



# GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ

## FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

Gümüşhane University Journal of Science

GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ YAYINI

PUBLISHED BY GÜMÜŞHANE UNIVERSITY

ISSN 2146 - 538X

CİLT/VOLUME: 13

SAYI/NUMBER : 2

YIL/YEAR : 2023

$$\text{Arf}(q) = \sum_{i=1}^n q^{(a_i) q(b_i)} \in \mathbb{Z}_2$$

$a_i, b_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n.$



EBSCO



TÜBİTAK

ULAKBİM  
TRIZIN



*Gümüşhane University Journal of Science*  
**Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**  
*Published by Gümüşhane University*  
Cilt/Volume: 13 Sayı/Issue: 2 Yıl/Year: 2023  
Üç ayda bir yayımlanır/ *Published four times a year*  
**ISSN 2146-538X**

**Sahibi / Owner**

*Prof. Dr. Halil İbrahim ZEYBEK*

Gümüşhane Üniversitesi Adına / *On the behalf of Gümüşhane University*

**Sorumlu Yazı İşleri Müdürü / Editor in Chief**

*Dr. Öğr. Üyesi Hasan Tahsin BOSTANCI*

**Baş Editörler / Executive Editors**

*Doç. Dr. Mehmet Ali GÜCER*

*Öğr. Gör. Salih TÜRK*

**Editörler / Editors**

*Prof. Dr. Ferkan SİPAHİ*

*Prof. Dr. Necati ÇELİK*

*Prof. Dr. Fatih DÖNER*

*Prof. Dr. Mehmet MERDAN*

*Prof. Dr. Duygu ÖZDEŞ*

*Prof. Dr. Serkan ÖZTÜRK*

*Prof. Dr. Halil YOLCU*

*Doç. Dr. Enver AKARYALI*

*Doç. Dr. Selçuk ALEMDAĞ*

*Doç. Dr. İlhan ÇELİK*

*Doç. Dr. Serhat DAĞ*

*Doç. Dr. Nihan GÜNGÖR*

*Doç. Dr. Ebru Emine ŞÜKÜROĞLU*

*Doç. Dr. Fevzi TOPAL*

*Doç. Dr. İbrahim TURAN*

*Dr. Öğr. Üyesi. Bülent AKAR*

*Dr. Öğr. Üyesi Onur ARAZ*

*Dr. Öğr. Üyesi Lale CONA*

*Dr. Öğr. Üyesi Recep ÇAKMAK*

*Dr. Öğr. Üyesi Osman KOMUT*

*Dr. Öğr. Üyesi Yasin OĞUZ*

*Dr. Öğr. Üyesi Samet TONYALI*

*Dr. İlker ERKAN*

**Yazım ve Dil Editörü / Layout Editor**

*Dr. İlker ERKAN*

**Dergi Sekreteryası / Secretary**

*Arş. Gör. Şener ALİYAZICIOĞLU*

*Arş. Gör. Kadir SÜNNETCİ*

*Arş. Gör. Murat ŞAN*

*Arş. Gör. Ahmet YAVUZDOĞAN*

**Yayın Türü / Publication Type**

*Yaygın süreli ve hakemli/ Common term and refereed*

**Yayın Tarihi / Publication Date**

**15 / 04 / 2023**

*Hakemli bir dergi olan Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi üç ayda bir çevrimiçi olarak yayımlanmaktadır. Akademik usullere uygun atıf yapmak suretiyle dergide yapılan çalışmalardan yararlanılabilir. Bu dergide yayımlanan çalışmaların tüm sorumluluğu yazarlara aittir.*



**Gümüşhane University Journal of Science**  
**Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**

Published by Gümüşhane University

Cilt/Volume: 13 Sayı/Issue:2 Yıl/Year: 2023

Üç ayda bir yayımlanır/ Published four times a year

**ISSN 2146-538X**

**Yayın Danışma Kurulu / Editorial Advisory Board**

- Prof. Dr. Jose Francisco Gomez Aguilar-Cenidet  
Prof. Dr. Vecihi AKSAKAL-Bayburt Üniversitesi  
Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ-Karadeniz Teknik Üni.  
Prof. Dr. Gökhan APAYDIN- Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Prof. Dr. Zafer ASLAN-Balıkesir Üniversitesi  
Prof. Dr. Charyyar Ashryalyev- Bahçeşehir Üniversitesi  
Prof. Dr. Fetullah ARIK-Konya Teknik Üniversitesi  
Prof. Dr. Mehmet ARSLAN-Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Prof. Dr. Abdon ATANGANA-Free State University  
Prof. Dr. Hasan BALTAŞ-Recep Tayyip Erdoğan Üni.  
Prof. Dr. Bilge BAHAR-Gümüşhane Üniversitesi  
Prof. Dr. Bahri BAYRAM-Atatürk Üniversitesi  
Prof. Dr. Fikri BULUT-Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Prof. Dr. Kamil COŞKUNÇELEBİ-Karadeniz Teknik Üni  
Prof. Dr. Çetin CÖMERT- Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Prof. Dr. Günay ÇAKIR-Gümüşhane Üniversitesi  
Prof. Dr. Tufan ÇAKIR-Gümüşhane Üniversitesi  
Prof. Dr. Özlem ÇAVDAR-Gümüşhane Üniversitesi  
Prof. Dr. Hüseyin DEMİR-Samsun Üniversitesi  
Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN-Uludağ Üniversitesi  
Prof. Dr. Abdurrahman DOKUZ-Gümüşhane Üniversitesi  
Prof. Dr. Çiğdem SAYDAM EKER-Gümüşhane Üniversitesi  
Prof. Dr. Murat EKİNCİ-Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Prof. Dr. Abdelhai ELAZZOZI-Sidi Mohamed Ben Abdellah U.  
Prof. Dr. Saffet ERDOĞAN-Harran Üniversitesi  
Prof. Dr. Yener EYÜBOĞLU-Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Prof. Dr. Ertan GÖKALP-Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Prof. Dr. Candan GÖKÇEĞLU-Hacettepe Üniversitesi  
Prof. Dr. Levent GÜMÜŞEL-Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Prof. Dr. Oğuz GÜNGÖR-Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Prof. Dr. Zülfü GÜROCAK-Fırat Üniversitesi  
Prof. Dr. Zakia HAMMOUCH-Moulay Ismail University  
Prof. Dr. Cahit HELVACI-Dokuz Eylül Üniversitesi  
Prof. Dr. Meazzez ÇELİK KARAKAYA-Selçuk Üniversitesi  
Prof. Dr. Necati KARAKAYA-Selçuk Üni.  
Prof. Dr. Hakan KARSLI-Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Prof. Dr. Elif Çelenk KAYA-Ondokuz Mayıs Üniversitesi  
Prof. Dr. Abdullah KAYGUSUZ-Gümüşhane Üniversitesi  
Prof. Dr. Cemal KÖSE-Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Prof. Dr. Mustafa KUMRAL-İstanbul Teknik Üniversitesi  
Prof. Dr. Birgül KURAL-Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Prof. Dr. Murat KÜÇÜK-Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Prof. Dr. Tayfur KÜÇÜKÖMEROĞLU-Karadeniz Teknik Üni.  
Prof. Dr. Ramazan LİVAOĞLU-Uludağ Üniversitesi  
Prof. Dr. Nafiz MADEN-Gümüşhane Üniversitesi  
Prof. Dr. Halim MUTLU-Ankara Üniversitesi  
Prof. Dr. Salim Serkan NAS-Gümüşhane Üniversitesi  
Prof. Dr. Kolade M. OWOLABI-Federal Uni. of Technology  
Prof. Dr. Sultan ÖZTÜRK-Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Prof. Dr. Sunil PROHIT- Rajasthan Technical University  
Prof. Dr. Abedallah RABABAH-Jordan Uni. Sci. and Tech.  
Prof. Dr. M. Burhan SADIKLAR-Karadeniz Teknik Üni.  
Prof. Dr. S. Beyza Ö. SARIKAYA-Gümüşhane Üniversitesi  
Prof. Dr. Müdahir ÖZGÜL-Atatürk Üniversitesi  
Prof. Dr. İsmet SEZER-Gümüşhane Üniversitesi  
Prof. Dr. Zehra ŞAHİN- Karadeniz Teknik Üni.  
Prof. Dr. Selim ŞEN-Gümüşhane Üniversitesi  
Prof. Dr. Ahmet TUTUŞ-Kahramanmaraş Sütçü İmam Üni.  
Prof. Dr. Coşkun ÜLSER-Ondokuz Mayıs Üniversitesi  
Prof. Dr. Mualla YALÇINKAYA-Karadeniz Teknik Üni.  
Prof. Dr. Şükrü YETGİN-Gümüşhane Üniversitesi  
Prof. Dr. Keewook YI-Korea Basic Science Institute  
Prof. Dr. Ali Osman YILMAZ Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Prof. Dr. Yong WANG- University of Manchester  
Prof. Dr. Emel ABDİOĞLU YAZAR-Karadeniz Teknik Üni.  
Prof. Dr. Özcan YİĞİT-Çanakkale 18Mart Üniversitesi  
Doç. Dr. Hazan ALKAN AKINCI Artvin Çoruh Üniversitesi  
Doç. Dr. Cemalettin BALTACI-Gümüşhane Üniversitesi  
Doç. Dr. Mehmet BAŞOĞLU-Gümüşhane Üniversitesi  
Doç. Dr. Zafer ÇAKIR-Alaaddin Keykubat Üniversitesi  
Doç. Dr. Okay ÇİMEN-Munzur Üniversitesi  
Doç. Dr. Mustafa ÇULLU-Gümüşhane Üniversitesi  
Doç. Dr. İbrahim DÜZGÜN-Gümüşhane Üniversitesi  
Doç. Dr. Afşin Ahmet KAYA-Ondokuz Mayıs Üniversitesi  
Doç. Dr. Ayberk KAYA- Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi  
Doç. Dr. Emine TANIR KAYIKÇI- Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Doç. Dr. Selami KESLER-Pamukkale Üniversitesi  
Doç. Dr. Melih OKÇU-Atatürk Üniversitesi  
Doç. Dr. Emre ÖZKOP-Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Doç. Dr. Birol ŞAHİN- Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi  
Doç. Dr. Uğur ŞİMŞEK-Iğdır Üniversitesi  
Doç. Dr. Yener TOP-Gümüşhane Üniversitesi  
Doç. Dr. Ayhan TOZLUOĞLU-Düzce Üniversitesi  
Doç. Dr. Osman ÜÇÜNCÜ-Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Doç. Dr. Alaaddin VURAL-Gümüşhane Üniversitesi  
Doç. Dr. Hilal YILDIZ-Neveşehir Hacı Bektaş Veli Üni.  
Doç. Dr. Sefa YALVAÇ-Gümüşhane Üniversitesi  
Doç. Dr. Cem YÜCEL-Gümüşhane Üniversitesi  
Dr. Öğr. Üyesi Eda Feyza AKYÜREK-Atatürk Üni.  
Dr. Öğr. Üyesi Yusuf AŞIK-Gümüşhane Üniversitesi  
Dr. Öğr. Üyesi Hacı Alim BARAN-Batman Üniversitesi  
Dr. Öğr. Üyesi İbrahim ÇAVUŞOĞLU-Gümüşhane Üni.  
Dr. Öğr. Üyesi Kemal ÇELİK-Gümüşhane Üniversitesi  
Dr. Öğr. Üyesi Muhammet M. KAHRAMAN-İstanbul Teknik Üni.  
Dr. Öğr. Üyesi Selim KAYA-Gümüşhane Üniversitesi  
Dr. Öğr. Üyesi Nurçin KÜÇÜK KENT-Gümüşhane Üni.  
Dr. Öğr. Üyesi Kemal KUVVET- Recep Tayyip Erdoğan Üni  
Dr. Öğr. Üyesi Abdurrahman LERMİ-N. Ömer Halisdemir Üni.  
Dr. Öğr. Üyesi Zuhale OKCU-Atatürk Üniversitesi  
Dr. Öğr. Üyesi Abdulveli SİRAT-Gümüşhane Üniversitesi  
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Nuri URAL-Gümüşhane Üniversitesi  
Dr. Ilyas KHAN- Majmaah University  
Dr. Rizwan Ul HAQ-Bahria University  
Dr. Chokka RAVICHANDRAN-Bharathiar University

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

**Araştırma Makalesi / Research Article**

Halit ÇETİNER	<b>Cataract disease classification from fundus images with transfer learning based deep learning model on two ocular disease datasets</b> <i>İki göz hastalığı veri seti üzerinde transfer öğrenme tabanlı derin öğrenme modeli ile fundus görüntülerinden katarakt hastalığı sınıflandırması</i>	<b>256</b>
Nazmiye GONUL BILGIN	<b>Arithmetic statistically convergent on neutrosophic normed spaces</b> <i>Nötrosifik normlu uzaylarda aritmetik istatistiksel yakınsaklık</i>	<b>270</b>
Funda KUTLU ONAY	<b>Öznitelik seçimi problemleri için ikili beyaz köpekbalığı optimizasyon algoritması</b> <i>Binary white shark optimization algorithm for feature selection problems</i>	<b>281</b>
Gizem ASLANTEPE Didem EREN SARICI	<b>Doğal taş artıkları kullanılarak üretilen yapay mermerlerin farklı çevresel koşullara karşı duraylılıklarının araştırılması</b> <i>Investigation of the durability of artificial marble produced using Natural Stone residues against different environmental conditions</i>	<b>299</b>
Lina İ. İSRAİL	<b>Atık mermer tozu katkılı kil tuğlaların fiziksel özelliklerinin araştırılması</b> <i>Investigation of the physical properties of clay bricks with waste marble powder additive</i>	<b>314</b>
Musa GÖĞEBAKAN Nazlı CANAL	<b>Hızlı katılaştırma ve mekaniksel alaşımlama yöntemleri ile üretilen Al85Ni5Fe5Nd5 alaşımının yapısal ve ısıl özellikleri</b> <i>Microstructure and thermal properties of Al85Ni5Fe5Nd5 alloy produced by rapid solidification and mechanical alloying methods</i>	<b>322</b>
Erdoğan Halis ALAKARA Melih Naci AĞAOĞLU Sinan NACAR	<b>Mermer ve beton atıkları ile üretilen bitümlü sıcak karışımların Marshall parametrelerinin incelenmesi ve YSA ile tahmin edilmesi</b> <i>Investigation of Marshall parameters of bituminous hot mixtures produced with marble and concrete wastes and estimation by ANN</i>	<b>333</b>
Hatice Gamze SOGUKOMEROGULLARI Ahmet Oral SARIOĞLU	<b>New Mixed Ni(II), Cu(II), and Co(II) Complexes derived from 2-((2-mercaptophenylimino)methyl)-4-methoxyphenol and 1,10-Phenanthroline: Synthesis and Characterization</b> <i>2-((2-merkaptofenilimino)metil)-4-metoksifenol ve 1,10-fenantrolinden Türetilen Yeni Karışık Ni(II), Cu(II) ve Co(II) Kompleksleri: Sentez ve Karakterizasyon</i>	<b>350</b>
Çağdaş KARA	<b>Yaya yolculuk taleplerinin mahalle karakteristiklerine dayalı tahmini</b> <i>Estimating pedestrian travel demands based on neighborhood characteristics</i>	<b>359</b>
Ali YILDIZ Ali İhsan MARTI Mustafa GÖĞÜŞ	<b>Farklı savak yüksekliğine ve konfigürasyona sahip dairesel labirent savakların deneysel modellenmesi</b> <i>Experimental modeling of circular labyrinth weirs with different weir heights and configurations</i>	<b>373</b>
Ayşenur DENİZ Muhammed Mehdi ELÖMER Ahmet Arif AYDIN	<b>A comparison of Apache Solr and Elasticsearch technologies in support of large-scale data analysis</b> <i>Büyük ölçekli veri analizini desteklemek için Apache Solr ve Elasticsearch teknolojilerinin karşılaştırması</i>	<b>386</b>
Yusuf BAYAR Melih YILAR Kadir AKAN	<b>Kırşehir ili nohut üretim alanlarında antraknoz (Ascochyta rabiei (Pass) Labr.) hastalığının yaygınlık ve bulunma oranlarının belirlenmesi</b> <i>Determination of the prevalence and presence rates of Ascochyta blight (Ascochyta rabiei (Pass) Labr.) in chickpea production areas in Kırşehir province</i>	<b>405</b>
Muhittin TURAN Mahmut İlter HACIOĞLU	<b>Yüksek mertbe sonlu eleman modeliyle fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin serbest titreşim ve statik analizi</b> <i>Free vibration and static analysis of functionally graded beams with the higher-order finite element model</i>	<b>414</b>

İbrahim KEÇEK Ahmet ÖZCAN Mehmet Uğur TOPRAK Mehmet DEMİRBİLEK	<b>Çimentoya mineral katkı olarak Kütahya Çayca Tüfünün kullanımı</b> <i>Use of Kütahya Çayca Tuff as a mineral additive to cement</i>	<b>432</b>
Benek HAMAMCI Burcu ÖZTÜRK	<b>Mekanik, kimyasal ve hibrit yüzey aşındırma işlemlerinin AA7075 alüminyum alaşımının yüzey enerjisine etkisi</b> <i>Effect of Mechanical, Chemical and Hybrid Surface Etching on Surface Energy of AA7075 Aluminum Alloy</i>	<b>444</b>
Alper POLAT	<b>Estimation of Contact Lengths Using Deep Learning Neural Network</b> <i>Derin Öğrenme Yöntemi ile Temas Uzunlukları Tahmini</i>	<b>458</b>
Kiraz EŞMELİ	<b>Ultrasonik İşlemin Linyit Süspansiyonunun Yağ Aglomerasyonu Üzerine Etkisi</b> <i>The Effect of Ultrasonic Treatment on Oil Agglomeration of Lignite Suspension</i>	<b>471</b>
Filiz UĞUR NİĞİZ Betül KARAKOCA	<b>Grafen katkılı polilaktik asit membranıyla vakum membran distilasyon ile bor giderimi</b> <i>Boron removal by vacuum membrane distillation with graphene doped polylactic acid membrane</i>	<b>482</b>
Dilek GÜMÜŞ	<b>Karışık boyalı atıksuların paslanmaz çelik ve grafit elektrotlar kullanarak peroksi-koagülasyon yöntemiyle arıtılması</b> <i>Treatment of mixed dye wastewater by peroxy-coagulation using stainless steel and graphite electrodes</i>	<b>491</b>

---

## Cataract disease classification from fundus images with transfer learning based deep learning model on two ocular disease datasets

*İki göz hastalığı veri seti üzerinde transfer öğrenme tabanlı derin öğrenme modeli ile fundus görüntülerinden katarakt hastalığı sınıflandırması*

**Halit ÇETİNER\*** 

*Isparta University of Applied Sciences, Vocational School of Technical Sciences, 32000, Isparta*

• Received: 31.08.2022

• Accepted: 20.01.2023

### Abstract

Cataract is one of the most serious eye diseases that can blind if left untreated. Detection of the disease in the early stages rather than in the advanced stages can prevent the patient from being blind. At this point, suspected patients should be constantly checked. Continuous control and follow-up of patients is a tiring and laborious process. For the reasons stated, two different deep learning models are proposed in this article that can be used in the diagnosis and detection of cataracts to assist the work and procedures of ophthalmologists. The proposed deep learning models were run on a fundus dataset with normal and cataract symptoms. The proposed deep learning models provide automatic classification of normal and cataract images. Fine-tuning and layer additions were performed on the upper layer using a pre-trained deep learning model called MobileNet V3 Small. A basic MobileNet V3 Small model has also been created to evaluate the performance of the model, which has been enriched by fine-tuning and adding layers to its upper layers. The difference between the proposed model and the basic model is demonstrated by comparing the classification performances of cataract and normal images with accuracy and complexity matrix measurements. According to the best results obtained in the performance comparisons made by separating the training and test data according to the KFold option, the proposed model gave a more successful result graph of 8.26% than the basic model. Finally, the proposed MobileNet V3 model has also been tested on images composed of two different datasets. On average, the proposed MobileNet V3 model on the combined dataset reached 96.62% accuracy.

**Keywords:** Cataract, Deep learning, MobileNet V3 Small, Transfer learning

### Öz

*Katarakt, tedavi edilmediği takdirde kör edebilen en ciddi göz hastalıklarından biridir. Hastalığın ileri aşamalarından ziyade erken aşamada tespit edilmesi hastanın kör olmasının önüne geçebilmektedir. Bu noktada şüphe duyulan hastaların sürekli olarak kontrol edilmesi gerekmektedir. Sürekli olarak hastaların kontrol ve takip edilmesi ise yorucu ve zahmetli bir işlemdir. Belirtilen sebeplerden dolayı bu makalede katarakt tanı ve tespitinde kullanılabilecek göz doktorlarının yaptıkları iş ve işlemlere yardımcı iki farklı derin öğrenme modeli önerilmiştir. Önerilen derin öğrenme modelleri normal ve katarakt belirtilerine sahip fundus veri seti üzerinde çalıştırılmıştır. Önerilen derin öğrenme modelleri normal ve kataraktlı görüntülerin otomatik olarak sınıflandırmasını sağlamaktadır. MobileNet V3 Small adlı önceden eğitilmiş derin öğrenme modeli kullanılarak üst katmanda ince ayarlamalar ve katman eklemeleri gerçekleştirilmiştir. Üst katmanlarında ince ayarlamalar ve katman eklemeleri yapılarak zenginleştirilen modelin performans değerlendirmesini yapabilmek için temel bir MobileNet V3 Small modeli de oluşturulmuştur. Önerilen model ile temel model arasındaki fark katarakt ve normal görüntülerin sınıflandırma performanslarını karşılaştırılarak doğruluk ve karmaşıklık matris ölçümleri ile gösterilmiştir. K Katlı seçeneğine göre eğitim ve test verileri ayrılarak yapılan performans karşılaştırmalarında elde edilen en iyi sonuçlara göre önerilen model, temel modelden 8.26% daha başarılı bir sonuç grafiği vermiştir. Son olarak, önerilen MobileNet V3 modeli, iki farklı veri setinin birleşmesinden oluşan görüntüler üzerinde de test edilmiştir. Ortalama olarak birleştirilmiş veri seti üzerinde önerilen MobileNet V3 modeli ile %96.62 doğruluk oranına ulaşmıştır.*

**Anahtar kelimeler:** Katarakt, Derin öğrenme, MobileNet V3 Small, Transfer öğrenme

\* Halit ÇETİNER; halitcetiner@isparta.edu.tr

## 1. Introduction

The opacity and turbidity of the inner lens of the eye are among the symptoms of cataract disease. At the same time, blindness can be experienced in cataract treatments where medical intervention is delayed (B. R. Kumar & Shimna, 2017). Ophthalmology is the field that deals with any eye disease such as cataracts (Grewal et al., 2018). Cataract disease, which is the most common cause of blindness worldwide, is examined and analyzed by ophthalmologists. Ophthalmologists directly or indirectly visualize the eye and its surroundings to help diagnose and diagnose any eye disease such as cataracts. They aim to identify lesions with pattern recognition after visualization. Diagnostic technologies used in the field of ophthalmology are very suitable for the application of computer vision techniques through digital display. In this article, the newest and rapidly spreading deep learning models in ophthalmology and machine learning are combined. Deep learning methods have adapted very quickly to the field of ophthalmology (Lee et al., 2017). For the stated reasons, a model that helps ophthalmologists has been developed by applying deep learning technologies together with computer vision techniques.

Ophthalmologists are struggling to control the ever-increasing number of cataract patients. Symptoms of cataract disease include opacity. Although the opacity is in the form of a point in the initial stage, it covers the entire lens in the later stages (Zhang et al., 2017). As a result of this, blurring and hazy images occur in the images with light scattering. This makes it difficult to use any vehicle (Fraser et al., 2013). The presence of cataract blocks lens light, causing it to not reach the lens (Junayed et al., 2021). It is a serious disease that does not prevent vision in the initial stage, but causes vision loss especially over the age of 40 (Rana & Galib, 2017). Early treatment of cataract disease, instead of costly and painful surgeries, closes the road to blindness (Pascolini & Mariotti, 2012). It is estimated that the number of people with severe visual impairment due to cataracts worldwide will exceed 40 million by 2025 (Cao et al., 2020). The number of people with severe visual impairment due to cataracts is estimated to exceed 40 million worldwide by 2025 (Cao et al., 2020). One third of visually impaired cases occur due to cataract disease (Organization, 1998). It is a serious disease that does not prevent vision in the initial stage, but causes vision loss especially over the age of 40 (Rana & Galib, 2017). The presence of cataract blocks lens light, causing it to not reach the lens (Junayed et al., 2021). As a result of this, with the light scattering, it becomes difficult to drive in any way (Fraser et al., 2013). For those who have cataracts and are over the age of 40, driving a vehicle becomes very risky. Early treatment of cataract disease paves the way for blindness instead of costly and painful surgeries (Pascolini & Mariotti, 2012). However, ophthalmologists are unable to control the ever-increasing number of cataract patients. At this point, technological tools are needed to assist ophthalmologists.

Retinal diseases such as cataract, trachoma, diabetic retinopathy, corneal opacity, glaucoma can cause blindness. Among the diseases mentioned, cataract is one of the most common eye disorders that causes vision distortion (Junayed et al., 2021). The types of cataracts of nuclear cataract (Hu et al., 2020), cortical cataract (Hu et al., 2020) and posterior subcapsular cataract (Yang et al., 2016) are divided into three main groups according to the location and region of development. The main causes of the different types of cataracts mentioned are thought to be caused by environmental factors such as diabetes, smoking and aging (Yang et al., 2016). In order to prevent blindness, the detection of cataract in an early stage with rapid and risk-free methods is of vital importance in treatment. Cataract detection is a challenging problem due to different reasons such as cataract scale, shape and location, patient's age, gender, eye type. In recent years, different studies have been carried out for automatic cataract detection. Automatic cataract detection and classification can be performed using ultrasound, slit lamp, retro-illumination, or fundus images (Junayed et al., 2021). Fundus images, which are widely used by experts among these cataract imaging systems, are of great interest in this field (Raju et al., 2016). Imaging systems such as slit lamps other than fundus images can only be used by experienced ophthalmologists. For this reason, the scarcity of ophthalmologists, especially in underdeveloped or developing countries, delays the treatment process (Yang et al., 2016). There is a strong need for an automatic cataract detection system based on fundus images to assist ophthalmologists in the delayed treatment process.

Although many hospitals have traditional eye imaging systems, the diagnosis may be mistaken due to reasons such as user error or sensor failure (Wang et al., 2021). There is a trend towards computer-aided diagnostic systems to solve the problems arising from the shortage of ophthalmologists and the inadequacies of different equipment (Doi, 2007; Gao et al., 2015; Liu et al., 2017). There are artificial intelligence supported systems based on different basic features such as discrete cosine transformation (DCT) (Fan et al.,

2015), deep features, local features (Xiong et al., 2017) for cataract classification. In the artificial intelligence supported systems in the literature, limitations and computational costs are high due to the low test accuracies and the number of model parameters in general. At the same time, it is seen that methods based on classical machine learning are generally used in the diagnosis of cataracts (Fan et al., 2015; Manchalwar & Warhade, 2017; Qiao et al., 2017; Xiong et al., 2017). In classical machine learning methods, unlike automatic feature extraction such as deep learning, manual feature extraction is performed. Instead of using a method with low discrimination, a new method with high accuracy is needed for cataract classification. A method with sufficient competence to assist ophthalmologists will contribute to the literature. Flaxman et al. state that automatic control of fundus images of cataract diseases with artificial intelligence supported software is important in terms of ophthalmology (Flaxman et al., 2017). Ophthalmologists can diagnose and detect cataracts by examining the fundus images of the right and left eyes separately. This process needs to be facilitated by a deep learning-based system. As a result of facilitation, the material and moral costs caused by cataract disease will be avoided. Automated systems are needed to reduce workloads so that ophthalmologists can fully catch up with patients. There is a significant spread of diagnosing diseases with the help of remote health services (Bakator & Radosav, 2018; Ertuğrul et al., 2021).

Transfer learning and CNN-based methods have been compared in different ways in the literature. Imran et al. stated that transfer learning-based methods tend to be more subjectivity than CNN-based methods. They declare that transfer learning-based methods can be trained on large datasets such as ImageNet, with fine-tuning of hyperparameters (Imran et al., 2021). The learned features can be transferred with the transfer learning method. In transfer learning-based methods, some of the model weights can be kept constant in order to be used in target tag estimation, and some can be updated and used in target tag estimation. As a result of these processes, adjustable fast and effective cataract classification and prediction processes can be performed using large data sets such as ImageNet.

The contributions of the article prepared with the specified scopes to the literature are presented below.

- Classification of images of normal and cataract disease is provided by using a deep learning model trained using large datasets such as ImageNet.
- A deep learning model based on MobileNet V3 Small is presented for the classification of images of cataracts and normal disease.
- A basic MobileNet V3 Small model was created to compare the performance of the presented MobileNet V3 Small based model.
- Training and test data are separated according to the KFold technique to compare the performance of the proposed and basic model.
- An average of 96.62% accuracy was obtained in the data set combined with the proposed MobileNet V3 model. This rate is important in that it is 0.62% higher than the data set obtained in a single data set. The data set has been expanded to improve the performance criteria of the proposed deep learning model.

The rest of the article consists of 3 sections. In the first section, detailed information is given about the data sets in which the performance tests of deep learning models are made. In the second section, the performance results obtained from different models are presented comparatively. In the last section, the study is concluded.

## 2. Material and methods

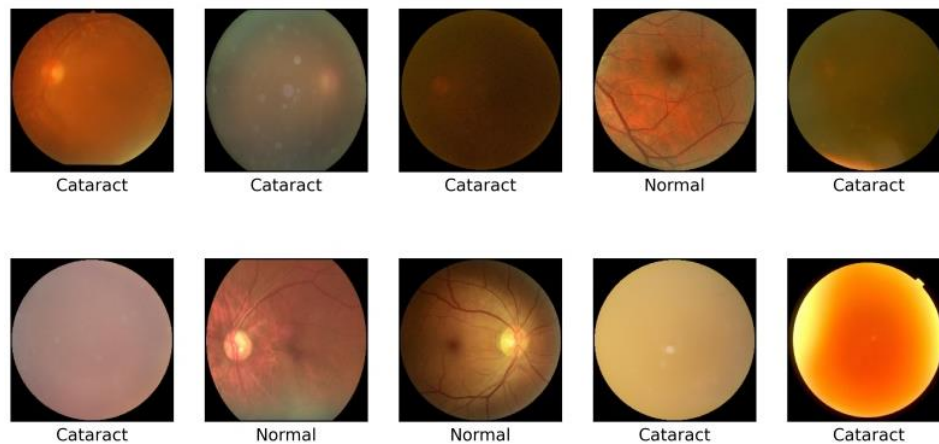
### 2.1. Material

In this study, two different models were defined. The main ones are MobileNet V3, proposed MobileNet V3. A dataset containing normal and cataract images (Ocular Disease Recognition, 2021) was used to test the basic and proposed MobileNet V3 model. The images in the dataset were obtained from 5,000 different people. The images used include different diseases in addition to cataract disease. These diseases are expressed as diabetes, glaucoma, hypertension, myopia, amd, and other abnormalities. In the article study, only normal images with cataracts and not related to any disease were selected from these diseases. There are 1088 images in total in the data set created by selection. 500 of the selected 1088 images represent normal images, while the rest represent images of the eyes with cataracts. Triyadi et al. using the data set (Ocular Disease Recognition, 2021) in their study, they mention 300 normal images and 313 images with cataract.



When these images are evaluated in terms of two different eyes, right and left, it is reported that there are 500 normal images and 594 cataracted images in the data set (Triyadi et al., 2022). In different sources in the literature ([Ocular Disease Recognition, 2021](#)), the number of data in the data set is expressed in different numbers (Khan et al., 2022). Experimental studies, if the “full\_df.csv” file in the data set is analyzed as left cataract and right cataract images, the correct number of normal and cataract images can be reached. While the number of images with left cataract is 304, the number of images with right cataract is 290. 6 out of a total of 594 images are not used due to image quality. A total of 588 cataract images are used. On the other hand, the proposed MobileNet V3 model was also tested on a data set consisting of combining both the ([Ocular Disease Recognition, 2021](#)) data set and the ([Chen, 2022](#)) data set. The ([Chen, 2022](#)) data set was combined with the other ([Ocular Disease Recognition, 2021](#)) data set to measure the effect of the proposed model on performance. The ([Chen, 2022](#)) dataset includes normal, cataract, glaucoma, retinal disease type images. In the ([Chen, 2022](#)) data set, there are 300, 100, 100, 100 images of normal, cataract, glaucoma, retinal disease type images, respectively. Among them, only normal and cataract images were used in performance tests.

When testing model performance using the images in the data set, training and test data are separated according to the KFold technique. Image examples showing normal and cataract images in the data set are given in Figure 1. Images in Figure 1 are images with indexes 1011, 309, 523, 1008, 461, 69, 244, 993, 104 and 242 from top left to bottom right corner. In Figure 1, the image with index 1011 represents the image with cataract, while the image with index 1008 represents the normal image. Images with index 1011, 309, 523, 461, 69, 104, 242, respectively, are images with cataracts. The images with index 1008, 244, 993 represent normal images. The images used in Figure 1 belong to the ([Ocular Disease Recognition, 2021](#)) dataset.



**Figure 1.** Examples of normal and cataract images in the data set used

## 2.2. MobileNet V3 Small

With the recent increase in portable devices, there is a great interest in transfer learning methods such as ImageNet that are pre-trained with millions of data. One of the architectures where this interest is concentrated is the MobileNet architectures. There are three different versions of MobileNet architectures, MobileNet V1 ([A. G. Howard et al., 2017](#)), MobileNet V2 ([Sandler et al., 2018](#)) and MobileNet V3. The MobileNet V2 architecture was developed by changing the bottleneck structure on MobileNet V1, which was developed as the first architecture of the version series ([Sandler et al., 2018](#)). There are two different versions of the MobileNet V3 architecture, small and large. The development of the proposed and basic model for the classification of cataract and normal images is based on the MobileNet V3 Small architecture. This architecture works in an optimized way with the help of NetAdapt and NAS search algorithms. In MobileNet V3 architectures, the hard swish function (h-swish) activation function is used instead of the ReLU activation function, which is predominantly used in the MobileNet V2 version ([Qian et al., 2021](#)). Like the ReLU activation function, the swish activation function is also an activation function. Swish activation function includes sigmoid function. The sigmoid function is used in the classification layers of deep learning models. This function is actively used in estimation, binary classification and logistic regression models ([Mercioni &](#)

Holban, 2020). Sigmoid is also used to calculate swish activation functions. The mathematical equation of the swish function is given in Equation 1.

$$\text{swish}(x) = x\sigma(x) = x \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (1)$$

In Equation 1, where the sigmoid activation function is used, the computational cost is high. In order to reduce this computational cost, the sigmoid function has been converted to a h-swish (Avenash & Viswanath, 2019). This transformation is shown in Equation 2.

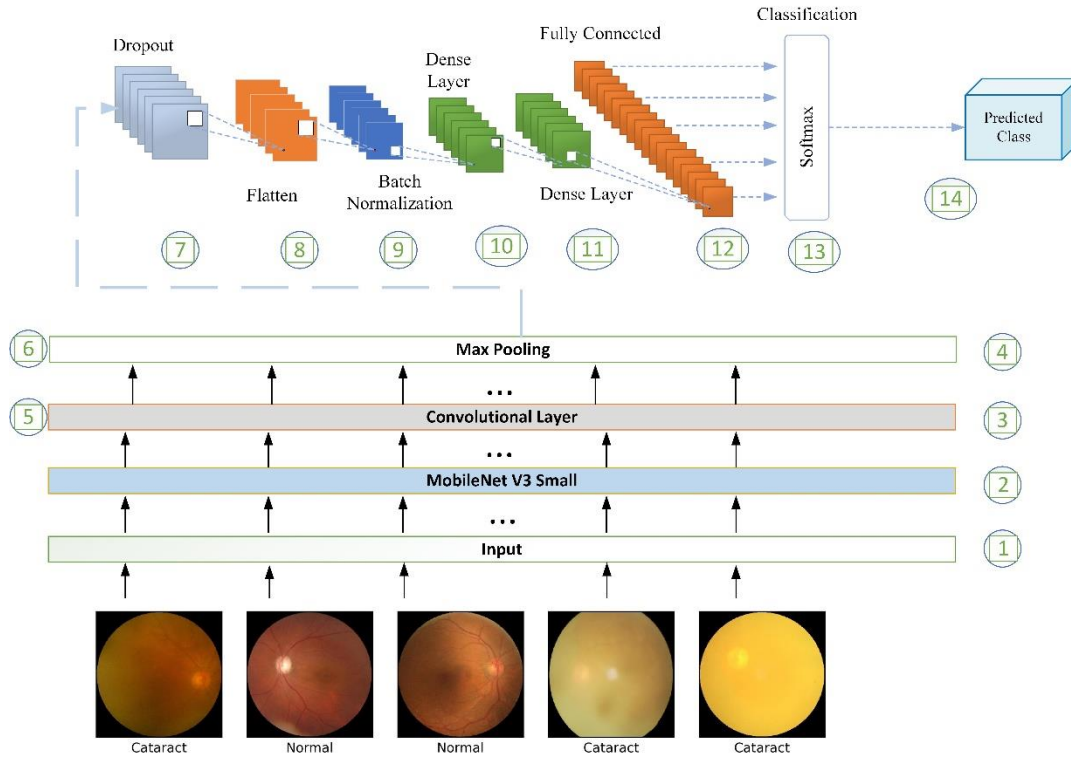
$$h - \text{swish}(x) = x \frac{\text{ReLU6}(x + 3)}{6} \quad (2)$$

In Equation 2, which was developed to reduce the computational cost, the ReLU6 function was used instead of the sigmoid activation function. The difference in Equation 2 is using the ReLU6 function rather than a custom constant. *h - swish* helps with network regulation as it solves the saturation problem of output neurons (Roy et al., 2022). Details of Equation 1 and Equation 2 equations are presented in the study (Howard et al., 2019). In the MobileNet V2 version, features are extracted from a high-dimensional space with minimal loss with linear bottleneck and inverted residual features. Linear bottleneck acts as a layer in the MobileNet V2 architecture by reducing the input size. These layered structures are also seen to be preserved in the MobileNet V3 architecture (Qian et al., 2021). Inverted residual block structures reduce memory costs in MobileNet V2 architectures. There are also shortcuts between bottleneck structures to avoid obstacles such as gradient loss and bursts. The MobileNet V3 architecture, on the other hand, takes the features of the MobileNet V2 architecture forward with the help of Nas and NetAdapt optimization based network exploration methods. An effective model is created by using the h-swish activation function instead of ReLU at some points of the MobileNet V3 architecture.

### 2.3. Proposed Model

Figure 2 shows the proposed deep learning model for automatic classification of cataract images. The proposed model consists of 14 steps. In the first step, normal and cataract images are presented as input. In the second step, fine adjustments were made on the upper layers of the basic MobileNet V3 Small architectural layers without using the weight values. In the third step, a convolution layer with 256 3x3 windows was added. In the fourth step, the maximum pooling layer with a 3x3 window was added. In the fifth step, a two-dimensional convolution layer with 256 filters was added, similar to the third step. In the sixth step, similar to the fourth step, although maximum pooling was used, a window size of 2x2 was used as the window size.

In the seventh layer, a dropout layer was applied that performs 0.8 neuron dropout. With this layer, memorization of the model is prevented. In the eighth layer, by smoothing the model, the created feature size of the model was reshaped. In the ninth step, the batch normalization layer was added, which normalizes the inputs between the layers. In the tenth step, a dense layer with 512 neurons was added. In the eleventh step, a second dense layer with 256 neurons was added. In the twelfth layer, a fully connected layer with swish activation function has been applied. In the thirteenth layer, classification layer with softmax activation function is applied. In the last step, the fourteenth step, the class estimation was performed and the process steps of the model were completed. It is also important to evaluate the performance of the model obtained as a result of these steps.



**Figure 2.** Proposed deep learning model for cataract classification

The proposed model, which was created as a result of the combination of the steps, and the model called the basic MobileNet V3 model were compared according to performance metrics. The basic MobileNet V3 model is the model created in the upper or lower layers of the MobileNet V3 architecture without adding or removing any layers. The structure of the proposed model has emerged by determining the different layers in addition to the basic model by successive experimental studies. Formulas defined in Equations 3-6 were used to compare the proposed model with the basic MobileNet V3 model. The formulas in Equations 3-6 are measurement metrics used in the literature in general terms (Goutte & Gaussier, 2005).

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \tag{3}$$

$$F1 = 2x \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \tag{4}$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \tag{5}$$

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \tag{6}$$

TP, FP, TN and FN in Equations 3-6 represent correctly predicted cataract, incorrectly predicted cataract, correctly predicted normal image and incorrectly predicted normal image, respectively. Recall, F1, Precision and accuracy values, which can be used comparatively in the literature, are calculated for the specified measurements.

### 3. Results and discussion

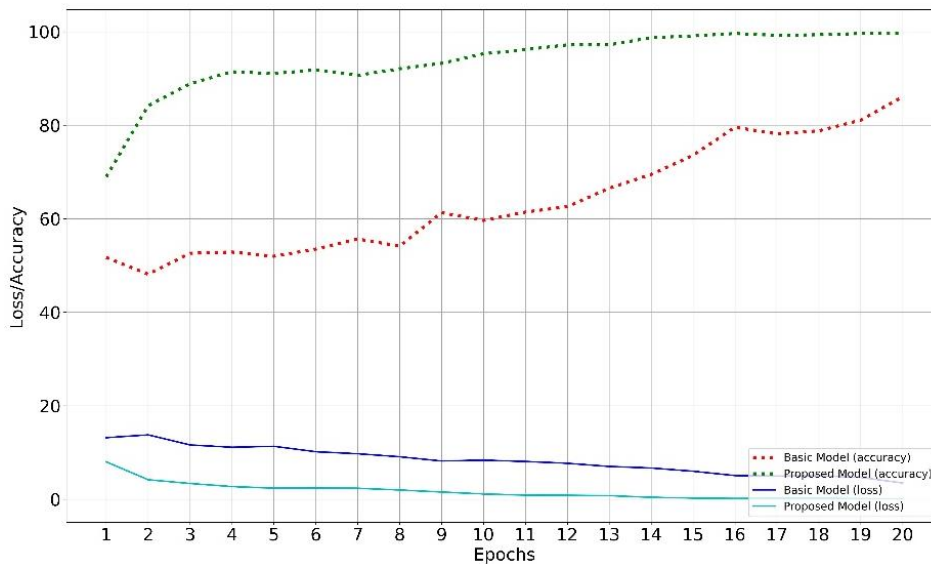
Performance measurements of the proposed model and the basic MobileNet V3 model were obtained using the equation connections between Equations 3-6. The proposed model achieved a test accuracy rate of 97%, while the basic MobileNet V3 Small model achieved a test accuracy rate of 89%. The difference between the proposed model and the basic model is 8%. In experimental studies, 20 epoch values were defined in the

training of models. The training and testing rate was determined to be 80% and 20%, respectively. Training and test data of cataract and normal images in the dataset were separated according to the KFold technique.

**Table 1.** Model performance results according to KFold options

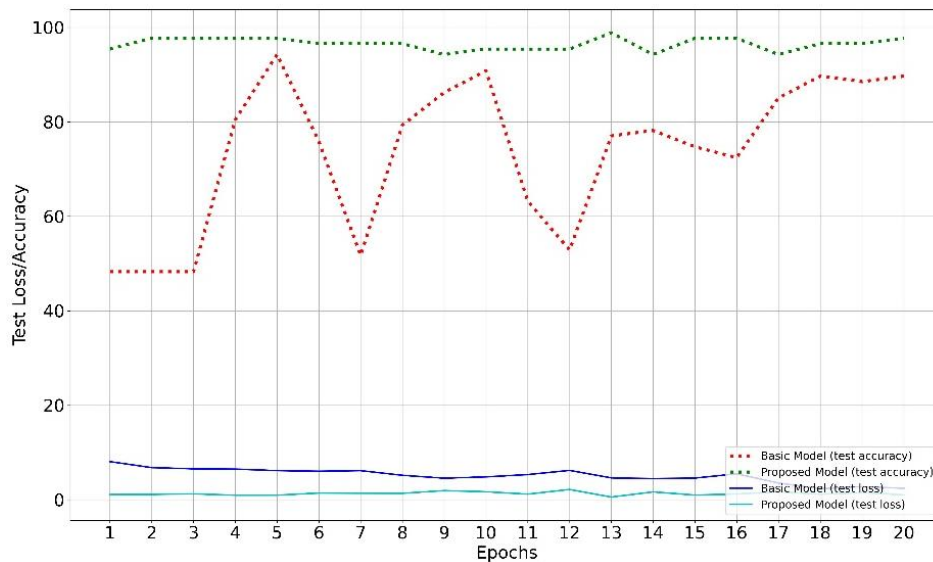
KFold	Model	Train Accuracy	Test Accuracy
1	MobileNet V3 Small model	0.78	0.79
2		0.86	0.89
3		0.90	0.95
4		0.78	0.87
5		0.64	0.61
Average		0.79	0.82
1	Proposed model	0.99	0.96
2		0.99	0.95
3		0.99	0.97
4		0.99	0.94
5		0.99	0.97
Average		0.99	96.0

With the KFold 5 technique, 5 different results were obtained. The KFold group with the most successful test result was preferred. Performance results of the basic MobileNet V3 Small model are plotted based on the KFold 2 option, while the performance plots of the proposed model are drawn based on the KFold 3 option. The graphs of the accuracy and loss rate obtained according to the selected models are shown in Figure 3.



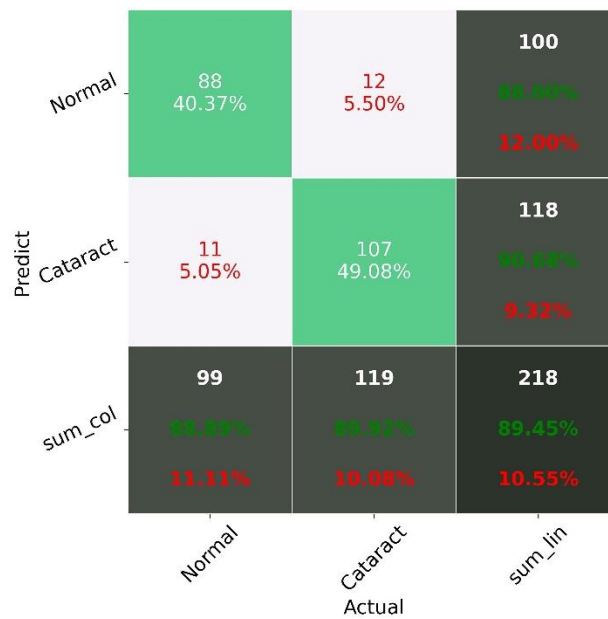
**Figure 3.** Training accuracy and loss performance of the proposed and basic MobileNet V3 models

According to the data from Figure 3, the loss value of the proposed model is reduced to 0.012%. According to the same chart, the basic MobileNet V3 Small model training loss rate reaches 0.35%. There is a difference of 0.33% between the basic model and the proposed model. The difference between the loss values of both models is very large. According to the results given in Table 1, the proposed model reached the highest 97% accuracy rate in terms of test accuracy, while the basic MobileNet V3 Small model reached 95%. Compared to the KFold option with the highest accuracy rate, the difference between models is around 2%.



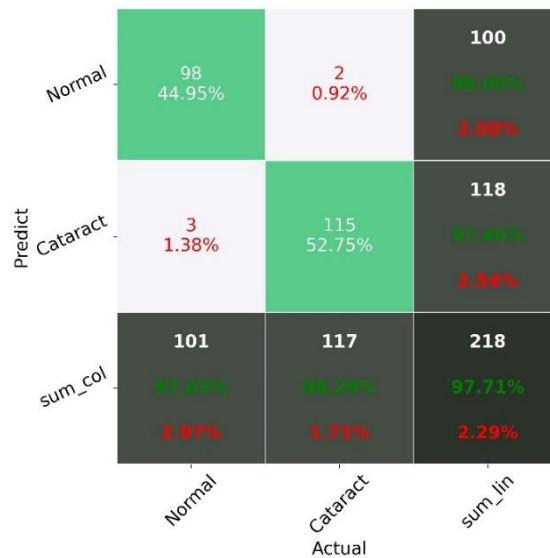
**Figure 4.** Validation accuracy and loss performance of basic MobileNet V3 and proposed models

According to Figure 4 data, the proposed model and basic model validation accuracy rates were 97.71% and 89.45%, respectively. Proposed model and basic MobileNet V3 Small validation loss rates decrease to 0.11% and 0.240%, respectively.



**Figure 5.** The confusion matrix of the basic MobileNet V3 Small model

Data from the confusion matrix of the basic MobileNet V3 Small model is presented in Figure 5. According to the basic model, the cataract class is predicted with a 90.68% accuracy rate, while the normal class is predicted with an 88% accuracy rate. According to the basic model, 12 errors and 88 correct determinations were made from the base class. According to the basic model, 107 correct detections and 11 incorrect detections were made in the cataract class.



