). Molecular evidence of stress-induced acute heart injury in a mouse model simulating posttraumatic stress disorder. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **111(8)**, 3188–3193.
- Craddock, T. J. A., Harvey, J. M., Nathanson, L., Barnes, Z. M., Klimas, N. G., Fletcher, M. A., and Broderick, G. (2015). Using gene expression signatures to identify novel treatment strategies in gulf war illness. *BMC Medical Genomics*, **8(1)**, 36.
- Daskalakis, N. P., Cohen, H., Cai, G., Buxbaum, J. D., and Yehuda, R. (2014). Expression profiling associates blood and brain glucocorticoid receptor signaling with trauma-related individual differences in both sexes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **111(37)**, 13529–13534.
- Fabregat, A., Sidiropoulos, K., Garapati, P., Gillespie, M., Hausmann, K., Haw, R., Jassal, B., Jupe, S., Korninger, F., McKay, S., Matthews, L., May, B., Milacic, M., Rothfels, K., Shamovsky, V., Webber, M., Weiser, J., Williams, M., Wu, G., ... D'Eustachio, P. (2016). The Reactome pathway Knowledgebase. *Nucleic Acids Research*, **44(D1)**, D481-7.
- Gasparyan, A., Navarro, D., Navarrete, F., and Manzanares, J. (2022). Pharmacological strategies for post-traumatic stress disorder (PTSD): From animal to clinical studies. *Neuropharmacology*, **218**, 109211.
- Gentleman, R. C., Carey, V. J., Bates, D. M., Bolstad, B., Dettling, M., Dudoit, S., Ellis, B., Gautier, L., Ge, Y., & Gentry, J. (2004). Bioconductor: open software development for computational biology and bioinformatics. *Genome Biology*, **5(10)**, 1–16.
- Grover, M. P., Ballouz, S., Mohanasundaram, K. A., George, R. A., Goscinski, A., Crowley, T. M., Sherman, C. D. H., and Wouters, M. A. (2015). Novel therapeutics for coronary artery disease from genome-wide association study data. *BMC Medical Genomics*, **8(2)**, S1.
- Iribarren, J., Prolo, P., Neagos, N., and Chiappelli, F. (2005). Post-Traumatic Stress Disorder: Evidence-Based Research for the Third Millennium. *ECAM*, **2(4)**, 503–512.
- Jovanovic, T., Sakoman, A. J., Kozarić-Kovačić, D., Meštrović, A. H., Duncan, E. J., Davis, M., and Norrholm, S. D. (2013). Acute stress disorder versus chronic posttraumatic stress disorder: inhibition of fear as a function of time since trauma. *Depression and anxiety*, **30(3)**, 217–224.
- Kamburov, A., Pentchev, K., Galicka, H., Wierling, C., Lehrach, H., and Herwig, R. (2011). ConsensusPathDB: Toward a more complete picture of cell biology. *Nucleic Acids Research*, **39(SUPPL. 1)**, D712-7.
- Kanehisa, M., Araki, M., Goto, S., Hattori, M., Hirakawa, M., Itoh, M., Katayama, T., Kawashima, S., Okuda, S., Tokimatsu, T., and Yamanishi, Y. (2008). KEGG for linking genomes to life and the environment. *Nucleic Acids Research*, **36 (Database issue)**, D480-4.
- Kang, H. K., Natelson, B. H., Mahan, C. M., Lee, K. Y., and Murphy, F. M. (2003). Post-Traumatic Stress Disorder and Chronic Fatigue Syndrome-like Illness among Gulf War Veterans: A Population-based Survey of 30,000 Veterans. *American Journal of Epidemiology*, **157(2)**, 141–148.
- Kessler R.C., Berglund P., Demler O., Jin R., Merikangas K.R., Walters E.E. (2005). Lifetime Prevalence and Age-of-Onset Distributions of DSM-IV Disorders in the National Comorbidity Survey Replication. *Arch Gen Psychiatry*, **62(6)**, 593–602.
- Kibler, J. L. (2009). Posttraumatic stress and cardiovascular disease risk. *Journal of Trauma and Dissociation*, **10(2)**, 135–150.
- Kim, S., Chen, J., Cheng, T., Gindulyte, A., He, J., He, S., Li, Q., Shoemaker, B. A., Thiessen, P. A., Yu, B., Zaslavsky, L., Zhang, J., and Bolton, E. E. (2019). PubChem 2019 update: Improved access to chemical data. *Nucleic Acids Research*, **47(D1)**, D1102–D1109.
- Kubat Oktem, E., Aydin, B., Yazar, M., Arga, K.Y. (2022). Integrative Analysis of Motor Neuron and Microglial Transcriptomes from SOD1G93A Mice Models Uncover Potential Drug Treatments for ALS. *Journal of Molecular Neuroscience*, **72(11)**, 2360-2376.