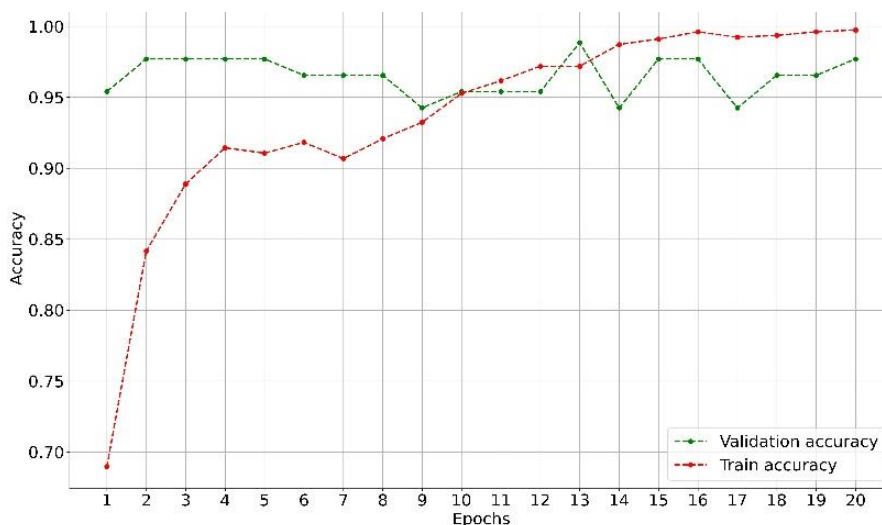
**Figure 6.** The confusion matrix of proposed model

The confusion matrix data of the proposed model is presented in Figure 6. According to the proposed model, the cataract class is predicted with an accuracy rate of 97.46%, while the normal class is estimated with a 98% accuracy rate. According to the proposed model, 2 errors and 98 correct detections were made from the normal class. According to the same proposed model, 115 correct detections and 3 incorrect detections were made in the cataract class. On average, an accuracy rate of 97.71% was achieved.

**Table 2.** Deep learning models performance results

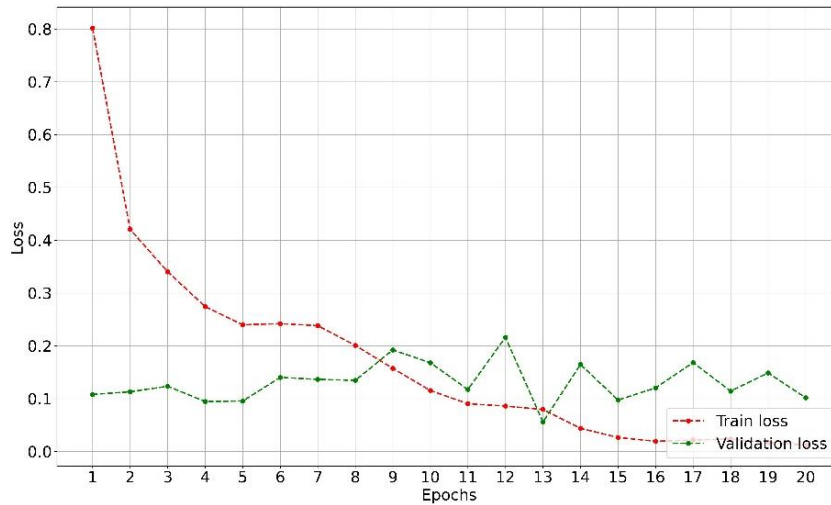
Models	Type	Precision	Recall	F1 score	Accuracy
Proposed Model	Normal	0.97	0.98	0.97	0.97
	Cataract	0.98	0.97	0.98	0.98
Basic MobileNet V3 Small	Normal	0.92	0.87	0.90	0.89
	Cataract	0.89	0.93	0.90	

In addition to the confusion matrix results given in Figure 5 and Figure 6 of the proposed model and the basic MobileNet V3 Small model in Table 2, precision, recall, F1 score, accuracy values are presented collectively. According to the presented data, it is seen that the proposed model is ahead in terms of performance not only in accuracy values, but also in other precision, recall, and F1 score values.



**Figure 7.** The accuracy graph of the proposed MobileNet V3 model tested on the combined dataset

In Figure 7, train accuracy and validation accuracy graphs of the proposed MobileNet V3 model in the extended data set are presented. Train accuracy graph reaches 98.31% accuracy at the 20th epoch. Validation accuracy rate reached 96.62% accuracy rate.



**Figure 8.** The loss graph of the proposed MobileNet V3 model tested on the combined dataset

Figure 8 shows the loss graphs obtained on the combined data set. Validation loss values decrease up to 0.12% at the 20th epoch. Train loss values decrease up to 0.05% at the 20th epoch.

#### 4. Discussion

Apart from this article, a DenseNet201-based deep learning model has been developed for cataract detection. In this study, which was developed differently from the DenseNet201 model study (Çetiner & Çetiner, 2022), an architectural model that can work on light devices was preferred. With the model based on the MobileNet V3 model, the classification of cataract disease has been carried out with high accuracy. In addition to these, the data set used in the study (Çetiner & Çetiner, 2022) was expanded. Only the (Ocular Disease Recognition, 2021) data set was used in the previously proposed DenseNet201 model. The proposed MobileNet V3 model in this study has not been tested only on the (Ocular Disease Recognition, 2021) dataset. The proposed MobileNet V3 model was also tested on the combined version of the (Ocular Disease Recognition, 2021) and (Chen, 2022) dataset. Despite the expansion of the data set, there was no decrease in the accuracy rate. Compared to the DenseNet201 architecture and the MobileNet V3 architecture, the DenseNet201 architecture is both older and has more layers. Working performance measures (Çetiner & Çetiner, 2022), developed based on DenseNet201 architecture, are 3% more accuracy than this study, but they are not lighter. Today, not only applications that work in desktop environments, but also applications that can easily work in mobile environments are preferred. For the reasons stated, this article was carried out as a separate study.

In Table 3 data, the results of the proposed model test performance were compared with studies in the literature. The data set used by the studies in the literature was used when making comparisons. As a result of performance comparisons, the accuracy, F1 score, recall and precision values are listed in Table 3. According to these listed data, there is a 7.5% difference in accuracy and 16% in precision compared to the (Jayachitra et al., 2021) study in determining the proposed model cataract class. The proposed model has a difference of 4.43% in accuracy compared to the (K S et al., 2021) study in detecting the cataract class. According to studies in the literature (Jayachitra et al., 2021) and (K S et al., 2021), the proposed model gave a good result in determining the cataract class. In normal class determination, on the other hand, 7.5% difference in accuracy and 15% difference in precision compared to the proposed model (Jayachitra et al., 2021) study. There was a 4.43% difference in normal class detection compared to another study in the literature (K S et al., 2021). (Y. Kumar & Gupta, 2022) achieved 92.6% accuracy in detecting cataracts in the Inception V3 model. In normal images, they reached 96.4% accuracy. (Y. Kumar & Gupta, 2022) achieved 90.9% cataract classification accuracy on the DenseNet 121 model. In the normal image, they reached 98.9%

accuracy. The accuracy rate they achieve in the classification of normal images is better than the classification success they achieve in images with cataracts.

**Table 3.** Comparison results with similar data sets

Class	Model	Accuracy (%)	F1 score (%)	Recall (%)	Precision (%)
Cataract	(Jayachitra et al., 2021)	89.5	--	--	82
	(K S et al., 2021)	92.56	--	--	--
	(Y. Kumar & Gupta, 2022)'s Inception V3	92.6	--	--	--
	(Y. Kumar & Gupta, 2022)'s DenseNet 121	90.9	--	--	--
	Proposed	97.0	98.0	97.00	98.00
Normal	(Jayachitra et al., 2021)	89.50	--	--	82
	(K S et al., 2021)	92.56	--	--	--
	(Y. Kumar & Gupta, 2022)'s Inception V3	96.4	--	--	--
	(Y. Kumar & Gupta, 2022)'s DenseNet 121	98.9	--	--	--
	Proposed	97.0	97.0	98.00	97.00

## 5. Conclusions

Recently, deep learning-based studies have been carried out for automatic classification of eye diseases. The main purpose of these studies is to increase the processing speed by reducing the number of ophthalmologists. The main benefit stated will be a reduction in workload in public health institutions and hospitals. Recent studies in the literature support that deep learning-based studies show higher performance in classification of ophthalmological diseases compared to classical classifiers. A deep learning model based on MobileNet V3 Small is presented for the automatic classification of cataract disease, which is defined as a serious eye disease and can cause blindness, with the stated motivations. According to the results given, the proposed model is a very useful model for the literature because it can be used in portable devices and is light. In the classification of the cataract class, which was obtained as a performance criterion, accuracy, F1 score, recall, precision values were 97%, 98%, 97%, 98%. In the classification of non-Cataract normal images, accuracy rates of 97%, 97%, 98%, and 97% were achieved. In future studies, innovative approaches for real-time detection of cataract regions can be created.

## Author contribution

The entire article was written by the corresponding author.

## Declaration of ethical code

The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

## Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

## References

- Avenash, R., & Viswanath, P. (2019). Semantic segmentation of satellite images using a modified CNN with hard-swish activation function. *14th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications, VISIGRAPP 2019* (pp. 413–420), Czech Republic.
- Bakator, M., & Radosav, D. (2018). Deep learning and medical diagnosis: a review of literature. In *Multimodal Technologies and Interaction*, 2(3). <https://doi.org/10.3390/mti2030047>.
- Cao, L., Li, H., Zhang, Y., Zhang, L., & Xu, L. (2020). Hierarchical method for cataract grading based on retinal



images using improved Haar wavelet. *Information Fusion*, 53, 196–208.

- Çetiner, H., & Çetiner, İ. (2022). Classification of cataract disease with a Densenet201 based deep learning model. *Journal*, 12(3), 1264–1276. <https://doi.org/10.21597/jist.1098718>.
- Chen, Y. (2022). *Retina Dataset*. [https://github.com/yiweichen04/retina\\_dataset](https://github.com/yiweichen04/retina_dataset).
- Doi, K. (2007). Computer-aided diagnosis in medical imaging: historical review, current status and future potential. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 31(4–5), 198–211.
- Ertuğrul, Ö. F., Acar, E., Aldemir, E., & Öztekin, A. (2021). Automatic diagnosis of cardiovascular disorders by sub images of the ECG signal using multi-feature extraction methods and randomized neural network. *Biomedical Signal Processing and Control*, 64, 102260. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2020.102260>.
- Fan, W., Shen, R., Zhang, Q., Yang, J.-J., & Li, J. (2015). Principal component analysis based cataract grading and classification. *2015 17th International Conference on E-Health Networking, Application & Services (HealthCom)* (pp. 459–462), USA. <https://doi.org/10.1109/HealthCom.2015.7454545>.
- Flaxman, S. R., Bourne, R. R. A., Resnikoff, S., Ackland, P., Braithwaite, T., Cicinelli, M. V., Das, A., Jonas, J. B., Keeffe, J., & Kempen, J. H. (2017). Global causes of blindness and distance vision impairment 1990–2020: a systematic review and meta-analysis. *The Lancet Global Health*, 5(12), e1221–e1234.
- Fraser, M. L., Meuleners, L. B., Lee, A. H., Ng, J. Q., & Morlet, N. (2013). Vision, quality of life and depressive symptoms after first eye cataract surgery. *Psychogeriatrics*, 13(4), 237–243.
- Gao, X., Lin, S., & Wong, T. Y. (2015). Automatic feature learning to grade nuclear cataracts based on deep learning. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 62(11), 2693–2701.
- Goutte, C., & Gaussier, E. (2005). A probabilistic interpretation of precision, recall and f-score, with implication for evaluation. In *Lecture Notes in Computer Science*, 3408, 345–359. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-31865-1\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-540-31865-1_25).
- Grewal, P. S., Oloumi, F., Rubin, U., & Tennant, M. T. S. (2018). Deep learning in ophthalmology: a review. *Canadian Journal of Ophthalmology*, 53(4), 309–313. <https://doi.org/10.1016/j.cjco.2018.04.019>.
- Howard, A. G., Zhu, M., Chen, B., Kalenichenko, D., Wang, W., Weyand, T., Andreetto, M., & Adam, H. (2017). Mobilenets: efficient convolutional neural networks for mobile vision applications. *ArXiv Preprint ArXiv:1704.04861*.
- Howard, A., Sandler, M., Chu, G., Chen, L.-C., Chen, B., Tan, M., Wang, W., Zhu, Y., Pang, R., & Vasudevan, V. (2019). Searching for Mobilenetv3. *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision* (pp. 1314–1324), Korea.
- Hu, S., Wang, X., Wu, H., Luan, X., Qi, P., Lin, Y., He, X., & He, W. (2020). Unified diagnosis framework for automated nuclear cataract grading based on smartphone slit-lamp images. *IEEE Access*, 8, 174169–174178.
- Imran, A., Li, J., Pei, Y., Akhtar, F., Mahmood, T., & Zhang, L. (2021). Fundus image-based cataract classification using a hybrid convolutional and recurrent neural network. *The Visual Computer*, 37(8), 2407–2417. <https://doi.org/10.1007/s00371-020-01994-3>.
- Jayachitra, S., Nitheesh Kanna, K., Pavithra, G., & Ranjeetha, T. (2021). A novel eye cataract diagnosis and classification using deep neural network. *Journal of Physics: Conference Series*, 1937(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1937/1/012053>.
- Junayed, M. S., Islam, M. B., Sadeghzadeh, A., & Rahman, S. (2021). CataractNet: an automated cataract detection system using deep learning for fundus images. *IEEE Access*, 9, 128799–128808. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3112938>.
- K S, Y., Mithra, N. M., KS, V., & R, K. (2021). Classification of diabetic retinopathy through identification of diagnostic keywords. *2021 Third International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)* (pp. 716–721), India. <https://doi.org/10.1109/ICIRCA51532.2021.9544621>.
- Khan, M. S., Tafshir, N., Alam, K. N., Dhruva, A. R., Khan, M. M., Albraikan, A. A., & Almalki, F. A. (2022). Deep

learning for ocular disease recognition: an inner-class balance. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022.

- Kumar, B. R., & Shimna, M. P. (2017). Recent approaches for automatic cataract detection analysis using image processing. *Journal of Network Communications and Emerging Technologies (JNCET)*, 7(10).
- Kumar, Y., & Gupta, S. (2022). Deep transfer learning approaches to predict glaucoma, cataract, choroidal neovascularization, diabetic macular edema, drusen and healthy eyes: an experimental review. *Archives of Computational Methods in Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09807-7>.
- Lee, A., Taylor, P., Kalpathy-Cramer, J., & Tufail, A. (2017). Machine learning has arrived! *Ophthalmology*, 124(12), 1726–1728. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2017.08.046>.
- Liu, X., Jiang, J., Zhang, K., Long, E., Cui, J., Zhu, M., An, Y., Zhang, J., Liu, Z., & Lin, Z. (2017). Localization and diagnosis framework for pediatric cataracts based on slit-lamp images using deep features of a convolutional neural network. *PloS One*, 12(3), e0168606.
- Manchalwar, M., & Warhade, K. (2017). Detection of cataract and conjunctivitis disease using histogram of oriented gradient. *International Journal of Engineering and Technology*, 9, 2400–2406. <https://doi.org/10.21817/ijet/2017/v9i3/1709030214>.
- Mercioni, M. A., & Holban, S. (2020). P-Swish: activation function with learnable parameters based on swish activation function in deep learning. *2020 International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC)* (pp. 1–4), Romania. <https://doi.org/10.1109/ISETC50328.2020.9301059>.
- Ocular Disease Recognition*. (2021). Senior data scientist at hospital israelita Albert Einstein São Paulo, State of São Paulo, Brazil.
- Organization, W. H. (1998). *The World health report: 1998: life in the 21st century: a vision for all: executive summary*. World Health Organization.
- Pascolini, D., & Mariotti, S. P. (2012). Global estimates of visual impairment: 2010. *British Journal of Ophthalmology*, 96(5), 614–618.
- Qian, S., Ning, C., & Hu, Y. (2021). MobileNetV3 for image classification. *2021 IEEE 2nd International Conference on Big Data, Artificial Intelligence and Internet of Things Engineering (ICBAIE)* (pp. 490–497), China. <https://doi.org/10.1109/ICBAIE52039.2021.9389905>.
- Qiao, Z., Zhang, Q., Dong, Y., & Yang, J. (2017). Application of SVM based on genetic algorithm in classification of cataract fundus images. *2017 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST)* (pp. 1–5), China. <https://doi.org/10.1109/IST.2017.8261541>.
- Raju, B., Raju, N. S. D., Akkara, J. D., & Pathengay, A. (2016). Do it yourself smartphone fundus camera—DIYretCAM. *Indian Journal of Ophthalmology*, 64(9), 663.
- Rana, J., & Galib, S. M. (2017). Cataract detection using smartphone. *2017 3rd International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT)* (pp. 1–4), Bangladesh. <https://doi.org/10.1109/EICT.2017.8275136>.
- Roy, A. M., Bose, R., & Bhaduri, J. (2022). A fast accurate fine-grain object detection model based on YOLOv4 deep neural network. *Neural Computing and Applications*, 34(5), 3895–3921. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06651-x>.
- Sandler, M., Howard, A., Zhu, M., Zhmoginov, A., & Chen, L.-C. (2018). Mobilenetv2: inverted residuals and linear bottlenecks. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 4510–4520), USA.
- Triyadi, A. B., Bustamam, A., & Anki, P. (2022). Deep learning in image classification using VGG-19 and residual networks for cataract detection. *2022 2nd International Conference on Information Technology and Education (ICIT&E)* (pp. 293–297), Indonesia.
- Wang, Y., Tang, C., Wang, J., Sang, Y., & Lv, J. (2021). Cataract detection based on ocular B-ultrasound images by collaborative monitoring deep learning. *Knowledge-Based Systems*, 231, 107442. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2021.107442>.

- Xiong, L., Li, H., & Xu, L. (2017). An approach to evaluate blurriness in retinal images with vitreous opacity for cataract diagnosis. *Journal of Healthcare Engineering*, 1–16. <https://doi.org/10.1155/2017/5645498>.
- Yang, J.-J., Li, J., Shen, R., Zeng, Y., He, J., Bi, J., Li, Y., Zhang, Q., Peng, L., & Wang, Q. (2016). Exploiting ensemble learning for automatic cataract detection and grading. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 124, 45–57.
- Zhang, L., Li, J., Zhang, i, Han, H., Liu, B., Yang, J., & Wang, Q. (2017). Automatic cataract detection and grading using deep convolutional neural network. *2017 IEEE 14th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)* (pp. 60–65), Italy. <https://doi.org/10.1109/ICNSC.2017.8000068>.

## Arithmetic statistically convergent on neutrosophic normed spaces

*Nötrosöfik normlu uzaylarda aritmetik istatistiksel yakınsaklık*

Nazmiye GONUL BILGIN\*, 

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Fakültesi, Matematik Bölümü, 67100, Zonguldak

• Received: 27.09.2022

• Accepted: 20.01.2023

### Abstract

This work is concerned with several important different types of convergence that will be described on neutrosophic normed spaces. In the study, arithmetic convergence was combined with different types of statistical convergence and then integrated into the structure of neutrosophic spaces established through the membership function. For this purpose, in the neutrosophic normed space, firstly, the concepts of arithmetic convergence and arithmetic statistical convergence are given, then some important definitions that can be established with lacunary sequences and ideal structures and some relationships between convergent sequences in this sense are examined. Furthermore, new convergence definitions were established by evaluating lambda sequences together with arithmetic convergence and statistical convergence with the help of neutrosophic normed space structure properties. Finally, with the help of the definition of graduated convergence, the inclusion relation between the two set is given.

**Keywords:** Arithmetic statistically convergence, Ideals, Neutrosophic normed spaces.

### Öz

*Bu çalışma, nötrosöfik normlu uzaylar üzerinde tanımlanacak olan önemli birkaç yakınsaklık türü ile ilgilidir. Çalışmada, aritmetik yakınsaklık, farklı istatistiksel yakınsaklık türleri ile birleştirilmiş ve daha sonra üyelik fonksiyonu yardımıyla kurulan nötrosöfik uzayların yapısına dahil edilmiştir. Bu amaçla nötrosöfik normlu uzayda öncelikle aritmetik yakınsaklık ve aritmetik istatistiksel yakınsaklık kavramları verilmiş, ardından lacunary diziler ve ideal yapılar ile kurulabilecek bazı önemli tanımlar ve yakınsak diziler arasında bu anlamdaki bazı ilişkiler incelenmiştir. Ayrıca nötrosöfik normlu uzay yapısı özellikleri yardımıyla lambda diziler; aritmetik yakınsaklık ve istatistiksel yakınsaklıkla birlikte değerlendirilerek yeni yakınsaklık tanımları kurulmuştur. Son olarak dereceli yakınsaklık tanımı yardımıyla iki küme arasında kapsama bağıntısı verilmiştir.*

**Anahtar kelimeler:** Aritmetik istatistiksel yakınsaklık, İdealler, Nötrosöfik normlu uzaylar.

\* Nazmiye GONUL BILGIN; nazmiyegonul@beun.edu.tr

## 1. Introduction

It is not easy to explain many uncertainties that arise in our daily lives with classical methods. In order to eliminate these ambiguities, first fuzzy, then intuitionistic fuzzy, and then neutrosophic concepts emerged. The fuzzy set theory, which is constructed with the help of the membership function that converts the elements of a set to the interval  $[0,1]$ , paved the way for the development of the intuitionistic fuzzy set theory with the addition of the non-member function that converts the elements of the set to the interval  $[0,1]$ . In this theory, the sum of the values of non-membership and membership function for all element of set remained in range of  $[0,1]$ .

Then, with the emergence of the neutrosophic sets, a more realistic decision-making process came to the fore with the concept that the accuracy, inaccuracy and indefinite membership values are independent of each other, and thus the sum of the three can take values in the range of  $[0,3]$  (Smarandache, 1998). The neutrosophic concept structure has been widely used in the solution of many problems in the fields of basic sciences, medicine and engineering. Many studies have been carried out in the field of mathematics related to this concept in order to be presented to the use of other fields. Kirisci & Simsek (2020) defined new concept called as neutrosophic normed space. By evaluating the new development area of analysis studies such as statistical convergence and the concept of neutrosophic together, Kisi (2020) investigated the concept of lacunary statistical convergence on this space. Some notable results in this regard can be reviewed here: (Khan et al., 2021; Gonul Bilgin, 2022a, 2022b; Kisi, 2021a).

On the other hand, Ruckle, (2012) established the concept of arithmetic convergence. It has been started to be studied by different authors by associating it with arithmetic convergence, statistical convergence, metric spaces and invariance. Arithmetic convergence is examined in (Yaying & Hazarika, 2018, 2020; Kisi, 2021b, 2022).

The concept of ideal convergence is presented in (Kostyrko et al., 2000). After then, this concept and its various generalizations have been studied from many different perspectives in fuzzy, intuitionistic fuzzy and neutrosophic normed spaces.e.g (Kisi, 2021a). Moreover, using some special sequences, such as lacunary and fibonacci sequences, convergence and statistical versions in this sense are important study areas of the last ten years.

Another concept combined with statistical convergence is lambda sequences.  $\lambda$  –sequence is introduced by (Mursaleen, 2000). With the help of these sequences with certain properties, many different studies have been carried out in the spaces given above, where uncertainty is investigated similar to the method of convergence of lacunary sequences e.g (Esi & Hazarika, 2013).

After a summary of the relevant literature, what has been done in this study can be briefly summarized as follows. The main motivation in the preparation of this study is to establish the equivalent of the concept of arithmetic convergence, on which important studies have been made, in rapidly developing neutrosophic structures with a new perspective brought to daily life problems. Since the concept of arithmetic convergence has not yet been transferred to spaces with neutrosophic norms, this study was created by taking into account the gap in the literature. In addition, the fact that there are very few examples of arithmetic convergence enabled the study to be shaped in this direction. The concepts that will be transferred to the Neutrosophic normed space will be introduced in order and connections will be made between them. For this purpose, the terms of arithmetic, statistical convergence and lambda, ideal and lacunary convergence are based on and the general structure of the neutrosophic normed space is integrated with their appropriate combinations. Finally, the degree of convergence definitions of the defined concepts were given and the inclusion status was examined.

Now some definitions necessary for the study will be reminded.

**Definition 1.1** (Kirisci & Simsek, 2020) Let  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  be a neutrosophic normed spaces.  $(s_n)$  is called to be convergent to  $s$  on  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  if for all  $\varepsilon^{\mathfrak{N}} \in (0,1)$  and  $p > 0$ , there exists  $n^* \in \mathbb{N}$ , such that for each  $n \geq n^*$ ,

$$\mathcal{M}^t(s_n - s, p) > 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^m(s_n - s, p) < \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^f(s_n - s, p) < \varepsilon^{\mathfrak{N}}. \quad (1)$$

Then, it is denoted  $\mathfrak{N} - \lim s_n = s$ . Here, (1) is also expressed by

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mathcal{M}^t(s_n - s, p) = 1, \lim_{n \rightarrow \infty} \mathcal{M}^f(s_n - s, p) = 0, \lim_{n \rightarrow \infty} \mathcal{M}^w(s_n - s, p) = 0. \tag{2}$$

**Definition 1.2 (Kisi, 2020)** Let  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  be a neutrosophic normed spaces,  $\theta^{\mathfrak{N}} = (\mathfrak{k}_n)$  be lacunary sequence. It is named to be lacunary statistically convergent to  $\delta^{\mathfrak{N}}$  in  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  if for all  $\varepsilon^{\mathfrak{N}} \in (0,1)$  and  $p > 0$ ,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{h_n} |\{n \in J_n : \mathcal{M}^t(s_n - \delta^{\mathfrak{N}}, p) \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^w(s_n - \delta^{\mathfrak{N}}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^f(s_n - \delta^{\mathfrak{N}}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}}\}| = 0. \tag{3}$$

Here,  $(\theta^{\mathfrak{N}})$  is an increasing integer sequence,  $\mathfrak{k}_0 = 0$ ,  $h_n = \mathfrak{k}_n - \mathfrak{k}_{n-1} \rightarrow \infty$  as  $n \rightarrow \infty$  and  $J_n = (\mathfrak{k}_{n-1}, \mathfrak{k}_n]$ .

**Definition 1.3 (Yaying & Hazarika, 2020)**  $(s_n)$  is called to be arithmetic statistically convergent to  $s_{\langle n,r \rangle}$  if for all  $\varepsilon^{\mathfrak{N}} > 0$ , there is an integer  $r$  so that,

$$\lim_{v \rightarrow \infty} \frac{1}{v} |\{n \leq v : |s_n - s_{\langle n,r \rangle}| \geq \varepsilon\}| = 0. \tag{4}$$

In this case, it is denoted with  $\lim s_n = s_{\langle n,r \rangle}$  ( $aSt$ ). Here, for two integers  $n, r$  the greatest common divisor of  $n, r$  denoted by  $\langle n, r \rangle$  is the largest number that divides both  $n$  and  $r$ .

**Definition 1.4 (Yaying & Hazarika, 2020)**  $(s_n)$  is named to be lacunary arithmetic statistically convergent to  $s_{\langle n,r \rangle}$  if for a lacunary sequence  $\theta = (\mathfrak{k}_v)$  and for all  $\varepsilon > 0$ , there is an integer  $r$  so that,

$$\lim_{v \rightarrow \infty} \frac{1}{h_v} |\{n \in J_v : |s_n - s_{\langle n,r \rangle}| \geq \varepsilon\}| = 0. \tag{5}$$

In this case, it is denoted with  $\lim s_n = s_{\langle n,r \rangle}$  ( $aSt_{\theta}$ ).

After the necessary definitions are given, different convergence situations can be constructed with the help of new concepts in next section.

## 2. Material and method

Firstly, definition of arithmetic convergence on neutrosophic normed space will be given.

**Definition 2.1** Let  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  be a neutrosophic normed spaces,  $(s_n)$  is called to be a arithmetic convergent to  $s_{\langle n,r \rangle}$  on  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  if for all  $\varepsilon^{\mathfrak{N}} \in (0,1)$ ,  $p > 0$  and there is an integer  $r$  and  $n^* \in \mathbb{N}$ , such that for each  $n \geq n^*$ ,

$$\mathcal{M}^t(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) > 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^w(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) < \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^f(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) < \varepsilon^{\mathfrak{N}}. \tag{6}$$

Then, it is denoted  $\mathfrak{N} - \lim s_n = s_{\langle n,r \rangle}$ . Here, (6) means

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mathcal{M}^t(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) = 1, \lim_{n \rightarrow \infty} \mathcal{M}^f(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) = 0, \lim_{n \rightarrow \infty} \mathcal{M}^w(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) = 0. \tag{7}$$

**Lemma 2.1** Let  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  be a neutrosophic normed spaces. then the next properties are hold.

- 1)  $(s_n)$  is arithmetic convergent on  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  then it is unique.
- 2) Let  $\lim_{n \rightarrow \infty} s_n = s_{\langle n,r \rangle}$  and  $\lim_{n \rightarrow \infty} \check{s}_n = \check{s}_{\langle n,r \rangle}$ . Then  $\lim_{n \rightarrow \infty} s_n + \check{s}_n = s_{\langle n,r \rangle} + \check{s}_{\langle n,r \rangle}$  on  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$ .
- 3) Let  $\lim_{n \rightarrow \infty} s_n = s_{\langle n,r \rangle}$  on  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  and  $c \neq 0$ , then  $\lim_{n \rightarrow \infty} c s_n = c s_{\langle n,r \rangle}$ .

**Proof.** The proof is easily obtained from the (6) or (7).

The definition of arithmetic convergence on  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  can be modified with the concept of statistical convergence as below.

**Definition 2.2** Let  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  be neutrosophic normed spaces.  $(s_n)$  is called to be a arithmetic statistically convergent to  $s_{(n,r)}$  on  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  if for all  $\varepsilon^{\mathfrak{N}} \in (0,1)$ ,  $p > 0$  and there is an integer  $r$  so that,

$$\lim_{v \rightarrow \infty} \frac{1}{v} |\{n \leq v: \mathcal{M}^t(s_n - s_{(n,r)}, p) \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^w(s_n - s_{(n,r)}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^f(s_n - s_{(n,r)}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}}\}| = 0 \quad (8)$$

Then, it is denoted  $\mathfrak{N} - \lim s_n = s_{(n,r)} (aSt)$ .

This definition given by the equation (8) can be used in the following equivalent statement instead.

**Lemma 2.2** Let  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  be a neutrosophic normed spaces. Then the next properties are equal.

- 1)  $\mathfrak{N} - \lim s_n = s_{(n,r)} (aSt)$ .
- 2)  $\lim_{v \rightarrow \infty} \frac{1}{v} |\{n \leq v: \mathcal{M}^t(s_n - s_{(n,r)}, p) \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}\}| = \lim_{v \rightarrow \infty} \frac{1}{v} |\{n \leq v: \mathcal{M}^w(s_n - s_{(n,r)}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}}\}|$   
 $= \lim_{v \rightarrow \infty} \frac{1}{v} |\{n \leq v: \mathcal{M}^f(s_n - s_{(n,r)}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}}\}| = 0$ .
- 3) Let  $\lim_{n \rightarrow \infty} \mathcal{M}^t(s_n - s_{(n,r)}, p) = 1(aSt)$ ,  $\lim_{n \rightarrow \infty} \mathcal{M}^w(s_n - s_{(n,r)}, p) = 0(aSt)$   
and  $\lim_{n \rightarrow \infty} \mathcal{M}^f(s_n - s_{(n,r)}, p) = 0(aSt)$ .

**Proof.** The proof is easily obtained from the definition.

The relationship between the two definitions above is given in the following lemma.

**Lemma 2.3** Let  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  be a neutrosophic normed spaces and  $\mathfrak{N} - \lim s_n = s_{(n,r)}$ . In this case,  $\mathfrak{N} - \lim s_n = s_{(n,r)} (aSt)$ .

**Proof.** Let  $\mathfrak{N} - \lim s_n = s_{(n,r)}$ , so for all  $\varepsilon^{\mathfrak{N}} \in (0,1)$ ,  $p > 0$  and there is an integer  $r$  and  $n^* \in \mathbb{N}$ , such that for each  $n \geq n^*$ ,

$$\mathcal{M}^t(s_n - s_{(n,r)}, p) > 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^w(s_n - s_{(n,r)}, p) < \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^f(s_n - s_{(n,r)}, p) < \varepsilon^{\mathfrak{N}}.$$

Hence, the density of  $\{n \leq v: \mathcal{M}^t(s_n - s_{(n,r)}, p) \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^w(s_n - s_{(n,r)}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^f(s_n - s_{(n,r)}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}}\}$  is zero. So,

$$\lim_{v \rightarrow \infty} \frac{1}{v} |\{n \leq v: \mathcal{M}^t(s_n - s_{(n,r)}, p) \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^w(s_n - s_{(n,r)}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^f(s_n - s_{(n,r)}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}}\}| = 0.$$

That is,  $\mathfrak{N} - \lim s_n = s_{(n,r)} (aSt)$ .

The following hybrid definitions integrates the concepts of arithmetic and lacunary convergence.

**Definition 2.3** Let  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  be neutrosophic normed spaces,  $\theta = (\mathfrak{h}_v)$  be lacunary sequence.  $(s_n)$  is named to be a arithmetic strong lacunary convergent to  $s_{(n,r)}$  on  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  if for all  $\varepsilon^{\mathfrak{N}} \in (0,1)$ ,  $p > 0$ , there is an integer  $r$  and  $n^* \in \mathbb{N}$ , such that for each  $n \geq n^*$ ,

$$\frac{1}{\mathfrak{h}_v} \sum_{n \in J_v} \mathcal{M}^t(s_n - s_{(n,r)}, p) > 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \frac{1}{\mathfrak{h}_v} \sum_{n \in J_v} \mathcal{M}^w(s_n - s_{(n,r)}, p) < \varepsilon^{\mathfrak{N}} \text{ and } \frac{1}{\mathfrak{h}_v} \sum_{n \in J_v} \mathcal{M}^f(s_n - s_{(n,r)}, p) < \varepsilon^{\mathfrak{N}}.$$

Then, it is denoted with  $\mathfrak{N} - \lim s_n = s_{(n,r)} (a\theta^S)$ .

**Theorem 2.1** Let  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  be a neutrosophic normed spaces,  $\theta = (\mathfrak{h}_v)$  be a lacunary sequence.  $(s_n)$  is arithmetic strong lacunary convergent on  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$ , in this case, this limit is unique.

**Proof.** Let's accept that  $\mathfrak{N} - \lim s_n = s_{(n,r)} (a\theta^s)$  and  $\mathfrak{N} - \lim s_n = \check{s}_{(n,r)} (a\theta^s)$ . For given  $\varepsilon^{\mathfrak{N}} \in (0,1)$ , choosing  $\varkappa \in (0,1)$  so that  $(1 - \varkappa) \otimes (1 - \varkappa) > 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}$  and  $\varkappa \boxtimes \varkappa < \varepsilon^{\mathfrak{N}}$ . For all  $p > 0$ , there is an integer  $r$  and  $n^* \in \mathbb{N}$ , such that for each  $n \geq n^*$ ,

$$\frac{1}{h_v} \sum_{n \in J_v} \mathcal{M}^t(s_n - s_{(n,r)}, p) > 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \frac{1}{h_v} \sum_{n \in J_v} \mathcal{M}^w(s_n - s_{(n,r)}, p) < \varepsilon^{\mathfrak{N}} \text{ and } \frac{1}{h_v} \sum_{n \in J_v} \mathcal{M}^f(s_n - s_{(n,r)}, p) < \varepsilon^{\mathfrak{N}}$$

At the same time, there is  $n^{**} \in \mathbb{N}$  such that, for each  $n \geq n^{**}$ ,

$$\frac{1}{h_v} \sum_{n \in J_v} \mathcal{M}^t(s_n - \check{s}_{(n,r)}, p) > 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \frac{1}{h_v} \sum_{n \in J_v} \mathcal{M}^w(s_n - \check{s}_{(n,r)}, p) < \varepsilon^{\mathfrak{N}} \text{ and } \frac{1}{h_v} \sum_{n \in J_v} \mathcal{M}^f(s_n - \check{s}_{(n,r)}, p) < \varepsilon^{\mathfrak{N}}$$

If it is choosing  $n^\wedge = \max\{n^*, n^{**}\}$ . Hence, for  $n \geq n^\wedge$ , taking a  $\mathfrak{k} \in \mathbb{N}$  such that

$$\mathcal{M}^t(s_{\mathfrak{k}} - s_{(n,r)}, \frac{p}{2}) > \frac{1}{h_v} \sum_{n \in J_v} \mathcal{M}^t(s_n - s_{(n,r)}, \frac{p}{2}) > 1 - \varkappa$$

So,

$$\mathcal{M}^t(s_{(n,r)} - \check{s}_{(n,r)}, p) > \mathcal{M}^t(s_{\mathfrak{k}} - s_{(n,r)}, \frac{p}{2}) \otimes \mathcal{M}^t(s_{\mathfrak{k}} - \check{s}_{(n,r)}, \frac{p}{2}) > (1 - \varkappa) \otimes (1 - \varkappa) > 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}.$$

Using  $\varepsilon^{\mathfrak{N}} > 0$  is arbitrary, for each  $p > 0$ , it is written  $\lim_{n \rightarrow \infty} \mathcal{M}^t(s_{(n,r)} - \check{s}_{(n,r)}, p) = 1$ , by doing the same with others then  $s_{(n,r)} = \check{s}_{(n,r)}$ .

**Definition 2.4** Let  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  be a neutrosophic normed spaces,  $\theta = (k_v)$  be a lacunary sequence.  $(s_n)$  is called to be a arithmetic lacunary statistically convergent to  $s_{(n,r)}$  on  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  if for all  $\varepsilon^{\mathfrak{N}} \in (0,1)$ ,  $p > 0$  and there is an integer  $r$  so that,

$$\lim_{v \rightarrow \infty} \frac{1}{h_v} |\{n \in J_v : \mathcal{M}^t(s_n - s_{(n,r)}, p) \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^w(s_n - s_{(n,r)}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^f(s_n - s_{(n,r)}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}}\}| = 0 \quad (9)$$

Then, it is denoted  $\mathfrak{N} - \lim s_n = s_{(n,r)} (aSt_\theta)$ .

Equivalent expressions that can be used instead of (9) are given in the lemma below.

**Lemma 2.4** Let  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  be a neutrosophic normed spaces and  $\theta = (k_v)$  be a lacunary sequence. Then the next properties are equivalent.

- 1)  $\mathfrak{N} - \lim s_n = s_{(n,r)} (aSt_\theta)$ .
- 2)  $\lim_{v \rightarrow \infty} \frac{1}{h_v} |\{n \in J_v : \mathcal{M}^t(s_n - s_{(n,r)}, p) \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}\}| = \lim_{v \rightarrow \infty} \frac{1}{h_v} |\{n \in J_v : \mathcal{M}^w(s_n - s_{(n,r)}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}}\}|$   
 $= \lim_{v \rightarrow \infty} \frac{1}{h_v} |\{n \in J_v : \mathcal{M}^f(s_n - s_{(n,r)}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}}\}| = 0.$
- 3)  $\lim_{v \rightarrow \infty} \frac{1}{h_v} |\{n \in J_v : \mathcal{M}^t(s_n - s_{(n,r)}, p) > 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}\}| = \lim_{v \rightarrow \infty} \frac{1}{h_v} |\{n \in J_v : \mathcal{M}^w(s_n - s_{(n,r)}, p) < \varepsilon^{\mathfrak{N}}\}|$   
 $= \lim_{v \rightarrow \infty} \frac{1}{h_v} |\{n \in J_v : \mathcal{M}^f(s_n - s_{(n,r)}, p) < \varepsilon^{\mathfrak{N}}\}| = 1.$
- 4) Let  $\mathfrak{N} - \lim \mathcal{M}^t(s_n - s_{(n,r)}, p) = 1(aSt_\theta)$ ,  $\mathfrak{N} - \lim \mathcal{M}^w(s_n - s_{(n,r)}, p) = 0(aSt_\theta)$   
 and  $\mathfrak{N} - \lim \mathcal{M}^f(s_n - s_{(n,r)}, p) = 0(aSt_\theta)$ .

### 3. Results

In this section, the relations of the definitions established above with  $\lambda$ -sequences and ideals will be presented.

**Definition 3.1** Let  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  be a neutrosophic normed spaces.  $(s_n)$  is called to be a arithmetic  $\lambda$ -statistically convergent to  $s_{(n,r)}$  on  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  if for all  $\varepsilon^{\mathfrak{N}} \in (0,1)$ ,  $p > 0$  and there is an integer  $r$  so that,



$$\lim_{v \rightarrow \infty} \frac{1}{\lambda_v} |\{n \in \mathfrak{I}_v : \mathcal{M}^t(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^w(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^f(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}}\}| = 0 \quad (10)$$

Then, it is denoted  $\mathfrak{N} - \lim s_n = s_{\langle n,r \rangle} (aSt_\lambda)$ . Here,  $\lambda = (\lambda_v)$ , be a non-decreasing sequence of positive numbers,  $\lambda_1 = 1$ ,  $\lim_{v \rightarrow \infty} \lambda_v = \infty$ ,  $\lambda_{v+1} \leq \lambda_v + 1$  and  $\mathfrak{I}_v = [v - \lambda_v + 1, v]$  well known in the literature.

Let us consider the following norms, which are frequently used in studies in the field of neutrosophic normed space, see (Kirisici & Simsek, 2020) and then let's choose the sequence to which we will apply the concept of arithmetic convergence.

**Example 3.1**

Let  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  be a neutrosophic normed spaces and  $p > \|s_n\|$ . For all  $\varepsilon^{\mathfrak{N}} \in (0,1)$ ,  $p > 0$  there is an integer  $r$  such that  $\mathcal{M}^t(s_n, p) = \frac{p}{\|s_n\| + p}$ ,  $\mathcal{M}^f(s_n, p) = \frac{\|s_n\|}{\|s_n\| + p}$ ,  $\mathcal{M}^w(s_n, p) = \frac{\|s_n\|}{p}$ . If we choose  $(\lambda_v) = v$ , then  $\mathfrak{I}_v = [1, v]$ . For  $s_n = \begin{cases} 1, & n = k^2 \\ 0, & n \neq k^2 \end{cases}$  and let's take  $r = 10$ . Let's calculate a few  $s_n - s_{\langle n,r \rangle}$  values to see the structure of the sequences.

$$s_1 - s_{\langle 1,10 \rangle} = 1 - 1 = 0, s_2 - s_{\langle 2,10 \rangle} = s_2 - s_2 = 0, s_3 - s_{\langle 3,10 \rangle} = s_3 - s_1 = -1, s_4 - s_{\langle 4,10 \rangle} = s_4 - s_2 = 1$$

$$s_5 - s_{\langle 5,10 \rangle} = s_5 - s_5 = 0, s_6 - s_{\langle 6,10 \rangle} = s_6 - s_2 = 0, s_7 - s_{\langle 7,10 \rangle} = 0 - s_1 = -1, s_8 - s_{\langle 8,10 \rangle} = s_8 - s_2 = 0$$

$$s_9 - s_{\langle 9,10 \rangle} = s_9 - s_1 = 0, s_{10} - s_{\langle 10,10 \rangle} = s_{10} - s_{10} = 0, \dots, s_{15} - s_{\langle 15,10 \rangle} = s_{15} - s_5 = 0, \dots$$

$$s_{20} - s_{\langle 20,10 \rangle} = s_{20} - s_{10} = 0, \dots, s_{100} - s_{\langle 100,10 \rangle} = s_{100} - s_{10} = 1 \dots$$

$$\left\{ n \leq v : \frac{p}{\|s_n - s_{\langle n,r \rangle}\| + p} \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \frac{\|s_n - s_{\langle n,r \rangle}\|}{\|s_n - s_{\langle n,r \rangle}\| + p} \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \frac{\|s_n - s_{\langle n,r \rangle}\|}{p} \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \right\}$$

$$= \left\{ n \leq v : \|s_n - s_{\langle n,r \rangle}\| \geq \frac{p\varepsilon^{\mathfrak{N}}}{1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}}, \|s_n - s_{\langle n,r \rangle}\| \geq p\varepsilon^{\mathfrak{N}} \right\}$$

$$= \{n \leq v : s_n - s_{\langle n,r \rangle} = 1\} = \{n \leq v : n = k^2, k \in \mathbb{N}\}.$$

So,

$$\frac{1}{\lambda_v} |\{n \leq v : n = k^2, k \in \mathbb{N}\}| = \frac{1}{v} |\{n \in \mathfrak{I}_v : n = k^2, k \in \mathbb{N}\}| \leq \frac{\sqrt{v}}{v}.$$

Here, if we take sufficiently large,  $\mathcal{M}^t(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) = \frac{p}{\|s_n - s_{\langle n,r \rangle}\| + p}$  becomes less than  $1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}$  and similarly  $\mathcal{M}^f(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) = \frac{\|s_n - s_{\langle n,r \rangle}\|}{\|s_n - s_{\langle n,r \rangle}\| + p}$ ,  $\mathcal{M}^w(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) = \frac{\|s_n - s_{\langle n,r \rangle}\|}{p}$  becomes larger than  $\varepsilon^{\mathfrak{N}}$ .

**Definition 3.2** Let  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  be a neutrosophic normed spaces.  $(s_n)$  is called to be a arithmetic  $\mathcal{J}^*$  -statistically convergent to  $s_{\langle n,r \rangle}$  on  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  if for all  $\varepsilon^{\mathfrak{N}} \in (0,1)$ ,  $\gamma^{\mathfrak{N}} > 0$  and  $p > 0$  there is an integer  $r$  so that,

$$\left\{ v \in \mathbb{N} : \frac{1}{v} |\{n \leq v : \mathcal{M}^t(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^w(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \text{ or } \mathcal{M}^f(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}}\}| \geq \gamma^{\mathfrak{N}} \right\} \in \mathcal{J}^* \quad (11)$$

Then, it is denoted  $\mathfrak{N} - \lim s_n = s_{\langle n,r \rangle} (aSt_{\mathcal{J}^*})$ .

In the following definition, the statistical convergence-based concept established by evaluating the (10) and (11) together will be given.

**Definition 3.3** Let  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  be a neutrosophic normed spaces.  $(s_n)$  is called to be a arithmetic  $\lambda \mathcal{J}^*$  -statistically convergent to  $s_{\langle n,r \rangle}$  on  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  if for all  $\varepsilon^{\mathfrak{N}} \in (0,1)$ ,  $\gamma^{\mathfrak{N}} > 0$  and  $p > 0$  there is an integer  $r$  so that,

$$\left\{ v \in \mathbb{N} : \frac{1}{\lambda_v} |\{n \in \mathfrak{I}_v : \mathcal{M}^t(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^w(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \text{ or } \mathcal{M}^f(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}}\}| \geq \gamma^{\mathfrak{N}} \right\} \in \mathcal{J}^* \quad (12)$$

Then, the situation given in (12) is denoted by  $\mathfrak{N} - \lim s_n = s_{\langle n,r \rangle} (aSt_{\lambda J^*})$ .

Now, let's give the arithmetic  $\lambda J^*$  –statistically summability definition with the help of the sum, which is known as the sum of the Valée-Pousin in the literature by  $t_n(s) = \frac{1}{\lambda_n} \sum_{v \in \mathfrak{S}_n} s_v$ .

**Definition 3.4** Let  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  be a neutrosophic normed spaces.  $(s_n)$  is called to be a arithmetic  $\lambda J^*$  –statistically summable to  $s_{\langle n,r \rangle}$  on  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  if for all  $\varepsilon^{\mathfrak{N}} \in (0,1), \gamma^{\mathfrak{N}} > 0$  and  $p > 0$  there is an integer  $r$  so that,

$$\left\{ v \in \mathbb{N}: \frac{1}{\lambda_v} \left| \left\{ n \in \mathfrak{S}_v: \mathcal{M}^t(t_n(s) - s_{\langle n,r \rangle}, p) \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^w(t_n(s) - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \text{ or } \mathcal{M}^f(t_n(s) - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \right\} \right| \geq \gamma^{\mathfrak{N}} \right\} \in \mathcal{J}^*$$

Then, it is denoted  $\mathfrak{N} - [\lambda J^*] - \lim s_n = s_{\langle n,r \rangle} (aSt_{\lambda J^*})$ .

Let's give the following theorem explaining the relationship between arithmetic  $\lambda J^*$  –statistically summable and arithmetic  $\lambda J^*$  – statistically convergent.

**Theorem 3.1** Let  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  be a neutrosophic normed spaces. If  $(s_n)$  is a arithmetic  $\lambda J^*$  –statistically summable to  $s_{\langle n,r \rangle}$  then  $(s_n)$  is arithmetic  $\lambda J^*$  –statistically convergent to  $s_{\langle n,r \rangle}$ .

**Proof.** Let  $(s_n)$  is a arithmetic  $\lambda J^*$  –statistically summable to  $s_{\langle n,r \rangle}$  on  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$ . Then

$$\begin{aligned} & \sum_{n \in \mathfrak{S}_v} \left( \mathcal{M}^t(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p), \mathcal{M}^f(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \text{ or } \mathcal{M}^w(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \right) \\ & \geq \sum_{\substack{n \in \mathfrak{S}_v, \mathcal{M}^t(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) < 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}} \\ \mathcal{M}^f(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) > \varepsilon^{\mathfrak{N}} \text{ or } \mathcal{M}^w(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) > \varepsilon^{\mathfrak{N}}}} \left( \mathcal{M}^t(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p), \mathcal{M}^f(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \text{ or } \mathcal{M}^w(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \right) \\ & \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \left| n \in \mathfrak{S}_v: \mathcal{M}^t(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^f(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \text{ or } \mathcal{M}^w(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \right|. \end{aligned}$$

So,

$$\frac{1}{\lambda_v} \left| \left\{ n \in \mathfrak{S}_v: \mathcal{M}^t(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^w(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \text{ or } \mathcal{M}^f(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \right\} \right| \geq \gamma^{\mathfrak{N}}.$$

Hence,

$$\frac{1}{\lambda_v} \sum_{v \in \mathfrak{S}_n} \mathcal{M}^t(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \leq (1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}) \gamma^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^w(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \gamma^{\mathfrak{N}} \varepsilon^{\mathfrak{N}} \text{ or } \mathcal{M}^f(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \gamma^{\mathfrak{N}} \varepsilon^{\mathfrak{N}}.$$

$$\left\{ v \in \mathbb{N}: \frac{1}{\lambda_v} \left| \left\{ n \in \mathfrak{S}_v: \mathcal{M}^t(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^w(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \text{ or } \mathcal{M}^f(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \right\} \right| \geq \gamma^{\mathfrak{N}} \right\}$$

$$\subset \left\{ v \in \mathbb{N}: \frac{1}{\lambda_v} \sum_{n \in \mathfrak{S}_v} \mathcal{M}^t(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \leq (1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}), \mathcal{M}^w(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \text{ or } \mathcal{M}^f(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \gamma^{\mathfrak{N}} \varepsilon^{\mathfrak{N}} \right\}.$$

Thus, using that  $(s_n)$  is a arithmetic  $\lambda J^*$  –statistically summable to  $s_{\langle n,r \rangle}$  then it is arithmetic  $\lambda J^*$  –statistically convergent to  $s_{\langle n,r \rangle}$ .

In the following theorem, the inclusion case between arithmetic  $J^*$  –statistically convergent and arithmetic  $\lambda J^*$  –statistically convergent is given.

**Theorem 3.2** Let  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  be a neutrosophic normed spaces, arithmetic  $J^*$  –statistically convergent sequences and arithmetic  $\lambda J^*$  –statistically convergent sequences spaces are denoted with  $S(aSt_{J^*})$  and  $S(aSt_{\lambda J^*})$ , respectively. If  $\lim_{v \rightarrow \infty} \frac{\lambda_v}{v} > 0$ , then  $S(aSt_{J^*}) \subset S(aSt_{\lambda J^*})$ .

**Proof.** Given  $\varepsilon^{\mathfrak{N}} > 0$ ,

$$\frac{1}{v} \left| \left\{ n \leq v: \mathcal{M}^t(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^w(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \text{ or } \mathcal{M}^f(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \right\} \right|$$

$$\begin{aligned} &\geq \frac{1}{v} \left| \left\{ n \in \mathfrak{I}_v : \mathcal{M}^t(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^{\mathfrak{M}}(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \text{ or } \mathcal{M}^f(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \right\} \right| \\ &= \frac{\lambda_v}{v} \frac{1}{\lambda_v} \left| \left\{ n \in \mathfrak{I}_v : \mathcal{M}^t(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^{\mathfrak{M}}(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \text{ or } \mathcal{M}^f(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \right\} \right|. \end{aligned}$$

Here, using  $\lim_{v \rightarrow \infty} \frac{\lambda_v}{v} = d > 0$ , then  $\left\{ n \in \mathbb{N} : \frac{\lambda_v}{v} < \frac{d}{2} \right\}$  is finite. So, for  $\gamma^{\mathfrak{N}} > 0$ ,

$$\begin{aligned} &\left\{ n \in \mathbb{N} : \frac{1}{\lambda_v} \left| \left\{ n \in \mathfrak{I}_v : \mathcal{M}^t(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^{\mathfrak{M}}(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \text{ or } \mathcal{M}^f(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \right\} \right| \geq \gamma^{\mathfrak{N}} \right\} \\ &\subset \left\{ n \in \mathbb{N} : \frac{1}{v} \left| \left\{ n \in \mathfrak{I}_v : \mathcal{M}^t(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^{\mathfrak{M}}(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \text{ or } \mathcal{M}^f(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \right\} \right| \geq \frac{d}{2} \gamma^{\mathfrak{N}} \right\} \\ &\cup \left\{ n \in \mathbb{N} : \frac{\lambda_v}{v} < \frac{d}{2} \right\}. \end{aligned}$$

The proof is complete because of the set in right-hand side belongs to  $\mathcal{J}^*$ .

**Theorem 3.3** Let  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  be a neutrosophic normed spaces. If  $\lim_{v \rightarrow \infty} \frac{\lambda_v}{v} = 1$ , then  $S(aSt_{\lambda \mathcal{J}^*}) \subset S(aSt_{\mathcal{J}^*})$ .

**Proof.** Given for  $\gamma^{\mathfrak{N}} > 0$ , let  $\lim_{v \rightarrow \infty} \frac{\lambda_v}{v} = 1$ . Then, for all  $v \geq \check{v}$ , there exists a  $\check{v} \in \mathbb{N}$  such that  $\left| \frac{\lambda_v}{v} - 1 \right| < \gamma^{\mathfrak{N}}$ . For all  $\varepsilon^{\mathfrak{N}} > 0$  and  $v \geq \check{v}$ ,

$$\begin{aligned} &\frac{1}{v} \left| \left\{ n \leq v : \mathcal{M}^t(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^{\mathfrak{M}}(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \text{ or } \mathcal{M}^f(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \right\} \right| \\ &= \frac{1}{v} \left| \left\{ n \leq v - \lambda_v : \mathcal{M}^t(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^{\mathfrak{M}}(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \text{ or } \mathcal{M}^f(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \right\} \right| \\ &+ \frac{1}{v} \left| \left\{ n \in \mathfrak{I}_v : \mathcal{M}^t(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^{\mathfrak{M}}(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \text{ or } \mathcal{M}^f(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \right\} \right| \\ &\leq \frac{v - \lambda_v}{v} + \frac{1}{v} \left| \left\{ n \in \mathfrak{I}_v : \mathcal{M}^t(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^{\mathfrak{M}}(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \text{ or } \mathcal{M}^f(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \right\} \right| \\ &\leq 1 - \left( 1 - \frac{\gamma^{\mathfrak{N}}}{2} \right) + \frac{1}{v} \left| \left\{ n \in \mathfrak{I}_v : \mathcal{M}^t(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^{\mathfrak{M}}(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \text{ or } \mathcal{M}^f(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \right\} \right| \\ &= \frac{\gamma^{\mathfrak{N}}}{2} + \frac{1}{v} \left| \left\{ n \in \mathfrak{I}_v : \mathcal{M}^t(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^{\mathfrak{M}}(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \text{ or } \mathcal{M}^f(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \right\} \right|. \end{aligned}$$

Then,

$$\begin{aligned} &\left\{ n \in \mathbb{N} : \frac{1}{v} \left| \left\{ n \leq v : \mathcal{M}^t(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^{\mathfrak{M}}(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \text{ or } \mathcal{M}^f(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \right\} \right| \geq \gamma^{\mathfrak{N}} \right\} \\ &\subset \left\{ n \in \mathbb{N} : \frac{1}{v} \left| \left\{ n \in \mathfrak{I}_v : \mathcal{M}^t(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^{\mathfrak{M}}(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \text{ or } \mathcal{M}^f(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \right\} \right| \geq \frac{\gamma^{\mathfrak{N}}}{2} \right\} \end{aligned}$$

$\cup \{1, 2, \dots, \check{v}\}$ .

If,  $(s_n)$ ,  $\lambda \mathcal{J}^*$ -statistically convergent to  $s_{\langle n,r \rangle}$  in this case, the set in right-hand side belongs to  $\mathcal{J}^*$ . Therefore,  $(s_n)$  arithmetic  $\mathcal{J}^*$ -statistically convergent to  $s_{\langle n,r \rangle}$ .

Some definitions of degree of convergence are given below.

**Definition 3.5** Let  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  be a neutrosophic normed spaces,  $\theta = (\lambda_v)$  be lacunary sequence,  $\alpha \in (0, 1]$ .  $(s_n)$  is named to be a arithmetic lacunary statistically convergent of order  $\alpha$  to  $s_{\langle n,r \rangle}$  on  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  if for all  $\varepsilon^{\mathfrak{N}} \in (0, 1)$ ,  $p > 0$  and there is an integer  $r$  so that,

$$\lim_{v \rightarrow \infty} \frac{1}{h_v^\alpha} \left| \left\{ n \in \mathcal{J}_v : \mathcal{M}^t(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^{\mathfrak{M}}(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^f(s_n - s_{\langle n,r \rangle}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \right\} \right| = 0 \quad (13)$$

In this case, it is demonstrated  $\mathfrak{N} - \lim s_n = s_{\langle n,r \rangle} (aSt_\theta^\alpha)$ .

**Definition 3.6** Let  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  be neutrosophic normed spaces,  $\alpha \in (0,1]$  and  $\theta = (\mathcal{K}_v)$  be lacunary sequence.  $(s_n)$  is named to be a arithmetic  $J^*$ -lacunary statistically convergent of order  $\alpha$  to  $s_{(n,r)}$  on  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  if for all  $\varepsilon^{\mathfrak{N}} \in (0,1), \gamma^{\mathfrak{N}} > 0$  and  $p > 0$  there is an integer  $r$  so that,

$$\lim_{v \rightarrow \infty} \frac{1}{h_v^\alpha} \left| \left\{ n \in J_v : \mathcal{M}^t(s_n - s_{(n,r)}, p) \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^w(s_n - s_{(n,r)}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^f(s_n - s_{(n,r)}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \right\} \right| \geq \gamma^{\mathfrak{N}} \} = 0 \quad (14)$$

Then, it is denoted  $\mathfrak{N} - \lim s_n = s_{(n,r)} (aSt_{J^* \theta}^\alpha)$ .

**Definition 3.7** Let  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  be a neutrosophic normed spaces,  $\alpha \in (0,1]$ .  $(s_n)$  is called to be a arithmetic  $\lambda$ -statistically convergent of order  $\alpha$  to  $s_{(n,r)}$  on  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  if for all  $\varepsilon^{\mathfrak{N}} \in (0,1), p > 0$  and there is an integer  $r$  so that,

$$\lim_{v \rightarrow \infty} \frac{1}{\lambda_v^\alpha} \left| \left\{ n \in \mathfrak{I}_v : \mathcal{M}^t(s_n - s_{(n,r)}, p) \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^w(s_n - s_{(n,r)}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^f(s_n - s_{(n,r)}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \right\} \right| = 0 \quad (15)$$

Then, it is denoted  $\mathfrak{N} - \lim s_n = s_{(n,r)} (aSt_\lambda^\alpha)$ .

**Definition 3.8** Let  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  be a neutrosophic normed spaces and  $\alpha \in (0,1]$ .  $(s_n)$  is called to be a arithmetic  $\lambda J^*$ -statistically convergent of order  $\alpha$  to  $s_{(n,r)}$  on  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  if for all  $\varepsilon^{\mathfrak{N}} \in (0,1), \gamma^{\mathfrak{N}} > 0$  and  $p > 0$  there is an integer  $r$  so that,

$$\lim_{v \rightarrow \infty} \frac{1}{\lambda_v^\alpha} \left| \left\{ n \in \mathfrak{I}_v : \mathcal{M}^t(s_n - s_{(n,r)}, p) \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^w(s_n - s_{(n,r)}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^f(s_n - s_{(n,r)}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \right\} \right| \geq \gamma^{\mathfrak{N}} \} = 0 \quad (16)$$

Then, it is denoted  $\mathfrak{N} - \lim s_n = s_{(n,r)} (aSt_{\lambda J^*}^\alpha)$ .

Let all arithmetic  $J^*$ -statistically convergent sequences spaces is showed by  $S(aSt_{J^*}^\alpha)$ . Then the following inclusion relation is valid for  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$ .

**Theorem 3.4** Let  $(\Omega, \mathfrak{N}, \otimes, \boxtimes)$  be a neutrosophic normed spaces  $\alpha, \mu \in (0,1]$  and  $\alpha \leq \mu$ . Then,  $S(aSt_{J^* \theta}^\alpha) \subset S(aSt_{J^* \theta}^\mu)$ .

**Proof.** Let  $\alpha, \mu \in (0,1]$  and  $\alpha \leq \mu$ . In this case,

$$\frac{1}{h_v^\mu} \left| \left\{ n \in J_v : \mathcal{M}^t(s_n - s_{(n,r)}, p) \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^w(s_n - s_{(n,r)}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^f(s_n - s_{(n,r)}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \right\} \right|$$

$$\leq \frac{1}{h_v^\alpha} \left| \left\{ n \in J_v : \mathcal{M}^t(s_n - s_{(n,r)}, p) \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^w(s_n - s_{(n,r)}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^f(s_n - s_{(n,r)}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \right\} \right|.$$

So, for all  $\gamma^{\mathfrak{N}} > 0$ ,

$$\left\{ v \in \mathbb{N} : \frac{1}{h_v^\mu} \left| \left\{ n \in J_v : \mathcal{M}^t(s_n - s_{(n,r)}, p) \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^w(s_n - s_{(n,r)}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^f(s_n - s_{(n,r)}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \right\} \right| \geq \gamma^{\mathfrak{N}} \right\} \subset$$

$$\left\{ v \in \mathbb{N} : \frac{1}{h_v^\alpha} \left| \left\{ n \in J_v : \mathcal{M}^t(s_n - s_{(n,r)}, p) \leq 1 - \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^w(s_n - s_{(n,r)}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}}, \mathcal{M}^f(s_n - s_{(n,r)}, p) \geq \varepsilon^{\mathfrak{N}} \right\} \right| \geq \gamma^{\mathfrak{N}} \right\}$$

Hence, belongs to  $J^*$  in the left-hand set, which is covered by the right-hand side of this expression belonging to  $J^*$ .

#### 4. Discussion and conclusions

In this study, which is one of the most important research subjects for researchers working in functional analysis, a neutrosophic approach was used to conduct decision -making processes more realistic in daily life problems. The concepts of ideals, lacunary convergence, statistical convergence on neutrosophic normed space have been studied by different researchers. However, this research was conducted since arithmetic convergence has not been studied in this sense yet. The equivalents of  $\lambda$  convergence in fuzzy, intuitionistic fuzzy and neutrosophic normed spaces were examined and it was thought that arithmetic convergence concept could be evaluated together with  $\lambda$  convergence in this sense. This concept, whose different properties are studied in all three spaces used for decision processes with the help of ideals, has been integrated with the

concept of arithmetic convergence. This paper; it has been prepared according to the neutrosophic approach, which argues that uncertainty exist in right and wrong in the decision-making process, and since it is obtained by combining two different convergences in the normed space structure, it has the advantages of both convergence types. This study, which was established to determine the properties of sequences that should be evaluated in terms of arithmetic and statistical convergence in neutrosophic spaces, is a resource for researchers whose convergence type is important in the space they work. When the studies available in the literature are examined, it is seen that the insufficiency in the fuzzy structure has not been overcome yet or the convergences related to this convergence type are examined in the classical sense, which does not include uncertainty and indecision situations. The equivalent of these studies in the literature in the neutrosophic space has not been examined yet. Therefore, the prepared paper is a pioneering study that will fill this gap. A few definitions have been given for the types of degree of convergence, and in future studies, detailed analyzes can be made from different perspectives for the relations of these concepts with each other. For example, using the convergence methods in this study, studies can be made in topological and metric spaces with the technique in (Riaz, 2022a, 2022b) and this convergence structure can be created for function sequences. Concepts that can be evaluated together with topological spaces such as fermatean and pythagorean neutrosophic structures can be blended with arithmetic convergence and their application to daily life problems may follow this study similar to (Gonul Bilgin et al, 2022). In addition, arithmetic convergence properties on the triple sequences used in the studies of (Kisi & Gurdal, 2022a, 2022b) and the relationship of the convergence type used in (Kisi, 2021) with arithmetic convergence can be investigated.

### Acknowledgement

I would like to thank the editors and referees for their contributions during the evaluation phase of the article.

### Declaration of ethical code

The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

### Conflicts of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

### References

- Esi, A., & Hazarika, B. (2013).  $\lambda$ -ideal convergence in intuitionistic fuzzy 2-normed linear space. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 24(4), 725-732.
- Gonul Bilgin, N. (2022a). Rough statistical convergence in neutrosophic normed spaces. *Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences*, 9(21), 47-55.
- Gonul Bilgin, N. (2022b). Hibrid  $\Delta$ -statistical convergence for neutrosophic normed space. *Journal of Mathematics*, 2022, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2022/3890308>
- Gonul Bilgin, N., Pamučar, D., & Riaz, M. (2022). Fermatean neutrosophic topological spaces and an application of neutrosophic kano method. *Symmetry*, 14(11), 2442. <https://doi.org/10.3390/sym14112442>
- Khan, V. A., Khan, M. D., & Ahmad, M. (2021). Some new type of lacunary statistically convergent sequences in neutrosophic normed space. *Neutrosophic Sets and Systems*, 42(1), 239-252.
- Kirisci, M., & Simsek N. (2020). Neutrosophic normed spaces and statistical convergence. *The Journal of Analysis*, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s41478-020-00234-0>
- Kisi, O. (2020). Lacunary statistical convergence of sequences in neutrosophic normed spaces. *4th International Conference on Mathematics: an Istanbul Meeting for World Mathematicians* (pp. 345–354), Istanbul.
- Kisi, O. (2021a). Ideal convergence of sequences in neutrosophic normed spaces. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, (Preprint)*, 1-10. <https://doi.org/10.3233/JIFS-201568>

- Kisi, O. (2021b). On  $I_\theta$  arithmetic convergence. *Malaya Journal of Matematik*, 9(3), 64-71.
- Kisi, O. (2021c). On  $I_{\{\theta\}}$ -convergence in neutrosophic normed spaces. *Fundamental Journal of Mathematics and Applications*, 4(2), 67-76. <https://doi.org/10.33401/fujma.873029>
- Kisi, O. (2022). I-lacunary arithmetic statistical convergence. *Journal of Applied Mathematics & Informatics*, 40(1-2), 327-339. <https://doi.org/10.14317/jami.2022.327>.
- Kisi, O., & Gurdal, V. (2022a). Triple lacunary  $\Delta$ -statistical convergence in neutrosophic normed spaces. *Konuralp Journal of Mathematics*, 10(1), 127-133.
- Kisi, O., & Gurdal, V. (2022b). On triple difference sequences of real numbers in neutrosophic normed spaces. *Communications in Advanced Mathematical Sciences*, 5(1), 35-45. <https://doi.org/10.33434/cams.1025928>
- Kostyrko, P., Šalát, T., & Wilczyński, W. (2000). I-convergence. *Real Analysis Exchange*, 669-685.
- Mursaleen M. (2000).  $\lambda$ -statistical convergence. *Math Slovaca* 50(1), 111–115.
- Smarandache F. (1998). *Neutrosophy. neutrosophic probability, set and logic* (1st ed.). ProQuest Information & Learning.
- Riaz, M., Almalki, Y., Batool, S., & Tanveer, S. (2022a). Topological structure of single-valued neutrosophic hesitant fuzzy sets and data analysis for uncertain supply chains. *Symmetry*, 14(7), 1382. <https://doi.org/10.3390/sym14071382>
- Riaz, M., Ishtiaq, U., Park, C., Ahmad, K., & Uddin, F. (2022b). Some fixed point results for  $\xi$ -chainable neutrosophic and generalized neutrosophic cone metric spaces with application. *AIMS Mathematics*, 7(8), 14756-14784. <https://doi.org/10.3934/math.2022811>
- Ruckle, W. H. (2012). Arithmetical summability. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 396(2), 741-748. <https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2012.06.048>
- Yaying, T., & Hazarika, B. (2018). On lacunary arithmetic convergence. *Proceedings of the Jangjeon Mathematical Society*. 21(3), 507-513.
- Yaying, T., & Hazarika, B. (2020). Lacunary arithmetic statistical convergence. *National Academy Science Letters*, 43(6), 547-551. <https://doi.org/10.1007/s40009-020-00910-6>

## Öznelik seçimi problemleri için ikili beyaz köpekbalığı optimizasyon algoritması

*Binary white shark optimization algorithm for feature selection problems*

Funda KUTLU ONAY\*, 

Amasya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 05200, Amasya

• Geliş tarihi / Received: 15.09.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 21.01.2023

### Öz

Öznelik seçimi, makine öğrenmesi problemlerinde kabul edilebilir bir sınıflandırma doğruluğunu hedeflerken, aynı zamanda büyük ölçekli bir veri kümesinden gereksiz, alakasız ve gürültülü öznelikleri elimine etme işlemidir. Aslında öznelik seçimi de bir optimizasyon problemi olarak nitelendirilebilir. Literatürde metasezgisel optimizasyon algoritmalarının, optimum öznelik alt kümelerinin bulunmasında başarılı performansa sahip olduğu çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmada da beyaz köpek balığı optimizasyon algoritması (BKO), S, V ve U-şekilli transfer fonksiyonları ile ikili forma dönüştürülerek öznelik seçimi için kullanılmıştır. Önerilen yöntemler UCI veri deposundaki sekiz farklı veri kümesi üzerinde uygulanmış ve sınıflandırma doğrulukları, uygunluk değerleri ve seçilen öznelik sayıları yönünden incelenmiştir. Sınıflandırıcı olarak k-en yakın komşuluk sınıflandırıcısı kullanılmıştır. Daha sonra farklı metasezgisel algoritmalarla karşılaştırılarak Freidman sıralama testi uygulanmıştır. Deneysel sonuçlar önerilen metotların, öznelik seçiminde başarılı olduğunu ve sınıflandırma başarısını artırdığını göstermektedir. Özellikle V ve U-şekilli versiyonların daha kararlı ve yüksek doğrulukla sonuçlar ürettiği yorumu yapılabilir.

**Anahtar kelimeler:** Beyaz köpek balığı optimizasyonu algoritması, Metasezgisel algoritmalar, Öznelik seçimi, Sınıflandırma, Transfer fonksiyonu

### Abstract

In this study, the geometric process (GP) model is considered in order to calculate the debugging and testing costs of a software product. Under the assumption of the GP model, the debugging and testing costs of the software product are obtained depending on the first and second moment functions of the GP. It is observed that the values of the first and second moment functions of the process must be known in order to calculate the debugging and testing costs. At the same time, the calculation of moment functions also depends on both the distribution of the first interarrival time of the GP and the estimates of the model and distribution parameters. In this study, the proposed debugging and testing costs are calculated for the data set containing 136 failure times of a real-time command and control system. For this dataset, it has been shown in previous studies that the GP with gamma distribution can be proposed as a model. Under gamma distribution assumption, the maximum likelihood estimates of the model parameters are obtained. Using the estimates of the model parameters, the first and second moment functions of the GP are calculated with the help of the numerical methods proposed for these functions. Finally, the debugging and testing costs are obtained for the data set.

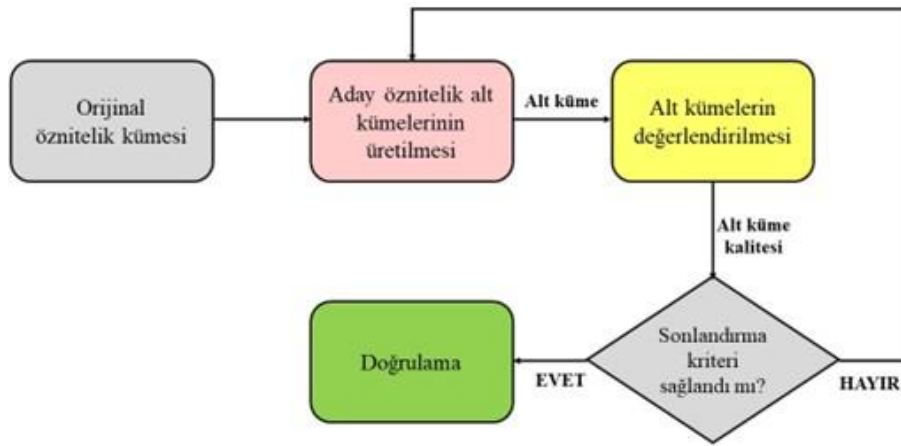
**Keywords:** White shark optimization algorithm, Metaheuristic algorithms, Feature selection, Classification Transfer function

\* Funda KUTLU ONAY; funda.kutlu@amasya.edu.tr

## 1. Giriş

### 1.1. Introduction

Son zamanlarda, teknolojinin gelişmesinin bir sonucu olarak birçok alanda gerçekleştirilen gerçek dünya uygulamalarında düzenli olarak büyük miktarda bir veri üretimi ve bu verilerin depolanması durumu söz konusudur. Bu verilerden birçoğu gereksiz veya problemle ilgisi olmayan veriler olabilir. Bu nedenle, anlamlı bilgiyi ortaya çıkarmak ve analiz etmek gerekir. Hesaplama karmaşıklığını azaltabilmek ve etkin bir sınıflandırma performansı yakalayabilmek için bu ayıklama işleminin yürütülmesi kaçınılmaz olabilir. Öznitelik seçimi (ÖS), verilerden gereksiz ve alakasız özelliklerin ortadan kaldırıldığı bir ön işleme fazıdır. Sınıflandırma problemleri için ÖS, özellikle büyük veri kümeleri içeren problemler için, zorlu ve hesaplama açısından pahalı bir süreç olabilir (Dash & Liu, 1997). ÖS sürecinin temel amacı, öğrenme algoritmasının öğrenme hızı veya sınıflandırma doğruluğu gibi önemli parametrelerinin iyileştirilmesi için en iyi öznitelik alt kümesini belirlemektir. Şekil 1'de ÖS sürecinin akış diyagramı ifade edilmiştir. Buna göre, ilk aşamada yeni bir öznitelik alt kümesi oluşturmak için yöntemler uygulanır. Daha sonra, üretilen çözümlerin etkinliğini değerlendirmek üzere sınıflandırıcı ve uygunluk fonksiyonu kullanılır. Bu işlem sonlandırma kriteri sağlanana dek devam eder. Kriter sağlanmadığı durumda, yeniden aday öznitelik alt kümeleri oluşturulur.



Şekil 1. Öznitelik seçim sürecinin akış diyagramı

Figure 1. Flow chart of the feature selection process

ÖS, aslında özniteliklerin optimum kombinasyonunu bulmaya yönelik bir arama sürecidir. Örneğin  $N$  özellikli bir öznitelik kümesinin,  $2^N - 1$  adet alt kümesi mevcuttur ve bunu değerlendirmek zor bir problemdir (Siedlecki & Sklansky, 1993). Bu durumda en iyi alt kümeyi bulmak için arama algoritması kullanılamaz. Öznitelik seçme algoritmaları filtre modelli, sarmal modelli ve gömülü model olmak üzere sınıfta ayrılmaktadır (Saeys, Inza, & Larranaga, 2007). Filtre modelli algoritmalar, bazı istatistiksel varsayımlar ile her bir özniteliğin sonuca katkısını hesaplayarak öznitelikleri değerlendirir ve belli bir eşik değerinin üzerindeki öznitelikleri hesaba katarak öznitelik seçimi gerçekleştirir. ReliefF (Robnik-Šikonja & Kononenko, 2003), Fskor (Duda, Hart, & Stork, 2001), bilgi kazancı (Quinlan, 1986) filtre modelli öznitelik çıkarım algoritmalarına örnek olarak gösterilebilir. Sarma modelli öznitelik seçim algoritmaları, sınıflandırma doğruluk oranını arttırmayı hedef alarak öznitelikleri seçmeyi hedefler. Dolayısıyla öznitelik sayısı arttıkça algoritmanın çalışma süresi de artmaktadır. Bundan dolayı sarmal yöntemler, filtre tabanlı yöntemlere göre daha yavaş çalışırlar. Genetik algoritma (Jh, 1975), sıralı geri eleme ve sıralı ileri eleme (Kittler, 1978) sarmal modelli öznitelik seçim yöntemlerine örnek gösterilebilir. Son olarak, gömülü modelli algoritmalar, sınıflandırma yapılırken öznitelik seçimi yapan modellerdir. Dolayısıyla gömülü yöntemler de filtre yöntemlerinden daha yavaş çalışmaktadırlar. Karar ağaçları (Grabczewski & Jankowski, 2005) ve destek vektör makineleri (Pal & Foody, 2010) gömülü yöntemlerin en sık kullanılan örneklerindedir. Metasezgisel algoritmalar (MA) da bu kısımda devreye girerler. MA, global optimizasyon problemlerine en uygun çözümleri bulmak için geliştirilen ve son zamanlarda birçok araştırma alanında popüler olarak kullanılan algoritmalar ve umut verici sonuçlar üretmektedirler (Abdel-Basset, Abdel-Fatah, & Sangaiyah, 2018). Bunlardan başlıcaları olarak parçacık sürü optimizasyonu (Poli, Kennedy, & Blackwell, 2007), evrimsel algoritmalar (Bäck & Schwefel, 1993), yapay arı kolonisi (Karaboga, Gorkemli, Ozturk, & Karaboga, 2014), gri kurt optimizasyonu (Long & Xu, 2016), Harris'in şahinleri (Fan, Chen, & Xia, 2020), balçık kalıbı algoritması (S. Li, Chen, Wang, Heidari, & Mirjalili, 2020), sinüs-kosinüs algoritması (Mirjalili,



2016) ve aritmetik optimizasyon (Abualigah, Diabat, Mirjalili, Abd Elaziz, & Gandomi, 2021) örnek verilebilir.

ÖS süreci için algoritmanın genel yapısını bozmaksızın yani MA ile aynı süreci uygulayarak ikilileştirme işlemi yapılması gerekir. İkilileştirme işlemi ile konum değerleri 0 veya 1 değerlerini alırlar ve bu işlem transfer fonksiyonu denilen matematiksel ifadelerle gerçekleştirilir. Bir girdi transfer fonksiyonuna geçirildikten sonra rastgele bir sayı ile karşılaştırılır ve karşılaştırma sonucunda göre 0 veya 1 değeri verilir. Literatürde ikilileştirme işlemi uygulanıp öznitelik seçiminde kullanılan çok sayıda metasezgisel algoritma vardır. Bunlardan en yenileri olarak ikili balina optimizasyon algoritması (Hussien, Hassanien, Houssein, Amin, & Azar, 2020), ikili sinüs kosinüs algoritması (Taghian & Nadimi-Shahraki, 2019), ikili atom arama optimizasyonu (Too & Rahim Abdullah, 2020), ikili karadelik optimizasyonu (Awadallah, Hammouri, Al-Betar, Braik, & Abd Elaziz, 2022), ikili salp sürüsü optimizasyonu (Dehghanivd., 2021), ikili kelebek optimizasyonu (Arora & Anand, 2019), ikili güve alevi optimizasyonu (Nadimi-Shahraki, Banaie-Dezfouli, Zamani, Taghian, & Mirjalili, 2021), ikili çekirge optimizasyonu (Hichem, Elkamel, Rafik, Mesaaoud, & Ouahiba, 2019), ikili Harris'in şahinleri optimizasyonu (Thaher, Heidari, Mafarja, Dong, & Mirjalili, 2020) ve İGKO (Luo & Zhao, 2019) örnek verilebilir.

Bu çalışmada ÖS için beyaz köpek balığı algoritmasının (BKO) ikilileştirilmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. BKO, köpek balıklarının avlanma ve avı izleme davranışlarından esinlenerek öne sürülen bir algoritmadır (Braik, Hammouri, Atwan, Al-Betar, & Awadallah, 2022). BKO'da köpek balıkları buldukları durumlara göre farklı hareket davranışları sergilerler. Köpek balıklarının konumları bu davranışlara göre güncellenecek ve böylece optimum çözüme ulaşılabilecektir. İkili beyaz köpekbalığı meta sezgisel algoritmasının bazı avantajlarından aşağıda bahsedilmiştir.

- Sömürü ve keşif arasındaki dengeyi kontrol altında alır. Dolayısıyla küresel en küçük değere yakınsamada, yerel en küçük değerde takılma ihtimalini azaltır.
- Yüksek yakınsama hızıyla zorlu optimizasyon problemlerinde küresel çözüme yakınsayabilmektedir.
- Matematiksel modeli ile yüksek boyutlu, çeşitli mühendislik optimizasyon problemlerini ele almayı uygun hale getirir.

İBKO ise BKO'nun ikilileştirilmiş versiyonunu temsil eder. Burada ikili değerlere dönüştürülmesi S, U ve V-şekilli transfer fonksiyonları ile elde edilmiştir ve bu versiyonlara sırasıyla SBKO, VBKO ve UBKO isimleri verilmiştir. İBKO alt kümeler üzerinden sınıflandırma işlemi yapılarak optimum öznitelik kümesini seçer. Dolayısıyla, sarmal bir öznitelik seçim metodudur.

Çalışmanın geri kalanı şu şekilde organize edilmiştir: Bölüm 2'de BKO'nun matematiksel alt yapısından ve algoritmanın işleyiş mekanizmasından bahsedilecektir. Bölüm 3'te BKO'nun ikilileştirilmesinde kullanılan transfer fonksiyonları açıklanacaktır. Bölüm 4'te elde edilen deneysel sonuçlara, bu sonuçların diğer algoritmalarla karşılaştırılmasına ve sıralama analizine yer verilecektir. Bölüm 5'te elde edilen sonuçlardan, önerilen yöntemin katkısından ve gelecekte yapılması planlanan çalışmalardan söz edilecektir.

## 2. Beyaz Köpek Balığı Optimizasyon Algoritması (BKO)

### 2. White Shark Optimization Algorithm (WSO)

Bu kısımda, köpek balıklarının avlanma ve avı izleme davranışlarının temel alan BKO'nun matematiksel modeli üzerinde durulacaktır. Büyük beyaz köpek balıkları, her ne kadar okyanusta avın yerini belirleme yeteneğine sahip olsalar da okyanusun derinlerindeki besin kaynaklarına ulaşabilmek için kapsamlı araştırmalar yapmak zorundadırlar. Bu amaçla köpek balıklarının üç temel hareketi esas alınmıştır. Bunlar:

- (1) Avın hareketi nedeniyle oluşan dalgalara dayalı ava doğru hareket: Burada köpek balığı, işitme ve koklama duyuları ile dalgalı hareketle avına ulaşmaya çalışır.
- (2) Okyanusun derinlerinde rastgele arama hareketi: Bunun için köpek balıkları ava doğru hareket ederek optimal avına yakın durur.
- (3) Optimal ava yakın olan bir avı bulma hareketi: Bu durumda büyük beyaz köpek balığı optimum avına çok yakın olan en iyi beyaz köpek balığına doğru hareket eder.

Bu davranışlara dayanarak, avın uygun şekilde bulunamaması durumunda en iyi çözüme ulaşmak için tüm beyaz köpekbalıklarının konumları güncellenecektir. Matematiksel modelin uygulanışı alt başlıklar altında detaylandırılmıştır.

## 2.1. BKO'nun başlatılması

### 2.1. Initialization of WSO

Bütün popülasyon tabanlı algoritmalarda olduğu gibi, BKO'da da ilk çözümler havuzu rastgele olarak oluşturulur. Problemin boyutu  $d$  ve köpek balığı popülasyonu ise  $N$  olsun.  $d$ -boyutlu bir arama uzayında  $N$  tane köpek balığı için aday çözümler matrisi  $\omega$ , denklem 1'deki gibi tanımlanır.

$$\omega = \begin{bmatrix} \omega(1,1) & \cdots & \omega(1,d) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega(N,1) & \cdots & \omega(N,d) \end{bmatrix}_{N \times d} \quad (1)$$

Burada  $\omega$ , tüm köpek balıklarının pozisyonunu;  $d$ , ilgili problem için karar değişkenlerinin boyutunu ve  $\omega(i,d)$ ,  $i$ . köpek balığının  $d$ . boyuttaki pozisyonunu ifade eder. Başlangıç popülasyonu denklem 2'deki gibi rastgele başlatma ile oluşturulur.

$$\omega(i,j) = low_j + rand \times (up_j - low_j) \quad (2)$$

Burada  $\omega(i,j)$ ,  $i$ . köpek balığının  $j$ . boyuttaki başlangıç konumunu;  $low_j$  ve  $up_j$  sırasıyla arama uzayının  $j$ . boyutta alt ve üst sınır değerlerini ve  $rand$ ,  $[0,1]$  aralığında üretilen rastgele bir sayıyı göstermektedir. Beyaz köpek balığının her yeni konumu için uygunluk fonksiyonu ile çözüm kalitesi değerlendirilir. Eğer yeni konum mevcut konumdan daha iyiyse, mevcut konum yenisiyle güncellenir. Aksi halde mevcut değerini korur.

## 2.2. Hareket stratejileri

### 2.2. Movement strategies

*Ava doğru hareket:* Beyaz köpekbalığı, avının hareketi esnasında algıladığı dalgaların tereddütüne dayanarak dalgalı bir hareketle avına doğru hareket eder. Bu durum denklem 3'teki gibi modellenmiştir.

$$\vartheta_{t+1}^i = \mu \left[ \vartheta_t^i + p_1 (\omega_{bestpos_t} - \omega_t^i) \times r_1 + p_2 (\omega_{best}^{\vartheta_t^i} - \omega_t^i) \times r_2 \right] \quad (3)$$

Burada,  $i$ , beyaz köpek balıklarının indeksini (1'den  $N$ 'ye kadar);  $\vartheta_{t+1}^i$ ,  $i$ . köpek balığının  $t$ . adımdaki yeni hız vektörünü;  $\vartheta_t^i$ ,  $t$ . adımdaki hızı,  $\omega_{bestpos_t}$ ,  $t$ . adımda herhangi bir köpek balığının o ana kadarki en iyi konum vektörünü,  $\omega_t^i$ ,  $i$ . köpek balığının  $t$ . adımdaki konum vektörünü;  $\omega_{best}^{\vartheta_t^i}$ , sürü tarafından bilinen en iyi konum vektörünü;  $\vartheta^i$ , denklem 4'te açıkça verildiği üzere en iyi konuma ulaşan beyaz köpekbalıklarının  $i$ . indeks vektörünü temsil eder. Ayrıca,  $r_1$  ve  $r_2$ ,  $[0,1]$  aralığında elde edilen iki rastgele sayı;  $p_1$  ve  $p_2$ ,  $\omega_t^i$ 'nin üzerinde  $\omega_{bestpos_t}$  ve  $\omega_{best}^{\vartheta_t^i}$ 'nin etkisini kontrol eden parametrelerdir ve sırasıyla denklem 5-6'daki gibi ifade edilirler. Son olarak  $\mu$ , BKO'da daralma etkisini kontrol eden parametre olarak denklem 7'deki şekilde önerilmiştir.

$$\vartheta = [N \times rand(1, N)] + 1 \quad (4)$$

$$p_1 = p_{max} + (p_{max} - p_{min}) \times e^{-\left(\frac{4T}{t}\right)^2} \quad (5)$$

$$p_2 = p_{min} + (p_{max} - p_{min}) \times e^{-\left(\frac{4T}{t}\right)^2} \quad (6)$$

Denklem 4'teki  $rand(1, N)$ ,  $[0,1]$  aralığında normal dağılıma sahip rastgele sayı vektörüdür. Denklem 5-6'da kullanılan  $t$  ve  $T$  sırasıyla mevcut iterasyonu ve maksimum iterasyon sayısını gösterir.  $p_{min}$  ve  $p_{max}$  ırasıyla beyaz köpek balıklarının en iyi hareketi için gerekli en küçük ve en büyük hızları temsil eder.

$$\mu = \frac{2}{|2-\tau-\sqrt{\tau^2-4\tau}|} \quad (7)$$

Denklem 7'deki  $\tau$  hızlanma katsayısıdır ve değeri 4.125 olarak belirlenmiştir.

*Optimum ava doğru hareket:* Beyaz köpek balıkları, genellikle avın hareketinden kaynaklanan dalgaları duyduklarında veya avın kokusunu aldıklarında ava doğru hareket ederler. Bazı durumlarda ise av ya yiyecek aramak için ya da beyaz bir köpekbalığı ona doğru hareket ettiğinde bulunduğu yeri terk eder. Balık sürüsünün besin kaynağı arama davranışı gibi, beyaz köpekbalığı av aramak için rastgele yerlerde gezinir. Bu bağlamda, söz konusu hareketi tanımlamak için denklem 8'deki konum güncelleme stratejisi kullanılır.

$$\omega_{t+1}^i = \begin{cases} \omega_t^i \cdot \neg \oplus \omega_0 + up \times av + low \times bv ; rand < mv \\ \omega_t^i + \frac{\vartheta_t^i}{f_{wavy}} ; rand \geq mv \end{cases} \quad (8)$$

Burada  $\omega_{t+1}^i$ ,  $i$ . beyaz köpek balığının  $(t+1)$ . adımıdaki yeni konum vektörünü;  $\neg$ , değil işlemi;  $av$  ve  $bv$ , denklem 9 ve 10'daki gibi tanımlanmış 1b ikili vektörleri;  $low$  ve  $up$ , sırasıyla arama uzayının alt ve üst sınırlarını;  $\omega_0$ , denklem 11'de tanımlanan lojik vektörü;  $f_{wavy}$ , denklem 12'de gösterildiği gibi tanımlanan beyaz köpek balığının dalgalı hareketinin frekansını;  $rand$ ,  $[0,1]$  aralığında üretilen rastgele bir sayıyı ve  $mv$ , iterasyon sayısına bağlı olarak köpek balığı avına yaklaştıkça artan hareket kuvvetini temsil eder ve denklem 13'teki gibi tanımlanır.

$$av = \text{sgn}(\omega_t^i - up) > 0 \quad (9)$$

$$bv = \text{sgn}(\omega_t^i - low) < 0 \quad (10)$$

$$\omega_0 = \oplus (av, bv) \quad (11)$$

Denklem 11'de  $\oplus$ , XOR işlemine karşılık gelmektedir. Denklem 9 ve 10, arama uzayının tüm muhtemel alanlarına ulaşmayı destekler.

$$f_{wavy} = f_{min} + \frac{f_{max} - f_{min}}{f_{max} + f_{min}} \quad (12)$$

Denklem 12'de  $f_{min}$  ve  $f_{max}$ , sırasıyla, dalgalı hareketin minimum ve maksimum frekanslarını ifade eder.

$$mv = \frac{1}{(c_1 + e^{(T/2-t)/c_2})} \quad (13)$$

Burada,  $c_1$  ve  $c_2$ , keşif ve sömürü davranışlarını yönetmek için kullanılan iki pozitif sabittir.

*En iyi beyaz köpek balığına doğru hareket:* Büyük beyaz köpek balıkları, avına en yakın olana karşı konumlarını koruyabilen bir davranış sergilerler. Bu davranış denklem 14'teki gibi hesaplanır.

$$(\omega_{t+1}^i)' = \omega_{bestpos_t} + rnd_1 \times \overrightarrow{Dist_\omega} \times \text{sgn}(rnd_2 - 0.5), rnd_3 < ss \quad (14)$$

Burada,  $(\omega_{t+1}^i)'$ ,  $i$ . beyaz köpek balığının avın konumuna göre güncellenmiş konumunu;  $\text{sgn}(rnd_2 - 0.5)$  aramanın yönünü değiştirmek için kullanılan ve -1 veya 1 üreten işaret fonksiyonunu;  $\overrightarrow{Dist_\omega}$ , köpek balığı ile av arasındaki denklem 15'teki gibi ifade edilen uzaklığı ve  $ss$ , beyaz köpek balıklarının koku ve görme duyularının gücünü ifade eden parametreyi denklem 16'daki gibi temsil etmektedir.

$$\overrightarrow{Dist_\omega} = |rand \times (\omega_{bestpos_t} - \omega_t^i)| \quad (15)$$

$$ss = |1 - e^{(-cs \times t/T)}| \quad (16)$$

Burada  $cs$ , keşif ve sömürü safhalarını kontrol etmede kullanılan pozitif bir sabit olup, bu çalışma için değeri  $5 \times 10^{-4}$  olarak belirlenmiştir.

### 2.3. Balık sürüsü davranışı

#### 2.3. Fish school behavior

Beyaz köpek balıklarının sürü davranışı denklem 17 ile tanımlanabilir. Bu denkleme göre ilk iki optimum çözüm korunur, diğer köpek balıklarının konumu da bu iki optimum konuma göre güncellenir. Büyük beyaz köpek balıklarının son konumu, optimum avına çok yakın olan arama alanı içinde bir yerde olacaktır. Balık sürüsü davranışı ve beyaz köpek balıklarının en iyi beyaz köpek balığına doğru hareketi, BKO'nun bütüncül davranışını belirler ve bu, daha iyi keşif ve kullanma özelliklerinin kapsamını genişletir.

$$\omega_{t+1}^i = \omega_t^i + (\omega_{t+1}^i)' / (2 \times rand) \quad (17)$$

### 2.4. Keşif ve sömürü fazı

#### 2.4. Exploration and exploitation phase

BKO'nun matematiksel modelini oluşturan denklemlerden bahsedildi. Buna göre bu denklemler içerisinde kullanılan ve keşif ve sömürü yeteneğini artıran parametreler şunlardır:

$\mu$ : BKO'nun yerel optimuma takılmasını önleyerek keşif fazını kontrol eder.

$p_1, p_2$ : Köpek balıklarının yerel ve global arama esansındaki hızlarını ayarlamak için kullanılır. BKO'nun iterasyonları boyunca bu değerler güncellenir. BKO'nun başarısı üzerinde oldukça etkisi vardır.

$mv$ : İlk iterasyonlarda av ve köpek balığı arasındaki mesafe oldukça fazladır.  $mv$ 'ye göre beyaz köpek balıklarının konumu güncellenir. Denklem içerisinde kullanılan  $c_1$  ve  $c_2$  parametreleri sırasıyla sömürü ve keşif kapasitesini artırmayı hedeflerler.

$(\omega_{t+1}^i)' = \omega_{bestpos_t} + rnd_1 \times \overrightarrow{Dist_\omega} \times sgn(rnd_2 - 0.5)$ : Denklem 14'teki  $sgn(rnd_2 - 0.5)$ , keşfin yönünü kontrol eder.  $rnd_2$  sayesinde, negatif ve pozitiflerin eşit olasılığı olan tutarlı bir dağılım sağlar.  $rnd_1$  ise arama uzayında çözümlerin rastgele davranmasına yardımcı olur

## 3. İkili Beyaz Köpek Balığı Optimizasyon Algoritması (İBKO)

### 3. Binary White Shark Optimization Algorithm (BWSO)

Metasezgisel algoritmalarda arama uzayının, popülasyonun her bir bireyi için kayan nokta konum vektörüne sahip sürekli bir uzay olduğu kabul edilir. BKO'nun temel versiyonu da sürekli optimizasyon problemlerini çözüm getirmek için önerilmiştir. Bu problemler temel kalite testi fonksiyonları olabileceği gibi gerçek dünya problemleri de olabilir (Dhiman & Kumar, 2019; Houssein, Saad, Hashim, Shaban, & Hassaballah, 2020; Y. Li, Zhu, & Liu, 2020). BKO'nun ikili versiyonu olan İBKO'da gerçekleştirilen, transfer fonksiyonuna göre sürekli verilerinin ikili değerlere dönüştürülmesidir. Bu çalışmada ise S, V ve U şekilli transfer fonksiyonları ile BKO'nun ikili versiyonları elde edilmiş ve sırasıyla SBKO, VBKO ve UBKO olarak isimlendirilmiştir.

S-şekilli transfer fonksiyonun matematiksel ifadesi denklem 18'de ve grafiği Şekil 2a'da verilmiştir.

$$S(x_i^{dim}(t+1)) = 1 / (1 + e^{-x_i^{dim}(t)}) \quad (18)$$

Burada  $S(x_i^{dim}(t+1))$ ,  $i$ . bireyin ikili konum değerinin  $dim$ . boyuttaki değişme olasılığını verir. Daha sonra denklem 19'daki gibi eşik değeri ile karşılaştırılarak ikili değer belirlenir. Burada  $rand$ , normal dağılıma sahip  $[0,1]$  aralığında rastgele bir değer değeridir.

$$x_i^{dim}(t+1) = \begin{cases} 1, & rand \leq S(x_i^{dim}(t+1)) \\ 0, & dd \end{cases} \quad (19)$$

V-şekilli transfer fonksiyonun matematiksel ifadesi denklem 20'de ve grafiği Şekil 2b'de verilmiştir.

$$V(x_i^{dim}(t+1)) = \left| \frac{2}{\pi} \arctan \left( \frac{\pi}{2} (x_i^{dim}(t)) \right) \right| \quad (20)$$

Burada  $V(x_i^{dim}(t+1))$ ,  $i$ . bireyin ikili konum değerinin  $dim$ . boyuttaki değişme olasılığını verir. İkili değerlerin belirlenmesi denklem 21 ile gerçekleştirilir.

$$x_i^{dim}(t+1) = \begin{cases} 1, & rand \leq V(x_i^{dim}(t+1)) \\ 0, & dd \end{cases} \quad (21)$$

Son olarak U-şekilli transfer fonksiyonunun matematiksel ifadesi denklem 22'de ve grafiği Şekil 2c'de verilmiştir. Burada,  $U(x_i^{dim}(t+1))$ ,  $i$ . bireyin ikili konum değerinin  $dim$ . boyuttaki değişme olasılığını verir.  $\alpha$  ve  $\beta$  kontrol parametreleri olmak üzere;  $\alpha$ , transfer fonksiyonunun eğimini ve  $\beta$ , kullanılan transfer fonksiyonunun havuz genişliğini temsil eder.

$$U(x_i^{dim}(t+1)) = \alpha |x_i^{dim}(t)|^\beta \quad (22)$$

İkili değerler ise denklem 23 ile üretilir.

$$x_i^{dim}(t+1) = \begin{cases} 1, & rand \leq U(x_i^{dim}(t+1)) \\ 0, & dd \end{cases} \quad (23)$$

Buna göre BKO'nun ikilileştirilmiş versiyonuna ilişkin algoritma aşağıdaki gibidir.