- Kubzansky, L. D., and Koenen, K. C. (2009). Is posttraumatic stress disorder related to development of heart disease? An update. *Cleveland Clinic Journal of Medicine*, **76(SUPPL.2)**, S60-5.

- KV, A., Madhana, R. M., JS, I. C., Lahkar, M., Sinha, S., and Naidu, V. G. M. (2018). Antidepressant activity of vorinostat is associated with amelioration of oxidative stress and inflammation in a corticosterone-induced chronic stress model in mice. *Behavioural Brain Research*, **344**, 73–84.
- Lee, D.H. , Lee, J.Y. , Hong, D.Y. , Lee, E.C. , Park, S.W. , and Lee, M.R., Oh, J.S. (2022). Neuroinflammation in Post-Traumatic Stress Disorder. *Biomedicines*, **10**, 953.
- Maddox, S. A., Schafe, G. E., and Ressler, K. J. (2013). Exploring epigenetic regulation of fear memory and biomarkers associated with post-traumatic stress disorder. *Frontiers in Psychiatry*, **4(JUL)**, 1-62.
- Matsumoto, Y., Morinobu, S., Yamamoto, S., Matsumoto, T., Takei, S., Fujita, Y., and Yamawaki, S. (2013). Vorinostat ameliorates impaired fear extinction possibly via the hippocampal NMDA-CaMKII pathway in an animal model of posttraumatic stress disorder. *Psychopharmacology*, **229(1)**, 51–62.
- Mudunuri, U., Che, A., Yi, M., and Stephens, R. M. (2009). bioDBnet: The biological database network. *Bioinformatics*, **25(4)**, 555–556.
- Muhie, S., Gautam, A., Chakraborty, N., Hoke, A., Meyerhoff, J., Hammamieh, R., and Jett, M. (2017). Molecular indicators of stress-induced neuroinflammation in a mouse model simulating features of post-traumatic stress disorder. *Translational Psychiatry*, **7(5)**, e1135.
- Muhie, S., Gautam, A., Meyerhoff, J., Chakraborty, N., Hammamieh, R., and Jett, M. (2015). Brain transcriptome profiles in mouse model simulating features of post-traumatic stress disorder. *Molecular Brain*, **8(1)**.
- O'Donnell, M. L., Varker, T., Creamer, M., Fletcher, S., McFarlane, A. C., Silove, D., Bryant, R. A., and Forbes, D. (2013). Exploration of Delayed-Onset Posttraumatic Stress Disorder After Severe Injury. *Psychosomatic Medicine*, **75(1)**, 68–75.
- Öktem, E. K., Yazar, M., Gulfidan, G., and Arga, K. Y. (2019). Cancer Drug Repositioning by Comparison of Gene Expression in Humans and Axolotl (*Ambystoma mexicanum*) During Wound Healing. *OMICS A Journal of Integrative Biology*, **23(8)**, 389–405.
- Oughtred, R., Stark, C., Breitkreutz, B.-J., Rust, J., Boucher, L., Chang, C., Kolas, N., O'Donnell, L., Leung, G., and McAdam, R. (2019). The BioGRID interaction database: 2019 update. *Nucleic Acids Research*, **47(D1)**, D529–D541.
- Pedersen, S. S., Middel, B., and Larsen, M. L. (2003). Posttraumatic stress disorder in first-time myocardial infarction patients. *Heart and Lung: Journal of Acute and Critical Care*, **32(5)**, 300–307.
- Prajwal P, Inban P, Natarajan B, Mitra S, Tango T, Ahmed A, Bansode S, Almushawah AA. (2022). Current Treatments of Post-traumatic Stress Disorder and Amygdala Ablation as a Potential Cutting-Edge Therapy in Its Refractory Cases. *Cureus*, **14(11)**, e31943.
- Règue, M., Poilbout, C., Martin, V., Franc, B., Lanfumey, L., and Mongeau, R. (2019). Increased 5-HT_{2C} receptor editing predisposes to PTSD-like behaviors and alters BDNF and cytokines signaling. *Translational Psychiatry*, **9(100)**.
- Ritchie, M. E., Phipson, B., Wu, D., Hu, Y., Law, C. W., Shi, W., & Smyth, G. K. (2015). Limma powers differential expression analyses for RNA-sequencing and microarray studies. *Nucleic Acids Research*, **43(7)**, e47.
- Roder, C., and Thomson, M. J. (2015). Auranofin: Repurposing an Old Drug for a Golden New Age. *Drugs in R and D*, **15(1)**, 13–20.
- Rosenfield, P. J., Stratyner, A., Tufekcioglu, S., Karabell, S., McKelvey, J., and Litt, L. (2018). Complex PTSD in ICD-11: A Case Report on a New Diagnosis. *Journal of Psychiatric Practice*, **24(5)**, 364–370.
- Sean, D., and Meltzer, P. S. (2007). GEOquery: A bridge between the Gene Expression Omnibus (GEO) and BioConductor. *Bioinformatics*, **23(14)**, 1846–1847.