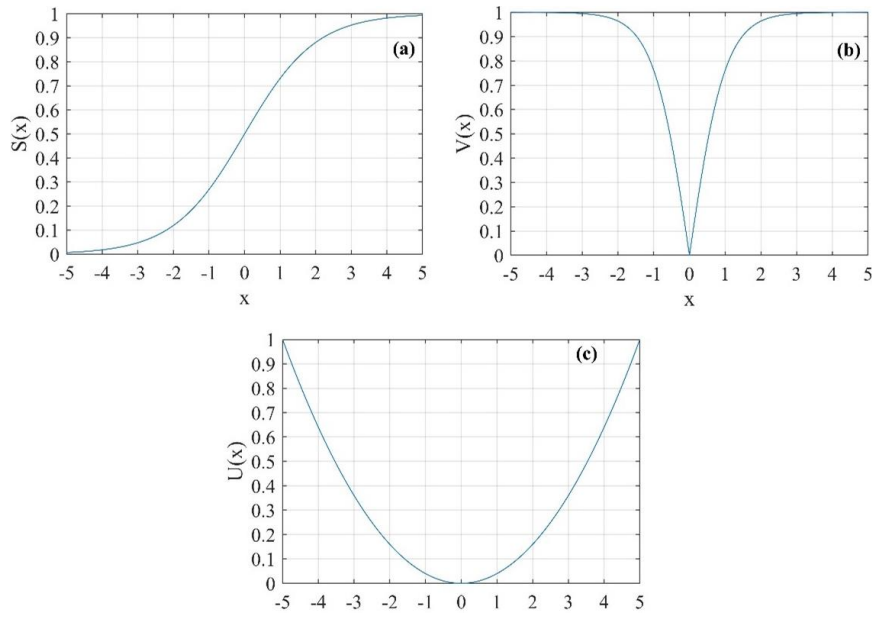
---

```

1: Problem parametreleri başlatılır.
2: BKO'nun parametreleri başlatılır.
3: Rastgele başlangıç konumları üretilir.
4: Başlangıç popülasyonun hızları başlatılır ve konumları değerlendirilir.
5: while(t<T) do
6:    $\vartheta$ ,  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $\mu$ ,  $av$ ,  $bv$ ,  $\omega_0$ ,  $f_{wavy}$ ,  $mv$ ,  $ss$  güncellenir.
7:   for i=1:N do
8:      $\vartheta_{t+1}^i = \mu [\vartheta_t^i + p_1(\omega_{bestpos_t} - \omega_t^i) \times r_1 + p_2(\omega_{best}^{\vartheta_t} - \omega_t^i) \times r_2]$ 
9:   end for
10:  for i=1:N do
11:    if rand < mv then
12:       $\omega_t^i \times \neg \oplus \omega_0 + up \times av + low \times bv$ 
13:    else
14:       $\omega_t^i + \vartheta_t^i / f_{wavy}$ 
15:    end if
16:  end for
17:  for i=1:N do
18:    if rand < ss then
19:       $\overrightarrow{Dist}_\omega = |[(rand \times (\omega)_{bestpos_t} - \omega_t^i)]|$ 
20:      if i==1 then
21:         $(\omega_{t+1}^i) = \omega_{bestpos_t} + rnd_1 \times \overrightarrow{Dist}_\omega \times sgn(rnd_2 - 0.5)$ 
22:      else
23:         $(\omega_{t+1}^i)' = \omega_{bestpos_t} + rnd_1 \times \overrightarrow{Dist}_\omega \times sgn(rnd_2 - 0.5)$ 
24:         $\omega_{t+1}^i = \omega_t^i + (\omega_{t+1}^i)' / (2 \times rand)$ 
25:      end if
26:    end if
27:  end for
28: Değerlendirilir ve pozisyonlar güncellenir.
29: Transfer fonksiyonu (TF) seçilir (S, V veya U).
30:   if rand ≤ ( $\omega_{t+1}^i$ ) then
31:      $\omega_{t+1}^i = 1$ 
32:   else
33:      $\omega_{t+1}^i = 0$ 
34:   end if
35: end while
36: Optimal sonuçları döndürülür.

```

---



**Şekil 2.** Transfer fonksiyonları (a) S-şekilli (b) V-şekilli (c) U-şekilli.  
**Figure 2.** Transfer functions (a) S-shaped (b) V-shaped (c) U-shaped.

#### 4. Deneysel Sonuçlar

##### 4. Experimental Results

Deneysel çalışmalar MATLAB R2016a versiyonunda, AMD Ryzen 5 3500X 6-çekirdek işlemci ve 16 GB RAM belleğe sahip bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntemler için UCI veri deposundan alınan 8 farklı kalite testi seti kullanılmıştır. Bu verilere ait öznitelik sayısı, örnek sayısı, sınıf sayısı, çalışma alanı ve sınıf dağılımı bilgileri Tablo 1’de açıklanmıştır.

**Tablo 1.** Kullanılan veri setleri ve özellikleri

**Table 1.** Datasets used and their properties

Veri seti	Öznitelik sayısı	Örnek sayısı	Sınıf sayısı	Çalışma alanı	Sınıf dağılımı
Sonar	60	208	2	Biyoloji	%46, %54
Ionosphere	33	351	2	Elektromanyetik	%35, %65
Breast cancer	9	699	2	Biyoloji	%65, %35
Clean1	168	476	2	Yapay	%43, %57
Spect	22	267	2	Biyoloji	%20, %80
Waveform	40	5000	3	Fizik	%34, %33, %33
Satellite	36	6435	6	Fiziksel	%23, %11, %21, %10, %12, %23
Spambase	57	4061	2	Bilgisayar	%69, %31

Her bir veri seti için önerilen üç yaklaşım 30 tekrarla çalıştırılmıştır. İstatistiksel sonuçlar olarak ortalama uygunluk değeri (OUD), ortalama sınıflandırma doğruluğu (OSD), ortalama seçilen örnek sayısı (OSÖS) ve bunların standart sapma değerleri (SS) hesaplanmıştır. Maksimum iterasyon sayısı (epok) 100 olarak belirlenmiş ve sınıflandırıcı olarak k-en yakın komşuluk (k-EYK) sınıflandırıcı 5 komşuluk değeri için uygulanmıştır. Sınıflandırma verileri, %80 eğitim-%20 test verisi olacak şekilde rastgele olarak oluşturulmuştur. Önerilen SBKO, VBKO ve UBKO yöntemleri; İAAO, İPSO (Khanesar, Teshnehlab, & Shoorehdeli, 2007), İHŞO, İGKO, İGAO algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. Her bir algoritmanın başlangıç ve temel parametreleri Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2.** Algoritmaların parametre ayarları  
**Table 2** Parameter settings of the algorithms

Algoritma	Parametre	Değer
İBKO	$f_{\min}$	0.07
	$f_{\max}$	0.75
	$\tau$	4.125
	$a_0$	6.25
	$a_1$	100
	$a_2$	0.0005
İAAO	$\alpha$	50
	$\beta$	0.2
İPSO	$c_1, c_2$	2
	$w_{\min}$	0.4
İHŞO	$w_{\max}$	0.9
	$\beta$	1.5
İGKO	$a$	[2 0]

Adil bir karşılaştırma yapabilmek adına her algoritma rastgele olarak başlatılmış ve popülasyon sayısı, maksimum iterasyon ve koşum sayısı algoritmalar arasında eşit tutulmuştur. Uygunluk fonksiyonu parametresi  $\alpha=0.99$  olarak alınmıştır. Önerilen algoritmaların başarısını ispatlamak ve elde edilen sonuçların tutarlılığını göstermek için Friedman sıralama testi uygulanmış ve yöntemler kendi aralarında derecelendirilmiştir.

#### 4.1. Önerilen yöntemlerin sayısal sonuçları

##### 4.1. Numerical results of the proposed methods

İlk olarak önerilen S, V ve U-şekilli versiyonlar farklı popülasyon sayıları için ( $N=[10, 20, 30, 50]$ ) uygulanmış ve gelecek işlemlerde kullanılacak olan optimum popülasyon sayısı belirlenmiştir. Popülasyon değerlerine göre S, V ve U-şekilli transfer fonksiyonlarına göre OSD sonuçları sırasıyla Tablo 3-5'te verilmiştir. Tablo 3'te SBKO'ya göre en yüksek OSD doğruluğu tüm veri setleri için en yüksek değerine  $N=50$  olduğu durumda ulaşmıştır. Tablo 4'te VBKO için, Breast cancer ve Waveform veri setlerinde ideal popülasyon sayısı  $N=30$  iken, diğer veri setleri için yine  $N=50$  olarak tespit edilmiştir. Son olarak Tablo 5'te ise UBKO OSD sonuçlarına göre Waveform veri seti için  $N=10$ , Satellite veri seti için  $N=30$  ve geri kalan veri setleri için  $N=50$  olarak gözlemlenmiştir.

**Tablo 3.** SBKO'nun farklı popülasyon boyutları için OSD sonuçları  
**Table 3.** ACA results of the SWSO for different population values

Veri seti	10		20		30		50	
	OSD	$\pm SS$	OSD	$\pm SS$	OSD	$\pm SS$	OSD	$\pm SS$
Sonar	0.8376	0.0215	0.8390	0.0285	0.8372	0.0143	<b>0.8540</b>	0.0146
Ionosphere	0.9059	0.0092	0.9085	0.0060	0.9097	0.0066	<b>0.9140</b>	0.0071
Breast cancer	0.9843	0.0015	0.9842	0.0014	0.9844	0.0012	<b>0.9845</b>	0.0013
Clean1	0.9123	0.0098	0.9181	0.0097	0.9236	0.0104	<b>0.9251</b>	0.0089
Spect	0.8784	0.0121	0.8845	0.0094	0.8890	0.0109	<b>0.8980</b>	0.0118
Waveform	0.8569	0.0054	0.8622	0.0057	0.8532	0.0082	<b>0.8695</b>	0.0037
Satellite	0.9246	0.0034	0.9247	0.0032	0.9252	0.0026	<b>0.9252</b>	0.0017
Spambase	<b>0.9530</b>	0.0038	0.9423	0.0055	0.9436	0.0042	<b>0.9439</b>	0.0052

**Tablo 4.** VBKO'nun farklı popülasyon boyutları için OSD sonuçları  
**Table 4.** ACA results of the VWSO for different population values

Veri seti	10		20		30		50	
	OSD	$\pm SS$	OSD	$\pm SS$	OSD	$\pm SS$	OSD	$\pm SS$
Sonar	0.8562	0.0210	0.8685	0.0196	0.8807	0.0143	<b>0.8890</b>	0.0227
Ionosphere	0.9355	0.0054	0.9358	0.0061	0.9371	0.0074	<b>0.9477</b>	0.0063
Breast cancer	0.9843	0.0013	0.9838	0.0012	<b>0.9849</b>	0.0012	0.9843	0.0014
Clean1	0.9229	0.0226	0.9468	0.0318	0.9523	0.0313	<b>0.9754</b>	0.0245
Spect	0.8834	0.0187	0.8924	0.0122	0.8969	0.0116	<b>0.9030</b>	0.0097

**Tablo 4.** Devamı  
*Table 4. continuing*

Waveform	0.8567	0.0100	0.8618	0.0045	<b>0.8635</b>	0.0066	0.8625	0.0056
Satellite	0.9212	0.0030	0.9228	0.0028	0.9220	0.0035	<b>0.9240</b>	0.0020
Spambase	0.9393	0.0045	0.9399	0.0034	0.9412	0.0040	<b>0.9437</b>	0.0029

**Tablo 5.** UBKO'nun farklı popülasyon boyutları için OSD sonuçları  
*Table 5. ACA results of the UWSO for different population values*

Veri seti	10		20		30		50	
	OSD	±SS	OSD	±SS	OSD	±SS	OSD	±SS
Sonar	0.9456	0.0180	0.9598	0.0159	0.9703	0.0154	<b>0.9754</b>	0.0103
Ionosphere	0.9783	0.0137	0.9840	0.0116	0.9911	0.0057	<b>0.9938</b>	0.0070
Breast cancer	0.9825	0.0026	0.9838	0.0026	0.9844	0.0009	<b>0.9843</b>	0.0011
Clean1	0.9712	0.0200	0.9853	0.0103	0.9862	0.0089	<b>0.9919</b>	0.0083
Spect	0.9262	0.0102	0.9307	0.0114	0.9352	0.0083	<b>0.9421</b>	0.0092
Waveform	<b>0.8592</b>	0.0076	0.8516	0.0036	0.8528	0.0030	0.8551	0.0058
Satellite	0.9202	0.0037	0.9231	0.0027	<b>0.9247</b>	0.0031	0.9245	0.0018
Spambase	0.9361	0.0119	0.9404	0.0130	0.9408	0.0133	<b>0.9421</b>	0.0143

Ancak genel olarak popülasyon boyutlarına göre OSD değerlerine bakıldığında sonuçlar birbirine oldukça yakındır. Örneğin Tablo 4'e göre VBKO için Breast cancer veri setinde, N=30'un N=50'ye göre doğruluk oranı yalnızca %0.04 daha iyidir. Durum Waveform veri seti için de farklı değildir. Tablo 5'te ise Waveform veri seti N=10 değerinde 0.8592 sınıflandırma doğruluğu elde edilmişken, N=50 için bu değer 0.8551'dir ve yine Tablo 4'tekine benzer bir oran söz konusudur. Bu oran çok küçük olduğundan, bundan sonraki karşılaştırmaların tümü N=50 için gerçekleştirilmiştir.

Buna göre N=50 için OSD değerleri Tablo 6'da özetlenmiştir. Burada, Breast cancer, Waveform ve Satellite veri setleri için SBKO ile diğer versiyonlarına göre daha yüksek sınıflandırma doğruluğu elde edildiği sonucuna varılmaktadır. Geri kalan veri setleri için ise UBKO'nun diğer versiyonlarından daha yüksek OSD'ye sahip olduğu görülmektedir.

**Tablo 6.** Önerilen yöntemlerin OSD değerlerine göre karşılaştırılması  
*Table 6. Comparison of the proposed methods according to their ACA values*

Veri seti	SBKO		VBKO		UBKO	
	OSD	±SS	OSD	±SS	OSD	±SS
Sonar	0.8540	0.0146	0.8813	0.0269	<b>0.9365</b>	0.0554
Ionosphere	0.9140	0.0071	0.9378	0.0154	<b>0.9686</b>	0.0370
Breast cancer	<b>0.9845</b>	0.0013	0.9843	0.0014	0.9843	0.0011
Clean1	0.9251	0.0089	0.9754	0.0245	<b>0.9920</b>	0.0129
Spect	0.9005	0.0094	0.9030	0.0097	<b>0.9297</b>	0.0223
Waveform	<b>0.8695</b>	0.0037	0.8628	0.0059	0.8634	0.0061
Satellite	<b>0.9252</b>	0.0017	0.9240	0.0020	0.9244	0.0019
Spambase	0.9421	0.0042	0.9438	0.0030	<b>0.9451</b>	0.0045

Metasezgisel algoritmaların başarıları uygunluk değerlerine göre yorumlanır. Uygunluk değeri ise aslında bir hata değeridir ve başarılı bir MA'nın düşük hata değeri üretmesi beklenir. Uygunluk değeri, denklem 24'e göre hesaplanır.

$$Fit = \alpha \times err + \beta \frac{|Self|}{|TotF|} \quad (24)$$

Burada;  $\alpha$  ve  $\beta$ , sınıflandırma kalitesini ve öznelik indirgemelerini etkileyen iki parametredir.  $\beta$ ,  $1-\alpha$  değerine eşittir.  $err$ , sınıflandırıcıdan elde edilen hata oranıdır. Bu çalışma için k-EYK sınıflandırıcısından elde edilen hata değerine karşılık gelmektedir.  $|Self|$ , seçilen öznelik sayısını ifade ederken,  $|TotF|$  ise toplam öznelik sayısını temsil eder. Buna göre önerilen yöntemler için OUD sonuçları Tablo 7'de rapor edilmiştir. Burada, denklem 24'ten de yorumlanacağı üzere Tablo 6'yı destekleyen uygunluk değerleri üretilmiştir.



**Tablo 7.** Önerilen yöntemlerin ortalama uygunluk değerlerine (OUD) göre karşılaştırılması  
**Table 7.** Comparison of the proposed methods according to their average fitness values (AFV)

Veri seti	SBKO		VBKO		UBKO	
	OUD	±SS	OUD	±SS	OUD	±SS
Sonar	0.1519	0.0149	0.1242	0.0270	<b>0.0687</b>	0.0556
Ionosphere	0.0917	0.0072	0.0667	0.0161	<b>0.0357</b>	0.0379
Breast cancer	<b>0.0216</b>	0.0000	<b>0.0216</b>	0.0000	<b>0.0216</b>	0.0000
Clean1	0.0810	0.0090	0.0296	0.0250	<b>0.0132</b>	0.0130
Spect	0.1053	0.0096	0.1030	0.0096	<b>0.0763</b>	0.0226
Waveform	<b>0.1376</b>	0.0036	0.1446	0.0055	0.1446	0.0058
Satellite	<b>0.0816</b>	0.0012	0.0827	0.0016	0.0822	0.0019
Spambase	0.0636	0.0040	0.0624	0.0031	<b>0.0616</b>	0.0037

Bir başka karşılaştırma metriği ise seçilen öznitelik sayısıdır. Her ne kadar sonuçlar, önerilen üç versiyon için de sınıflandırma doğruluğu ve uygunluk değerleri açısından tatmin edici olsa da bu değerlerin en az öznitelik ile elde edilmesi de önerilen yöntemin başarısına katkıda bulunacaktır. Tablo 8’de önerilen yöntemlerin OSÖS değerleri verilmiştir.

**Tablo 8.** Önerilen yöntemlerin OSÖS değerlerine göre karşılaştırılması  
**Table 8.** Comparison of the proposed methods according to the ANSF values

Veri seti	SBKO		VBKO		UBKO	
	OSÖS	±SS	OSÖS	±SS	OSÖS	±SS
Sonar	26.1364	9.1459	<b>25.6364</b>	8.7098	27.0455	7.0405
Ionosphere	16.1250	2.9534	<b>12.9583</b>	6.2169	13.2917	4.8318
Breast cancer	5.2759	1.1618	<b>5.1034</b>	1.2348	5.1379	1.0255
Clean1	88.4615	8.1610	<b>79.6875</b>	10.9467	84.6250	14.3475
Spect	<b>10.2632</b>	2.7252	11.0000	2.1264	11.3333	2.5988
Waveform	<b>22.6667</b>	7.1063	23.7778	5.0936	26.2222	5.2863
Satellite	21.6154	2.7549	21.0556	3.1895	<b>21.0000</b>	3.0870
Spambase	26.1364	9.1459	<b>25.6364</b>	8.7098	27.0455	7.0405

Burada veri setine göre farklı versiyonlarda başarı gözlenmiştir. SBKO ile ortalama olarak Spect veri setinde 22’den 10.2632’e ve Waveform veri setinde 40’tan 22.6667 düzeyinde indirgeme gerçekleşmiştir. VBKO ortalama olarak, Sonar veri setinde 60’tan 25.6364, Ionosphere veri setinde 34’ten 12.9583, Breast cancer veri setinde 9’dan 5.1034, Clean1 veri setinde 166’dan 79.6875 ve Spambase veri setinde 57’den 25.6364 öznitelige indirgeme sağlamıştır. UBKO ise Satellite veri seti için 35 öznitelikten 21 öznitelige indirgeme sağlamış ve bu sayıyı 21.0556 ile VBKO takip etmektedir.

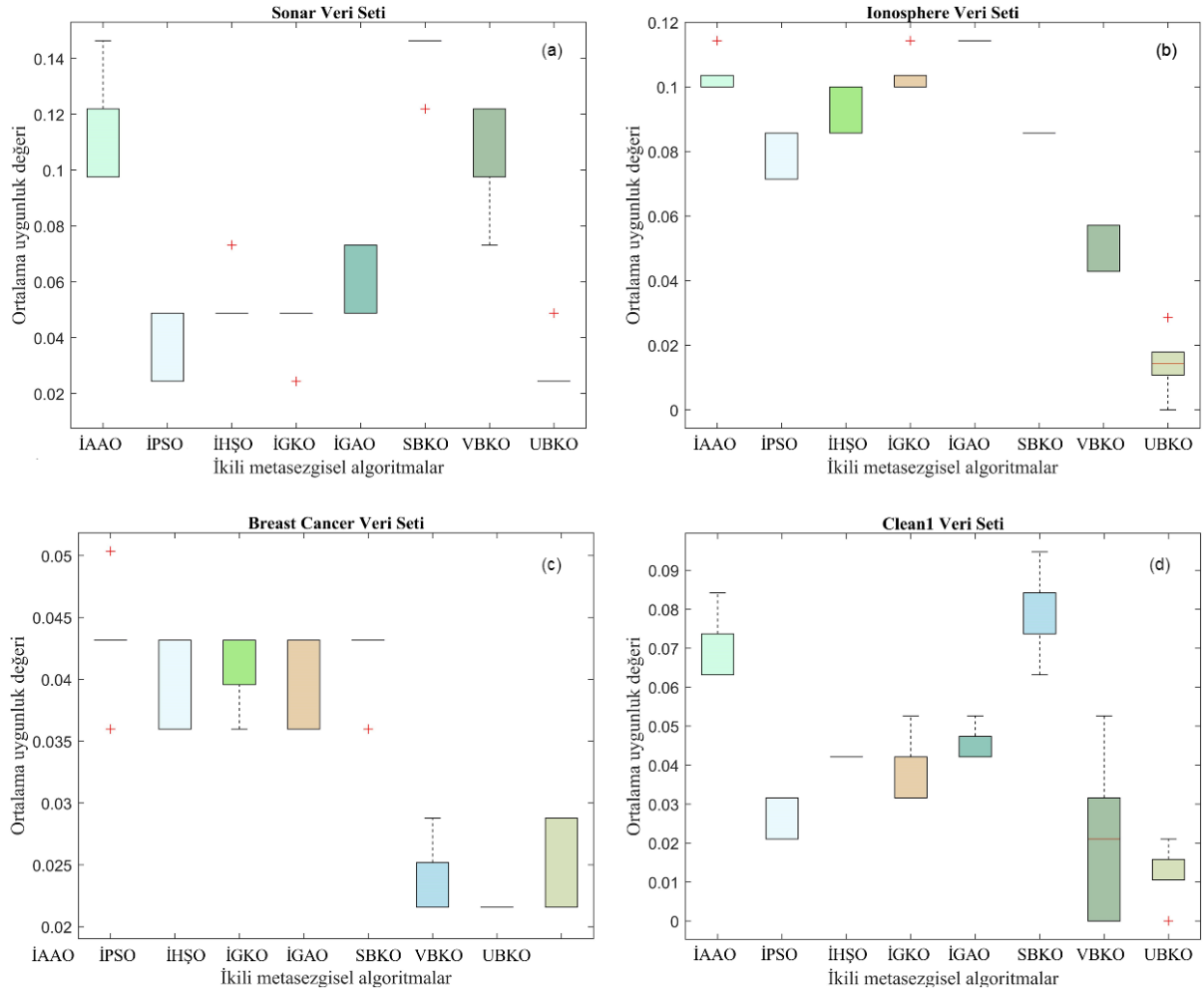
#### 4.2. Önerilen yöntemlerin diğer ikili yöntemlerle karşılaştırılması

##### 4.2. Comparison of the proposed methods with other binary methods

Bu kısımda SBKO, VBKO ve UBKO önerilen yöntemlerinin diğer ikili metasezgisel algoritmalarla karşılaştırılması yapılmıştır. Bu karşılaştırmada kullanılacak olan algoritmalar, literatürde popüler ve bilinen algoritmalar olan ikili atom arama optimizasyonu (İAAO), ikili parçacık sürü optimizasyonu (İPSO), ikili gri kurt (İGKO), ikili Harris’in şahinleri optimizasyonu (İHŞO) ve ikili güve alevi optimizasyonu (İGAO)’dur. Tüm veri setlerinin değerlendirilmesinde k-EYK sınıflandırıcı kullanılmış ve k değeri 5 olarak belirlenmiştir.

Tüm algoritmalar, tüm veri setleri üzerinde daha önceki bölümlerde bahsedilen metriklerle değerlendirilmiştir. Şekil 3-4’te, farklı veri setleri için 8 farklı öznitelik seçim algoritmasının karşılaştırılması grafiksel olarak görselleştirilmiştir. Karşılaştırma metriği olarak OUD kullanılmıştır. Buna göre Şekil 3a’da Sonar veri seti için, UBKO’nun en iyi uygunluk değerine sahip olduğu ve bu değeri İHŞO ve İGKO’nun takip ettiği söylenebilir. Şekil 3b’de Ionosphere için yine UBKO belirgin bir farkla en iyi uygunluk değerine sahiptir. Breast cancer veri seti için Şekil 3c’de önerilen üç versiyonun da başarılı olduğu yorumu yapılabilir. Şekil 3d’ye göre ise Clean1 veri seti için VBKO daha başarılı olmuştur.

Şekil 4a’da Spect veri setinde UBKO’nun belirgin bir uygunluk değerine sahip olduğu açıktır. Şekil 4b, 4c ve 4d için önerilen yöntemlerin birbirine yakın uygunluk değerleri ürettiği ve karşılaştırılan diğer yöntemlerden daha başarılı oldukları söylenebilir.



**Şekil 3.** Önerilen yöntemlerin farklı ikili metotlarla OUD'ye göre karşılaştırma sonuçları. (a) Sonar veri seti (b) Ionosphere veri seti (c) Breast cancer veri seti (d) Clean1 veri seti.

**Figure 3.** Comparison results of proposed methods with different binary methods according to ACA. (a) Sonar dataset (b) Ionosphere dataset (c) Breast cancer dataset (d) Clean1 dataset.

Şu ana kadarki ortalama sınıflandırma doğruluğu ve ortama uygunluk değeri sonuçlarına bakıldığında, önerilen yöntemler içerisinde UBKO'nun genel olarak başarılı sonuçlar ürettiği yorumu yapılabilir. Ancak bu yorumun net bir şekilde yapılabilmesi için verilerin sınıf dağılımlarına göre de incelenmesi gerekmektedir. Çünkü dengeli olmayan veriler için tek başına sınıflandırma doğruluğu ve uygunluk değeri yeterli olmayabilir. Bu nedenle mikro ve makro F1 skor değerlerinin de hesaplanması gerekir.

F1 skoru, sınıf başına hesaplanan bir metriktir. Birden fazla sınıf içeren bir veri kümesi için genel F1 skoru, mikro ve makro toplama yöntemleri ile elde edilir. F1 skoru denklem 25 ile, denklem 26 ve 27'yi kullanarak hesaplanır.

$$F1 \text{ Skoru} = 2 \times \frac{\text{Kesinlik} \times \text{Duyarlılık}}{\text{Kesinlik} + \text{Duyarlılık}} \quad (25)$$

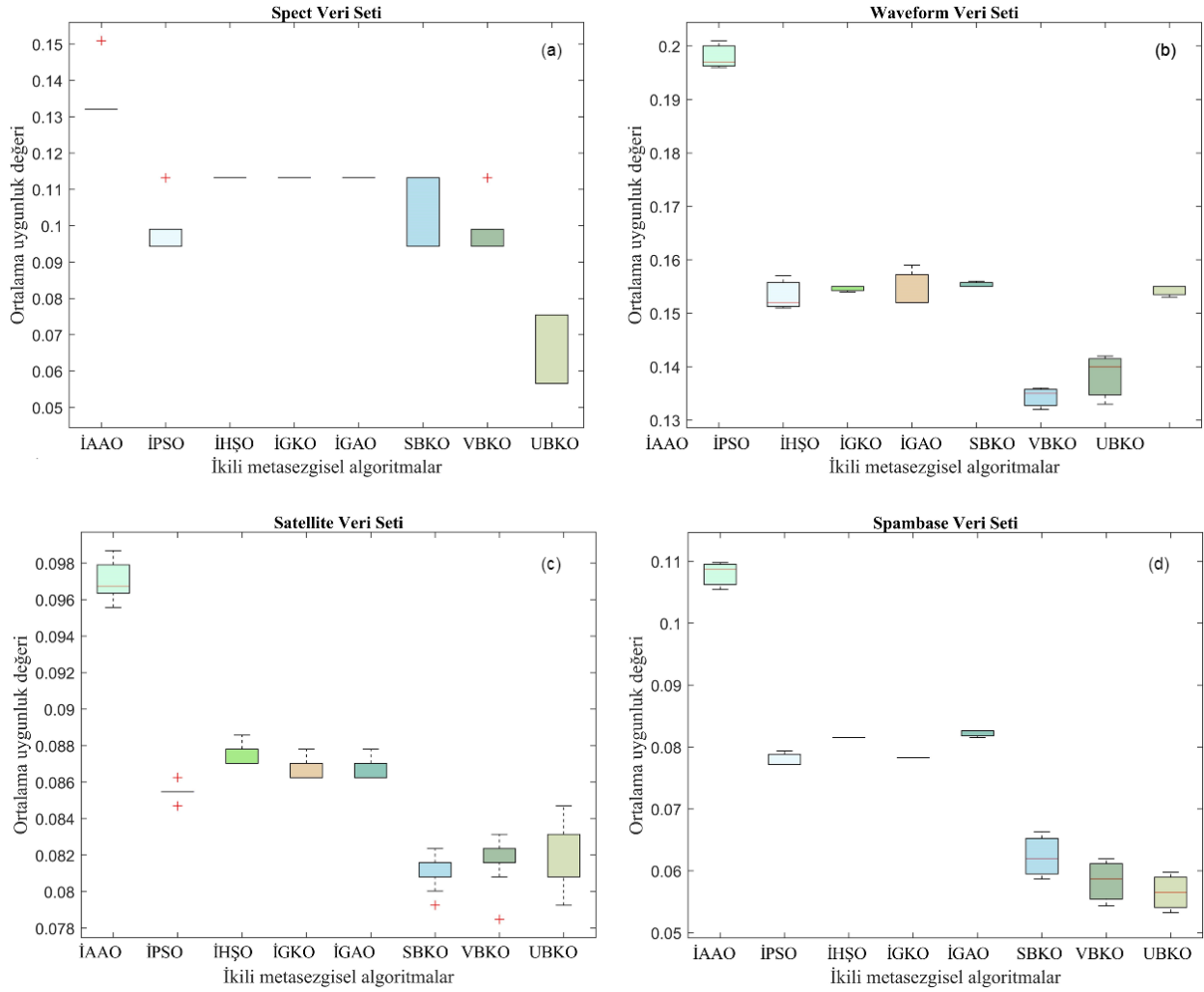
$$\text{Kesinlik} = \frac{DP}{DP + YP} \quad (26)$$

$$\text{Duyarlılık} = \frac{DP}{DP + YN} \quad (27)$$

Doğru Pozitif (DP): Pozitif olan verilerin pozitif olarak bulunma oranı

Yanlış Pozitif (YP): Negatif olanların pozitif olarak bulunma oranı

Yanlış Negatif (YN): Pozitif olanların negatif olarak bulunma oranı



**Şekil 4.** Önerilen yöntemlerin farklı ikili metotlarla OUD'ye göre karşılaştırma sonuçları. (a) Spect veri seti (b) Waveform veri seti (c) Satellite veri seti (d) Spambase veri seti.

**Figure 4.** Comparison results of proposed methods with different binary methods according to ACA. (a) Spect dataset (b) Waveform dataset (c) Satellite dataset (d) Spambase dataset.

Mikro F1 skoru normal F1 formülüne karşılık gelir ancak her sınıf için ayrı ayrı olmak yerine, toplam DP, YP ve YN değerlerine bağlıdır ve denklem 28'e göre hesaplanır.

$$\text{Mikro F1 Skoru} = \frac{DP}{DP + 0.5 \times (YP + YN)} \quad (28)$$

Makro F1 skoru, sınıf başına hesaplanan F1 puanlarının ağırlıksız ortalamasıdır ve denklem 29'daki gibi hesaplanır.

$$\text{Makro F1 Skoru} = \frac{F1 \text{ skorları toplamı}}{\text{sınıf sayısı}} \quad (29)$$

Tablo 9'da UBKO'nun F1-skoruna göre diğer metasezgisel algoritmalarla karşılaştırılmasına yer verilmiştir. Buna göre, Spect veri setinin mikro ve makro F1-skor değerlerinin arasındaki farkın belirgin ölçüde olduğu ve bu da veri setinin dengeli olmayan veri seti olduğu yorumunu ortaya çıkarır. Mikro ve makro-F1 skorlarına göre, Sonar, Clean1 ve Spambase veri setleri hariç, diğer tüm veri setlerinde en yüksek değerler elde edilmiştir. Sonar ve Spambase için en iyi F1 skorlarını İGKO sağlarken, Clean1 için İAAO sağlamıştır. Ancak, mikro ve makro F1 skorlarının hesaplanması, daha çok Spect veri seti için anlamlıdır ve Spect veri seti için UBKO hem mikro hem de makro F1 skoru açısından diğer yöntemlerden daha yüksek değere sahiptir.

**Tablo 9.** Mikro ve makro F1 skorlarının karşılaştırılması**Table 9.** Comparison of micro and macro F1 scores

Veri seti	UBKO		İAAO		İPSO		İHŞO		İGKO		İGAO	
	Mikro F1	Makro F1	Mikro F1	Makro F1	Mikro F1	Makro F1	Mikro F1	Makro F1	Mikro F1	Makro F1	Mikro F1	Makro F1
Sonar	0.8390	0.8365	0.8146	0.8131	0.8293	0.8240	0.7805	0.7793	0.9114	0.8913	0.7415	0.7232
Ionosphere	0.8914	0.8750	0.8029	0.7568	0.8857	0.8674	0.8771	0.8308	0.8143	0.7918	0.8229	0.7701
Breast cancer	0.9856	0.9831	0.9453	0.9372	0.9604	0.9588	0.9496	0.9407	0.9496	0.9464	0.9410	0.9294
Clean1	0.9095	0.9092	0.8358	0.8320	0.9158	0.9139	0.8358	0.8343	0.9145	0.8992	0.8526	0.8526
Spect	0.8340	0.7691	0.7547	0.6330	0.7925	0.7307	0.7925	0.7102	0.7170	0.6757	0.7585	0.6803
Waveform	0.8360	0.8360	0.7724	0.7719	0.7945	0.7943	0.7670	0.7663	0.8280	0.8282	0.7078	0.7059
Satellite	0.9223	0.9057	0.8931	0.8725	0.9037	0.8851	0.9040	0.8896	0.9153	0.9029	0.8886	0.8676
Spambase	0.9091	0.8921	0.7996	0.7889	0.9022	0.8983	0.7976	0.7895	0.9342	0.9309	0.8715	0.8621

### 4.3. Freidman sıralama testi değerlendirmesi

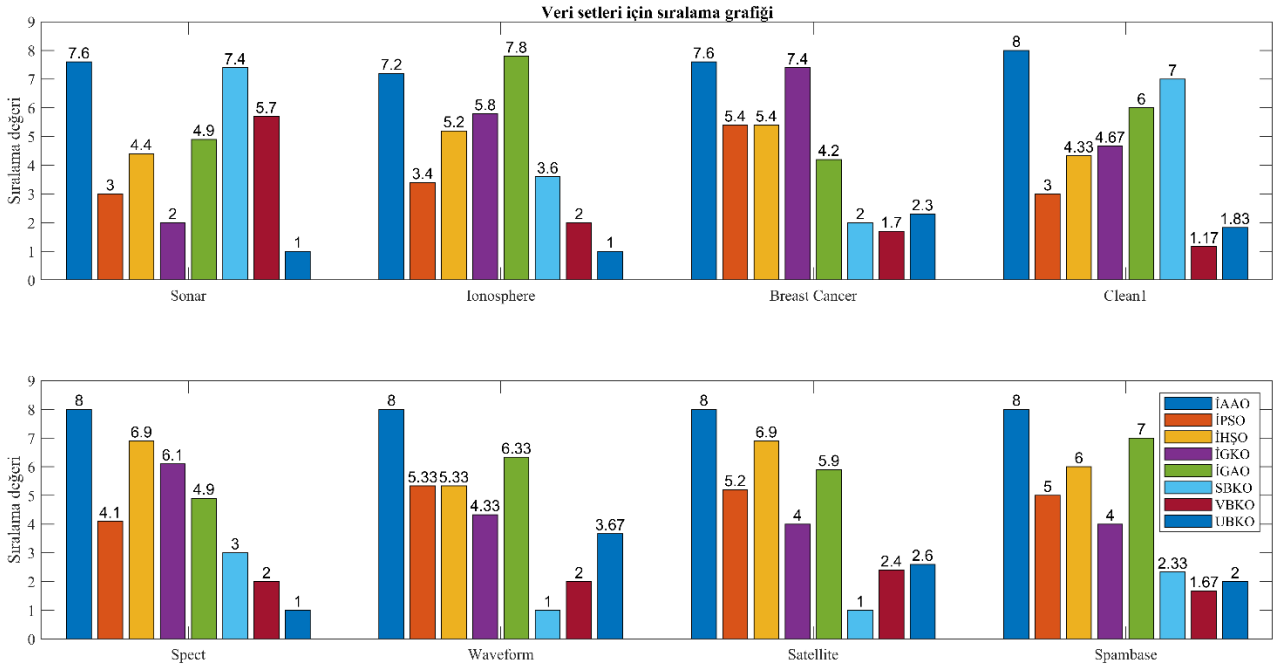
#### 4.3. Evaluation of the Freidman's rank test

Önerilen yöntemlerin önemini kanıtlamak için istatistiksel testlerin yapılması gerekli görülebilir. Bu bağlamda, Friedman sıralama testi kullanılarak, önerilen yöntemlerin karşılaştırılan algoritmalar arasındaki başarıları derecelendirilmiştir. Friedman sıralama testi, ortalama değerler üzerinden sonuçların birbirlerinden anlamlı bir şekilde ayrılıp ayrılmadığını test eden istatistiksel bir yöntemdir (Friedman, 1940).

Tablo 9'da OSD ve SS değerlerine göre Friedman sıralama test sonuçları verilmiştir. Burada SBKO, VBKO ve UBKO, Ionosphere, Breast cancer, Spect, Waveform, Satellite ve Spambase veri setlerinde ilk üçe yerleşmeyi başarmıştır. Clean1 veri setinde ise VBKO ve UBKO versiyonları yüksek sınıflandırma doğruluğu ile sırasıyla 1. ve 2. Sıradadır. Son olarak Sonar veri seti için önerilen yöntemler arasında UBKO'nun başarıları en yüksektir. Bunu İGKO ve İPSO takip etmektedir. Tablo 10'daki gibi hesaplanan sıralama değerleri Şekil 5'teki görselleştirilmiştir. Buradan da önerilen yöntemlerin analiz edilen veri setlerinin büyük çoğunluğunda karşılaştırılan diğer MA'lardan başarılı olduğu yorumu açıkça yapılabilir.

**Tablo 10.** OSD ve SS değerlerine göre sıralama analizi sonuçları**Table 10.** Rank analysis results according to ACA and SD values

Veri seti		İAAO	İPSO	İHŞO	İGKO	İGAO	SBKO	VBKO	UBKO
Sonar	OSD	0.8690	0.9566	0.9506	0.9578	0.9382	0.8768	0.9117	0.9768
	±SS	0.0136	0.0005	0.0105	0.0003	0.0099	0.0091	0.0120	0.0020
	Sıralama	7.60	<b>3.00</b>	4.40	<b>2.00</b>	4.90	7.40	5.70	<b>1.00</b>
Ionosphere	OSD	0.8998	0.9266	0.9094	0.9028	0.8914	0.9203	0.9533	0.9859
	±SS	0.0061	0.0071	0.0067	0.0056	0.0003	0.0002	0.0059	0.0100
	Sıralama	7.20	3.40	5.20	5.80	7.80	<b>3.60</b>	<b>2.00</b>	<b>1.00</b>
Breast cancer	OSD	0.9605	0.9677	0.9677	0.9617	0.9695	0.9860	0.9862	0.9857
	±SS	0.0027	0.0000	0.0000	0.0000	0.0010	0.0006	0.0005	0.0006
	Sıralama	7.60	5.40	5.40	7.40	4.20	<b>2.00</b>	<b>1.70</b>	<b>2.30</b>
Clean1	OSD	0.9276	0.9734	0.9631	0.9580	0.9539	0.9323	0.9981	0.9963
	±SS	0.0052	0.0002	0.0003	0.0057	0.0004	0.0003	0.0033	0.0032
	Sıralama	8.00	<b>3.00</b>	4.33	4.67	6.00	7.00	<b>1.17</b>	<b>1.83</b>
Spect	OSD	0.8696	0.8968	0.8918	0.8924	0.8932	0.9118	0.9128	0.9495
	±SS	0.0079	0.0073	0.0007	0.0005	0.0002	0.0006	0.0007	0.0006
	Sıralama	8.00	4.10	6.90	6.10	4.90	<b>3.00</b>	<b>2.00</b>	<b>1.00</b>
Waveform	OSD	0.80981	0.85395	0.85355	0.85463	0.85305	0.86811	0.86357	0.85843
	±SS	0.00223	0.00381	0.00075	0.00371	0.00089	0.00303	0.00105	0.00454
	Sıralama	8.00	5.33	5.33	4.33	6.33	<b>1.00</b>	<b>2.00</b>	<b>3.67</b>
Satellite	OSD	0.9083	0.9201	0.9192	0.9213	0.9196	0.9261	0.9243	0.9239
	±SS	0.0009	0.0005	0.0008	0.0004	0.0008	0.0019	0.0011	0.0017
	Sıralama	8.0	5.2	6.9	4.0	5.9	<b>1.0</b>	<b>2.4</b>	<b>2.6</b>
Spambase	OSD	0.8971	0.9287	0.9263	0.9300	0.9251	0.9431	0.9463	0.9440
	±SS	0.0014	0.0013	0.0005	0.0004	0.0007	0.0045	0.0047	0.0037
	Sıralama	8.00	5.00	6.00	4.00	7.00	<b>2.33</b>	<b>1.67</b>	<b>2.00</b>



**Şekil 5.** Önerilen ve karşılaştırılan ikili algoritmaların veri setlerine göre sıralama değerleri  
**Figure 5.** Rank values of proposed and compared binary algorithms according to data sets

#### 4.4. Çalışma zamanı analizi

##### 4.4. Run time analysis

Örnek olarak Ionosphere veri seti için 1000 iterasyon ve 50 popülasyonda önerilen yöntem ile diğer ikili metasezgisel algoritmalar, çalışma süresi açısından karşılaştırılmış ve Tablo 11 elde edilmiştir. Buna göre, önerilen yöntemlerden UBKO'nun genel olarak diğer ikili yöntemlerden daha hızlı çalıştığı söylenebilir ve bu süre 11.947 s olarak ölçülmüştür. Aynı zamanda sınıflandırma doğruluğu olarak da UBKO'nun genellikle yüksek sonuçlar ürettiği de Tablo 6'da belirtilmiştir. Bununla birlikte, UBKO'nun SBKO ve VBKO'dan da daha kısa sürede sonuç ürettiği açıktır. Çünkü, S- ve V-şekilli transfer fonksiyonlarında, U-şekilli transfer fonksiyonuna göre hesaplaması uzun süren fonksiyonlar kullanılmaktadır. S-şekilli transfer fonksiyonu doğal logaritmik ( $e^x$ ) ifadeler içerirken, V-şekilli transfer fonksiyonu ise trigonometrik ifadeler barındırır.

**Tablo 11.** Ionosphere veri seti için ortalama çalışma süreleri  
**Table 11.** Average run times for the Ionosphere dataset

Yöntem	Ortalama çalışma süresi (s)
SBKO	12.420
VBKO	12.781
UBKO	<b>11.947</b>
İAAO	12.500
İPSO	12.751
İHŞO	19.221
İGKO	13.381
İGAO	12.026

#### 5. Tartışma ve sonuçlar

##### 5. Discussion and conclusions

Çalışmada metasezgisel bir algoritma olan beyaz köpek balığı algoritmasının, makine öğrenmesinin önemli bir adımı olan öznelik seçimi sürecinde kullanılmak üzere ikili versiyonları geliştirilmiştir. Bu işlem transfer fonksiyonları denilen matematiksel ifadelerle gerçekleştirilir. Bu çalışma için S, V ve U-şekilli transfer fonksiyonları uygulanmıştır. Geliştirilen versiyonlar, UCI veri deposundan alınan Sonar, Ionosphere, Breast cancer, Clean1, Spect, Waveform, Satellite ve Spambase veri setlerinin öznelik seçiminde test edilmiştir. Değerlendirme metriği olarak ortalama sınıflandırma doğruluğu, ortalama uygunluk değeri,

ortalama seçilen öznitelik sayısı ve bunların standart sapma değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca, verilerin sınıf oranını da dikkate alan bir metrik olan F1 skoru da tüm veri setlerine uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, literatürdeki beş farklı MA ile karşılaştırılmış ve Freidman sıralama testi ile sonuçlar doğrulanmıştır.

Buna göre önerilen SBKO, VBKO ve UBKO yöntemlerinin genel olarak sekiz veri setinde de doğruluk ve uygunluk değeri açısından başarıya ulaştığı söylenebilir. Ancak bunlar arasında en tutarlı ve tüm veri setleri için başarı sağlayan UBKO olmuştur. Öznitelik indirgemesi açısından ise VBKO diğer versiyonlarına göre daha az öznitelikle etkin bir doğruluğa ulaşmıştır. Bununla birlikte, dengeli olmayan veri setleri için uygunluk değeri ve sınıflandırma doğruluğu metrikleri tek başına yeterli olmayacağından, sınıf oranına bağlı hesaplanan bir metrik olan mikro ve makro F1 skorları da incelenmiştir. Burada da genel olarak UBKO'nun en yüksek F1 skorlarına sahip olduğu görülmüştür. Özellikle dengeli olmayan Spect veri setinde, yine en yüksek mikro ve makro F1 skoru sonucu UBKO ile elde edilmiştir.

Önerilen yöntem, çalışma süreleri açısından da diğer metasezgisellerle karşılaştırılmıştır. Buna göre, UBKO'nun çalışma süresinin SBKO ve VBKO ile birlikte, diğer metasezgisel algoritmalarından daha kısa olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, U-şekilli transfer fonksiyonun hesaplama süresi kısa olan fonksiyonlardan oluşmasıdır. Dezavantaj olarak ise, önerilen yöntem sarmal bir öznitelik seçim yöntemi olduğundan, bilgi kazanımı, ReliefF gibi geleneksel filtre tabanlı yöntemlere göre daha yavaş çalışmaktadır.

Tüm sonuçlar göz önüne alındığında, gelecek çalışmalar için S, V ve U şekilli transfer fonksiyonlarının farklı MA'larda ve bunların geliştirilmiş ve hibrit versiyonlarında da kullanılabilirliği mümkün görülmektedir. Aynı zamanda yüksek örnek ve öznitelik sayısına sahip veri setlerinde (büyük veri kümelerinde) de uygulanabilir hale getirilmesi gelecek çalışma planları arasındadır. Ayrıca, yeni modifiye transfer fonksiyonları önerilip, MA'ların ikilileştirilmesinde kullanılabilir ve öznitelik seçimi için yeni ikili yöntemler literatüre kazandırılabilir.

#### **Yazar katkısı**

*Author contribution*

Funda KUTLU ONAY: literatür taraması, metodoloji, deneysel çalışmalar, ilgili tabloların/şekillerin hazırlanması ve yorumlanması, bulgular ve sonuç kısmının şekillendirilmesi, makalenin düzenlenmesi ve revizyon süreçlerinin yürütülmesi.

#### **Etik beyanı**

*Declaration of ethical code*

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

#### **Çıkar çatışması beyanı**

*Conflicts of interest*

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

#### **Kaynaklar**

*References*

- Abdel-Basset, M., Abdel-Fatah, L., & Sangaiah, A. K. (2018). Metaheuristic algorithms: A comprehensive review. *Computational intelligence for multimedia big data on the cloud with engineering applications*, 185-231. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813314-9.00010-4
- Abualigah, L., Diabat, A., Mirjalili, S., Abd Elaziz, M., & Gandomi, A. H. (2021). The arithmetic optimization algorithm. *Computer Methods in Applied Mechanics*, 376, 113609. doi:https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.113609
- Arora, S., & Anand, P. (2019). Binary butterfly optimization approaches for feature selection. *Expert Systems with Applications*, 116, 147-160. doi:https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.08.051

- Awadallah, M. A., Hammouri, A. I., Al-Betar, M. A., Braik, M. S., & Abd Elaziz, M. (2022). Binary Horse herd optimization algorithm with crossover operators for feature selection. *Computers in Biology Medicine*, *141*, 105152. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2021.105152>
- Bäck, T., & Schwefel, H.-P. (1993). An overview of evolutionary algorithms for parameter optimization. *Evolutionary computation*, *1*(1), 1-23. doi:<https://doi.org/10.1162/evco.1993.1.1.1>
- Braik, M., Hammouri, A., Atwan, J., Al-Betar, M. A., & Awadallah, M. A. J. K.-B. S. (2022). White Shark Optimizer: A novel bio-inspired meta-heuristic algorithm for global optimization problems. *243*, 108457. doi:<https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.108457>
- Dash, M., & Liu, H. (1997). Feature selection for classification. *Intelligent data analysis*, *1*(1-4), 131-156. doi:[https://doi.org/10.1016/S1088-467X\(97\)00008-5](https://doi.org/10.1016/S1088-467X(97)00008-5)
- Dehghani, M., Montazeri, Z., Dehghani, A., Malik, O. P., Morales-Menendez, R., Dhiman, G., Nouri, N., Ehsanifar, A., Guerrero, J. M., & Ramirez-Mendoza, R. A. (2021). Binary spring search algorithm for solving various optimization problems. *Applied Sciences*, *11*(3), 1286. doi:<https://doi.org/10.3390/app11031286>
- Dhiman, G., & Kumar, V. (2019). Seagull optimization algorithm: Theory and its applications for large-scale industrial engineering problems. *Knowledge-based systems*, *165*, 169-196. doi:<https://doi.org/10.1016/j.knosys.2018.11.024>
- Duda, R. O., Hart, P. E., & Stork, D. G. (2001). *Pattern Classification*, Hoboken. In: NJ: Wiley.
- Fan, Q., Chen, Z., & Xia, Z. (2020). A novel quasi-reflected Harris hawks optimization algorithm for global optimization problems. *Soft Computing*, *24*(19), 14825-14843. doi:<https://doi.org/10.1007/s00500-020-04834-7>
- Friedman, M. (1940). A comparison of alternative tests of significance for the problem of m rankings. *The Annals of Mathematical Statistics*, *11*(1), 86-92. doi:<https://doi.org/10.1214/aoms/1177731944>
- Grabczewski, K., & Jankowski, N. (2005). *Feature selection with decision tree criterion*. Fifth International Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS'05) (ss. 6 pp.).
- Hichem, H., Elkamel, M., Rafik, M., Mesaaoud, M. T., & Ouahiba, C. (2019). A new binary grasshopper optimization algorithm for feature selection problem. *Journal of King Saud University-Computer Information Sciences*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2019.11.007>
- Houssein, E. H., Saad, M. R., Hashim, F. A., Shaban, H., & Hassaballah, M. (2020). Lévy flight distribution: A new metaheuristic algorithm for solving engineering optimization problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *94*, 103731. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2020.103731>
- Hussien, A. G., Hassanien, A. E., Houssein, E. H., Amin, M., & Azar, A. T. (2020). New binary whale optimization algorithm for discrete optimization problems. *Engineering Optimization*, *52*(6), 945-959. doi:<https://doi.org/10.1080/0305215X.2019.1624740>
- Jh, H. (1975). Adaptation in natural and artificial systems. *Ann Arbor*.
- Karaboga, D., Gorkemli, B., Ozturk, C., & Karaboga, N. (2014). A comprehensive survey: artificial bee colony (ABC) algorithm and applications. *Artificial Intelligence Review*, *42*(1), 21-57. doi:<https://doi.org/10.1007/s10462-012-9328-0>
- Khanesar, M. A., Teshnehlab, M., & Shoorehdeli, M. A. (2007). *A novel binary particle swarm optimization*. 2007 Mediterranean conference on control & automation (ss. 1-6).
- Kittler, J. (1978). Feature set search algorithms. *Pattern recognition signal processing*, 41-60.
- Li, S., Chen, H., Wang, M., Heidari, A. A., & Mirjalili, S. (2020). Slime mould algorithm: A new method for stochastic optimization. *Future Generation Computer Systems*, *111*, 300-323. doi:<https://doi.org/10.1016/j.future.2020.03.055>
- Li, Y., Zhu, X., & Liu, J. (2020). An improved moth-flame optimization algorithm for engineering problems. *Symmetry*, *12*(8), 1234. doi:<https://doi.org/10.3390/sym12081234>

- Long, W., & Xu, S. (2016). A novel grey wolf optimizer for global optimization problems. 2016 IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC) (ss. 1266-1270).
- Luo, K., & Zhao, Q. (2019). A binary grey wolf optimizer for the multidimensional knapsack problem. *Applied Soft Computing*, 83, 105645. doi:<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105645>
- Mirjalili, S. (2016). SCA: a sine cosine algorithm for solving optimization problems. *Knowledge-based systems*, 96, 120-133. doi:<https://doi.org/10.1016/j.knosys.2015.12.022>
- Nadimi-Shahraki, M. H., Banaie-Dezfouli, M., Zamani, H., Taghian, S., & Mirjalili, S. (2021). B-MFO: a binary moth-flame optimization for feature selection from medical datasets. *Computers in Biology*, 10(11), 136.
- Pal, M., & Foody, G. M. (2010). Feature selection for classification of hyperspectral data by SVM. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing* 48(5), 2297-2307. doi:<https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2039484>
- Poli, R., Kennedy, J., & Blackwell, T. (2007). Particle swarm optimization. *Swarm intelligence*, 1(1), 33-57. doi:<https://doi.org/10.1007/s11721-007-0002-0>
- Quinlan, J. R. (1986). Induction of decision trees. *Machine learning*, 1(1), 81-106.
- Robnik-Šikonja, M., & Kononenko, I. J. M. I. (2003). Theoretical and empirical analysis of ReliefF and RReliefF. 53(1), 23-69.
- Saeys, Y., Inza, I., & Larranaga, P. J. b. (2007). A review of feature selection techniques in bioinformatics. 23(19), 2507-2517. doi:<https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btm344>
- Siedlecki, W., & Sklansky, J. (1993). On automatic feature selection. In *Handbook of pattern recognition and computer vision* (ss. 63-87): World Scientific.
- Taghian, S., & Nadimi-Shahraki, M. H. (2019). Binary sine cosine algorithms for feature selection from medical data. *Advanced Computing: An International Journal (ACIJ)*, 10. doi:<https://doi.org/10.5121/acij.2019.10501>
- Thaher, T., Heidari, A. A., Mafarja, M., Dong, J. S., & Mirjalili, S. (2020). Binary Harris Hawks optimizer for high-dimensional, low sample size feature selection. In *Evolutionary machine learning techniques* (ss. 251-272): Springer.
- Too, J., & Rahim Abdullah, A. (2020). Binary atom search optimisation approaches for feature selection. *Connection Science*, 32(4), 406-430. doi:<https://doi.org/10.1080/09540091.2020.1741515>



## Doğal taş artıkları kullanılarak üretilen yapay mermerlerin farklı çevresel koşullara karşı duraylılıklarının araştırılması

*Investigation of the durability of artificial marble produced using Natural Stone residues against different environmental conditions*

Gizem ASLANTEPE\* , Didem EREN SARICI 

*Inönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 44080, Malatya*

• Geliş tarihi / Received: 01.10.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 30.01.2023

### Öz

Yapı sektöründe yaygın biçimde kullanılan doğal taş ve mermerlerin ocakta üretimi ve fabrikalarda nihai ürün haline getirilmeleri sırasında azımsanmayacak oranda artık malzeme meydana gelmektedir. Bu artık malzemelerin değerlendirme olanaklarının araştırılması, çevre kirliliğinin azaltılması, ülke ekonomisine katkı sağlanması ve mermer yataklarının rezervlerinin korunması açısından önem arz etmektedir. Yapay mermer üretiminde söz konusu bu doğal taş ve mermer artıklarının kullanılabilme olanaklarının araştırılması bu çalışmanın konusunu oluşturmaktadır. Bu kapsamda, Eskişehir bölgesinden temin edilen granit artıkları ile Malatya bölgesinden temin edilen mermer artıkları polyester reçine ile belirlenen oranlarda karıştırılmış, kalıplanarak yapay mermer numuneleri üretilmiştir. Elde edilen numunelerin fiziko-mekanik özellikleri TSE ve ISRM standartlarında tanımlanan yöntemlere göre belirlenmiştir. Bunlara ek olarak elde edilen numunelerin değişik çevresel koşullara karşı duraylılıklarını belirlemek amacıyla tuz kristallenmesi, termal şok ve donma çözünme döngüleri uygulanmıştır. Döngüler sonunda mermerlerde gelişen ağırlık kayıpları, yüzey renk özelliklerindeki değişimler belirlenmiştir. Elde edilen numunelerin fizikomekanik özelliklerinin mermer ve doğal taşlar için uygun sınırlarda olduğu görülmüştür. Uygulanan çevresel koşullardan termal şok uygulamalarının yapay mermer örnekleri üzerinde en çok tahribat yaratan uygulama olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Doğal taş artığı, Granit, Mermer artığı, Yapay Mermer

### Abstract

A large amount of waste materials occurs during the production and processing of natural stones and marbles, which are widely used in the construction industry. It is important to investigate the possibilities of using these waste materials, to reduce environmental pollution, to contribute to the country's economy, to protect the reserves of marble deposits. Investigation of the possibilities of using these natural stones and marble residues in the production of artificial marble is the subject of this manuscript. Artificial marble samples were produced by mixing granite residues from Eskişehir region and marble residues from Malatya region with polyester resin and moulding. The physical-mechanical properties of samples were determined according to TSE and ISRM methods. Additionally salt crystallization, thermal shock, freeze-thaw cycles were applied to determine the stability of the samples in different environmental conditions. At the end of the cycles, weight loss, surface colour changes were determined. It was determined that the physicommechanical properties of the samples were appropriate in accordance with natural stone standards and thermal shock cycles were the most destructive environmental conditions on artificial marble samples.

**Keywords:** Natural stones waste, Granite, Marble waste, Artificial marble

\* Didem EREN SARICI; didem.sarici@inonu.edu.tr

## 1. Giriş

### 1.1. Introduction

Alp-Himalaya kuşağında yer alan Türkiye’de 4 milyar m<sup>3</sup> işletilebilir mermer, 2,8 milyar m<sup>3</sup> işletilebilir traverten, 1 milyar m<sup>3</sup> granit rezervinin bulunduğu ve bu oranlar ile Dünya doğal taş rezervinin yaklaşık %40’ına sahip olduğu bilinmektedir. Mermer ve granit gibi doğal taşların üretiminde hem blokların ana kaya kütesinden ayrılması hem de fabrikalarda kesme-parlatma işlemleri esnasında önemli miktarda artık oluşmaktadır. Bu artıkların üretim miktarının %58’i kadar olduğu bilinmektedir ve bu malzemelerin %20-25’lik bölümü 5-20 mm arasında değişen parça artıklardan oluşmaktadır. Bu malzemeler kirletici olmamalarının yanı sıra doğada biriktiklerinde toprak geçirimsizliği, su kaynaklarının kirlenmesi konularında ciddi problemler yaratmaktadır (Medina et al., 2017; Aliabdo et al., 2014).

Üretim esnasında açığa çıkan bu artıkların yeniden kullanım olanaklarının araştırılması ve bulunması çevre kirliliğinin azaltılması, artıkların ekonomiye yeniden kazandırılması ve doğal kaynakların gelecek nesillere aktarımının ve sürdürülebilir üretimin sağlanması açısından önemlidir. Mermer ve granit artıklarının çimento, beton dolgu malzemesi, asfalt agregası, seramik hammaddesi ve yapay mermer malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırıldığı çalışmalar literatürde mevcuttur.

Menezes et al. (2005) ve Gomes et al. (2021), granit kesim artıklarının seramik bünyelerde kullanılabilirliğini araştırmış ve fiziksel, mineralojik yapı itibarıyla olumlu sonuçlar elde etmişlerdir. Uysal (2018) mermer artık tozlarını kendiliğinden yerleşen betonda kullanmış olumlu sonuçlar elde etmiştir. Sharma et al. (2017) granit artıklarının beton içinde parça agregası olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmalarının neticesinde ürünlerin su emme, su geçirimsizliği ve aşınma dayanımı değerlerinde iyileşme meydana gelirken çekme ve basma dayanımı değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu artıkların yapay mermer üretiminde kullanılabilirliğinin araştırıldığı çalışmalar da mevcuttur.

Yüçetürk (2010), kalsit ve kuvars kullanarak ürettikleri yapay mermerlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini ele almışlardır. Elde ettikleri değerleri standart değerler ile kıyasladıklarında yapay mermer örneklerinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin mermer olarak kullanılabilir nitelikte olduğu sonucuna varmışlardır. Samad & Rashid (2020) yaptıkları çalışmada dolomit ve granit artığı kullanarak yapay mermer üretmişler, ürünlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında ağırlıkça %10 granit atığını dolomit yerine kullanmanın basınç ve çekme dayanımı değerlerini artırdığını, su emme oranını düşürdüğünü belirlemişlerdir. Barani (2016) çalışmasında granit ve mermer artıklarını kullanarak yapay mermer üretmişlerdir ve ürünlerin doğal taşlara kıyasla yoğunluk, su emme, eğilme, basınç dayanımı değerlerinin daha iyi olduğunu belirlemişlerdir. Efran (2021) çalışmasında kalsit kökenli mermer artıklarını ve epoksi reçineyi kullanarak yapay mermer üretmiş ve ürünlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin standartlara uygun olduğunu belirleyerek mermer artıklarının yapay mermer üretimi için alternatif kaynak olarak değerlendirilebileceğini ifade etmiştir.

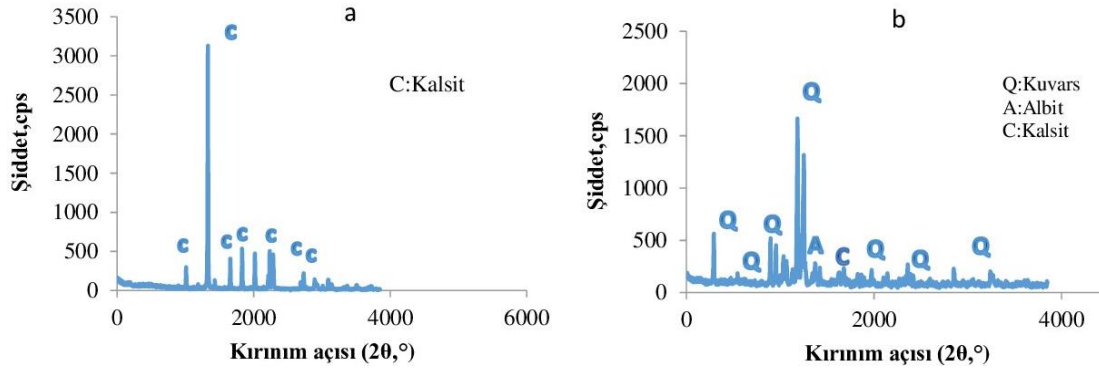
Yapay mermer, zemin, duvar kaplamacılığında sıklıkla kullanılan yeni nesil yapı malzemelerindedir. Düşük porozitesi, su emme özelliği, yüksek dayanımı, aşınma ve diğer korosif etkilere dayanıklılığı sayesinde tercih edilmektedirler. Üretiminde bağlayıcı olarak epoksi veya polyeater reçineler ve çimento kullanılmaktadır. Yapay mermer üretim maliyetini azaltmak için alternatif agregası kaynaklarının araştırılması gündemdedir. Artık malzemeler ile üretilen yapay mermerlerin üretim için tükettikleri enerji, özel işgücü ve nakliye masrafları doğal taş üretim süreçleriyle kıyaslandığında birçok avantaj sunmaktadır. Doğal taş artıkları, maliyetlerinin ucuz olması, erişilebilirliklerinin kolay oluşu nedeniyle bu konuda alternatif kaynak olarak kullanılabilirler (Shishegaran et al., 2021; Gomes et al., 2021).

Bu çalışmada mermer ve granit üretim tesislerinden elde edilen toz artıkların belirli oranlarda polyeater reçine ile karıştırılarak suni mermer üretilmesi ve ürünlerin çevresel koşullara dayanıklılığının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla üretilen yapay mermer örneklerinin fiziko-mekanik özellikleri ISRM ve TSE tarafından önerilen yöntemlere göre belirlenmiş, donma-çözünme, termal şok ve tuz kristallenmesi döngülerine tabii tutulan örneklerde gelişen renk ve ağırlık değişimleri incelenmiştir.

## 2. Materyal

### 2. Material

Çalışmada kullanılan hammaddeler Malatya ili Akçadağ ilçesinde faaliyet göstermekte olan Netmer A.Ş ve Eskişehir ilinde faaliyet göstermekte olan Granitaş A.Ş.'nin üretim artıklarıdır. Net-Mer AŞ., Malatya batısında bulunan Malatya Baseni'ne ait Orta-Geç Eosen yaşlı Gedik formasyonu içinde bulunan mermerlerin, Granitaş A.Ş ise Eskişehir ili Sivrihisar ilçesi Kadıncık Mahallesi civarında bulunan ve Hisar Gri ticari ismi ile piyasaya satışı yapılan Sivrihisar granitoidine ait granitlerin üretimini gerçekleştirmektedir. Kullanılan artık malzemelerin mineralojik yapısı Rigaku Rad-B-D Max II seri X-Ray difraktogram (XRD) ile İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Laboratuvarında belirlenmiştir. Analiz sonucunda elde edilen kırınım desenleri Şekil 1 a-b de verilmiştir.



**Şekil 1.** Mermer ve granit artığının XRD difraktogramı. (a) mermer artığı, (b) granit artığı. C: kalsit, Q: kuvars, A: albit

**Figure 1.** XRD diffractogram of marble and granite rejects. (a) marble rejects, (b) granite rejects. C: calcite, Q: quartz, A: albite

Analiz sonuçları irdelendiğinde mermer tozunun kalsit mineralinden, granit tozunun ise kuvars, kalsit, albit minerallerinden oluştuğu anlaşılmaktadır.

Mermer ve granit tozlarının kimyasal bileşimleri (X-Işını Floresans) XRF analizi ile ortaya konulmuştur. XRF analizleri Afyon Kocatepe Üniversitesi Doğal Taş Analiz Laboratuvarında Rigaku ZSX Primus II marka cihaz ile yaptırılmıştır. XRF analizi sonuçları Tablo '1 de verilmiştir.

**Tablo 1.** Mermer ve granit artıklarının XRF analizi sonuçları  
**Table 1.** XRF analysis results of marble and granite rejects

Oksit (%)	Mermer artığı	Granit artığı
SiO <sub>2</sub>	2.07	64.68
TiO <sub>2</sub>	-	0.304
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.632	15.32
Fe <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.054	2.96
MnO	-	-
MgO	0.587	1.029
CaO	52.68	4.807
Na <sub>2</sub> O	0.025	5.61
K <sub>2</sub> O	0.058	3.34
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0.14
Kızdırma kaybı	43.154	1.21

Tablo 1 incelendiğinde mermer artığındaki en önemli oksitin CaO, granit artığında ise SiO<sub>2</sub> olduğu görülmektedir.

Çalışmada bağlayıcı olarak BRE 450 döküm tipi polyester reçine, kürleştirici olarak akkobalt (%6 kobalt), ve hızlandırıcı olarak metil, etil, keton peroksit kullanılmıştır. BRE 450, kimyasal dayanımsız reçine olarak bilinen, genel kullanım amaçlı, hızlı kürleşme sağlayan ortoflatik bazlı doymamış polyester reçinesidir. Akcobalt %6 kobalt, doymamış polyester reçinelerin oda sıcaklığında kürlenmesi için kullanılmaktadır. Yaygın olarak %1-10 organik peroksitlerle kullanımı tercih edilmektedir. MEKP; metil, etil, keton ve peroksitin, karışımından oluşur ve polyester reçinelerin kürleştirilmesi için kobalt ile birlikte oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda kullanılan bir kürleştiricidir. Yapay mermer üretiminde kullanılan kimyasalların özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2.** Yapay mermer üretiminde kullanılan kimyasalların özellikleri  
*Table 2. Chemical properties of chemicals which utilised in artificial marble*

Özellik	Polyester reçine	MEKP	Kobalt
Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	1.2-1,27	1.17	0.92
Vizkozite (MPa.s)	700-900	25	300
Görünüm	renksiz	renksiz	Mavi-menekşe rengi

### 3.Yöntem

#### 3. Method

Doğal taş üretim tesislerinden temin edilen doğal taş artıkları nemini uzaklaştırmak için etüvde kurutulduktan sonra topaklanmasının giderilmesi için öğütücüde 5 dakika süre ile öğütülmüş ve 70 nolu elekden (-212 µm göz açıklığına sahip) geçirilerek boyutlandırılmış ve polyester reçine, MEKP ve kobalt ile karıştırılıp kalıplanarak deney numuneleri hazırlanmıştır. Yapay mermer örneklerinin elde edilmesinde mermer ve granit tozu değişen oranlarda bünyeye katılmıştır. 1 kg döküm tipi polyester reçine ile karıştırılan tozların içine konulacak olan kobalt ve MEKP miktarlarının belirlenmesinde ortam sıcaklığı [Yüçetürk \(2010\)](#)’da ifade edildiği şekilde dikkate alınmış ve yapılan ön denemeler neticesinde Tablo 3’de belirtilen miktarlar ve oranlar ile numuneler hazırlanmıştır. Mikserin karıştırma yapılacak haznesine sıra ile polyester reçine mermer ve granit tozu, MEKP ve kobalt eklenmiş, 10 dk karıştırma süresi sonucunda karışım 5x5x5 cm<sup>3</sup> lük kübik kalıplara paylaştırılarak titreşim sehpasında yaklaşık 5 dakika (numune üzerinde yeni hava kabarcığı oluşumu duruncaya kadar) titreşime tabii tutulmuştur. Bu şekilde malzemenin kalıba iyice yerleştirilmesi sağlanmıştır. Örnekler bir süre sonra sertleşmiş ve kalıptan çıkartılarak priz alması için 28 gün laboratuvarında bekletilmiştir. Şekil 2’de deney numunelerinin hazırlanma aşamalarına ait görüntü verilmiştir.



1)Doğal taş artıklarının genel görünümleri A: granit artığı, B: elenmiş granit artığı, C:mermer artığı, D: kurutulmuş mermer artığı

2)Numune hazırlamada kullanılan aletler A:mikser, B: terazi, C: öğütücü, D:titreşim sehvası



3)Kalıplanan numuneler

4)Nihai ürünler

**Şekil 2.** Yapay mermer numunelerinin hazırlanma aşamaları.1: doğal taş artıklarının genel görünüşleri, 2: numune hazırlamada kullanılan aletler A: mikser, B: terazi, C: öğütücü, D: titreşim sehpası, 3: kalıplanan numuneler, 4: nihai ürünler

**Figure 2.** Preparation stages of artificial marble samples. 1: general views of natural stones rejects, 2: devices used in sample preparation A: mixer, B:scales, C: grinder, D: vibrator, 3: molded samples, 4: final product

**Tablo 3.** Yapay mermer üretiminde kullanılan artık ve kimyasalların miktarları

**Table 3.** Wastes and chemical quantities used in artificial marble production

Örnek kodu	Mermer artığı oranı (%)	Mermer artığı (g)	Granit artığı (g)	Polyester Reçine (g)	MEKP (g)	Kobalt (g)
GM	25	262.5	787.5	380	3.17	0.57
MG	75	787.5	262.5	380	3.17	0.57
M	100	1050	0	380	3.17	0.57
G	0	0	1050	380	3.17	0.57

### 3.1. Fiziksel ve mekanik özellikler

#### 3.1. Physical and mechanical properties

Üretilen yapay mermer numunelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla 28 günlük kür süresi sonunda numunelere TS EN 1939 yöntemine göre birim hacim ağırlığı, su emme, porozite deneyleri yapılmıştır. Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği [ISRM \(1978\)](#)'e göre tek eksenli basınç dayanımı, [ISRM \(1978\)](#)'e göre ultrasonik dalga hızı tayini deneyleri uygulanmıştır.

Hazırlanan örneklerin çevresel koşullara karşı dayanıklılığını belirlemek amacıyla TS 699 yöntemine göre donma-çözünme, TS EN 12370 yöntemine göre tuz kristallenmesi etkilerine dayanım testi, TS EN 14066 yöntemine göre termal şok etkilerine dayanım testleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler İnönü Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Maden İşletme Laboratuvarında yapılmıştır.

### 3.2. Donma-çözünme döngüleri

#### 3.2. Freeze-thaw cycles

Donma-çözünme döngüleri öncesinde numuneler etüv kurusu hale getirilerek ağırlıkları, yüzey renk parametreleri (L, a, b) belirlenmiştir. Yapay mermer örneklerinin donma-çözünme etkilerine karşı duraylılıklarının belirlenmesi için TS 699 standardında tanımlanan yöntemle donma çözünme döngüleri uygulanmıştır. Numuneler suda 24 saat süre ile bekletilerek doymuş hale getirildikten sonra  $-18^{\circ}\text{C}$ 'deki dondurucuda 16 saat süre ile bekletilmiş ve donmaları sağlanmıştır. Donan numuneler  $+20^{\circ}\text{C}$ 'deki su içine alınarak çözünmesi sağlanmıştır. Bu süreç bir donma-çözünme döngüsü olarak tanımlanmıştır ve toplam 30 döngü uygulanan numunelerin ağırlık kayıpları ve yüzey renk değişimleri belirlenmiştir [TS 699 \(2009\)](#).

### 3.3. Tuz kristallenmesi döngüleri

#### 3.3. Salt crystallisation cycles

Yapay mermer örneklerinin tuz kristallenmesi etkilerine karşı duraylılıklarının belirlenmesi için TS EN 12370 standardına göre tuz kristallenmesi döngüleri uygulanmıştır TS EN 12370 (2001). Numuneler öncelikle 24 saat boyunca 105 °C'lik etüvde kurutulmuş tartılmıştır. Ardından %14'lük Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.10H<sub>2</sub>O çözeltisinde 2 saat boyunca bekletilmiş ve bu süre sonunda 16 saat boyunca 105 °C'lik etüvde kurutulmuştur. Bu bir döngü olarak adlandırılmıştır. Toplamda 30 döngü uygulanmış ve döngüler sonunda numunelerin kuru ağırlıkları belirlenerek ağırlık kayıpları ve yüzey renk değişimleri hesaplanmıştır.

### 3.4. Termal şok döngüleri

#### 3.4. Thermal shock cycles

Termal şok çevrimleri TS 14066'da tanımlanan yöntemle göre gerçekleştirilmiştir TS EN 14066 (2004). Termal şok çevrimlerine başlamadan önce numuneler kurutma işlemine tabii tutulmuştur. 105 ± 5°C'lik etüvde sabit kütleye gelinceye kadar kurutulan numuneler tartılmış, tartım sonucu (m<sub>0</sub>) olarak kaydedilmiştir. Daha sonra numuneler 105 ± 5°C sıcaklıktaki hava dolaşım etüvde 18 ± 1 saat bekletilmiş sonra (20 ± 5) °C sıcaklıktaki demineralize su içerisine (6 ± 0.5) saat süreyle daldırılmıştır. Bu işlem bir döngü olarak tanımlanmıştır. Numunelere 30 döngü uygulanmıştır. Döngüler sonunda (105 ± 5)°C sıcaklıkta sabit kütleye ulaşıncaya kadar kurutulmuş, desikatörde soğutulmuş tartılmıştır (mf), yüzey renk değişimleri hesaplanmıştır.

### 3.5. Ağırlık kayıplarının belirlenmesi

#### 3.5. Determination of weight loss

Termal döngüler sonucunda gerçekleşen ağırlık kayıplarını belirlemek amacıyla deney öncesi ve sonrasında numuneler 105 °C'de 24 saat süre ile kurutulmuş, kuru ağırlıkları kaydedilmiştir TS EN 14066 (2004). Örneklerde gerçekleşen ağırlık kayıpları Eşitlik 1 kullanılarak belirlenmiştir.

$$\Delta m = \frac{mf - m_0}{m_0} \times 100 \quad (1)$$

Bu eşitlikte;

m<sub>0</sub>: Deney öncesi kuru ağırlık, (g)

mf: Deney sonrası kuru ağırlık, (g)

### 3.6. Renk değişimlerinin belirlenmesi

#### 3.6. Determination of color changes

Mermerler ve yapay mermerler için satış koşullarını etkileyen en önemli kalite belirteçlerinden bir tanesi renk özellikleridir. Renk özellikleri L, a, b ve ΔE değerleri ile ifade edilmektedir. L, a ve b olarak adlandırılan parametreler, CIELAB renk sisteminde; L parlaklık (L:0 siyah, L:100 beyaz), a kırmızı-yeşillik (kırmızı a>0, yeşil a<0), b ise sarılık-mavilik (sarı 0<b, mavi b<0) belirteci olarak tanımlanmaktadır Özgüven & Özçelik (2013). ΔE ise toplam renk değişimini ifade eden bir kavramdır. Bu çalışma kapsamında renk ölçümleri MRC marka CLRM310 model renk ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır. Deney numunelerinin yüzeylerinden 3 ölçüm alınarak ortalamaları hesaplanıp kaydedilmiştir.

L, a, b parametrelerinde gerçekleşen değişimler Eşitlik 2-4, toplam renk değişimi Eşitlik 5'ten yararlanılarak hesaplanmıştır Özgüven & Özçelik (2013).

$$\Delta L = \frac{(SL - iL)}{iL} \times 100 \quad (2)$$

$$\Delta a = \frac{(Sa - ia)}{ia} \times 100 \quad (3)$$

$$\Delta b = \frac{(Sb - ib)}{ib} \times 100 \quad (4)$$

Burada;  
 $\Delta L$ : L (siyahlık-beyazlık) değerindeki % değişimi  
 $S_L$ : Son döngüde ölçülen L değeri  
 $\dot{L}$ : Deney öncesi ölçülen L değeri  
 $\Delta a$ : a (yeşillik-kırmızılık) değerindeki % değişimi  
 $S_a$ : Son döngüde ölçülen a değeri  
 $\dot{a}$ : Deney öncesi ölçülen a değeri  
 $\Delta b$ : b (mavilik-sarılık) değerindeki % değişimi  
 $S_b$ : Son döngüde ölçülen b değeri  
 $\dot{b}$ : Deney öncesi ölçülen b değeri

$$\Delta E^{ab} = \sqrt{[(\Delta L *)^2 + (\Delta a *)^2 + (\Delta b *)^2]} \quad (5)$$

Burada;  
 $\Delta E^{ab}$ : Toplam renk değişimi (%)  
 $\Delta L$ : L (siyahlık-beyazlık) değerindeki % değişimi  
 $\Delta a$ : a (yeşillik-kırmızılık) değerindeki % değişimi  
 $\Delta b$ : b (mavilik-sarılık) değerindeki % değişimi

#### 4. Bulgular ve tartışma

##### 4. Results and discussion

##### 4.1. Fiziksel ve mekanik özellikler

##### 4.1. Physical and mechanical properties

Yapay mermerlerin yapı sektöründe kullanım olanağı bulabilmesi sahip olduğu fiziksel ve mekanik özelliklere bağlıdır. Elde edilen yapay mermer örnekleri üzerinde TSE ve ISRM tarafından önerilen yöntemlere göre gerçekleştirilen testlerin sonuçları Tablo 4’de verilmiştir.

**Tablo 4.** Yapay mermerlerin fiziksel ve mekanik özellikleri  
**Table 4.** Physical and mechanical properties of artificial marbles

Artık mermer karışım oranı	Doğal BHA (kN/m <sup>3</sup> )	Porozite değerleri (%)	Ağırlıkça su emme (%)	Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)
Sınır değerler		<%1: Çok kompakt Tarhan (1989)	<%0.1 Chiodi & Rodriquez (2009)	70-130 MPa Chiodi & Rodriquez (2009)
%100 Mermer	18.96±0.04	0.08±0.01	0.04±0.005	60.14±21.58
%75 Mermer	18.77±0.03	0.06±0.02	0.03±0.01	64.16±8.32
%25 Granit				
%75 Granit	18.58±0.26	0.07±0.02	0.03±0.01	64.82±10.83
%25 Mermer				
%100 Granit	18.59±0.02	0.06±0.01	0.03±0.005	72.73±0.93

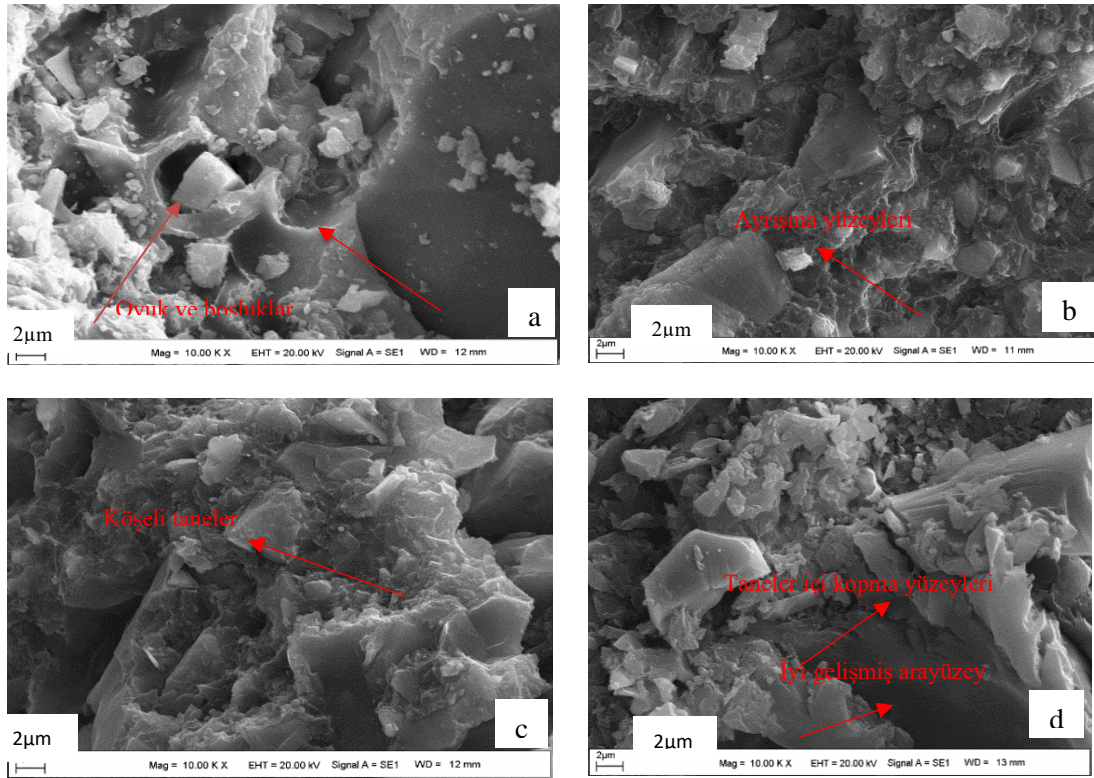
Fiziksel özelliklerden poroziteye göre değerlendirme yapıldığında granit tozu katkılı örneklerde porozite değerlerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Tarhan (1989) tarafından kayalar için yapılan sınıflandırmaya göre örnekler çok kompakt grubunda yer almaktadırlar. Yapay mermerlerin fiziko-mekanik özellikleri için belirlenmiş ve kabul edilmiş standartlar bulunmadığından değerlendirmeleri yapılırken doğal taşlar ve kayalar için kullanılan standartların göz önünde bulundurulması yaygındır. Chiodi & Rodriquez (2009) porozite değeri %0,5’in, su emme değeri de %0,1’in altında olan ürünler için yüksek kaliteli tanımlamasını yapmışlardır. Bu tanımlamaya göre değerlendirme yapıldığında elde edilen ürünlerin yüksek kaliteli olarak nitelendirilebileceği sonucu çıkarılmaktadır. Gözenekliliğin düşük olması durumu örnek grubunda su emme değerinin de düşük çıkmasına neden olmuştur. Böylelikle malzemenin geçirimsizliği azalmakta ve nemli ve ıslak ortamlarda kullanımında bir sıkıntı meydana gelmeyeceği sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu değer granit tozu içeren örneklerde düşük çıkmasının nedeninin polyester bağlayıcı ile granit tozunun daha iyi bir arayüzey oluşturmasından kaynaklandığı düşünülmüştür.

Tablo 4’ de verilen tek eksenli basınç dayanımı değerleri incelendiğinde örneklerin granit artığı oranları arttıkça tek eksenli basınç dayanımı değerlerinin de arttığı görülmektedir. En yüksek basınç dayanımı değeri %100 granit artığı ile hazırlanan örnekte, en düşük değer %100 mermer artığı kullanılarak üretilen örnek de elde edilmiştir. Örneklerin tümünün basınç dayanımı değerleri Deer & Miller (1966) sınıflamasına göre değerlendirildiğinde “orta dirençli” sınıfında yer aldıkları görülmektedir. Granit tozu içerisinde bulunan silis miktarının fazla oluşunun basınç dayanımı değerlerinde artışa neden olduğu düşünülmüştür. Chioidi & Rodriguez (2009) yapay mermer örnekleri için 70-130 MPa değerinde bir basınç dayanımının uygun olduğunu belirtmiştir. Bu çalışmada elde edilen değerler Chioidi & Rodriguez (2009) tarafından yapılan çalışmada elde ettikleri değerler ile uyum göstermektedir.

#### 4.2. SEM analizi sonuçları

##### 4.2. SEM analysis results

Yapay mermer örneklerinin iç yapısını ayrıntılı görüntüleyebilmek için SEM analizleri LEO Evo-40xVp marka taramalı elektron mikroskobu ile İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezinde gerçekleştirilmiştir. Yapay mermer örneklerinin SEM analizi sonucunda elde edilen görüntüleri Şekil 3. a-d de verilmiştir.



**Şekil 3.** Yapay mermer örneklerinin SEM görüntüleri (a) :%100 mermer artığı ile üretilen yapay mermer, (b): %75 mermer artığı, %25 granit artığı ile üretilen yapay mermer, (c): %75 granit artığı, %25 mermer artığı ile üretilen yapay mermer, (d): %100 granit artığı ile üretilen mermer

**Figure 3.** SEM images of artificial marble samples (a) artificial marble produced with %100 marble reject, (b): artificial marble produced with %75 marble %25 granite reject, (c): artificial marble produced with %25 marble, %75 granite reject, (d): artificial marble produced with %100 granite reject.

Şekil 3 a incelendiğinde %100 mermer artığı kullanılarak üretilen yapay mermer örneklerinin bünyesinde büyük boyutlu gözeneklerin var olduğu, bazı gözeneklerin küçük tane boyutlu parçacıklar ile doldurulduğu görülmektedir. Numune porozitesinin fazla çıkmasının sebebinin büyük boyutlu bu gözeneklerin varlığından kaynaklandığı düşünülmüştür.



Şekil 3-b de verilen SEM görüntüleri incelendiğinde %75 mermer, %25 granit artığı kullanılarak üretilen yapay mermer örneklerinin %100 mermer içeren örneklere göre daha kompakt bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Taneler arasında ayrışmalar bu örnekte de mevcuttur ancak bu yapıların daha az var olduğu göze çarpmaktadır.

Şekil 3-c de verilen %75 granit, %25 mermer artığı kullanılarak üretilen yapay mermer örneklerinin SEM görüntüleri incelendiğinde tanelerin daha köşeli yapıya sahip olduğu göze çarpmaktadır. Bu köşeli tanelerin arasında bazı boşlukların var olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 3-d incelendiğinde %100 granit artığı kullanılarak üretilen yapay mermer örneklerinde granit artığı taneleri ile polyster reçinenin arasında iyi gelişmiş arayüzeylerin varlığı göze çarpmaktadır. SEM görüntülerinde %100 granit artığı numunelerin köşeli yapıda olması basınç dayanımının artmasına neden olmuştur. Köşeli tane yapısına sahip örneklerde taneler arasında kenetlenme olduğundan numunenin daha güçlü bir yapı ve dayanım kazanmasını sağlamaktadır.

Miller et al. (1998) ve Debhnat et al. (2004) tarafından ifade edildiği üzere kompozit malzemelerde taneçik ve resin arasında gelişen iyi arayüzeylerin varlığı mekanik özellikleri olumlu yönde etkilemektedir. Granit tozu ile üretilen örneklerin fizikomekanik özelliklerinin daha iyi olmasını bu durum açıklamaktadır. Bu arayüzeylerin varlığı tüm bünyede mevcut değildir bunlara ek olarak taneler arasında boşlukların var olduğu ayrıca tanelerin içinde kopmaların geliştiği göze çarpmaktadır.

### 4.3. Yaşlandırma döngüleri sonuçları

#### 4.3. Ageing cycles results

#### 4.3.1 Ağırlık kayıpları

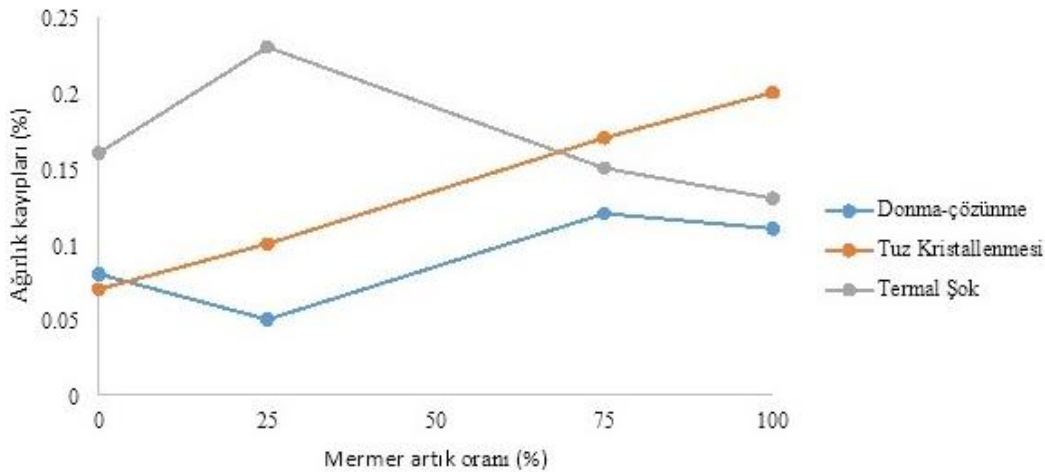
##### 4.3.1. Weight loss

Yapay mermer örnekleri üzerinde yapılan 30 donma-çözünme, termal şok etkilerine dayanım, tuz kristallenmesi döngüleri sonucunda numunelerde meydana gelen ağırlık kayıpları Eşitlik 1'e göre hesaplanmış sonuçlar Tablo 5'de, sonuçların grafiksel gösterimi Şekil 4'de verilmiştir.

**Tablo 5.** Yaşlandırma döngüleri sonunda ağırlık kaybı değerleri

**Table 5.** Weight loss values after ageing cycles

Artık mermer ve granit karışım oranı	Donma-çözünme döngüleri sonucunda ağırlık kayıpları (%)	Tuz kristallenmesi döngüleri sonucunda ağırlık kayıpları (%)	Termal şok döngüleri sonucunda ağırlık kayıpları (%)
% 100Mermer	-0.11±0.03	-0.20±0.01	-0.24±0.05
% 75 Mermer %25 Granit	-0.12±0.06	-0.17±0.02	-0.23±0.06
% 75 Granit %25 Mermer	-0.05±0.02	-0.10±0.01	-0.15±0.03
% 100 Granit	-0.08±0.01	-0.07±0.01	-0.16±0.02



**Şekil 4.** Mermer artık oranına göre ağırlık kayıpları

**Figure 4.** Weight loss according to marble reject proportions

Tablo 5 ve Şekil 4 incelendiğinde 30 donma-çözünme, tuz kristallenmesi ve termal şok etkilerine dayanım döngüsü neticesinde tüm örneklerde değişen oranlarda ağırlık kayıplarının gerçekleştiği görülmektedir. Suni mermer örneklerinin bünyesine eklenen mermer tozunun oranındaki artışla birlikte gerçekleşen ağırlık kaybı oranı da artmaktadır. Yaşlandırma döngüleri içerisinde suni mermer örneklerine en fazla etki eden termal şok döngüleri, en az etki eden donma-çözünme döngüleri olmuştur. Granit tozu ilavesi ile üretilen örneklerde gelişen ağırlık kaybı oranlarının daha düşük çıkma nedeni bu örneklerde porozitenin ve su emme özelliğinin daha düşük olmasıdır. Şahin vd. (2019)' da beton numuneler için çevresel koşullardaki değişimlerin yarattığı problemler ile mücadelede en etkili yöntemin geçirimsizliğin artırılması olduğu bildirilmiştir. Bu durumun suni mermer örnekleri içinde geçerli olduğu anlaşılmaktadır. Geçirimsizlik malzemenin kolay ıslanmamasını, kimyasal etkilere karşı daha dayanımlı olmasını sağlamaktadır. Özellikle büyük yıkıcı etkisi bulunan ve doğada en fazla tahribat gücüne sahip olan NaSO<sub>4</sub> etkilerine karşı erken zamanda meydana gelen duraysızlıkları önlemek için geçirimsizliği azaltmak önemlidir Şahin vd. (2022). Granit tozu ile hazırlanan örneklerde bağlayıcı polyester ile granit tozu daha iyi birleşerek daha sağlam bir yapının oluşmasına olanak vermiştir. Termal şok etkisinde bırakılan örneklerde döngüler ilerledikçe numunelerde parçalanmalar gözlemlenmiş bazı örnekler kırılarak kullanılamaz hale gelmiştir. Bu durumun bağlayıcı amaçlı kullanılan polyester reçinenin ısı etkilere dayanımının olmamasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Mermer tozu içeren örneklerde daha fazla ağırlık kaybının gelişmesinin nedeni mermer tozunun anizotropik termal genişlemesinin granit tozuna nazaran daha fazla olmasından kaynaklanmasıdır Yavuz et al. (2010). Kompozit malzemelerde ani ısı değişimlerinin malzemede içsel kırıklar gelişmesine neden olarak dayanım azalmasına yol açtığı bilinmektedir. Bu durumun uzun süreli tekrar etmesi bu tür etkilere maruz kalan malzemelerde önemli duraylılık problemlerinin meydana gelmesine neden olmaktadır Başçetin et al. (2021).

### 4.3.2. Renk değişimleri

#### 4.3.2. Color changes

Renk yapı malzemelerinin satış koşullarını ve kullanım alanlarını belirleyen önemli bir ticari özelliktir. Renkte meydana gelen değişimler sonucu yapı malzemelerinin değiştirilmesi zorunluluğu gündeme gelebilir bu durum ekonomik kayıplar olarak karşımıza çıkar. Bu nedenle renk değişimlerinin belirlenmesi önem arz etmektedir. Yapılan 30 donma-çözünme, tuz kristallenmesi, termal şok çevrimleri neticesinde numunelerde meydana gelen toplam renk değişimlerini belirlemek için renk parametreleri olan L (siyahlık-beyazlık), a (yeşillik-kırmızılık) ve b (sarılık-mavilik) parametrelerinde meydana gelen değişim değerleri Tablo 6-8'de, toplam renk değişimleri Tablo 9'da, toplam renk değişimlerinin mermer artı oranına göre değişimlerinin grafiksel gösterimi Şekil 5'de verilmiştir.

**Tablo 6.** L (Siyahlık-beyazlık) değişimleri

**Table 6.** L (Whiteness-blackness) changes

Artık mermer ve granit karışım oranı	Donma-çözünme döngüleri sonucunda renk değişimleri (%)	Gelişen renk değişimi	Tuz kristallenmesi döngüleri sonucunda renk değişimleri (%)	Gelişen renk değişimi	Termal şok döngüleri sonucunda renk değişimleri (%)	Gelişen renk değişimi
% 100Mermer	5.28	Beyazlaşma	1.61	Beyazlaşma	-3.72	Siyahlaşma
% 75 Mermer- % 25 Granit	7.03	Beyazlaşma	9.26	Beyazlaşma	-2.07	Siyahlaşma
% 75 Granit- % 25 Mermer	16.36	Beyazlaşma	14.94	Beyazlaşma	7.38	Beyazlaşma
% 100 Granit	3.54	Beyazlaşma	25.62	Beyazlaşma	5.76	Beyazlaşma

Tablo 6 incelendiğinde termal şok döngüleri harç tüm döngülerde örneklerin L değerlerinin arttığı yani renkte beyazlaşmanın ve açılmanın geliştiği görülmektedir. Sadece ısı işlemin uygulandığı termal şok döngülerinde mermer artığını büyük oranda bulunduran örneklerde koyulaşma görülmüştür. Renkte açılmanın en çok gözlemlendiği seri, tuz kristallenmesi döngülerine maruz bırakılan %100 granit artığı tozu kullanılarak üretilen seri olmuştur.