- Shannon, P., Markiel, A., Ozier, O., Baliga, N. S., Wang, J. T., Ramage, D., Amin, N., Schwikowski, B., and Ideker, T. (2003). Cytoscape: a software environment for integrated models of biomolecular interaction networks. *Genome Research*, **13(11)**, 2498–2504.
- Smith EJT, Gasper WJ, Schneider PA, Finlayson E, Walter LC, Covinsky KE, Conte MS, Iannuzzi JC. (2022). Cognitive Impairment is Common in a Veterans Affairs Population with Peripheral Arterial Disease. *Ann Vasc Surg*, **S0890-5096(22)00892-5**.
- Smyth, G.K. (2005). limma: Linear Models for Microarray Data. In: Gentleman, R., Carey, V.J., Huber, W., Irizarry, R.A., Dudoit, S. (eds) *Bioinformatics and Computational Biology Solutions Using R and Bioconductor*. *Statistics for Biology and Health*. Springer, New York, NY.

- Stein, D. J., McLaughlin, K. A., Koenen, K. C., Atwoli, L., Friedman, M. J., Hill, E. D., Maercker, A., Petukhova, M., Shahly, V., van Ommeren, M., Alonso, J., Borges, G., de Girolamo, G., de Jonge, P., Demyttenaere, K., Florescu, S., Karam, E. G., Kawakami, N., Matschinger, H., Okoliyski, M., ... Kessler, R. C. (2014). DSM-5 and ICD-11 definitions of posttraumatic stress disorder: investigating "narrow" and "broad" approaches. *Depression and anxiety*, **31(6)**, 494–505.
- Szklarczyk, D., Santos, A., von Mering, C., Jensen, L. J., Bork, P., and Kuhn, M. (2016). STITCH 5: Augmenting protein-chemical interaction networks with tissue and affinity data. *Nucleic Acids Research*, **44(D1)**, D380–D384.
- Tarifeño-Saldivia, E., Lavergne, A., Bernard, A., Padamata, K., Bergemann, D., Voz, M. L., Manfroid, I., & Peers, B. (2017). Transcriptome analysis of pancreatic cells across distant species highlights novel important regulator genes. *BMC Biology*, **15(1)**, 21.
- Turanli, B., Karagoz, K., Bidkhor, G., Sinha, R., Gatza, M. L., Uhlen, M., Mardinoglu, A., and Arga, K. Y. (2019). Multi-omic data interpretation to repurpose subtype specific drug candidates for breast cancer. *Frontiers in Genetics*, **10 (MAY)**, 420.
- Turanli, B., Zhang, C., Kim, W., Benfeitas, R., Uhlen, M., Arga, K. Y., and Mardinoglu, A. (2019). Discovery of therapeutic agents for prostate cancer using genome-scale metabolic modeling and drug repositioning. *EBioMedicine*, **42**, 386–396.
- van Loey, N. E., van de Schoot, R., and Faber, A. W. (2012). Posttraumatic Stress Symptoms after Exposure to Two Fire Disasters: Comparative Study. *PLoS ONE*, **6(7)**, e41532.
- Vogrin, D., and Kunej, T. (2017). Drug repositioning: computational approaches and research examples classified according to the evidence level. *Discoveries*, **5(2)**, e75.
- von Känel, R., Hari, R., Schmid, J. P., Wiedemar, L., Guler, E., Barth, J., Saner, H., Schnyder, U., and Begré, S. (2011). Non-fatal cardiovascular outcome in patients with posttraumatic stress symptoms caused by myocardial infarction. *Journal of Cardiology*, **58(1)**, 61–68.
- Wawruszak, A., Borkiewicz, L., Okon, E., Kukula-Koch, W., Afshan, S., and Halasa, M. (2021). Vorinostat (SAHA) and breast cancer: An overview. *Cancers*, **13(18)**, 4700.
- Xu, R., and Wang, Q. Q. (2016). A genomics-based systems approach towards drug repositioning for rheumatoid arthritis. *BMC Genomics*, **17**, 518.
- Xue, C., Ge, Y., Tang, B., Liu, Y., Kang, P., Wang, M., and Zhang, L. (2015). A meta-analysis of risk factors for combat-related PTSD among military personnel and veterans. *PLoS ONE*, **10(3)**, e0120270.
- Yakhni, M., Briat, A., el Guerrab, A., Furtado, L., Kwiatkowski, F., Miot-Noirault, E., Cachin, F., Penault-Llorca, F., and Radosevic-Robin, N. (2019). Homoharringtonine, an approved anti-leukemia drug, suppresses triple negative breast cancer growth through a rapid reduction of anti-apoptotic protein abundance. *American Journal of Cancer Research*, **9(5)**, 1043–1060.
- Zhang, M., Luo, H., Xi, Z., and Rogaeva, E. (2015). Drug repositioning for diabetes based on "omics" data mining. *PLoS ONE*, **10(5)**, e0126082.