**Tablo 7. a** (yeşillik- kırmızılık) değeri değişimleri  
**Table 7. a** (Greenes-redness) values changes

Artık mermer ve granit karışım oranı	Donma-çözünme döngüleri sonucunda renk değişimleri (%)	Gelişen renk değişimi	Tuz kristallenmesi döngüleri sonucunda renk değişimleri (%)	Gelişen renk değişimi	Termal şok döngüleri sonucunda renk değişimleri (%)	Gelişen renk değişimi
%100Mermer	-18.37	Yeşillenme	6.22	Kırmızılaşma	11.54	Kırmızılaşma
%75 Mermer-%25 Granit	-20.97	Yeşillenme	57.39	Kırmızılaşma	17.99	Kırmızılaşma
%75 Granit- %25 Mermer	-149.6	Yeşillenme	51.13	Kırmızılaşma	-146.9	Yeşillenme
%100 Granit	-437.9	Yeşillenme	-288.3	Kırmızılaşma	-114.2	Yeşillenme

Tablo 7’de verilen örneklerin yüzey renklerindeki yeşillik-kırmızılık değerini ifade eden a değerindeki değişimler incelendiğinde donma-çözünme döngülerinde tüm serilerde değerin negatif yönde değiştiği yani yeşillenmenin arttığı görülmektedir. Örnek bünyesindeki granit artığı oranı arttıkça bu değer artış göstermiştir. %100 granit artığı ile üretilen örneklerin tümünde renkte yeşillenmenin olduğu elde edilen değerlerden anlaşılmaktadır. Tuz kristallenmesi döngüleri sonucunda bünyesinde mermer tozu bulduran tüm serilerde renkte kırmızılaşma gelişmiştir. Termal şok döngülerinde ise bünyesinde büyük oranda mermer artığı tozu bulduran serilerde kırmızılaşma diğer serilerde yeşillenme geliştiği elde edilen sonuçlardan anlaşılmıştır.

**Tablo 8. b** (Mavilik-sarılık) değeri değişimleri  
**Table 8. b** (Blueness-redness) values changes

Artık mermer ve granit karışım oranı	Donma-çözünme döngüleri sonucunda renk değişimleri (%)	Gelişen renk değişimi	Tuz kristallenmesi döngüleri sonucunda renk değişimleri (%)	Gelişen renk değişimi	Termal şok döngüleri sonucunda renk değişimleri (%)	Gelişen renk değişimi
%100Mermer	-18.29	Mavileşme	8.73	Sarılaşma	31.73	Sarılaşma
%75 Mermer-%25 Granit	-2.26	Mavileşme	8.26	Sarılaşma	32.91	Sarılaşma
%75 Granit- %25 Mermer	-12.14	Mavileşme	115.5	Sarılaşma	41.65	Sarılaşma
%100 Granit	31.11	Mavileşme	406.9	Sarılaşma	377.6	Sarılaşma

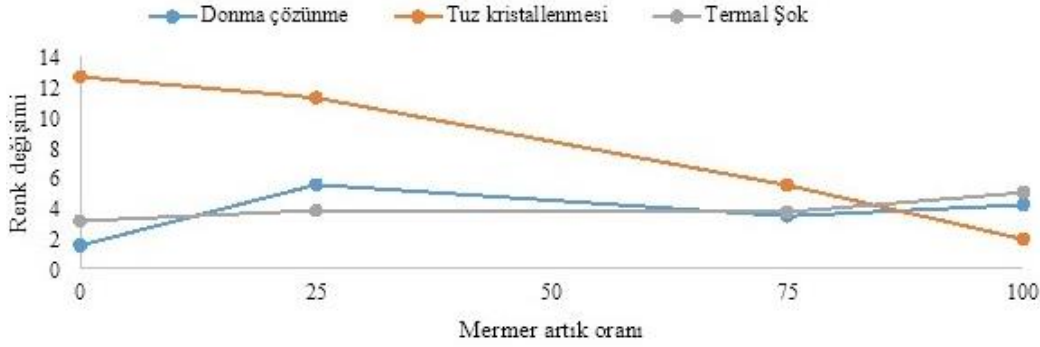
Örneklerin b (b>0 sarılık, b<0 mavilik) değerlerini veren Tablo 8 incelendiğinde donma-çözünme döngüleri hariç diğer tüm döngülerde değerin arttığı yani numunelerin sarılaştığı görülmektedir. Donma çözünme döngülerinde numunenin mermer oranı azaldıkça b değeri azalmış yani mavileşme gelişmiştir.

**Tablo 9.** Toplam renk değişimleri  $\Delta E$   
**Table 9.** Total color changes  $\Delta E$

Artık mermer ve granit karışım oranı	Donma-çözünme döngüleri sonucunda renk değişimleri (%)	Tuz kristallenmesi döngüleri sonucunda renk değişimleri (%)	Termal şok döngüleri sonucunda renk değişimleri (%)
%0Mermer	4.15±1.22	1.88±0.73	4.96±0.68
%75 Mermer- %25 Granit	3.41±1.61	5.45±2.75	3.68±0.59
%25 Granit- %75 Mermer	5.48±1.75	11.23±1.16	3.78±1.59
%100 Granit	1.46±0.49	12.61±4.34	3.09±1.41

Toplam renk değişimi  $\Delta E$ , renk değişiminin büyüklüğünü ifade eden ancak renk değişiminin ne yönde geliştiğini belirtmeyen bir ifadedir Pires et al. (2014). Yapay mermer örneklerinin tümünde çevresel koşullara dayanıklılık için yapılan döngüler neticesinde değişen oranlarda renk değişiklikleri meydana

gelmiştir. Donma çözünme ve termal şok döngülerinde gelişen toplam renk değişimlerine bakacak olursak yapay mermer örneği bünyesindeki granit artığı miktarı arttıkça toplam renk değişiminin azaldığını, tuz kristallenmesi döngülerinde ise granit artığı oranının artışı ile birlikte değişimin de arttığını görebiliriz.



**Şekil 5.** Mermer artık oranına göre toplam renk değişimleri

**Figure 5.** Color changes according to marble reject proportions

Renk, yapay ve doğal taşlar için satış koşullarını belirleyen ve etkileyen, kalite belirteci olan önemli bir özelliktir ve kullanım alanına ve yerine bağlı olarak zamanla değişime uğramaktadır. Bu değişimlerin büyük oranda gerçekleşmesi mermerde bozulmaların oluşmasına ve ürünün zaman içinde kullanılamaz hale gelmesine neden olabilmektedir. Bu nedenle hazırlanan yapay mermer örnekleri içerisinde toplam renk değişimi açısından en duraylı örnek türünün %100 mermer artığı içeren grup olduğu anlaşılmaktadır.

## 5. Tartışma ve sonuçlar

### 5. Discussion and conclusions

Mermer ve granit artık tozlarının polyester reçine ve sertleştirici kimyasallar ile belirli oranlarda karıştırılması ile elde edilen yapay mermer örneklerinin özelliklerinin belirlenmesi ve çevresel etkenlere (donma-çözünme, termal şok ve tuz kristallenmesi) karşı duraylılığının ne ölçüde olduğunun ortaya konulması için yapılan bu çalışmada artık granit ve mermer tozları ile dört farklı seride örnekler hazırlanmış serilerde mermer ve granit artık oranları değiştirilmiştir. Elde edilen örnekler mermer ve doğal taş standartlarına göre testlere tabii tutulmuş sonuçlar yine mermer ve doğal taş standartlarına göre değerlendirilmiştir. Çalışmada şu bulgulara rastlanmıştır.

Örneklerin tümünün porozite ve su emme değerlerinin düşük olduğu görülmüştür. Örnekler porozite değerlerine göre çok kompakt grupta yer almaktadırlar. Granit artığı tozu ile üretilen örneklerde porozite değerleri mermer artığı tozu ile üretilenlere nazaran daha düşük çıkmıştır. Bu değerlerin düşüklüğünü destekleyen SEM analizlerinden de bu bilginin doğruluğu anlaşılmaktadır. Yapay mermer örneklerinin Tek eksenli basma dayanımı değeri de granit artık tozu içeren örneklerde daha yüksek şekilde elde edilmiştir. Yapay mermer örneklerinde granit artığı tozunun artışının reçine toz malzeme arasında daha iyi gelişmiş arayüzey oluşumu sağlaması ile birlikte örneğe daha pozitif özellikler kazandırdığı yapılan testler neticesinde anlaşılmıştır. Yapay mermer örneklerinin farklı çevresel koşullara karşı duraylılığının belirlenmesi amacıyla yapılan 30 donma-çözünme, tuz kristallenmesi ve termal şok çevrimi neticesinde tüm örneklerde ağırlık kayıplarının olduğu gözlemlenmiştir. Yapay mermer örnekleri üzerinde en fazla ağırlık kaybı oluşturan termal şok döngüleri olmuştur. Mermer artığı içeren örneklerde mermer artığının bünyesindeki kalsit mineralinin anizotropik termal genişleme katsayısının daha yüksek olması nedeniyle daha fazla koparak ayrılmalar gözlemlenmiştir.

Yapay mermer örneklerinde döngüler sonucunda renk değişimleri gelişmiştir. Örneklerde tüm döngülerde renk açılmalarının geliştiği görülmüştür. Özellikle granit artığı içeren seride renk, diğerlerine göre daha koyu olduğundan bu açılma gözle bile fark edilebilecek seviyede gerçekleşmiştir. En fazla renk değişiminin geliştiği seri bünyesinde en fazla granit artığı barındıran seri olmuştur. En çok renk değişikliğini gerçekleştiren döngü ise tuz kristallenmesi döngüleri olmuştur.

Elde edilen tüm bu veriler ışığında söz konusu bu artıkların yapay mermer üretiminde kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır. Kullanım alanı ve yeri seçiminde ürünlerin ani ısıl değişimlerine maruz kalacak ortamlarda daha dikkatli kullanımının uygun olduğu görülmektedir.

### **Teşekkür**

#### *Acknowledgement*

Yazarlar bu çalışmayı FYL-2021-2448 nolu proje ile destekleyen İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne ve makalenin inceleme ve değerlendirme aşamasında katkıda bulunan editörlere ve hakemlere teşekkür ederler.

### **Yazar katkısı**

#### *Author contribution*

Didem Eren Sarıcı: Makale yazımı, sonuçların yorumlanması  
Gizem Aslantepe: deneylerin yapılması, analizlerin yapılması

### **Etik beyanı**

#### *Declaration of ethical code*

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

### **Çıkar çatışması beyanı**

#### *Conflicts of interest*

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

### **Kaynaklar**

#### *References*

- Aliabdo, A.A., Elmoaty, M.A., & Auda, M. (2014). Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete. *Construction and Building Materials*, 50, 28-41. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.005>
- Barani, K., & Esmaili, H. (2016). Production of artificial stones labs using waste granite and marble stones sludge samples. *Journal of Mining and Environment*, 7(1), 135-141.
- Başçetin, A., Adıguzel, D., Eker, H., Odabaş, E., & Tuylu, S. (2021). Effects of puzzolanic materials in surface paste disposal by pilot-scale tests: observation of physical changes. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18, 949-964. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02892-w>
- Chioidi, C.F., & Rodriquez, H.P. (2009). Guide application of stones in coverings. *Sao Paulo Abirocha*, 118, 37-41.
- Debnath, S., Ranade, R., Wunder, S.L., Mccool, J., Boberick, K., & Baran, G. (2004). Interface effects on mechanical properties of particle-reinforced composites. *Dental Materials*, 20(7), 677-686. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2003.12.001>
- Deere, D.V., & Miller, R.P. (1966). *Engineering classification and index properties of intact rock*. University of Illinois. 90-101. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD0646610.pdf>
- Dehghan, S., Sattari, G., Chehreh, Chelgani, S., & Allabadi, M.A. (2009). Prediction of uniaxial compressive strength and modulus of elasticity for travertine samples using regression and artificial neural networks. *Mining Science and Technology*, 20, 41-46. [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60158-7](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60158-7)
- Efran, N.A. (2021). Recycling of marble calcite waste into useful artificial marble. *Journal of Advanced Engineering Trends*, 40, 7-12. <https://doi.org/10.21608/jaet.2021.82182>
- Felekoğlu, B., & Türkel, S. (2004). Yükleme hızının beton basınç dayanıma ve elastisite modülüne etkisi. *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 6(1), 65-75.

- Gomes, M.L.P.M., Carvalho, E.A.S., Demartin, T.J.C., Carvalho, E.A., Colorado, H.A., & Vieira, C.M.F. (2021). Mechanical and physical investigation of an artificial stone produced with granite residue and epoxy resin. *Journal of Composite Materials*, 55(9), 1247-1253. <https://doi.org/10.1177/0021998320968137>
- ISRM. (1978). Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanical Abstract*, 16, 135-140. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(79\)91451-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(79)91451-7)
- ISRM. (1978). Suggested methods for determining sound velocity. *International Journal of Rock Mechanic and Mining Science and Geomechanic Abstract*, 15, 53- 58.
- Köse, H. (2009). *Kaya mekaniği*, (4. Baskı). Dokuz Eylül Üniversitesi Yayınları.
- Medina, G., Saez del Bosque, I.F., Frias, M., Sanchez de Rojas, M.I., & Medina, C. (2017). Granite quarry waste as a future eco-efficient supplementary cementitious material (SCM): scientific and technical considerations. *Journal of Cleaner Production*, 148, 467e476. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.048>
- Menezes, R.R., Ferreria, H.S., Neves, G.A., & Ferreria, H.C. (2005). Use of granite sawing waste in the production of ceramic bricks and tiles. *Journal of European Ceramic Society*, 25(7), 1149-1158. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2004.04.020>
- Miller, J.D., Ishida, H., & Maurer, F.H.J. (1998). Dynamic-mechanical properties of interfacially modified glass sphere polyethylene. *Rheologica Acta*, 27, 397-404. <https://doi.org/10.1007/BF01332160>
- Özgüven, A., & Özçelik, Y. (2013). Investigation of some property changes of natural building stones exposed o fire and heat. *Construction and Building Materials*, 38, 813-821. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.072>
- Pires, V., Rosa, L.G., & Dionisio, A. (2014). Implications of exposure to high temperatures for stone cladding requirements of three Portuguese granites regarding the use of dowel-hole anchoring systems. *Construction and Building Materials*, 64, 440-450. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.035>
- Sabatokasis, N., Koukis, G., Tsiambaos, G., & Papanakli, G. S. (2008). Index properties and strength variation controlled by microstructure for sedimentary rocks. *Engineering Geology*, 97, 80-90. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.12.004>
- Sharma-Kumar, N., Kumar, P., Kumar, S., Skariah Thomas, B., & Chandra Gupta, R. (2017). Properties of concrete polished granite waste as partial substitution of coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 151, 158-163. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.081>
- Sharma, P.K. & Singh, T.N. (2008). A correlation between p-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67, 17–22. <https://doi.org/10.1007/s10064-007-0109-y>
- Shishegaran, A., Mohsen, S., Sajjad M., & Korayem A.H. (2021). The mechanical strength of the artificial stones, containing the travertine wastes and sand. *Journal of Materials Research and Technology*, 11, 1688-1709, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.02.013>
- Samad, H., A. & Rashid, R.A. (2020). Influence of dolomite and granite waste content on the properties of artificial marble, mineral research centre, department of mineral and geoscience. *Materials Science and Engineering*, 713(1) 1-9. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/713/1/012017>
- Şahin Demir, D., Çullu, M., & Eker, H. (2019). Betonların aşındırma ve karbonatlaşma performanslarına kireçsi uçucu küllerin Farklı incelik ve ikame oranlarının etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 17, 1150-1163. <https://doi.org/10.31590/ejosat.654733>
- Şahin Demir, D., Eker, H., & Çullu, M. (2022). Uçucu kül inceliğinin betonun sülfat direnci üzerine etkisi. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17, 287-303. <https://doi.org/10.54365/adyumbd.1053376>
- Tahran, F. (1989). *Mühendislik Jeolojisi Prensipleri*. (145). KTÜ yayınları.
- TS 699. (2009). *Tabii yapı taşları- muayene ve deney metodları*. TSE, Ankara.

- TS EN 1939. (2010). *Doğal taşlar- deney metotları- gerçek yoğunluk, görünür yoğunluk, toplam ve açık gözeneklilik tayini*, TSE, Ankara.
- TS EN 14066. (2004). *Doğal taşlar-deney metotları termal şok etkisiyle yıpranmaya direncin tayini*, TSE, Ankara.
- TS EN 12370. (2001). *Doğal Taşlar Deney Metotları - Tuz Kristallenmesine Direncin Tayini*. TSE, Ankara.
- Uysal, M. (2018). The use of waste maroon marble powder and iron oxide pigment in the production of coloured self-compacting concrete. *Advance Civil Engineering*, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2018/8093576>
- Yavuz, H., Demirdağ, S., & Caran, S. (2010). Thermal effect on physical properties of carbonate rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 47, 94-103. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2009.09.014>
- Yüçetürk, G. (2010). *Göller bölgesindeki kayaçların mineralojik petrografik özelliklerinin yapay mermer kalitesine etkileri* [Doktora tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]

## Atık mermer tozu katkılı kil tuğlaların fiziksel özelliklerinin araştırılması

### *Investigation of the physical properties of clay bricks with waste marble powder additive*

Lina İ. İSRAİL\*, Kemal KÖSEOĞLU

Ege Üniversitesi, Ege Meslek Yüksekokulu, 35100, İzmir

• Geliş tarihi / Received: 20.09.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 30.01.2023

#### Öz

Atıkların yeniden kullanılması ya da geri dönüştürülmesi üzerinde titizlikle durulması gereken önemli bir konudur. Bu çalışmada mermer madenciliğinde yan ürün olarak nitelendirilen mermer tozu kil tuğlalara katılarak değerlendirilmiştir. Hazırlanan tuğlalara sinterleşme sıcaklığı 950°, 1113° ve 1185° C olan üç farklı endüstriyel pişirim rejimi uygulanmıştır. Doğrusal pişirme küçülmesi, pişirme mukavemeti, su emme ve renk gibi fiziksel testler ile tuğlaların ulusal ve uluslararası standartlara uygunluğu araştırılmıştır. En uygun katkı oranının %20 olduğu görülmüştür. Pişirme küçülmesinin % 0,06 ile 2,4 arasında değiştiği, pişirme mukavemet değerinin en düşük 6 MPa en yüksek yaklaşık 37 MPa olduğu ve su emme değerinin ise % 13 ile %20 aralığında kaldığı tespit edilmiştir. Sıcaklık artışı ile kırmızı ve sarı renk değerlerinde azalma görülmüştür. Çalışmanın doğal kil kaynakların daha az kullanımı ve atıkların değerlendirilmesi açısından büyük önem taşıdığı düşünülmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Atık mermer tozu, Fiziksel özellikler, Kil tuğlalar

#### Abstract

Reusing or recycling of wastes is an important issue that needs to be considered painstakingly. In this study, marble dust, characterized as a by-product of marble mining, was evaluated by adding it to clay bricks. Three different industrial firing regimes with sintering temperatures of 950°, 1113°, and 1185°C were applied to the clay bricks prepared. The compliance of the bricks with national and international standards was investigated by physical tests such as linear firing shrinkage percentage, firing strength, water absorption percentage, and color. It was seen that the most appropriate contribution rate was 20%. The firing shrinkage changed between 0.06% and 2.4% while firing strength was a minimum of 6 MPa and maximum of 37 MPa and finally, water absorption percentage varied between 13%-20%. A decrease in red and yellow color values was observed with the increase in temperature. The study is thought to be of great importance in terms of less usage of natural clay resources and reuse of wastes.

**Keywords:** Waste marble powder, Physical properties, Clay bricks

\* Lina İ. İSRAİL; lina.israil.01@mail.ege.edu.tr



## 1. Giriş

### 1.1. Introduction

Teknoloji ve sanayileşmenin ilerlemesi ve hızlı nüfus artışı ihtiyaçları giderek arttırmakta, doğal kaynakların zamanla azalmasına, atıkların ve yan ürün oluşumunun katlanarak artmasına neden olmaktadır. Atık ve yan ürün niteliği taşıyan maddelerin depolanması ve biriktirilmesi insan sağlığı açısından zararsız olarak nitelendirilse bile büyük bir dikkat ve bilgi birikimi ile yapılmalıdır (Segada vd., 2005). Özellikle gelişmekte olan ülkelerde artan çevre kirliliği, toprakların giderek verimsizleşmesi gibi olumsuzluklar atık yönetiminde büyük sorunlara sebebiyet vermektedir (Khan vd., 2021). Doğru bir şekilde yapılacak geridönüşüm bu tür sorunları azaltarak ülke ekonomisine büyük fayda sağlayacaktır.

Dünya mermer rezervlerinin %40'ı Türkiye'de yer almaktadır (İhracat Genel Müdürlüğü, 2021). Ülkemizde mermer madenciliği giderek önem kazanmakta fabrika ve işleme tesislerinin sayısı her geçen gün artmaktadır. Bu durum mermer endüstrisinin en büyük sorunlarından biri olan doğaya büyük yığınlar halinde bırakılan mermer atıkların hacmini de giderek arttırmaktadır. Mermer madenciliğinde boyut küçültme işlemlerinde çıkarılan bloklar ürün haline dönüştürülürken oluşan parça ve tozlar suyla karıştırılır, makinelerde kek haline getirilir ve bu şekliyle atık olarak doğaya bırakılır (Bilgin & Koç, 2013). Toplam üretimin en az % 40'ını oluşturan, çevre açısından kalıcı etkisi bilinmeyen (Ceylan & Manca, 2013) bu alkali atıklar toprağın alkaliliğini artırarak (Abdalkader vd., 2021) bitki örtüsünü olumsuz etkilemekte, hava ve su kirliliğine de sebep olmaktadır.

İnce partiküllü ve az metal oksit içerikli mermer atık tozlarının tuğlalar, yapı malzemeleri, seramikler, karolar vb. pekçok endüstriyel uygulamada değerlendirilmesi için araştırmalar yapılmaktadır (Marras vd., 2010). Tuğlaların termal iletkenliğini düşürdüğü, ve uygun katkı miktarlarında pişme mukavemeti açısından olumlu sonuçlar alındığı literatürde belirtilmiştir (Sütçü vd., 2015; Munir vd., 2018; Khan vd., 2021). Seghir vd. (2019) yaptıkları çalışmada harçtaki bir miktar çimento yerine atık mermer tozu kullanılmıştır. Tuğlanın mukavemetinde ve görünen yoğunluğunda azalma, gözenekliliğinde de artış görülmüştür. Başta kalsit ( $\text{CaCO}_3$ ) ve dolomit ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ) olmak üzere mika, kuvars ve grafit gibi mineraller içeren mermer tozları seramik yapılarda eritici olarak kullanılmıştır. Pişme esnasında kalsiyum ve magnezyum oksidin silikalaşması ile oluşan ürünler bünyenin mekanik özelliklerini geliştirmiştir (Garcia-Ten vd., 2003).

1980'lerden sonra ülkemizde artan endüstrileşme ve şehirleşme bina ihtiyacını arttırdığı için tuğla üretimi ve dolayısıyla doğal ana hammadde olan killere de ihtiyacı arttırmıştır. Mermer tozunun tuğla reçetesine katılması ile atık hacminin ve kil tüketiminin azaltılması ve ekonomiye kazandırılması düşüncesiyle gerçekleşen bu çalışmanın amacı deneysel tuğla örneklerinin hazırlanması, pişme küçülmesi, pişme mukavemeti, su emme ve renk gibi fiziksel özelliklerinin incelenmesidir.

## 2. Materyal ve metod

### 2.1. Material and method

#### 2.1.1. Hammaddeler

##### 2.1.1.1. Raw materials

Bu çalışmada kullanılan hammaddeler Tablo 1'de kimyasal analizleri verilen plastik kil (Uşak kili) ve mermer tozudur (Aytaş Akın Mermer San. ve Tic. A.Ş., Burdur). Hammaddelerden alınan 10 gramlık örnekler  $110^\circ\text{C}$ 'de etüvde (Nüve KD 400) kurutulmuştur ardından kimyasal analizleri Ege Seramik Sanayi ve Ticaret A.Ş fabrikasında (Polat Holding A.Ş, İzmir, Türkiye) Metek Spectra IQ II X-ışınları flüoresans spektrometresi ile yapılmıştır.

**Tablo 1.** Hammaddelerin kimyasal analizi

**Table 1.** Chemical analysis of raw materials

Hammadde	KK*	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Toplam
Uşak kili	6,01	63,48	20,12	4,40	0,78	0,44	1,07	0,94	2,76	100
AMT	44,01	0,01	0,88	0,02	0,01	52,77	2,03	0,27	0,00	100

KK\*: Kızdırma kaybı

## 2.2. Hammaddelerin karakterizasyonu

### 2.2. Characterization of raw materials

TS 705 (2005) standardı gereği kullanılacak olan kil ulusal standartları karşılamalıdır bu amaçla ilk önce 1000°C'de pişirilen Uşak kilinden kesitler alınarak siyah çekirdek oluşumlarına bakılmıştır. TSE EN ISO 10545-4 (2000) eğilme testi için toz kuru kil ağırlıkça %7 oranında nemlendirilmiştir. Ardından el presinde 10 cm x 5 cm x 1 cm ebatlarında tek eksen boyunca 300 barlık hidrolik pres (SACMI 470, PIL) altında sıkıştırılmıştır. 110°C'de 2 saat etüvde (Nüve KD 400) bekletilen kilin kuru mukavemeti, yer karosu pişirim rejimi olan 1185°C'de 42 dakika pişirim sonrası küçülme yüzdesi, mukavemeti, su emme yüzdesi ve pişme rengi gibi bazı fiziksel özellikleri Ege Seramik Sanayi ve Ticaret A.Ş Kimya laboratuvarında deney numuneleri hazırlanmadan önce tayin edilmiştir.

#### Pişme küçülmesi (PK) testi:

Kuru ve pişmiş örneklerin boyu ( $l_k$ ,  $l_p$ ) kumpas ile ölçülmesi sonrası PK (1) formülüne göre hesaplanmıştır.

$$\% \text{ PK} = \frac{l_k(\text{mm}) - l_p(\text{mm})}{l_k(\text{mm})} \times 100 \quad (1)$$

#### Pişme ve kuru mukavemet (PM ve KM) testi:

3 nokta eğme cihazı (Ceramic Instrument Bending Strength) kullanılarak kilin KM ve PM (2) formülü kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{PM / KM (kg/cm}^2\text{)} = \frac{3x Fx L}{2x bxh^2} \quad (2)$$

Eşitlikte F numune üzerine uygulanan kuvvet, L, mesnetler arası mesafe, b ve h sırasıyla numune boyu ve yüksekliğidir.

#### Su emme (SE) testi:

Kil kuru olarak ( $W_1$ ) ve iki saat suda kaynatılıp kurutulduktan ( $W_2$ ) sonra ayrı ayrı tartılmıştır. SE yüzdesi (3) formülü kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\% \text{ SE} = \frac{(W_1 - W_2)}{W_1} \times 100 \quad (3)$$

#### Renk Testi:

CIELab renk sistemine göre trikromatik renk koordinatlarını ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) belirlemek için Erichsen Spectromaster 565-D renk cihazı kullanılmıştır. Beyazlık derecesi, 0-100 arasında değişen  $L^*$  ile belirlenir. 0 siyah, 100 beyaz rengi temsil eder. Yeşil-kırmızı arası renk değişimi  $a^*$  ile ( $-a^*$  yeşil,  $+a^*$  kırmızı) mavi-sarı arası renk değişimi  $b^*$  ile ifade edilir ( $-b^*$  mavi,  $+b^*$  sarı).

## 2.3. Deneysel tuğla örnekleri (DTÖ)' nin hazırlanması

### 2.3. Preparation of the experimental brick samples (EBS)

Standart ve ağırlıkça farklı oranlarda atık mermer tozu içeren 11 adet DTÖ Tablo 2'de verilen reçeteye göre hazırlanmıştır. AMT'nin tuğla yapımında kullanılabilirliği bir standarda göre tespit edilmemiştir. Ancak, tuğlada olası çatlamalara karşı tane iriliğinin küçük olması, erime ve sinterleşmede sorun yaşanmaması için mermer miktarının iyi ayarlanması gerekir (Marbleport, 2014). Bu nedenle katkı miktarı en çok %40 kullanılabilmiştir. Karışımlara öğütmeyi kolaylaştırması için ağırlıkça %1 sodyum silikat çözeltisinden (%10 w/w) ilave edilerek bu işleme tane iriliği -100 µm olacak şekilde (Maccihine Macine Schmalta) 16 dakika devam edilmiştir. 110 °C'ye ayarlı etüvde (Nüve KD 400) bir saat kurutulan karışım bölüm 2.2'de verilen koşullarda şekillendirilmiş ve sıkıştırılmıştır. Numunelere uygulanacak olan endüstriyel pişirim sıcaklıkları ve toplam süreleri tuğlanın pişme sıcaklığı olan 950°C (65 dk), Ege Seramik fabrikasının duvar ve yer karosu pişirim sıcaklıkları olan 1113°C (36 dk) ve 1185°C (42 dk) olarak belirlenmiştir. Tünel fırınlarda (SACMI) gerçekleşen pişirim döngüleri son kurutma, dehidrasyon, oksidasyon, sinterleşme ve pişme indirgenmesi (soğutma) basamaklarını içerir. Sinterleşme basamağı tüm pişirim sıcaklıklarında 8 dakikadır. Fırın sıcaklığı 100°C'ye düştüğünde numuneler fırından çıkarılmıştır. DTÖ, bölüm 2.2'de verilen pişme küçülmesi, pişme mukavemeti, su emme ve renk testlerine tabi tutulmuştur.

**Tablo 2.** DTÖ bileşimleri**Table 2.** Chemical composition of the EBS

DTÖ numarası	STD*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Kil	100	99	97,5	95	92,5	90	87,5	85	80	70	60
AMT	0	1	2,5	5	7,5	10	12,5	15	20	30	40

STD\*: Standart

### 3. Bulgular ve tartışma

#### 3. Results and discussion

Kil içinde yer alan organik maddeler 250-500°C pişme sıcaklığı aralığında yanar. Özellikle fırın oksijeninin yetersiz olduğu hızlı tuğla pişiriminde kilin dış tabakalarında sinterleşme başladığı halde iç tabakalarında yanmamış organik maddeler siyah çekirdek oluşumu şeklinde kendini gösterir (Köseoğlu, 2007).

Çalışmada kullanılan kil için böyle bir durum söz konusu değildir. Saf kaolinitin  $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$  oranı 1,3 kullanılan

Uşak kilinin ise 3,16'dır. Oranın yüksek olması kilde kuvars mineralini; reçetedeki ağırlıkça %2'den fazla olan  $\text{K}_2\text{O}$  yüzdesi de illit mineralini işaret etmektedir. Düşük kızdırma kaybı yüzdesi (%6,01), uçucu bileşiklerin, yanmış organik maddelerin ve karbonat ayrışmasının az olduğunu gösterirken (Santos, 1989; Segada vd., 2005) bu durum toplam toprak alkali yüzdelерinin düşük olmasından da anlaşılmaktadır. Pişme küçülmesi %7,4 olan kilin su emme yüzdesi %1,8'dir. Yüksek alümina yüzdesine (%20,2) sahip Uşak kilinin kuru ve pişme mukavemet değerleri sırasıyla 66,4 ve 493 kg/cm<sup>2</sup> (6,51 MPa ve 48,64 MPa) olup oldukça plastiktir. Mukavemet, küçülme ve su emme değerlerinin tümünün standarda (TS 705, 2005) uygun olması kilin rahatlıkla tuğla yapımı için kullanılabileceğini göstermektedir. Trikromatik renk koordinatları (L\*, a\*, b\*) 44,86, + 12,03, +16,05'dir. Yapısındaki yüksek Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği (%4,4 w/w) kilin kırmızı (+12,03) ve sarı (+16,05) rengini açıklamaktadır.

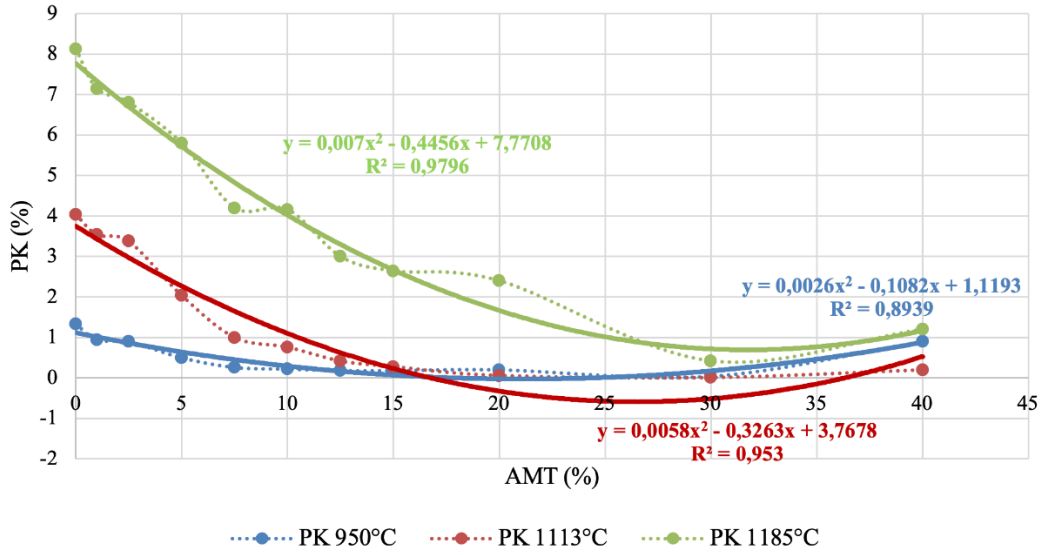
Yaklaşık ağırlıkça %53 oranında CaO ve yaklaşık %2 oranında MgO içeren atık mermer tozu büyük çoğunlukla kalker, az bir oranda da dolomit kaynaklıdır (Saboya Jr. vd., 2007; Bilgin vd., 2012; Munir vd., 2018) %44,01 olan kızdırma kaybı yüzdesi de bunu açıkça ortaya koymaktadır.

#### 3.1. DTÖ'nin fiziksel özellikleri

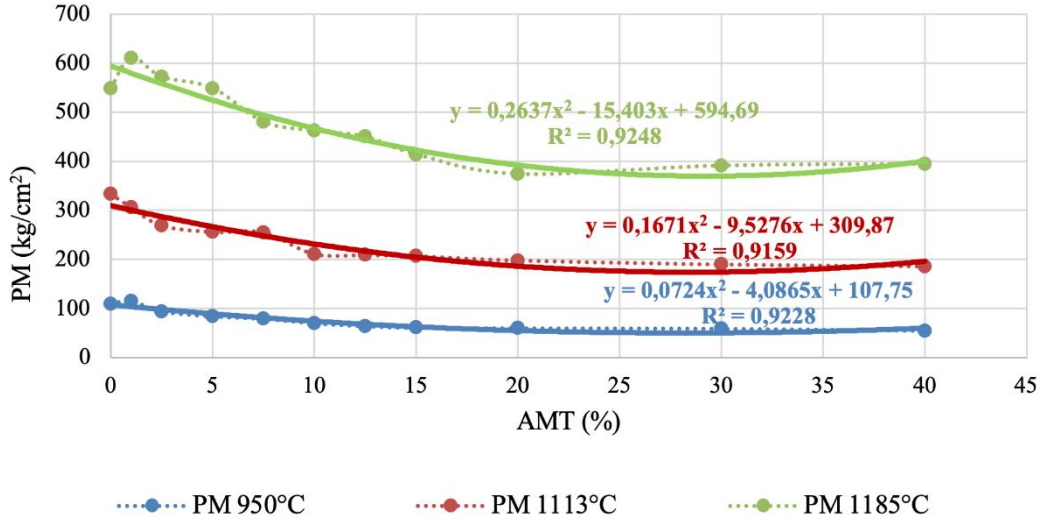
##### 3.1. Physical properties of the EBS

Şekil 1 AMT miktarı ile değişen DTÖ'nin PK değerlerini göstermektedir. Ölçümler çizilen eğilim çizgileriyle %90'dan fazla uyum göstermiştir. %30 AMT katkısına kadar PK tüm pişirim sıcaklıklarında azalmıştır (küçülme). 950°C'de azalma yaklaşık %1,3, 1113°C'de %4 ve 1185°C'de %7'dir. %40 AMT katkısında PK artmıştır (genleşme). DTÖ'de organik maddelerin yanması ve gaz çıkışlarının çok olması küçülmenin nedeni olarak düşünülmüştür (Saboya Jr. vd., 2007; Munir vd., 2018 a). Genleşmenin ise kalkerin CaO'ye dönüşümü esnasında açığa çıkan CO<sub>2</sub> gaz çıkışı ve gözenek sayısının artmasından ya da çok reaktif genleşebilen CaO'in havadaki birçok madde ile etkileşime girmesinden kaynaklanabileceği tahmin edilmiştir. Benzer durumlara literatürde de rastlanmıştır (Bilgin vd., 2012). Tüm DTÖ'nin PK yüzdeleri üst limit olan %8'in altındadır (ASTM C210-95, 2019).

Tuğlanın gözenek dağılımı, sinterleşme derecesi (Dayalan & Beulah, 2014) ve tuğlaya konan katkı maddelerinin sertliği (Yüçetürk, 2010; Bilgin vd., 2012) bükülme mukavemetini belirleyen parametrelerdir. Düşük sertliğe sahip mermer katkısı ile tüm sıcaklıklarda PM düşmüştür (Şekil 2). Eğilim çizgileriyle %90 dan fazla uyumlu olan grafiklere göre 950°C'de 109 kg/cm<sup>2</sup> (10,69 MPa) olan mukavemet değeri %1 AMT katkısı ile 115 kg/cm<sup>2</sup> (11,28 MPa) yükselmiş ve kademeli olarak %20 AMT katkısına kadar 60 kg/cm<sup>2</sup> (5,88 MPa) değerine düşmüştür. Daha yüksek AMT içerikli DTÖ'nin mukavemet değerleri yaklaşık 7 MPa olan standart (TS 705, 2005) alt limitin dışında kalmıştır. %40 AMT katkılı DTÖ'nin PM, kontrol örneğine göre %50,4 azalmıştır. 1113° ve 1185°C pişirimlerinde PM sırasıyla 334 ve 549 kg/cm<sup>2</sup> (32,75 ve 549 MPa) dir. PM %40 AMT katkısı ile 1113°C'de %44,3 azalarak 186 kg/cm<sup>2</sup> (18,24 MPa), 1185°C'de %28,2 azalarak 394 kg/cm<sup>2</sup> (38,64 MPa) değerine düşmüştür.



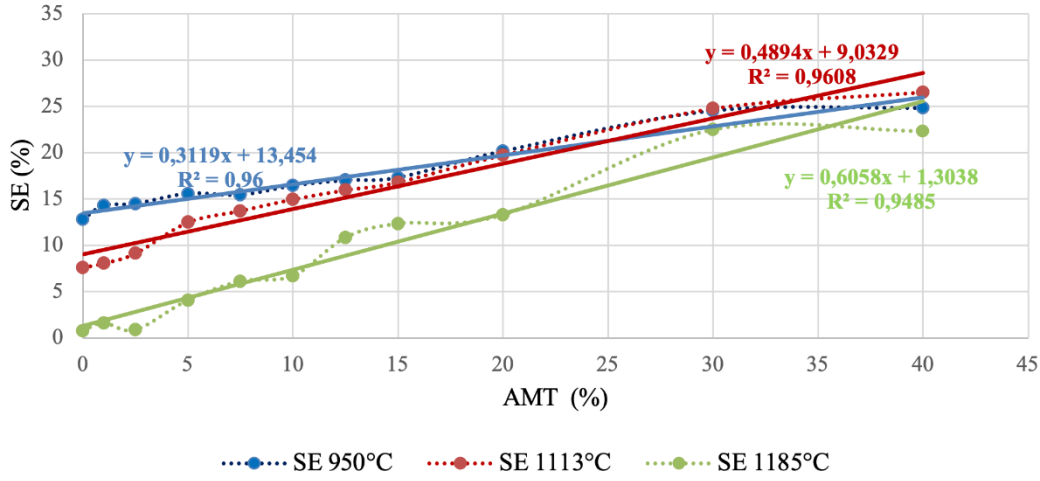
**Şekil 1.** Atık mermer tozu (AMT) miktarı ile değişen DTÖ'nin PK değerleri  
**Figure 1.** The variation of the fired shrinkage values of the EBS with waste marble powder (WMP)



**Şekil 2.** Atık mermer tozu (AMT) miktarı ile değişen DTÖ'nin PM değerleri  
**Figure 2.** The variation of the fired strength values of the EBS with waste marble powder (WMP)

Yapılan araştırmalar tuğlada SE yüzdesinin üst limiti olarak %20-%30 arası olduğunu (Saboya Jr. vd., 2007, Kazmi vd., 2016, Munir vd., 2018 b) ifade etse de ılıman iklim koşulları için bu değer ASTM C62 (2013) standardı gereği %22'dir. DTÖ'nin SE yüzdesi Şekil 3'de verilmiştir. Doğrusal eğilim çizgileri ile %95 uyumlu grafiğe göre katkısız DTÖ'nin SE yüzdesi sırasıyla 950°, 1113°, 1185°C pişirim sıcaklıklarında %12,76, 7,59, 0,77'dir. %20 AMT içeren örneklerin tüm sıcaklıklarda SE değerleri üst limitin altında kalmıştır. Daha düşük mermer içeriklerinde SE değerleri 950°C ve 1113°C pişirimlerinde standart dışı olmuştur.

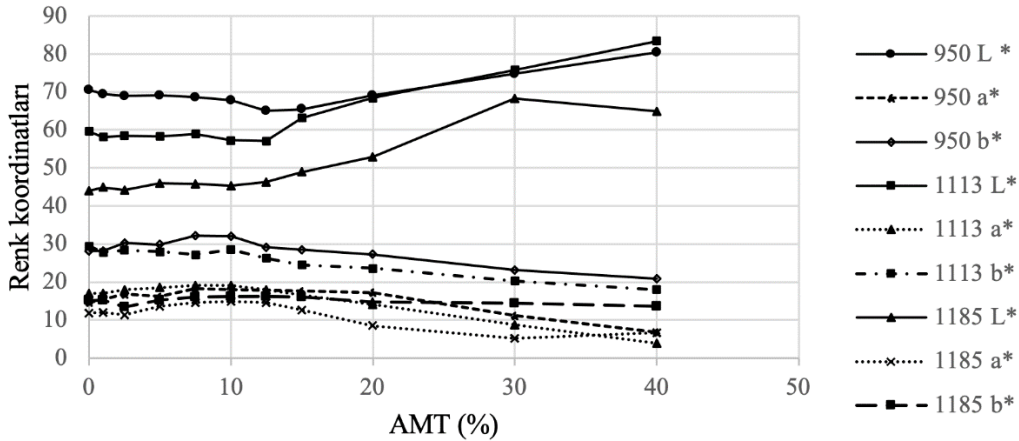
Estetik özelliklerin en az mekanik özellikler kadar önemli olduğu pişmiş tuğlalarda renk bütünlüğü aranır (Beal vd., 2019). Açık renkli tuğlaların ticari değeri düşüktür. Tuğlaya kırmızı, sarı ve kahverengi rengi veren kil yapısında yer alan demirin 900°-1250°C arası fırın sıcaklığında oksitlenme derecesidir (Toydemir, 1978; Tekinel vd., 1989; Karaman, 2006). Bu sebeple Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarının en fazla %5-6 arası olması istenir. Daha yüksek demir içeriği tuğlalarda koyu mavi hatta siyah renge sebep olabilir (Maaze, 2016).



Şekil 3. Atık mermer tozu (AMT) miktarı ile değişen DTÖ'nin SE değerleri

Figure 3. The variation of the water absorption values of the EBS with waste marble powder (WMP)

Tuğla rengini etkileyen bir diğer unsur kalkerdir. Özbek ve arkadaşlarının 2001'de (Karaman, 2006) yaptığı bir çalışmaya göre %7 kalker içeriği ile 1050°-1100°C'de pişmiş toprak ürününün soluk sarı, sarı ve kahverengi tonlarında olduğu ve özellikle kırmızı renk tonun sıcaklık artışı ile açıldığı görülmüştür. Şekil 4 artan AMT miktarına karşı değişen renk koordinatlarını göstermektedir. L\* değerleri üç pişirim sıcaklığında %15 AMT katkısından sonra yükselmiştir. CaO miktarı artışı ile Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarı azalmış renk hafif açılmıştır. Aynı durum a\* (kırmızı) ve b\* (sarı) değerlerinin düşmesiyle de anlaşılmıştır.



Şekil 4. Atık mermer tozu (AMT) miktarı ile değişen DTÖ'nin renk koordinatları

Figure 4. The variation of the colour coordinates of the EBS with waste marble powder (WMP)

Yukarıda anlatılan bulguların ışığında standartlara uygunluğu açısından üç pişirim sıcaklığı için en uygun AMT miktarı %20 olarak belirlenmiştir. Sırasıyla Tablo 3 %20 AMT'nin fiziksel özelliklerini Tablo 4 ise renk özelliklerini göstermektedir.

Tablo 3. %20 AMT katkılı tuğlanın fiziksel özellikleri

Table 3. The physical properties of the brick with 20 % WMP additive

Mekanik özellikler/Pişirim sıcaklığı (°C)	TS 705	950	1113	1185
PK (%)	maks. %8	0,2	0,06	2,4
PM (MPa)	min. 7 Mpa	5,88	9,61	36,68
SE (%)	maks. %22	20,15	19,72	13,28

maks: maksimum, min. minimum

**Tablo 4.** %20 AMT katkılı tuğlanın renk koordinatları  
**Tablo 4.** *The colour coordinates of the brick with 20 % WMP additive*

Piştirim sıcaklığı (°C)	Renk koordinatı	STD	%20 AMT
950	L*	70,57	69,12
	a*	14,63	17,28
	b*	28,15	27,29
1113	L*	59,61	68,45
	a*	17,00	14,05
	b*	29,42	23,58
1185	L*	43,96	52,93
	a*	11,85	8,48
	b*	15,14	14,72

STD: Standart

#### 4. Sonuçlar

##### 4. Conclusions

- AMT katkılı tuğlaların mekanik ve renk özelliklerinin incelendiği bu çalışmada kullanılan Uşak kilinin tuğla üretimi için uygun olduğu görülmüştür. Kızdırma kaybı düşüktür (%6,01). PM, SE, kuru ve pişme mukavemetleri sırasıyla %7,4, %1,8, 6,51 MPa ve 48,64 MPa olup oldukça plastiktir. %4,4 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriğinden dolayı rengi koyu sarı-kırmızı arasındadır (a\*= 12,03, b\*= 16,05).
- AMT tuğla içine en fazla %40 oranında katılabilmiştir. Daha yüksek AMT katkılı tuğlalar kırılmıştır.
- PK'nin % 0,2-2,4 arasında PM'nin en düşük 6 MPa ve SE'nin en fazla %20 olduğu belirlenen % 20 AMT katkılı tuğlalar TS 705 (2005) standardına en uygun sonuçları vermiştir.
- AMT tuğlaların sarı ve kırmızı renkleri azalan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarına bağlı olarak hafif açılmıştır.

#### Teşekkür / Katkı belirtme (Gerekli durumlarda veya tercihen kullanılır)

##### Acknowledgement

Hammaddelerin temini ve laboratuvar cihazlarının kullanımına imkân veren Ege Seramik fabrikası yönetimine ve Kimya Laboratuvarı personeline yazarlar teşekkürü bir borç bilirlir.

#### Yazar katkısı

##### Author contribution

Bu çalışma için hipotezin geliştirilmesi, yöntemin planlanması, deneylerin yapıldığı laboratuvar için izin alınması ve deneylerin yapılmasından sorumlu olan yazar Kemal Köseoğlu; literatür taraması, makale yazımı ve makaleyi eleştirel incelenmeye hazır hale getiren yazar Lina İ. İsrail'dir.

#### Etik beyanı

##### Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan ederler.

#### Çıkar çatışması beyanı

##### Conflicts of interest

Yazarlar aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

#### Kaynaklar

##### References

Abdelkader, H. A. M., Hussein, M. M. A., & Ye, H. (2021). Influence of waste marble dust on the improvement of expansive clay soils. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2021/3192122>

- ASTM International (2013). *Standard Specification for Building Brick (Solid Masonry Units Made From Clay or Shale ASTM C62*. West Conshohocken: An American National Standard.
- ASTM International (2019). *Standard Test Method for Standard Test Method for Reheat Change of Insulating Firebrick ASTM C210-95*. West Conshohocken: An American National Standard.
- Beal, B., Selby, A., Atwater, C., James, C., Viens, C., & Almquist, C. (2019). A comparison of thermal and mechanical properties of clay bricks prepared with three different pore-forming additives: vermiculite, wood ash, and sawdust. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 38(6), 13150-13155. <https://doi.org/10.1002/ep.13150>
- Bilgin, N., Yeprem, H., Arslan, S., Bilgin, A., Günay, E., & Marşoğlu, M. (2012). Use of waste marble powder in brick industry. *Construction and Building Materials*, 29, 449-457. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.011>
- Bilgin, Ö., & Koç, E. (2013). Mermer madenciliğinde çevresel etkiler. *Madencilik Türkiye Dergisi*, 28, 68-79.
- Ceylan, H., & Manca, S. (2013). Mermer parça atıklarının beton agregası olarak değerlendirilmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi*, 3(1), 21-25.
- Dayalan, J., & Beulah, M. (2014). Glazed sludge tile. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 4(3), 201-204.
- Garcia-Ten, J., Mallol, C., Bou, E., Silva, G., Fernandez, J., Molina, A., & Romera, J. (2003). Recycling marble working wastes in manufacturing ceramic products. *Ceramic Forum International*, 80(9), E884-E888
- İhracat Genel Müdürlüğü (2021). *Doğal taşlar sektör raporu*. Türkiye Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı. <https://ticaret.gov.tr/data/5b87000813b8761450e18d7b/Do%C4%9Fal%20Ta%C5%9Flar%20Sekt%C3%B6r%20Raporu%202021.pdf>
- Karaman, S. (2006). Yapı tuğlalarında renk oluşumu. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 9(1), 125-129.
- Kazmi, S. M., Abbas, S., Saleem, M. A., Munir, M. J., & Khitab, A. (2016). Manufacturing of sustainable clay bricks: utilization of waste sugarcane bagasse and rice husk ashes. *Construction and Building Materials*, 120, 29-41. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.084>
- Khan, Z., Gul, A., Shah S. A. A., Samiullah, Q., Wahab, N., Badshah, E., Naqash, T., & Shahzada, K. (2021). Utilization marble wastes in claybricks: a step towards lightweight energy efficient construction materials. *Civil Engineering Journal*, 7(09), 1488-1500. <http://dx.doi.org/10.28991/cej-2021-03091738>
- Köseoğlu, K. (2007). Talaş ve strafor katılarak tuğla üretimi. *Celal Bayar Üniversitesi Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi*, 2(8), 45-54.
- Maaze, R., Kumar, V., & Mishra, S. K. (2016). Influence of marble and aluminium waste powder on the performance of bricks. *International Journal of Engineering Development and Research*, 4(2), 900-912.
- Marbleport (2014). Tuğla kiremit hammaddesi. Türkiye'nin yapı taşları maden-mermer portalı. <http://www.Marbleport.com/doğal-kaynaklar/62/tuğla-kiremit-hammaddesi>
- Marras, G., Careddu, N., Intemicola, C. & Siotto, G. (2010). *Recovery and reuse of marble powder by-product*. Global Stone Congress 2010 (ss.1-5), Spain.
- Munir, M. J., Abbas, S., Nehdi, M. L., Kazmi, S. M. S., & Khitab, A. (2018 b). Development of eco-friendly fired clay bricks incorporating recycled marble powder. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(5), 1-11. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002259](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002259)
- Munir, M. J., Kazmi, S. M. S., Gencel, O., Ahmad, M. R., & Chen, B. (2021). Synergistic effect of rice husk, glass and marble sludges on the engineering characteristics of eco-friendly bricks. *Journal of Building Engineering*, 42, 102484. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102484>
- Munir, M.J., Kazmi, S. M. S., Wu, Y., Hanif, A., & Khan, M. U. A. (2018 a). Thermally efficient fired clay bricks incorporating waste marble sludge: an industrial-scale study. *Journal of Cleaner Production*, 174, 1122-1135. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.060>
- Özbek, K., Çakı, M. & Ay, N. (2001). Pişmiş toprak bünyelerde CaO ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in etkileri. 1. *Uluslararası Pişmiş Toprak Sempozyumu* (pp.145-151), Eskişehir.
- Saboya, F., Xavier, G., & Alexandre, J. (2007). The use of the powder marble by-product to enhance the properties of brick ceramic. *Construction and Building Materials*, 21(10), 1950-1960. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.029>
- Santos, P. (1980). *Clay Science and Technology* (2nd ed.). Edgar Blucher.
- Segadães, A., Carvalho, M., & Acchar, W. (2005). Using marble and granite rejects to enhance the processing of clay products. *Applied Clay Science*, 30(1), 42-52. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2005.03.004>
- Sütçü, M., Alptekin, H., Erdoğan, E., Er, Y., & Gencel, O. (2015). Characteristics of fired clay bricks with waste marble powder addition as building materials. *Construction and Building Materials*, 82, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.055>
- Tekin, O., Çevik, B., & Tekinsoy, M. A. (1989). *İnşaat Malzeme Bilgisi*. Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi.
- Toydemir, N. (1978). *Pişmiş toprak yapı malzemesinin rasyonel üretim olanaklarının araştırılması* [Doçentlik Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi].
- Türk Standardı. (2000). *Seramik karolar- Eğilme Dayanımı ve Kırılma Dayanımı Tayini* (TSE EN ISO 10545-4:2000). Türk Standardları Enstitüsü.
- Türk standardı. (2005). *Fabrika Tuğlaları-Duvarlar için Dolu ve Düşey Delikli* (TS 705). Türk Standardları Enstitüsü.
- Yüçetürk, G. (2010). Yapay mermerde kullanılan kuvars ve kalsit minerallerinin fizikomekanik özellikleri. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 2(3), 72-80.

## Hızlı katılaştırma ve mekaniksel alaşımlama yöntemleri ile üretilen $Al_{85}Ni_5Fe_5Nd_5$ alaşımının yapısal ve ısıl özellikleri

*Microstructure and thermal properties of  $Al_{85}Ni_5Fe_5Nd_5$  alloy produced by rapid solidification and mechanical alloying methods*

Musa GÖĞEBAKAN\* , Nazlı CANAL 

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 46100, Kahramanmaraş

• Geliş tarihi / Received: 19.04.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 31.01.2023

### Öz

Bu çalışmada,  $Al_{85}Ni_5Fe_5Nd_5$  at.% de alaşımı hızlı katılaştırma yöntemi ile ince şeritler halinde ve mekaniksel alaşımlama (MA) yöntemi ile tozlar halinde elde edilmiştir. Alaşımların morfolojik özellikleri, faz tanımlaması, parçacık boyutu ve parçacıkların dağılımı gibi yapısal özellikleri X-ışını difraksiyonu (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Alaşımların kristalleşme sıcaklıkları, aktivasyon enerjisi ve faz dönüşüm sıcaklıkları gibi ısıl özellikleri diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ile incelenmiştir. Hızlı katılaştırma metodu ile üretilen şeritler amorf yapıda, MA metodu ile üretilen tozlar ise nanokristal yapıda elde edilmiştir. XRD sonuçları, 200 saatlik alaşımlama işleminden sonra toz alaşımların kristal boyutlarının 15 nm' nin altına düştüğünü ve  $Al_3Ni$  ve  $Al_{18}Nd_3$  gibi fazların nanokristal yapıda oluştuğunu göstermiştir. Amorf alaşımların aktivasyon enerjisi Kissinger metodu ile hesaplanmıştır. Amorf alaşımın birinci kristalleşme pikinin başlama sıcaklığı için aktivasyon enerjisi 482 kJ/mol olarak hesaplandı. Bu çalışma amorf alaşım üretmek için hızlı katılaştırma, nanokristal alaşım üretmek için MA metodunun uygun olduğunu göstermiştir.

**Anahtar kelimeler:** Amorf alaşım, Hızlı katılaştırma, Mekaniksel alaşımlama, Nanokristal

### Abstract

In this study,  $Al_{85}Ni_5Fe_5Nd_5$  (at.%) alloy was produced as thin ribbons by rapid solidification method and as powders by mechanical alloying method. The structural properties of the alloys such as morphological properties, phase identification, particle size and distribution of particles were investigated using X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). Thermal properties of the alloy such as crystallization temperatures, activation energy and phase transformations were investigated by differential scanning calorimetry (DSC). The ribbons produced by the rapid solidification method were obtained in amorphous structure, and the powders produced by mechanical alloying were obtained in nanostructure. The XRD results showed that after 200 h of alloying process, the crystal size of the powder alloys decreased below 15 nm and nanostructured phases such as  $Al_3Ni$  and  $Al_{18}Nd_3$  were formed. The activation energy of the amorphous alloy was calculated by the Kissinger method. The activation energy for the initiation temperature of the first crystallization peak was calculated as 482 kJ/mol. This study showed that rapid solidification method is suitable for producing amorphous alloy and mechanical alloying method is suitable for producing nanocrystalline alloy.

**Keywords:** Amorphous alloy, Rapid solidification, Mechanical alloying, Nanocrystalline

\* Musa GÖĞEBAKAN; gogebakan@ksu.edu.tr



## 1. Giriş

### 1. Introduction

Alüminyum elementi; demir ve bakır gibi insanların ilk çağlardan beri kullandıkları elementlerden sonra keşif edilmesine rağmen, günümüzde demirden sonra en çok kullanılan malzemedir. Ayrıca alüminyuma eklenen alaşım elementleri, alüminyumun mukavemet ve sertlik özelliklerini daha da iyileştirerek onu diğer metallere üstün kılmaktadır. Dolayısıyla, alüminyum alaşımları mukavemetlerinin yüksek olması, iyi korozyon direnci, düşük özgül ağırlık, elektrik ve ısıyı iyi iletme, kolay şekillendirilebilme gibi özelliklerinden dolayı kullanım alanları giderek artan vazgeçilmez malzemeler haline gelmiştir (Inoue, 1998; Troeger & Starke, 2000; Kaya vd., 2012; Chen vd., 2013). Alüminyumun mevcut özelliklerini iyileştirerek kullanım alanlarını artırmak amacı ile alüminyuma farklı oranlarda alaşımlama elementleri eklenerek yeni alaşımlar üretilmiştir. Son yıllarda yapılan çalışmalar, bir malzemenin özelliklerinin yalnızca ilave edilen alaşımlama elementlerine değil aynı zamanda uygulanan üretim tekniğine de bağlı olduğunu göstermiştir.

Al-esaslı alaşımlar farklı tekniklerle üretilebilmektedir. Bu teknikler arasında en çok kullanılanlar; fiziksel buhar biriktirme, geleneksel katılaştırma, hızlı katılaştırma, gaz atomizasyon, döküm ve mekaniksel alaşımlama gibi tekniklerdir. Alaşım üretmek için bu tekniklerden biri kullanılırken, üretilecek malzemenin miktarı, maliyeti, geometrik yapısı, alaşım bileşenlerinin erime sıcaklıkları ve elde edilmesi hedeflenen mikro yapı gibi durumlar dikkate alınmalıdır. Son yıllarda bu teknikler kullanılarak birçok Al-esaslı alaşım üretilmiştir. Ancak bazı durumlarda, Al elementinin ergime sıcaklığının düşük olması nedeniyle, özellikle yüksek ergime sıcaklığına sahip bileşenlerden oluşan alaşımlar için Al-esaslı alaşımların üretilmesi oldukça zordur. Bu tür zorlukların üstesinden gelmek için, genellikle MA tekniği kullanılır. Bu teknik bir katı-katı reaksiyonu olduğu için, alaşımı oluşturan elementlerin eritilmesine gerek olmaksızın alaşım üretilebilmektedir. Böylece, bu teknik kullanılarak elementlerin erime sıcaklıkları dikkate alınmadan alaşımlar kolayca üretilebilir. Dolayısıyla MA tekniği ile erime sıcaklıkları birbirinden farklı olan elementlerle alaşım üretmek mümkündür. Bunun yanında, diğer tekniklerle üretilmesi oldukça zor ve hatta imkânsız olan alaşımlar MA tekniği ile üretilebilmektedir. Bu tekniğin diğer bir önemli avantajı ise, hedeflenen mikro yapıya ulaşıldığı zaman alaşımlama işlemi sonlandırılıp istenilen mikro yapıya sahip malzemenin üretilmesinin mümkün olmasıdır (Suryanarayana, 2001).

Amorf, nanaokristal, kuazikristal gibi alaşımlar, aynı kompozisyona sahip kristal alaşımlardan daha iyi özellikler sergilediği için çok araştırılan malzeme grubundandır (Inoue, 1998; Inoue, 2000; Avar vd., 2008; Avar & Gogebakan, 2009; Viet vd., 2015; Li vd., 2022). Bu alaşımlar yarı-kararlı alaşımlar olarak adlandırılır. Bu malzemeler yüksek sıcaklıklarda faz dönüşüme uğrayarak kristal yapıya geçerler ve oda sıcaklığındaki üstün özellikleri kaybolur. Dolayısıyla, bu alaşımların kristal hale geçiş sıcaklıklarının bilinmesi önemlidir. Bu sıcaklık kristalleşme sıcaklığı ( $T_x$ ) olarak adlandırılmaktadır. Diğer taraftan amorf alaşımların düşük sıcaklıklarda kontrollü kristalleştirilmesi ile amorf yapı içerisinde nanokristal parçacıklar oluşabilmektedir. Nanokristal yapıdaki parçacıkların, amorf yapı içerisinde homojen dağılımı, faz yapısı, parçacık boyutu, parçacık hacim oranı gibi mikroyapısal parametreler malzemenin mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerini önemli ölçüde etkileyen faktörlerdir. Bazı alaşımlarda nanokristallerin amorf yapı içerisinde homojen olarak dağılımı malzemenin mekanik özelliklerini 2-3 kat artırmaktadır (Maurya vd., 2016; Mudry vd., 2021).

Mevcut çalışmada,  $Al_{85}Ni_5Fe_5Nd_5$  alaşımı hızlı katılaştırma yöntemi ile ince şeritler halinde ve MA yöntemi ile tozlar halinde elde edilmiştir. Alaşımların morfolojik özellikleri, faz tanımlaması, parçacık boyutu ve parçacıkların dağılımı gibi yapısal özellikleri ile kristalleşme sıcaklıkları, aktivasyon enerjisi ve faz dönüşüm sıcaklıkları gibi ısıl özellikleri detaylıca incelenmiştir.

## 2. Materyal ve metod

### 2. Material and method

Bu çalışmada  $Al_{85}Ni_5Fe_5Nd_5$  alaşımı hızlı katılaştırma ve MA teknikleri ile üretilmiştir. Alaşımlar hızlı katılaştırma tekniği ile şeritler halinde ve MA tekniği ile tozlar halinde elde edilmiştir. Alaşımların üretilmesi için gerekli elementler (Al, Ni, Fe, Nd) en az %99,7 saflıkta Alfa Aesar ve Merck firmasından temin edildi. Alaşımı oluşturan Al, Ni, Fe ve Nd elementlerinin bazı özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Bu çalışmada kullanılan elementlerin bazı özellikleri  
**Table 1.** Some properties of the elements used in this study

Element sembol	Erime sıcaklığı (K)	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Atom kütlesi (g/mol)	Kristal yapı	Atomik çap (Å)	Örgü parametresi (Å)
Al	933.5	2.70	26.98	YMK*	1.43	4.05
Ni	1728	8.91	58.69	YMK	1.25	3.52
Fe	1811	7.87	55.85	HMK*	1.27	2.87
Nd	1290	7.00	144.24	Hekzagonal	1.82	3.66

YMK\*: Yüzey merkezli kübik, HMK\*: Hacim merkezli kübik

Al<sub>85</sub>Ni<sub>5</sub>Fe<sub>5</sub>Nd<sub>5</sub> alaşımı önce Fritsch Pulverisette-5 marka MA cihazı ile tozlar halinde üretilmiştir. Alaşım, argon atmosferinde 250 ml hacimli paslanmaz çelik havan içinde ve 15 mm çapa sahip bilyeler ile bilye-toz kütle oranı 10:1 olacak şekilde hazırlanmıştır. Alaşımı oluşturan tozların açık havada oksitlenmesini önlemek amacıyla, elementler Ar atmosferinde kapalı bir ortamda (glove-box) içerisinde tartılarak hazırlanmıştır. MA işlemi esnasında cihazın içerisindeki sıcaklık artışı önlemek için cihaz 30 dakika çalıştıktan sonra 30 dakika duracak şekilde programlanmıştır. Belirli zaman aralıklarında (2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20, 30, 50, 70, 100, 150 ve 200 saat) cihazdan numuneler alınarak incelenmiştir. Alaşım üretiminin ikinci aşamasında Al<sub>85</sub>Ni<sub>5</sub>Fe<sub>5</sub>Nd<sub>5</sub> alaşımı hızlı katılaştırma tekniği ile ince şeritler halinde üretilmiştir. Bunun için Edmund Bühler marka Eriyik döndürme (Melt-spinning) cihazı kullanılmıştır. Hızlı katılaştırılmış şeritleri üretmek için cihaz diskinin dönme hızı 30 m/s olarak ayarlanmış ve alaşımlar şerit halinde yaklaşık 4-5 mm genişliğinde ve 20-80 µm kalınlığında üretilmiştir. Alaşımların ısıl özellikleri, Perkin Elmer Sapphire marka Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) ile incelendi. DSC analizleri için yaklaşık 20-25 mg miktarında numuneler kullanılmıştır. DSC analizi 350–950 K arasında; 5, 10, 20, 40 K/dakikalık ısı artış oranında ve nitrojen atmosferi altında yapıldı. Alaşımın mikro yapısı, kristal boyutundaki değişim ve ısıl işlem sonrası faz dönüşümleri, Panalytical Philips X'Pert PRO marka X-ışını difraksiyonu (XRD) cihaz ile 40 kV ve 30 mA, monokromatik CuK<sub>α</sub> radyasyonu (λ = 0.154 nm), 20° den 100° ye kadar 0.02° adım aralığında yapılmıştır. MA tekniği ile üretilen alaşımların morfolojik özellikleri ZEISS EVO LS10 marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile BSD detektörü kullanılarak incelenmiştir.

### 3. Bulgular ve tartışma

#### 3. Results and discussions

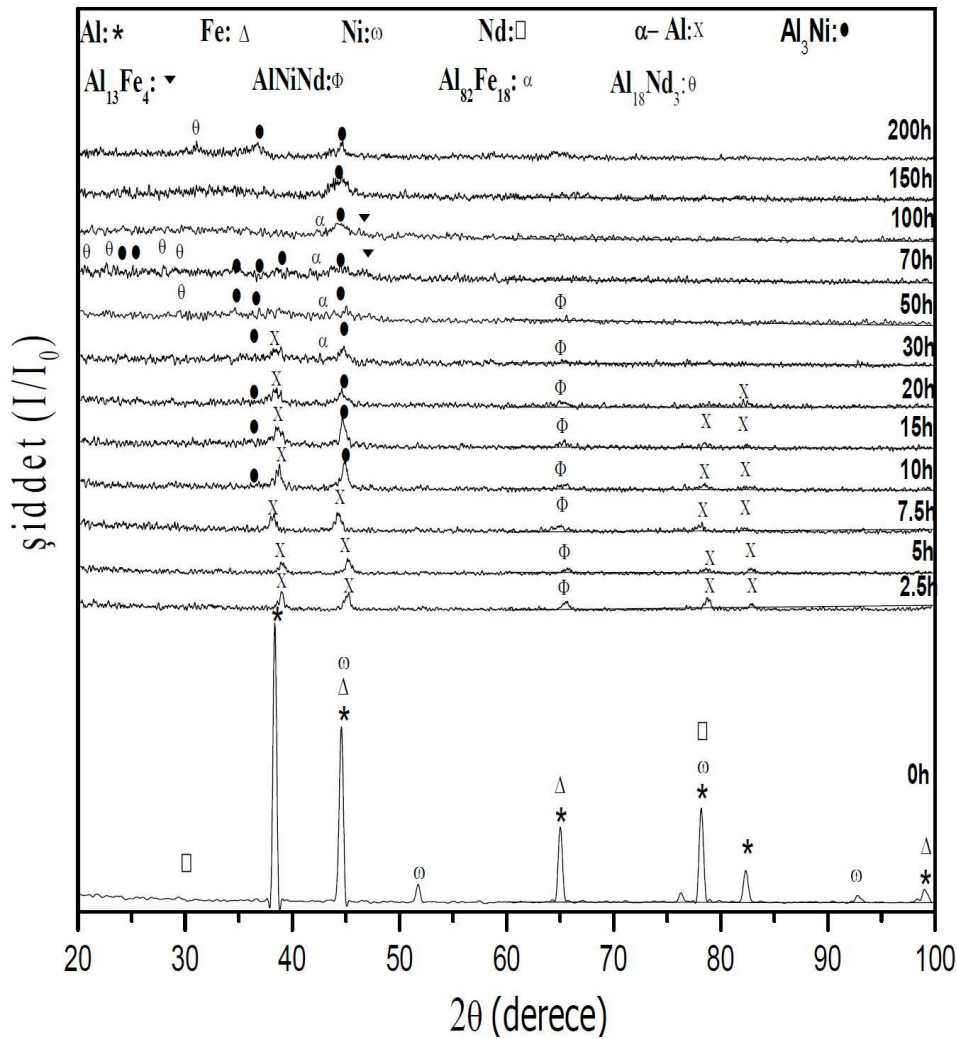
Bu çalışmada Al<sub>85</sub>Ni<sub>5</sub>Fe<sub>5</sub>Nd<sub>5</sub> alaşımı önce MA tekniği ile tozlar halinde üretildi. Alaşımlama işlemi 200 saate kadar sürdürüldü ve belli sürelerde cihazdan numuneler alınarak incelendi. Böylece seçilen zaman aralıklarında alaşımın mikro yapısı, oluşan fazlar ve bunların alaşımlama sürelerine bağlılığı incelendi. MA ile tozlar halinde üretilen Al<sub>85</sub>Ni<sub>5</sub>Fe<sub>5</sub>Nd<sub>5</sub> alaşımının mikro yapısı ve faz dönüşümleri XRD cihazı ile incelenmiştir. Şekil 1'de alaşımın XRD grafiği görülmektedir. Bu grafiğe alaşımlama işlemi yapılmayan başlangıç elementel tozlarının XRD sonuçları da (0 saat = 0 h) eklenmiştir. Şekil 1'de açıkça görüleceği gibi alaşımlama işlemine tabi tutulmayan tozların XRD grafiğinde Al, Ni, Fe ve Nd elementlerinin pikler görülmektedir. Elementlerden yansıyan piklerden bazıları aynı açıdan yansıyarak üst üste gelmiştir. 2.5 saatlik alaşımlama işlemi sonrası bu piklerin şiddetlerinin hızlı bir şekilde azaldığı ve bazılarının kaybolduğu görülmektedir. Bu sonuç, 2.5 saatlik alaşımlama işlemi sonrası elementel tozların birbirleri ile reaksiyona girmesi sonucu yeni fazların oluşmaya başladığını göstermektedir. Alaşımlama işleminin bu zaman aralığında oluşan yeni fazlardan biri α-Al (Nd, Fe, Ni) fazıdır. α-Al(Nd, Fe, Ni) fazı elementel tozların birbirleri ile reaksiyona girmesi sonucu oluşmuştur. Bu faz Nd, Fe ve Ni içerdiği için aynı zamanda aşırı doymuş Al fazı olarak adlandırılmaktadır. Şekil 1'de, α-Al (Nd, Fe, Ni) fazının piklerinin; 2θ=39°, 2θ=44°, 2θ=78° ve 2θ=83° açılardan yansıdığı görülmektedir. Nd, Fe ve Ni elementlerinin Al içerisindeki çözülme miktarları sınırlıdır. Bu miktar MA işlemi ile artırılabilir. Diğer taraftan Nd, Fe, Ni elementlerinin Al içerisinde çözünme miktarları aynı değildir. Örneğin Nd, Al içerisinde %10 dan fazla çözülebilirken, Ni elementinin Al içerisinde çözünme miktarı en fazla %10 kadardır (Suryanarayana, 2001). Fe'nin Al içerisindeki çözünme miktarı oda sıcaklığında %0,003 iken bu miktar ötektik sıcaklığında %0,05 oranına ulaşabilmektedir. Dolayısıyla Al-esaslı alaşımlara sertleştirici bir özellik kazandıran Fe'nin Al içerisindeki çözülme miktarı oldukça düşüktür. 10-20 saatlik alaşımlama işlemi sonrası, α-Al (Nd, Fe, Ni) fazından yansıyan piklerin şiddetlerinde azalmalar görülürken, 2θ=37° ve 2θ=46° yansıma açılarında yeni pikler gözlenmiştir. Bu yeni piklerin Al<sub>3</sub>Ni intermetalik fazından yansıdığı tespit edilmiştir. Bu durum alaşımlama işlemi sırasında katı-hal reaksiyonunun meydana geldiğini ve MA işlemi

sırasında ortaya çıkan enerjinin faz dönüşümlerine neden olduğunu göstermektedir. 30 saatlik alaşımlama işlemi sonunda  $2\theta=43^\circ$  açısında  $\text{Al}_{82}\text{Fe}_{18}$  fazından yansıyan pik gözlenmiş ve 50 saatlik alaşımlama işleminden sonra  $\alpha$ -Al fazından yansıyan piklerin şiddetleri azalarak tamamen kaybolmuştur. Diğer taraftan Şekil 1’de alaşımlama süresinin artmasıyla piklerin şiddetlerinin azalarak genişlediği görülmektedir. Bu durum, parçacıkların kristal boyutunun azalmasından kaynaklanmaktadır (Krifa vd., 2013). Daha uzun süreli MA işlemleri sonucu  $\text{Al}_{18}\text{Nd}_3$ ,  $\text{Al}_3\text{Ni}$ ,  $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$  ve  $\text{Al}_{82}\text{Fe}_{18}$  fazlarından yansıyan pikler gözlenmiştir. 200 saatlik alaşımlama işleminden sonra ise sadece  $\text{Al}_{18}\text{Nd}_3$  ve  $\text{Al}_3\text{Ni}$  fazlarından yansıyan pikler gözlenmiştir.  $\text{Al}_3\text{Ni}$  ve  $\text{Al}_{18}\text{Nd}_3$  fazlarının nanokristal yapıda olduğu ve kristal boyutlarının 15 nm’nin altına düştüğü belirlenmiştir. 200 saatten daha uzun süreli MA işlemleri sonrası alaşımlama mikroyapısında herhangi bir değişiklik gözlenmediğinden alaşımlama işlemi sonlandırılmıştır. Sonuç olarak alaşımlama işlemi 200 saate kadar sürdürülmesine rağmen  $\text{Al}_{85}\text{Ni}_5\text{Fe}_5\text{Nd}_5$  alaşımı amorf yapıda elde edilememiş ancak nano-kristal yapıda  $\text{Al}_3\text{Ni}$  ve  $\text{Al}_{18}\text{Nd}_3$  gibi intermetalik fazlar elde edilmiştir.

$\text{Al}_{85}\text{Ni}_5\text{Fe}_5\text{Nd}_5$  alaşımını oluşturan tozların MA işlemi süresince kristal boyutundaki değişimler XRD sonuçları kullanılarak Debye-Scherrer denklemi ile hesaplanmıştır (Suryanarayana & Grant, 1998). Bu denklem aşağıda verilmiştir (Denk 1).

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (1)$$

Burada  $D$ , ortalama kristal boyutu,  $\lambda$ , X-ışını dalga boyu ( $\lambda_{\text{CuK}\alpha}=0.154$  nm),  $\theta$ , pikin yansıdığı açıdır.  $\beta$  ise maksimum pikin yarısındaki tam genişlik değeridir (FWHM).

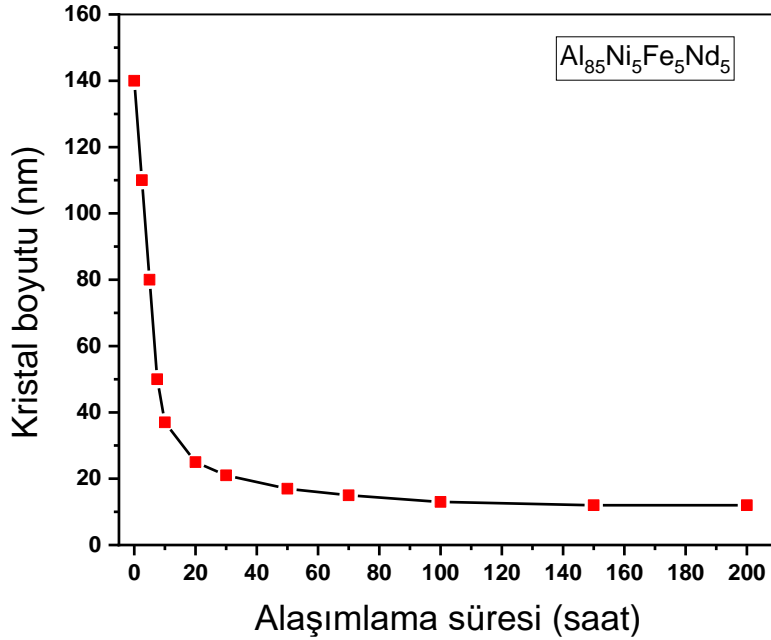


Şekil 1. MA ile üretilen  $\text{Al}_{85}\text{Ni}_5\text{Fe}_5\text{Nd}_5$  alaşımının XRD grafiği

Figure 1. XRD graph of  $\text{Al}_{85}\text{Ni}_5\text{Fe}_5\text{Nd}_5$  alloy produced by mechanical alloying

Alaşımlama işlemi süresince  $Al_{85}Ni_5Fe_5Nd_5$  toz alaşımlarının kristal boyutundaki değişimler Şekil 2’de görülmektedir. Şekil 2’de görüldüğü gibi tozların kristal boyutları alaşımlama işleminin başlangıcında hızlı bir şekilde azalmış ve 25 saatlik alaşımlama işleminin sonunda 30 nm’nin altına düşmüştür. 25 saatten sonra alaşımlama işleminin artmasına bağlı olarak kristal boyutundaki değişim daha yavaş olmuş ve 50 saatlik alaşımlamadan sonra sabit bir değerde kalacak şekilde küçük değişimler gözlenmiştir. 200 saat sonunda kristal boyutunun 15 nm’nin altına düştüğü gözlenmiştir. Bu çalışmada MA ile üretilen  $Al_{85}Ni_5Fe_5Nd_5$  alaşımlarının kristal boyutundaki değişimler literatürdeki sonuçlarla benzerlik göstermektedir (Calin vd., 2004; Mula vd., 2009; Kursun & Gogebakan, 2015; Avar & Gogebakan, 2017; Kursun vd., 2018; Yaykaşlı vd., 2022).

MA tekniği ile üretilen  $Al_{85}Ni_5Fe_5Nd_5$  alaşımlarının morfolojik özellikler SEM kullanılarak araştırıldı. Alaşımların SEM fotoğrafları Şekil 3’de görülmektedir. Alaşımlama işleminin başlangıç safhasında alaşımı oluşturan tozların bilyelerle ve birbirleriyle çarpışması sonucu tozların şekilleri değişime uğrar, morfolojik yapıları bozulur ve birbirlerine yapışarak belli bölgelerde kümeleşirler. Bu duruma soğuk kaynaklanma (cold welding) denir (Suryanarayana, 2001; Suryanarayana, 2004). Alaşımlama süresinin artması sonucu ortaya çıkan enerji nedeni ile tozlar parçalanmaya başlar ve boyutlarında azalmalar görülür. Bu durum ise kırılma, parçalanma (fracturing) olarak bilinir (Suryanarayana, 2001; Suryanarayana, 2004). Toz parçacıklarının boyutlarındaki azalmalar kristal boyutu belli küçüklüğe gelinceye kadar devam eder ve kristal boyutu belli bir küçüklük değerine geldiğinde daha fazla kırılma olmadığında tozların boyutları sabitleşir.



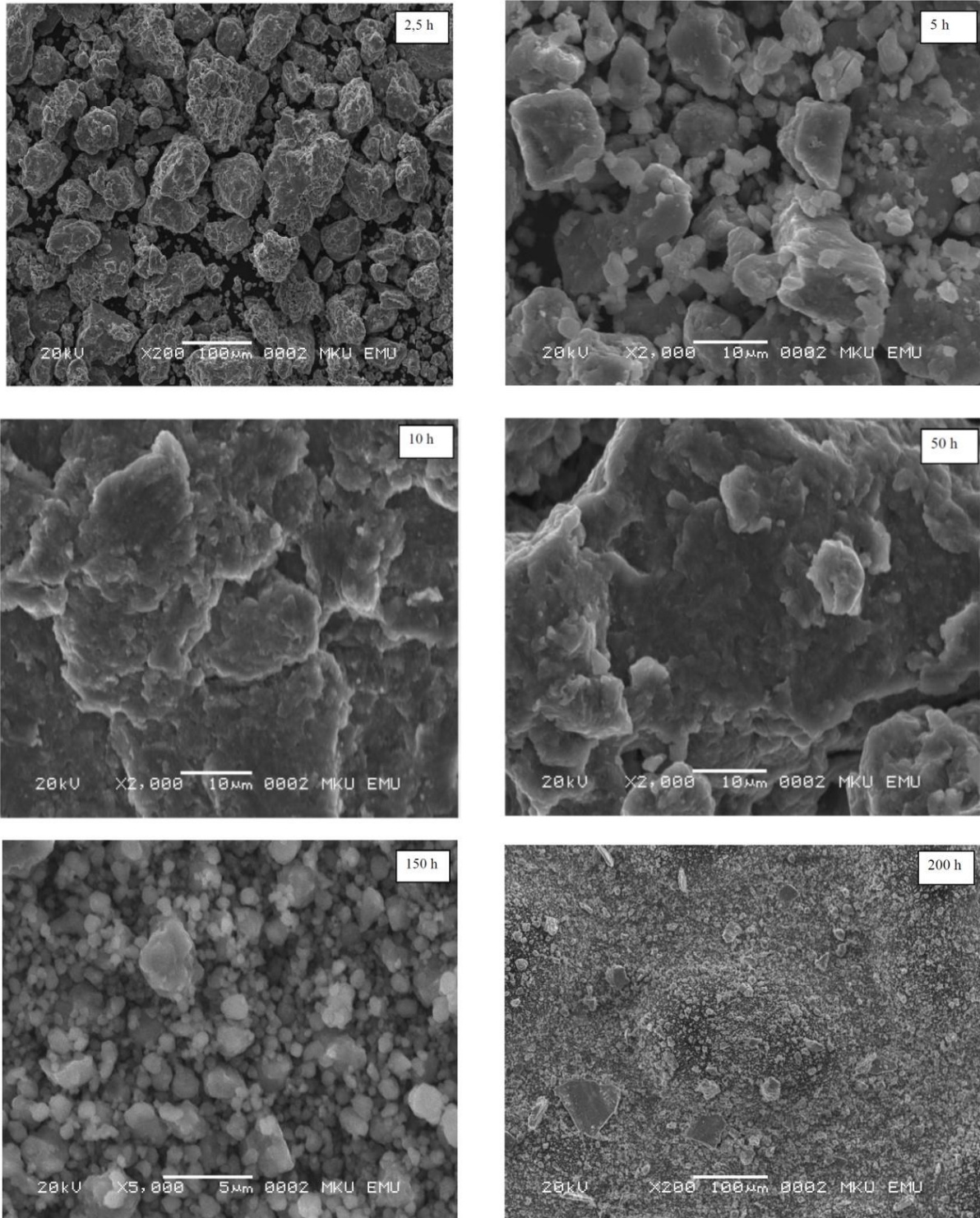
**Şekil 2.**  $Al_{85}Ni_5Fe_5Nd_5$  toz alaşımlarının alaşımlama süresine bağlı olarak kristal boyutundaki değişimler

**Figure 2.** Changes in crystal size of  $Al_{85}Ni_5Fe_5Nd_5$  powder alloy depending on alloying time

Şekil 3’de alaşımlamanın ilk aşamasında (2,5 saat) elementel tozların farklı boyutta ve farklı geometrik yapıda olduğu görülmektedir. 5 ve 10 saatlik alaşımlamadan sonra parçacık boyutlarının ve geometrik yapılarının değiştiği bazı bölgelerde tozların kümeleştiği görülmektedir. 50 saatlik alaşımlama sonrası ise kümeleşmenin arttığı açıkça görülmektedir. Dolayısıyla alaşımların; 5, 10 ve 50 saatlik alaşımlama işleminden sonraki SEM fotoğraflarında soğuk kaynaklanmanın daha baskın olduğu görülmektedir. Soğuk kaynaklanma işlemi sonucunda elementel tozların ara yüzeyleri kaybolmuş ve kümeleşen tozların yeni ara-yüzeyler oluşturmasıyla alaşım oluşmuştur.

Alaşımlama işleminin; kırılma, parçalanma (fracturing) olarak bilinen ikinci safhası; 150 ve 200 saatlik alaşımlama işleminden sonraki SEM fotoğraflarında görülmektedir. Şekil 3’de görüldüğü gibi, alaşımlama işleminin bu safhasında belli bir büyüklüğe ulaşan parçacıkların kırılması ile boyutları azalmaya başlamıştır. Kristal boyutundaki azalma belli bir süre devam etmiş ve parçacık boyutu belli bir değere ulaşıncaya kadar sabitlenmiştir. 200 saatlik alaşımlama işleminden sonraki SEM fotoğrafında parçacıklarında boyutunun 15

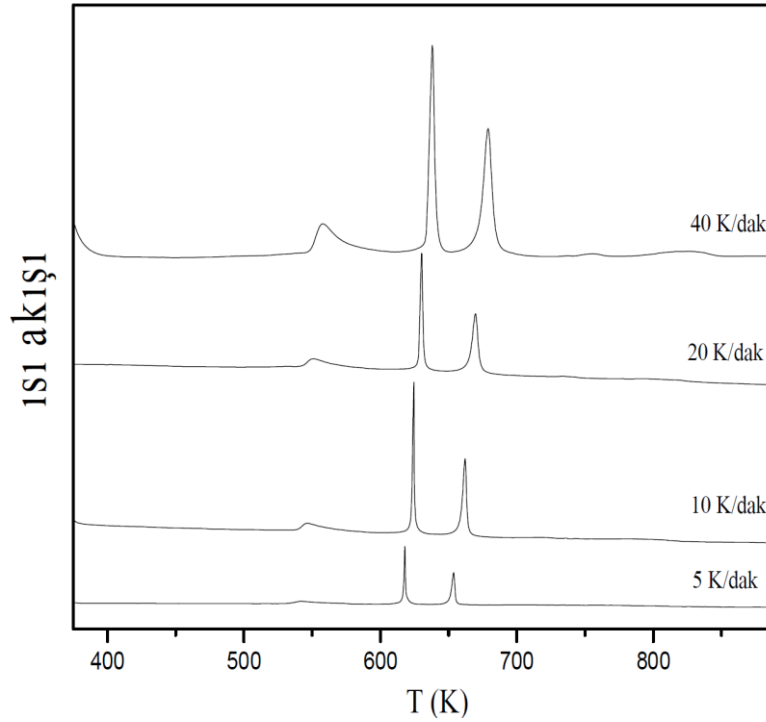
nm'nin altına düştüğü ve homojen bir yapının meydana geldiği görülmektedir. Bu sonuç, MA tekniğinin nanokristal malzeme elde etmek için etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir.



**Şekil 3.** MA ile üretilen  $Al_{85}Ni_5Fe_5Nd_5$  alaşımının SEM fotoğrafları  
**Figure 3.** SEM photographs of  $Al_{85}Ni_5Fe_5Nd_5$  alloy produced by MA

$Al_{85}Ni_5Fe_5Nd_5$  alaşımının ısısal özellikleri DSC ile incelendi. Amorf alaşımın DSC grafiği Şekil 4' de görülmektedir. DSC grafiğinde, üç ekzotermik pik gözlenmektedir. Bu pikler amorf fazın kristalleşmesi sürecinde oluşan faz dönüşümünü temsil etmektedir. Dolayısıyla, bu durum amorf alaşımın kristalleşmesinin üç aşamada gerçekleştiğini göstermektedir.  $Al_{85}Ni_5Fe_5Nd_5$  alaşımının kristalleşme sıcaklığı ( $T_x$ ) ile pik sıcaklıkları ( $T_{p1}$ ,  $T_{p2}$ ,  $T_{p3}$ ) Tablo 2'de verilmiştir. Şekil 4'de ve Tablo 2'de kristalleşme sıcaklığı ( $T_x$ ) ve pik sıcaklıklarının ( $T_{p1}$ ,  $T_{p2}$ ,  $T_{p3}$ ) ısıtma oranının artması ile arttığı ve piklerin genişlediği görülmektedir. Örneğin,

ısıtma oranı 5 K/dakika iken kristalleşme sıcaklığı,  $T_x$ , 536 K iken, ısıtma oranı 40 K/dakika olduğunda,  $T_x$ , 546 K değerine çıkmıştır. Aynı durum diğer pik sıcaklıkları ( $T_{p1}$ ,  $T_{p2}$ ,  $T_{p3}$ ) için de geçerlidir. Bu durum amorf alaşımlarda görülen genel bir özelliktir ve amorf alaşımların aktifliği olarak tanımlanır. Amorf alaşımların ısısal kararlılığını belirlemek için kullanılan aktivasyon enerjisi, amorf alaşımların bu özelliklerinden yararlanılarak hesaplanır.



**Şekil 4.** Hızlı katılaştırma ile üretilen  $Al_{85}Ni_5Fe_5Nd_5$  alaşımının DSC sonuçları  
**Figure 4.** DSC results of  $Al_{85}Ni_5Fe_5Nd_5$  alloy produced by rapid solidification

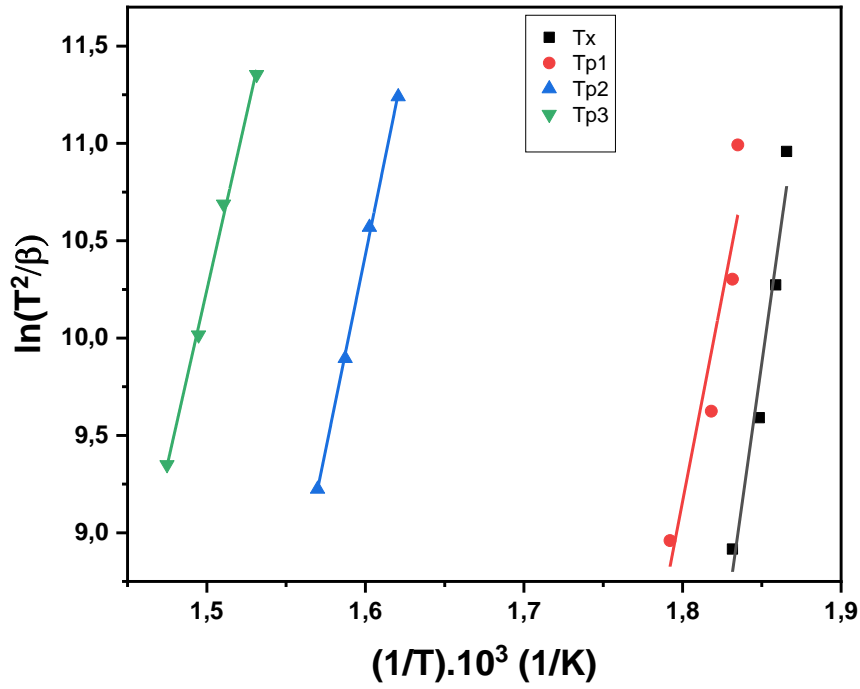
**Tablo 2.**  $Al_{85}Ni_5Fe_5Nd_5$  alaşımının kristalleşme sıcaklığı ( $T_x$ ) ile pik sıcaklıkları ( $T_{p1}$ ,  $T_{p2}$ ,  $T_{p3}$ )  
**Table 2.** Crystallization temperature ( $T_x$ ) and peak temperatures ( $T_{p1}$ ,  $T_{p2}$ ,  $T_{p3}$ ) of  $Al_{85}Ni_5Fe_5Nd_5$  alloy

$\beta$ (K/dakika)	$T_x$ (K)	$T_{p1}$ (K)	$T_{p2}$ (K)	$T_{p3}$ (K)
5	536	545	617	653
10	538	546	624	662
20	541	550	630	669
40	546	558	637	678

Amorf yapıda elde edilen  $Al_{85}Ni_5Fe_5Nd_5$  alaşımının aktivasyon enerjisi Kissinger metodu kullanılarak hesaplanmıştır (Kissinger, 1957). Bu denklem aşağıda verilmiştir (Denk 2).

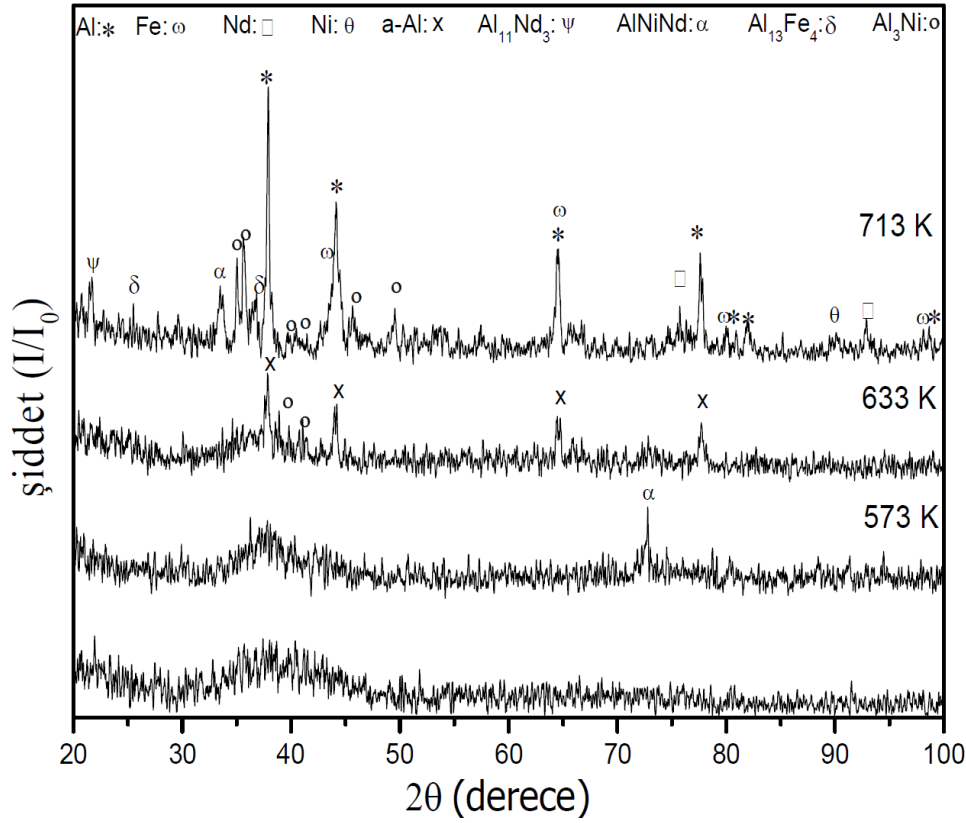
$$\ln\left(\frac{T^2}{\beta}\right) = \left(\frac{E}{RT}\right) + A \quad (2)$$

Burada  $T$ ;  $T_x$ ,  $T_{p1}$ ,  $T_{p2}$ ,  $T_{p3}$  DSC grafiğinde gözlene ekzotermik veya endotermik piklerin sıcaklığı,  $\beta$  ısıtma oranı,  $E$  aktivasyon enerjisi,  $R$  gaz sabiti ve  $A$  sabittir. Aktivasyon enerjisini hesaplamak için,  $\ln(T^2/\beta)$  değeri y-ekseni ve  $1/T$ , x-ekseni olmak üzere Kissinger grafiği çizilir. Şekil 5’de görüldüğü gibi Kissinger grafikleri doğrusaldır ve doğruların eğimlerinin  $R$  (8.314 J/mol K) ile çarpımı aktivasyon enerjisini verir.  $Al_{85}Ni_5Fe_5Nd_5$  amorf alaşımının, kristalleşmenin başlama sıcaklığı, birinci, ikinci ve üçüncü pik sıcaklıkları ( $T_x$ ,  $T_{p1}$ ,  $T_{p2}$ ,  $T_{p3}$ ) için aktivasyon enerjileri ( $E_x$ ,  $E_{p1}$ ,  $E_{p2}$ ,  $E_{p3}$ ) sırasıyla 482, 351, 332 ve 299 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. Kristalleşmenin başlama sıcaklığı için hesaplanan aktivasyon enerjisinin  $E_x$ , birinci, ikinci ve üçüncü pik sıcaklıkları için hesaplanan aktivasyon enerjilerinden daha yüksek olması amorf yapının kararlı olduğunu göstermektedir. Literatürde, Al-Ni-Si (McKay vd., 2001; Gögebakan & Okumus, 2009), Al-Y-Ni (Gögebakan vd., 1997), Cu-Zr-Ni-Ti (Kursun vd., 2015), Cu-Zr-Ag-Al (Zhang vd., 2013) alaşımları için benzer sonuçlar elde edilmiştir.



**Şekil 5.** Al<sub>85</sub>Ni<sub>5</sub>Fe<sub>5</sub>Nd<sub>5</sub> alaşımasının Kissinger grafiği  
**Figure 5.** Kissinger plot of Al<sub>85</sub>Ni<sub>5</sub>Fe<sub>5</sub>Nd<sub>5</sub> alloy

Hızlı katılaştırma ile amorf olarak elde edilen Al<sub>85</sub>Ni<sub>5</sub>Fe<sub>5</sub>Nd<sub>5</sub> alaşımasının kristalleşmesi sırasında meydana gelen faz dönüşümleri hakkında bilgi edinmek amacı ile amorf alaşımdan alınan numuneler DSC de gözlenen ekzotermik piklerin bitiş sıcaklıklarında (573, 633 ve 713 K), 30 dakika ısıtıldıktan sonra XRD ile incelendi. Al<sub>85</sub>Ni<sub>5</sub>Fe<sub>5</sub>Nd<sub>5</sub> alaşımasının ısıl işlem öncesi ve sonrası XRD grafiği Şekil 6'da görülmektedir. Isıl işlem öncesi alaşımanın amorf yapıda olduğunu gösteren geniş ve yayvan bir pik gözlenmiştir. Alaşımanın DSC grafiğinde (Şekil 4) gözlenen ilk ekzotermik pikin bitiş sıcaklığı olan 573 K'de ısıtılan alaşımanın XRD grafiğinde amorf fazla birlikte α-Al(Ni,Fe,Nd) ve AlNiNd fazlarından yansıyan pikler gözlenmiştir. Bu, DSC grafiğindeki ilk pikin, amorf yapının bir kısmının α-Al(Ni,Fe,Nd) ve AlNiNd fazlarına dönüşmesine temsil etmektedir. 633 K de ısıtılan alaşımanın XRD sonucunda mevcut fazlarla birlikte Al<sub>3</sub>Ni fazlarından yansıyan pikler gözlenmiştir. Bu durum, DSC analizinde gözlenen ikinci ekzotermik pikin, amorf fazın Al<sub>3</sub>Ni fazına dönüşümü sonucu oluştuğu anlamını ifade etmektedir. Ayrıca alaşım 633 K de ısıtıldıktan sonra α-Al(Ni,Fe,Nd) fazının şiddetinin artışı ve daha belirgin hale geldiği görülmektedir. Alaşımanın 713 K de ısıtılması ile alaşımanın tamamı kristal hale dönüşmüştür. Bu durumda Al<sub>11</sub>Nd<sub>3</sub>, Al<sub>13</sub>Fe<sub>4</sub>, AlNiNd, Al<sub>3</sub>Ni, Al, Ni, Fe ve Nd, fazlarından yansıyan pikler gözlenmiştir. Dolayısıyla, DSC analizinde gözlenen üçüncü ekzotermik pik alaşımanın tamamının kristal yapıya dönüşmesini temsil etmektedir.



**Şekil 6.**  $Al_{85}Ni_5Fe_5Nd_5$  alaşımının ısıl işlemden önceki ve sonraki XRD grafiği  
**Figure 6.** XRD graph of  $Al_{85}Ni_5Fe_5Nd_5$  alloy before and after heat treatment

#### 4. Sonuçlar

##### 4. Conclusions

Bu çalışmada, hızlı katılaştırma ve MA yöntemleri ile üretilen  $Al_{85}Ni_5Fe_5Nd_5$  alaşımının yapısal ve ısıl özellikleri incelenmiştir. MA ile üretilen alaşımların mikro yapısında kristal boyutları 15 nm altında olan  $Al_3Ni$  ve  $Al_{18}Nd_3$  gibi nanokristal yapıli intermetallik fazlar gözlenmiştir. Hızlı katılaştırma ile üretilen alaşımların amorf yapıda olduğu belirlenmiştir. Amorf yapıda üretilen alaşımın kristalleşmesi DSC ile incelenmiştir. Amorf alaşımların DSC grafiğinde, amorf fazın kristalleşmesi sürecinde oluşan faz dönüşümünü temsil eden üç ekzotermik pik gözlenmiştir. Bu pikler, amorf alaşımın kristal yapıya geçişinin üç aşamada olduğu göstermektedir. 573-713 K aralığında ısıtılan amorf alaşımlar tamamen kristal yapıya dönüşmüş ve alaşımın mikro yapısında Al, Ni, Fe Nd pikleri ile birlikte  $\alpha$ -Al(Ni,Fe,Nd),  $Al_{11}Nd_3$ ,  $Al_{13}Fe_4$ , AlNiNd,  $Al_3Ni$  gibi fazlardan yansıyan pikler gözlenmiştir. Amorf alaşımın aktivasyon enerjisi Kissinger metodu ile hesaplanmıştır. Kristalleşmenin başlama sıcaklığı için hesaplanan aktivasyon enerjisi birinci, ikinci ve üçüncü pik sıcaklıkları için hesaplanan değerlerden yüksek olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, amorf yapının kararlı olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar hızlı katılaştırma metodunun amorf alaşım üretmek için uygun bir teknik olduğunu göstermiştir. MA metodunun ise nanokristal malzeme üretmek için uygun olduğunu göstermiştir.

#### Yazar katkısı

##### Author contribution

Araştırmacılarından Nazlı CANAL; deneysel çalışmalar ve analizlerde, Musa GÖĞEBAKAN; makalenin düzenlenmesi ve yazımında, verilerin elde edilmesi-yorumlanması, ilerleyişinin denetlenmesinde, ilgili tabloların/şekillerin hazırlanması ve yorumlanmasında, bulgular ve sonuç kısmının şekillendirilmesinde katkı sunmuştur.



**Etik beyanı***Declaration of ethical code*

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

**Çıkar çatışması beyanı***Conflicts of interest*

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

**Kaynaklar***References*

- Avar, B., & Gogebakan, M. (2009). Synthesis of the quasi-crystalline phase in  $Al_{63}Cu_{25}Fe_{12}$  powders prepared by mechanical alloying. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 11(10), 1460-1463.
- Avar, B., & Gogebakan, M. (2017). Mekanik alaşımlama süresince  $Al_{85}Co_7Y_8$  alaşımının faz değişimi. *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, 2, 54-59. <https://doi.org/10.7240/marufbd.292305>
- Avar, B., Gogebakan, M., & Yilmaz, F. (2008). Characterization of the icosahedral quasicrystalline phase in rapidly solidified Al-Cu-Fe alloys. *Zeitschrift für Kristallographie*, 223, 731-734. <https://doi.org/10.1524/zkri.2008.1077>
- Calin, M., Grahl, H., Adam, M., Eckert, J., & Schultz, L. (2004). Synthesis and thermal stability of ball-milled and melt-quenched amorphous and nanostructured Al-Ni-Nd-Co alloys. *Journal of Materials Science*, 39, 5295-5298. <https://doi.org/10.1023/B:JMSC.0000039232.67075.ed>
- Chen, J., Lengsdorf, R., Henein, H., Herlach, D. M., Dahlborg, U., & Calvo-Dahlborg, M. (2013). Microstructure evolution in undercooled Al-8 wt% Fe melts: comparison between terrestrial and parabolic flight conditions. *Journal of Alloys and Compounds*, 556, 243-251. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.11.182>
- Gogebakan, M., & Okumus M. (2009). Structure and crystallization kinetics of amorphous Al-Ni-Si alloy. *Materials Science-Poland*, 27(1) 79-87.
- Gögebakan, M., Warren, P. J., & Cantor, B. (1997). Crystallization behaviour of amorphous  $Al_{85}Y_{11}Ni_4$  alloy. *Materials Science and Engineering A*, 226-228, 168-172. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(96\)10611-0](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(96)10611-0)
- Inoue, A. (1998). Amorphous, nanoquasicrystalline and nanocrystalline alloys in Al-based systems. *Progress in Materials Science*, 43, 365-520.
- Inoue, A. (2000). Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys. *Acta Materialia*, 48, 279-306. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(99\)00300-6](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(99)00300-6)
- Kaya, H., Büyük, U., Çadırılı, E., & Maraşlı, N. (2012). Measurements of the microhardness, electrical and thermal properties of the Al-Ni eutectic alloy. *Materials & Design*, 34, 707-712. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.05.030>
- Kissinger, H. E. (1957). Reaction kinetics in differential thermal analysis. *Analytical Chemistry*, 29, 1702. <https://doi.org/10.1021/ac60131a045>
- Krifa, M., Mhadhbi, M., Escoda, L., Saurina, J., Suñol, J. J., Llorca-Isern, N., Artieda-Guzmán, & C., Khitouni, M. (2013). Phase transformations during mechanical alloying of Fe-30% Al-20% Cu. *Powder Technology*, 246, 117-124. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.05.015>
- Kursun, C., & Gogebakan, M. (2015). Characterization of nanostructured Mg-Cu-Ni powders prepared by mechanical alloying. *Journal of Alloys and Compounds*, 619, 138-144. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.08.126>
- Kursun, C., Gogebakan, M., & Eskalen, H. (2018). Mechanical properties, microstructural and thermal evolution of  $Mg_{65}Ni_{20}Y_{15-x}Si_x$  (X=1, 2, 3) alloys by mechanical alloying. *Materials Research Express*, 5(3), 036512. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aab405>

- Kursun, C., Gögebakan, M., & Gencer, Y. (2015). Microstructural characterization of rapidly solidified  $\text{Cu}_{50}\text{Zr}_{40}\text{Ni}_5\text{Ti}_5$  amorphous alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 643, S33-S38. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.10.041>
- Li, W., Kong, L. T., & Li, J. F. (2022). Thermal stability and crystallization behavior of  $\text{Al}_{86}\text{Ni}_9\text{Y}_5$  amorphous alloys with different Si addition. *Materials Characterization*, 194, 112-122. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.112387>
- Maurya, R. S., Sahu, A., & Laha, T. (2016). Effect of consolidation pressure on phase evolution during sintering of mechanically alloyed  $\text{Al}_{86}\text{Ni}_8\text{Y}_6$  amorphous powders via spark plasma sintering. *Materials Science and Engineering A*, 649, 48-56. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.09.109>
- McKay, B.J., Cizek, P., Schumacher, P., & O'Reilly, K.A.Q. (2001). Heterogeneous nucleation in an Al-Ni-Si alloy studied using a metallic glass technique. *Materials Science and Engineering A*, 304-306(31), 240-244. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01476-3](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01476-3)
- Mudry, S. I., Kulyk Yu, O., & Boichyshy, L. M. (2022). Nanocrystallization of amorphous alloy  $\text{Al}_{87}\text{Ni}_8\text{Dy}_5$  induced by heat treatment. *Materials Today: Proceedings*, 62, 5805-5811. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.493>
- Mula, S., Ghosh, S., & Pabi, S. K. (2009). On the formation of phases by mechanical alloying and their thermal stability in Al-Mn-Ce system. *Powder Technology*, 191, 176-181. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.10.002>
- Suryanarayana, C. (2001). Mechanical alloying and milling. *Progress in Materials Science*, 46, 1-184. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(99\)00010-9](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(99)00010-9)
- Suryanarayana, C. (2004). Mechanical alloying and milling. 466, Marcel Dekker Press, New York, USA.
- Suryanarayana, C., & Grant Norton, M. (1998). X-ray Diffraction: A Practical Approach. 207, Plenum Press, New York, USA.
- Troeger, L. P., & Starke, E. A. (2000). Microstructural and mechanical characterization of a superplastic 6xxx aluminum alloy. *Materials Science and Engineering A*, 277, 102-113. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00543-2](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00543-2)
- Viet, N. H., Oanh, N. T. H., Quynh, P. N. D., Lap, T. Q., & Kim, J. S. (2015). Thermal stability of amorphous Al-Fe-Y alloy prepared by mechanical alloying. *Materials Science Forum*, 804, 271-274. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.804.271>
- Yaykaşlı, H., Eskalen, H., Kavun, Y., & Gogebakan, M. (2022). Microstructural, thermal, and radiation shielding properties of  $\text{Al}_{50}\text{B}_{25}\text{Mg}_{25}$  alloy prepared by mechanical alloying. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33, 2350-2359. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-07434-9>
- Zhang, L., Hua Chen, Z., Zheng, Q., & Chen, D. (2013). Isochronal and isothermal phase transformation of  $\text{Cu}_{45}\text{Zr}_{45}\text{Ag}_7\text{Al}_3$  bulk metallic glass. *Physica B*, 411, 149-153. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2012.12.001>

## Mermer ve beton atıkları ile üretilen bitümlü sıcak karışımların Marshall parametrelerinin incelenmesi ve YSA ile tahmin edilmesi

*Investigation of Marshall parameters of bituminous hot mixtures produced with marble and concrete wastes and estimation by ANN*

Erdinç Halis ALAKARA\*, Melih Naci AĞAOĞLU, Sinan NACAR

Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 60250, Tokat

• Geliş tarihi / Received: 26.05.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 31.01.2023

### Öz

Bu çalışmada, mermer ve beton atıkları ile üretilen bitümlü sıcak karışımların binder tabakasında kullanılabilirliği incelenmiştir. Çalışma kapsamında, altı farklı agrega karışım grubu için Marshall Tasarım Yöntemi kullanılarak 126 adet asfalt numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin pratik özgül ağırlık ( $D_p$ ), hava boşluğu ( $V_h$ ), bitümle dolu boşluk ( $V_f$ ), agregalar arası boşluk (VMA), Marshall stabilitesi (MS) ve akma değerleri yapılan deneyler sonucunda tespit edilmiştir. Daha sonra, agrega karışım gruplarındaki yüzdesel oranlar ve bitüm yüzdesi bağımsız değişkenleri kullanılarak klasik regresyon analizi (KRA) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemleri ile MS,  $V_h$  ve  $V_f$  değerleri tahmin edilmiştir. KRA yönteminde doğrusal (LF), üs (ÜF), üstel (EF) ve kuadratik (KF) olmak üzere dört farklı fonksiyon uygulanmış ve bu fonksiyonlara ait katsayılar hesaplanmıştır. YSA yönteminde ise farklı nöron sayıları kullanılarak modeller kurulmuş ve bu modeller arasından en başarılı tahmin oranına sahip model belirlenmiştir. Kullanılan yöntemlerin tahmin performanslarının değerlendirilebilmesi amacıyla çeşitli performans istatistikleri (ortalama karesel hatanın karekökü, ortalama mutlak hata, saçılım indeksi ve Nash Sutcliffe verimlilik katsayısı) kullanılmıştır. Elde edilen performans istatistikleri karşılaştırıldığında; KRA yönteminde kullanılan dört farklı fonksiyon içerisinde, en başarılı tahmin sonuçlarının KF'den elde edildiği görülmüştür. YSA'nın özellikle MS'yi tahmin etmede KF'ye kıyasla daha başarılı olduğu tespit edilmiştir. YSA modelinin NS performansı KF ile karşılaştırıldığında; MS,  $V_h$  ve  $V_f$ 'nin eğitim veri setini sırasıyla %13.58, %1.28, %0.86 oranında iyileştirdiği, test veri setlerini ise sırasıyla %48.57, %3.48 ve %1.78 oranında iyileştirdiği görülmüştür. Modelleme çalışmaları sonucunda elde edilen performans istatistikleri, Marshall tasarımına ait performans özelliklerinin kısa bir süre içerisinde, daha az numune ve maliyet ile yüksek bir tahmin oranında belirlenebileceğini göstermiştir.

**Anahtar kelimeler:** Atık agrega, Bitümlü sıcak karışım, Klasik regresyon analizi, Marshall tasarımı, Yapay Sinir Ağları

### Abstract

*In this study, the usability of bituminous hot mixtures produced with marble and concrete wastes in the binder layer was investigated. Within the scope of the study, 126 asphalt samples were prepared using the Marshall Design Method for six different aggregate mixture groups. The practical specific gravity ( $D_p$ ), air void ( $V_a$ ), bitumen filled void ( $V_f$ ), void of mineral aggregate (VMA), Marshall stability (MS) and flow values of the prepared samples were determined as a result of the experiments. Then, MS,  $V_a$  and  $V_f$  values were estimated by classical regression analysis (CRA) and Artificial Neural Networks (ANN) methods using percentage ratios in aggregate mixture groups and bitumen percentage independent variables. In the CRA method, four different functions, namely linear (LF), power (PF), exponential (EF) and quadratic (QF), were applied and the coefficients of these functions were obtained. In the ANN method, models were established using different neuron numbers and the model with the most successful prediction rate was determined among these models. Various performance statistics (root mean square error, mean absolute error, scatter index and Nash Sutcliffe efficiency coefficient) were used to evaluate the estimation performance of the methods. When the performance statistics are compared; among the four different functions used in the CRA method, it was seen that the most successful estimation results were obtained from QF. It has been found that ANN is more successful than QF, especially in predicting MS. When the NS performance of the ANN model is compared with the QF; It was observed that MS,  $V_a$ , and  $V_f$  improved the training dataset by 13.58%, 1.28%, and 0.86%, respectively, and the test datasets by 48.57%, 3.48%, and 1.78%, respectively. The performance statistics obtained as a result of the modeling studies showed that the performance characteristics of Marshall design can be determined in a short time, with less samples and cost, at a high estimation rate.*

**Keywords:** Waste aggregate, Bituminous hot mixture, Classical Regression Analysis, Marshall design, Artificial Neural Network

\* Erdinç Halis ALAKARA; erdinchalis.alakara@gop.edu.tr

## 1. Giriş

### 1. Introduction

Bitümlü sıcak karışım (BSK), agrega ve bitümün kombinasyonundan oluşan kompozit yapıdan meydana gelmektedir. Agregalar, bu kompozit yapının iskeletini oluştururken bitüm ise yapıştırma görevini üstlenmektedir. BSK'nın yaklaşık olarak ağırlıkça %95'ini agregalar oluşturmaktadır. Bu sebeple agrega özellikleri, BSK'nın performansı üzerinde doğrudan önemli bir etkiye sahiptir. BSK ile imal edilen kaplamalarda görülen tekerlek izi, soyulma vs. gibi üstyapı sorunları çoğu zaman yanlış agrega seçimine bağlanabilmektedir (Kandhal vd., 1997; Ahmedzade & Şengöz, 2009).

BSK'lar; stabilite, sürüş konforu, dayanıklılık ve su geçirimsizliği sağlamadaki üstün hizmet performansları nedeniyle tüm dünyada en yaygın kullanılan kaplama çeşididir (Yılmaz vd., 2011; Sargın vd., 2013). BSK üretiminde kullanılan agregaların büyük bir kısmı doğal taş ocaklarından elde edilmektedir. Ancak bu agregaların temin edilmesi sırasında çevre kirliliği oluşturulmakta dolayısı ile ekolojik dengeye büyük zararlar verilmektedir. Ayrıca kullanılan malzeme ve enerji maliyetleri de her geçen gün artış göstermektedir. Tüm bu durumlar araştırmacıları mevcut kaynakların idareli bir şekilde kullanımı ve alternatif agrega kaynakları üzerine araştırmalar yapmaya teşvik etmiştir (Yılmaz vd., 2011). Yapılan çalışmalarda genel olarak hem atık malzemelerin BSK'larda agrega olarak değerlendirilmesi hem de kaplama performans ve ömrünün artırılması hedeflenmiştir (Terzi & Vural, 2020; Chen vd., 2011a; Chen vd., 2011b; Kardeşahin & Terzi, 2007; Akbulut ve Gürer, 2007; Huang vd., 2009). Dünyada oluşan katı atıkların yarısına inşaat sektörünün sebep olduğu bilinmektedir. Katı atıkların yaklaşık olarak %20-25'ini ise beton atıklarının oluşturduğu düşünülmektedir. Yüksek miktarda katı atık oluşturan bir diğer sektör de mermer madenciligidir. Mermerlerin ocaktan çıkarılması halinde %50 oranında atık parçalar oluşurken tesislerde işlenmesi sırasında %15-50 civarında atık tozlar meydana gelmektedir (Maçin ve Demir, 2018).

Atık malzemelerin BSK'larda kullanımına ve performanslarının değerlendirilmesine yönelik literatürde yer alan çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir. Akbulut & Gürer (2007) Afyonkarahisar-İscehisar bölgesinde bulunan mermer ve andezit ocağı atıklarından üretilen geri dönüştürülmüş agregaların BSK'da kullanımını incelemiştir. Bu amaçla hem agrega deneyleri hem de Marshall testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, atık agregaların fiziksel özelliklerinin belirtilen sınırlar içinde olduğu ve bu atık malzemelerin potansiyel olarak hafif ila orta trafiğe sahip asfalt kaplamaların, binder tabakasında kullanılabileceği tespit edilmiştir. Chen vd. (2011) asfalt karışımlarında filler agrega olarak geri dönüştürülmüş ince agrega tozunu kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre ince agrega tozunun, su hassasiyeti ve yorulma direnci dahil üzere asfalt karışımların özelliklerini iyileştirebileceği görülmüştür. Özellikle sıcak bölgelerdeki asfalt kaplamalarda ince agrega tozunun kullanılmasının uygun olabileceği tespit edilmiştir. Akbulut vd. (2012) yapmış oldukları çalışmada, graniti kesme ve cilalama işlemi sırasında ortaya çıkan atık granit çamurunun BSK'da filler agrega olarak kullanılmasını araştırmışlardır. Karışımlarda atık granit %0, %2, %4, %6 ve %8 oranlarında filler agrega olarak kullanılmış ve her bir filler oranı için Marshall yöntemi kullanılarak optimum bitüm oranları bulunmuştur. Elde edilen sonuçlara göre BSK'da filler agrega olarak optimum %7.3 oranında granit çamuru kullanılması ile aşınma tabakaları için mühendislik özelliklerinin iyileştirebileceği tespit edilmiştir. Arabani vd. (2013) yapmış oldukları çalışmada, dasit ve geri dönüştürülmüş atık betonun BSK'da kullanımını incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre Marshall stabilitesi, yorulma, kalıcı deformasyon ve esneklik modülü bakımından optimum özellikleri gösteren karışımın kaba agrega olarak dasit, ince agrega olarak beton atığının kullanıldığı karışımların olduğu tespit edilmiştir. Gedik vd. (2021) geri dönüştürülmüş floresan lamba atıklarının BSK'da filler agrega olarak kullanımını araştırmışlardır. Yapılan testler sonucunda, atık floresan lambaların düşük ve orta trafiğe maruz kalan yollarda kullanılmasının uygun olabileceği görülmüştür. Ayrıca hem maliyet açısından tasarruf sağlayacağı hem de çevre kirliliğinin de büyük ölçüde önlenilebileceği tespit edilmiştir.

Son yıllarda bilgisayar teknolojilerinin de gelişmesi ile mühendislik problemlerinin çözümünde modelleme tabanlı birçok çalışmanın yapıldığı görülmektedir (Mardani-Aghabaglou vd., 2021; Karasu vd., 2020; Xu vd., 2021). Yapılan çalışmalar incelendiğinde, esnek üst yapılara ait parametrelerin farklı yöntemler kullanılarak tahmin edilebileceği görülmüştür (Ektaş & Karacasu, 2012; Kara & Karacasu, 2017; Pourtahmasb vd., 2015; Arslan & Bayırtepe, 2018). Ozgan (2011) yapmış olduğu çalışmada asfalt numunelerinin farklı sıcaklık ve bu sıcaklıklara maruz kalma sürelerine göre belirlemiş olduğu Marshall stabilitesi değerlerini yapay sinir ağı (YSA) kullanarak modellemiştir. Modelde girdi parametreleri olarak asfalt numunelerinin fiziksel özellikleri, numunelerin maruz kaldığı sıcaklık ve süre değerleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda deney verileri ile YSA

modelinden elde edilen tahmin verileri arasındaki korelasyon katsayısının (eğitim ve test verileri için sırasıyla %96.9 ve %93.3) oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir. Chandra vd. (2013) çalışmalarında IRI ile oyulma, çatlaklar, tekerlek izi, soyulma ve yama gibi bozulma parametreleri arasındaki ilişkiyi doğrusal regresyon, doğrusal olmayan regresyon ve YSA yaklaşımlarını kullanarak modellemişlerdir. Çalışmada geliştirilen modeller kıyaslandığında, YSA'nın tahmin yeteneğinin diğer regresyon yöntemlerine kıyasla daha başarılı olduğu belirlenmiştir. Shafabakhsh & Tanakizadeh (2015) uyarlamalı sinirsel bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) yöntemini kullanarak yüklem özelliklerinin asfalt karışımlarının esneklik modülü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. ANFIS modelinde giriş katmanı parametreleri olarak sıcaklık, yüklem süresi ve dinlenme süresinin yüklem süresine oranı (R/L) değerleri kullanılırken çıkış katmanı olarak esneklik modülü verileri kullanılmıştır. Tahmin edilen esneklik modülü değerleri ile deneysel veriler arasında çok yakın ilişki olduğu ve  $R^2$  değerinin %99.33 olduğu tespit edilmiştir. Arslan & Bayırtepe (2018) BSK'lara ait akma değerlerini malzeme ve karışım özelliklerine bağlı olarak regresyon modelleri kullanarak tahmin etmişlerdir. Geliştirilen modellerde regresyon katsayısı %73.9'a kadar ulaşmıştır. Zehtabchi vd. (2018) BSK'ya ilave etmiş oldukları polimer yüzdesi ve karışımlarda kullanılan geomateriyalin kırılma yüzdesine bağlı olarak Marshall stabilitesi değerlerini bulanık mantık yöntemiyle tahmin etmişlerdir. Çalışma sonucunda %5.12'lik bir hata oranıyla stabilize değerlerinin yüksek ölçüde tahmin edilebileceği görülmüştür. Kırbaç vd. (2018) düzgünlük (IRI) ile kaplamalardaki yüzey bozulmaları arasındaki ilişkiyi doğrusal regresyon, çok değişkenli uyarlanabilir regresyon eğrileri (MARS) ve YSA yöntemlerini kullanarak incelemişlerdir. Yapılan modelleme çalışması sonucunda, en başarılı tahmin sonuçlarının YSA modelinden elde edildiği bunu sırasıyla MARS ve doğrusal regresyon yöntemlerinin izlediği belirtilmiştir. Kıyıldı (2021) yapmış olduğu çalışmada, YSA metodunu kullanarak bitüm yüzdesi, hacim özgül ağırlığı ve boşluk değerlerine bağlı olarak Marshall stabilitesi (MS) değerlerini tahmin etmiştir. Tahmin edilen değerler ile deneysel veriler arasında iyi bir ilişki olduğu belirlenmiştir.

Tokat ili Türkiye'deki mermer rezervinin yaklaşık %20'sine sahiptir (Ertaş vd., 2011). Bu rezervlerden çıkarılan mermerlerden kaynaklı olarak ortaya çıkan atıkların Tokat'taki yol inşaatlarında kullanılarak bertaraf edilebilirliği bu çalışmanın motivasyonu olmuştur. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, atık mermer agregalarının BSK'da kullanılması halinde stabilitede düşüslere neden olduğu görülmüştür. Bu amaçla çalışma kapsamında, mermer agregaları atık beton agregaları ile birlikte kullanılarak bu iki atık malzemenin stabiliteye etkisi incelenmiştir. Ayrıca deneyler sonucunda elde edilen MS, hava boşluğu ( $V_h$ ) ve bitümle dolu boşluk ( $V_f$ ) gibi Marshall parametreleri klasik regresyon analizi (KRA) ve YSA yöntemleri ile kurulan farklı modeller altında tahmin edilmiştir. Hazırlanan modellerde bitüm ve agregası karışım oranları bağımsız değişken olarak, MS, hava boşluğu oranı ( $V_h$ ) ve bitümle dolu boşluk ( $V_f$ ) değerleri ise bağımlı değişken olarak kullanılmıştır. KRA modellerinde doğrusal (LF), üs (ÜF), üstel (EF) ve kuadratik (KF) olmak üzere dört farklı fonksiyon uygulanmış ve bu fonksiyonlara ait katsayılar hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar farklı performans istatistikleri kullanılarak kıyaslanmış ve deneysel sonuçlara en yakın değerleri veren fonksiyonlar ve bu fonksiyonlara ait katsayılar belirlenmiştir. Daha sonra KRA'da en başarılı tahmin sonuçlarını veren fonksiyon ile YSA modelinden elde edilen tahmin sonuçları birbiri arasında kıyaslanmıştır.

## 2. Materyal ve metod

### 2. Material and method

#### 2.1. Materyal ve karışım oranları

##### 2.1. Material and mixing ratios

Çalışmada 50/70 penetrasyon sınıfına sahip bitüm kullanılmıştır. Tablo 1'de bitümün fiziksel özellikleri verilmiştir. Agregası olarak kalker kökenli doğal agregası, atık mermer ve beton atığı agregası olmak üzere üç farklı agregası kullanılmıştır. Agregalara ait fiziksel özellikler Tablo 2'de gösterilmiştir. Agregalar, karışımlarda farklı oranlarda kullanılmış olup toplamda altı farklı agregası karışım grubu hazırlanmıştır.

Tablo 3'te karışım gruplarına ait yüzdesel oranlar verilmiştir. Agregası karışımları hazırlanmadan önce mermer ve beton atığı agregaları, doğal agregasının elenmesi işleminde kullanılan eleklerden elenmiştir. Hazırlanan karışımlarda mermer atığı agregası kaba agregası grubuna %100 oranında, beton atığı agregası ise ince agregası grubuna %25 ve %50 oranında ikame edilmiştir. Filler agregası grubu tüm karışımlarda sabit tutulmuş olup %100 oranında kalker kökenli doğal agregası içermektedir.

**Tablo 1.** Bitümün fiziksel özellikleri  
*Table 1. Physical properties of bitumen*

Test	Deney sonucu	Standart
Penetrasyon (25°C)	58	TS EN 1426
Yumuşama Noktası (°C)	50	TS EN 1427
Özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	1.036	TS 1013 EN ISO 3675
Düktilite (25°C, 5 cm/min)	> 100	TS EN 13589
Parlama Noktası (°C)	302	TS EN ISO 2592

**Tablo 2.** Agregaların fiziksel özellikleri  
*Table 2. Physical properties of aggregates*

Malzeme özellikleri	Doğal agregata			Atık mermer	Beton atığı	Standart
	Kaba	İnce	Filler	Kaba	İnce	
Özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	2.714	2.734	2.724	2.71	2.68	TS EN 1097-6
Su emme (%)	0.45	0.67	-	0.30	6.82	TS EN 1097-6
Los Angeles Aşınma değeri	20.65	-	-	20.78	-	TS EN 1097-2
Yassılık indeksi değeri (%)	17.6	-	-	23.1	-	BS 812
Sıkışık Birim Hacim Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	1.54	1.86	-	1.48	1.55	TS EN 1097-3
Gevşek Birim Hacim Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	1.40	1.69	-	1.33	1.42	TS EN 1097-3

**Tablo 3.** Agregata gruplarının karışım oranları  
*Table 3. Mixing ratios of aggregate groups*

Grup adı	Kaba agregata ( $\Sigma$ %100)		İnce agregata ( $\Sigma$ %100)		Filler agregata ( $\Sigma$ %100)
	Doğal	Mermer atığı	Doğal	Beton atığı	Doğal
1	100	-	100	-	100
2	-	100	100	-	100
3	-	100	50	50	100
4	100	-	50	50	100
5	-	100	75	25	100
6	100	-	75	25	100

Şekil 1’de binder tabakası için hazırlanmış olan agregata gradasyon eğrisi gösterilmiştir. Hazırlanan agregata gradasyonuna göre karışımın; %58.6’sı kaba agregata, %36.7’si ince agregata ve %4.7’si filler agregatadan oluşmaktadır.

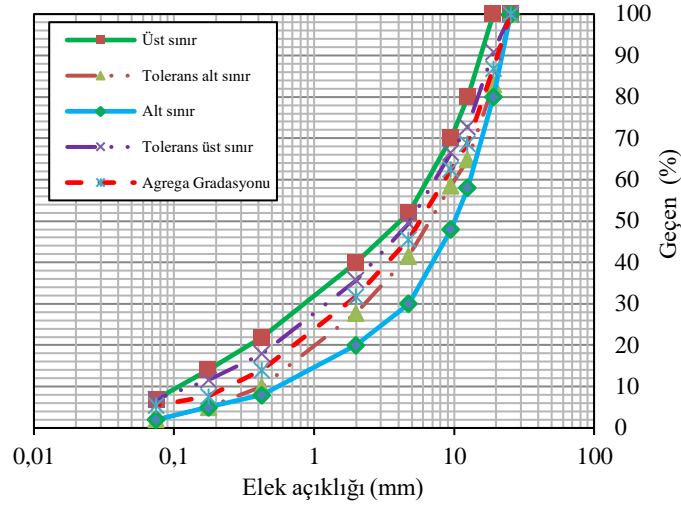
## 2.2. Metot

### 2.2. Method

#### 2.2.1. Marshall tasarımı

##### 2.2.1. Marshall design

BSK numuneleri hazırlanırken Marshall Tasarım Metodu kullanılmıştır. Tablo 3’te verilen her bir agregata karışım grubu için 7 farklı bitüm oranı (%3.5-%4-%4.5-%5-%5.5-%6-%6.5) ve her bir bitüm oranı için de üç adet olmak üzere toplamda 126 (6×7×3) adet numune hazırlanmıştır. Numuneler hazırlanırken 1150 gram agregata karışımları ile bitüm 155 °C sıcaklığa ulaşmaya kadar etüvde ısıtılmıştır. Daha sonra agregata ve bitüm tartılarak alttan ısıtma özelliğine sahip karıştırıcı ile karıştırılmış ve kalıplara yerleştirilerek Marshall tokmağı ile 75 darbe yapılarak sıkıştırılmıştır. Numuneler soğuduktan sonra test aşamasına geçilerek pratik özgül ağırlık ( $D_p$ ),  $V_h$ ,  $V_f$ , agregatlar arası boşluk (VMA), MS ve akma değeri parametreleri belirlenmiştir. Son olarak “Hava boşluğu-Bitüm oranı” grafiğinden her bir agregata karışım grubuna ait optimum bitüm oranı belirlenmiştir (KGM, 2021).



**Şekil 1.** Agregra gradasyon eğrisi  
**Figure 1.** Aggregate gradation curve

### 2.2.2. Klasik regresyon analizi (KRA)

#### 2.2.2. Classical regression analysis (CRA)

İki ya da daha fazla rastgele değişkenin olduğu problemlerde, değişkenlerin aynı gözlem sırasında aldığı değerler istatistiksel olarak birbirinden bağımsız değildir. Bu değişkenlerin birbiri arasında önemli bir ilişki vardır. Ancak bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiler fonksiyonel değildir. Kısaca açıklanacak olursa; bağımsız değişkenin birisi bir değer aldığı anda diğer değişkenler de bu değere karşılık her zaman aynı değeri alamayabilir. Fonksiyonel olmayan bu ilişkiyi gösteren matematiksel ifadeye regresyon denklemi denir (Bayazıt & Oğuz, 2005; Nacar vd., 2018). Çalışma kapsamında kullanılan fonksiyonlar Eşitlik 1-4'te verilmiştir.

$$y_{Doğrusal} = w_0 + w_1 x_1 + w_2 x_2 + w_3 x_3 + \dots + w_n x_n \quad (1)$$

$$y_{Üs} = w_0 x_1^{w_1} x_2^{w_2} x_3^{w_3} x_4^{w_4} \dots x_n^{w_n} \quad (2)$$

$$y_{Üstel} = w_0 + \exp(w_1 + w_2 x_1 + w_3 x_2 + \dots + w_{n-1} x_n) \quad (3)$$

$$y_{Kuatratik} = w_0 + w_1 x_1 + w_2 x_2 + \dots + w_5 x_1 x_2 + w_6 x_1 x_3 + \dots + w_{11} x_1^2 + w_{12} x_2^2 + \dots + w_{14} x_4^2 \quad (4)$$

Verilen eşitliklerde  $w$ 'ler regresyon katsayılarını,  $x$ 'ler bağımsız değişkenleri gösterirken  $y$ 'ler ise MS,  $V_h$  ve  $V_f$  değerlerini göstermektedir. KRA, bir rastgele değişkenin değerini bir veya daha fazla sayıda değişkenin değerine bağlı olarak tahmin etmeye yarayan matematiksel ifadenin belirlenmesidir (Bayazıt, 1981). KRA, değişkenler arasındaki ilişkiyi belirleyerek tahmin eşitliğini geliştirir. Bu sayede, bağımsız değişkenlerin değerleri bilindiğinde bağımlı değişkenler tahmin edilebilmektedir (Arslan & Bayırtepe, 2018; Şentürk, 2008; Ünver & Gamgarn, 1996).

### 2.2.3. Yapay sinir ağı (YSA)

#### 2.2.3. Artificial neural network (ANN)

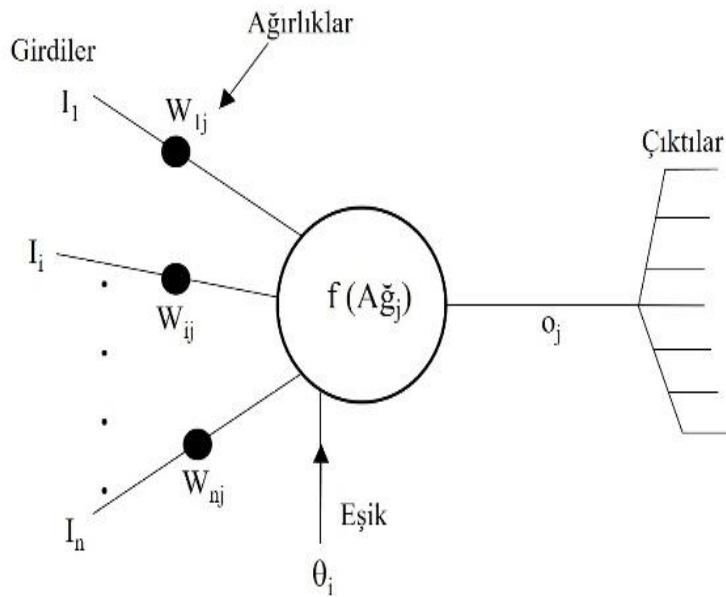
YSA, beyin gibi biyolojik sistemlerden ilham alan bir bilgi işleme yöntemidir. Sinir ağları, belirli sorunları çözmek için uyum içinde çalışan çok sayıda işlem ögelerinden (nöron) oluşmaktadır. Nöronlar, yönlendirilmiş bağlantılar sayesinde birbirlerine bağlanırlar. Her bir bağlantı kendisiyle ilişkilendirilmiş bir ağırlığa sahiptir. YSA, ağa bilinmeyen bir veri girildiğinde geçmiş deneyimlerine dayalı olarak en etkili çözümü bulabilme mantığına sahiptir (Kok vd., 2010). Şekil 2'de YSA nöronunun yapısal şeması verilmiştir. Burada,  $I_1, \dots, I_i, \dots, I_n$  girdi değerleri ve  $w_{1j}, \dots, w_{ij}, \dots, w_{nj}$  ağırlık değeri olarak kabul edilirse Ağ<sub>j</sub>, gelen nöronun aktivasyonunun çarpımlarının toplamıdır. Eşik değeri olan  $\theta_j$  ise çıktıya eklenir. Eşitlik 5'te Ağ<sub>j</sub> verilmiştir. Burada;

- $i$ , girdi nöronlarının vektör gösterimini,
- $n$ , girdi nöron sayısını,
- $w$  ağırlıkların vektör gösterimini,
- $\theta_i$  eşik noktasını göstermektedir.

$O_j$  olarak gösterilen  $j$ 'inci nöral bağlantının çıktısı olarak kabul edilen aktivasyon fonksiyonu Eşitlik 6'da verilmiştir. Bu fonksiyon, bir nöronun giriş modelini belirten çıktı aralığına eşitlemek için kullanılmaktadır. En sık kullanılan aktivasyon fonksiyonları tanjant hiperbolik, tanjant sigmoid ve doğrusal fonksiyonlardır. YSA mimarisinde temel olarak giriş tabakası, gizli tabaka ve çıkış tabakası bulunmaktadır (Kırbaş vd., 2018; Kızılda, 2021).

$$A\check{g}_j = \sum_{i=1}^n I_i W_{ij} + \theta_i \quad (5)$$

$$O_j = f(A\check{g}_j) \quad (6)$$



Şekil 2. YSA nöronunun fonksiyonel yapısı (Kırbaş vd., 2018)

Figure 2. The functional structure of the ANN neuron (Kırbaş vd., 2018)

## 2.2.4. Modelleme

### 2.2.4. Modeling

Modelleme çalışmalarında kaba mermer agrega (KMA), ince beton agrega (İBA) ve bitüm oranı (BO) değerleri bağımsız değişken olarak  $MS$ ,  $V_h$ ,  $V_f$  değerleri ise bağımlı değişken olarak kullanılmıştır. Toplamda 42 adet veri kullanılarak hazırlanan modelde 30 adet veri eğitim için, 12 adet veri ise test için ayrılmıştır. Verileri eğitim ve test setlerine ayırırken her iki sette de tüm veri grubunu temsil edebilecek değerlerin olmasına özen gösterilmiştir. Eğitim veri seti için en yüksek performansı veren modeller test veri takımı kullanılarak ayrıca değerlendirilmiştir. Tablo 4'te eğitim, test ve tüm veriler için en küçük, en büyük, ortalama ve standart sapma temel istatistik değerleri gösterilmiştir.

Çalışma kapsamında kullanılan bağımlı ve bağımsız değişkenlerin değer aralıkları farklı olduğu için modellenmesi zorlaşabilmektedir. Bu sebeple çözümün daha hızlı ve daha kolay elde edilmesi amacıyla verilere normalizasyon işlemi uygulanmıştır. Bu işlem sonucunda veri setinde bulunan bağımlı ve bağımsız değişkenlere ait veriler 0.1 ile 0.9 arasında normalize edilmiştir. Bu işlem Eşitlik 7'de verilen formül kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Bayram vd., 2015).

$$\text{Normalize değer} = \left[ \frac{\text{Ham değer} - \text{Minimum değer}}{\text{Maksimum değer} - \text{Minimum değer}} \right] \times (0.8) + 0.1 \quad (7)$$



**Tablo 4.** Modellemedeki değişkenlere ait temel istatistikler  
**Table 4.** Basic statistics of the variables in the modeling

Veri seti	Değişken	Birim	En küçük	Ortalama	En büyük	Standart sapma
Tümü	BO	%	3.5	5.0	6.5	1.00
	KMA	%	0.0	50	100	50.00
	İBA	%	0.0	25	50	20.41
	MS	kg	954	1256.2	1557	137.92
	V <sub>h</sub>	%	0.96	4.10	8.98	2.37
	V <sub>f</sub>	%	38.5	70.6	93.5	16.37
Eğitim	BO	%	3.5	5.0	6.5	1.04
	KMA	%	0.0	50	100	50.00
	İBA	%	0.0	25	50	20.41
	MS	kg	954	1244.3	1557	137.45
	V <sub>h</sub>	%	0.96	4.13	8.98	2.51
	V <sub>f</sub>	%	38.5	70.4	93.5	17.41
Test	BO	%	3.5	5.0	6.5	0.89
	KMA	%	0.0	50	100	50.00
	İBA	%	0.0	25	50	20.41
	MS	kg	1126	1286.2	1533	134.49
	V <sub>h</sub>	%	1.44	4.04	7.68	1.98
	V <sub>f</sub>	%	48.3	71.1	89.8	13.43

### 2.2.5. Model performansının değerlendirilmesi

#### 2.2.5. Evaluation of model performance

Kullanılan modellerin tahmin performanslarını karşılaştırmak amacıyla ortalama karesel hatanın karekökü (OKHK), ortalama mutlak hata (OMH), saçılım indeksi (SI) ve Nash Sutcliffe verimlilik katsayısı (NS) performans istatistikleri Eşitlik 8-11 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$OKHK = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - td_i)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

$$OMH = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |t_i - td_i| \quad (9)$$

$$SI = \frac{OKHK}{\bar{t}} \quad (10)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - td_i)^2}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} \quad (11)$$

Verilen eşitliklerde;  $t_i$  ölçüm değerlerini,  $td_i$  tahmin değerlerini,  $\bar{t}$  ölçüm değerlerinin ortalamasını ve  $n$  veri sayısını göstermektedir. NS değeri  $-\infty$  ile 1 arasındadır. NS=1 olması, kullanılan yöntemin mükemmel olduğunu belirtmektedir. [Moriasi vd. \(2007\)](#) NS için Tablo 5'teki gibi bir aralık önermişlerdir.

**Tablo 5.** NS değer aralığı

**Table 5.** NS value range

Parametre	Çok iyi	İyi	Yeterli	Yetersiz
NS	0.75-1.00	0.65-0.75	0.50-0.65	<0.50

### 3.Bulgular ve tartışma

#### 3. Results and discussion

#### 3.1. Deneysel sonuçların değerlendirilmesi

##### 3.1. Evaluation of experimental results

Marshall numunelerine ait parametreler yapılan testler sonucunda belirlenmiştir. Hesaplamalar sonucunda %5 hava boşluğuna karşılık gelen bitüm değeri, optimum bitüm miktarı olarak kabul edilmiştir. Optimum bitüm miktarına karşılık gelen asfaltla dolu boşluk, agregalar arası boşluk, stabilite ve akma değerlerinin şartname limitlerine uygunluğu kontrol edilmiştir (KGM, 2021). Tablo 6’da verilen değerler incelendiğinde tüm karışım gruplarının şartname limitleri arasında kaldığı görülmektedir.

**Tablo 6.** Optimum bitüm miktarına karşılık gelen Marshall parametreleri

**Table 6.** Marshall parameters corresponding to the optimum amount of bitumen

Karışım grupları	Optimum bitüm (%)	Pratik özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	Hava boşluğu (%)	Asfaltla dolu boşluk (%)	Agregalar arası boşluk (%)	Stabilite (kg)	Akma (mm)
1	4.20	2.410	5	64.44	13.89	1379	2.23
2	4.02	2.419	5	63.31	13.51	1113	2.38
3	5.03	2.347	5	64.54	14.10	1253	2.27
4	4.78	2.352	5	63.17	13.48	1542	2.55
5	4.35	2.387	5	63.23	13.47	1236	2.67
6	4.33	2.386	5	62.98	13.33	1310	2.52
<b>Şartname limitleri</b>							
min	-	-	4	60	13	750	2
max	-	-	6	75	15	-	4

Tablo 6’da verilen deney sonuçları incelendiğinde, tüm karışımların şartnamede verilen minimum stabilite (750 kg) değerinin oldukça üzerinde kaldığı görülmektedir. Ancak kaba agrega olarak mermer atıklarının kullanıldığı karışımların stabilite değerlerinde düşüşler görülmektedir. Bu durumun nedeninin, mermer agregalarının yassılık indeksinin yüksek olmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Beton atığının kullanıldığı karışımların stabilite değerlerinde genel olarak artışlar tespit edilmiştir. Bu sayede, mermer agregasının sebep olduğu stabilite düşüşlerinin beton atığı ile giderilebileceği görülmüştür. Beton atığı kullanılan karışımların optimum bitüm miktarı ve hava boşluğu değerleri artarken pratik özgül ağırlık değeri düşmüştür. Bu durumun nedeni, beton atıklarının poroz bir yapıya sahip olmasından dolayıdır. Genel olarak tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, mermer ve beton atıklarının BSK’ların binder tabakasında kullanılabileceği tespit edilmiştir. Bu sayede, büyük miktarlarda açığa çıkan iki farklı atık malzemenin yol kaplamalarında kullanılarak önemli ölçüde bertaraf edilebileceği belirlenmiştir.

#### 3.2. Modelleme sonuçlarının değerlendirilmesi

##### 3.2. Evaluation of modeling results

##### 3.2.1. Klasik regresyon analizi (KRA) model sonuçları

###### 3.2.1. Classical regression analysis (CRA) model results

KRA modelleme çalışmaları sonucunda LF, ÜF, EF ve KF fonksiyonları için Tablo 7’deki katsayı değerleri elde edilmiştir. KRA yöntemlerinin uygulanması sonucunda, fonksiyonlara ait katsayılar eşitliklerdeki yerlerine yazılarak eğitim ve test veri setleri üretilmiştir. Tablo 8’de MS, Tablo 9’da V<sub>h</sub> ve Tablo 10’da V<sub>f</sub> eğitim ve test veri setlerine ait tahmin değerleri ile ölçüm değerleri arasında hesaplanan performans istatistikleri verilmiştir. Tablo 8, Tablo 9 ve Tablo 10 incelendiğinde en düşük OKHK, OMH ve SI ile en yüksek NS değerlerini veren fonksiyon türünün hem eğitim için hem de test için KF olduğu tespit edilmiştir. Tablo 8’de görüldüğü üzere KF fonksiyonu eğitim için NS performans istatistiğine göre “çok iyi” düzeyde tahmin yaparken test için “yeterli” düzeyde bir tahmin yapmıştır (Moriassi vd., 2007). Tablo 9 ve Tablo 10 için tahmin değerleri ile ölçüm değerleri kullanılarak hesaplanan performans istatistiklerinin birbirine oldukça yakın ve “çok iyi” düzeyde olduğu görülmektedir (Moriassi vd., 2007). Şekil 3’te MS, V<sub>h</sub> ve V<sub>f</sub> için KF

fonksiyonu ile elde edilen eğitim ve test verilerinin tahmin değerleri ile ölçüm değerlerine ait saçılım grafikleri verilmiştir.

**Tablo 7.** Regresyon analizinden elde edilen LF, ÜF, EF ve KF fonksiyonlarına ait katsayılar  
*Table 7. Coefficients of LF, PF, EF and QF functions obtained from regression analysis*

Model fonksiyonları		Regresyon analizinden elde edilen katsayılar									
		$w_0$	$w_1$	$w_2$	$w_3$	$w_4$	$w_5$	$w_6$	$w_7$	$w_8$	$w_9$
MS	LF	0.506	-0.029	-0.305	0.292						
	ÜF	0.462	0.045	-0.226	0.224						
	EF	-0.495	-0.014	-0.024	-0.312	0.300					
	KF	-18.422	0.891	208.615	0.073	0.065	0.196	-0.109	-1.070	-208.876	0.199
$V_h$	LF	0.726	-0.811	-0.003	0.195						
	ÜF	0.262	-0.559	-0.021	0.181						
	EF	-0.120	-0.119	-1.566	-0.022	0.363					
	KF	-55.551	-1.295	626.128	0.136	0.014	-0.288	0.036	0.618	-626.166	0.178
$V_f$	LF	0.243	0.832	0.004	-0.193						
	ÜF	0.873	0.670	0.007	-0.072						
	EF	-42.040	3.744	0.020	0.000	-0.005					
	KF	56.535	1.209	-626.034	-0.179	0.002	0.221	-0.022	-0.490	626.056	-0.109

**Tablo 8.** MS için eğitim ve test verilerinin OKHK, OMH, SI ve NS değerleri  
*Table 8. RMSE, MAE, SI and NS values of training and test data for MS*

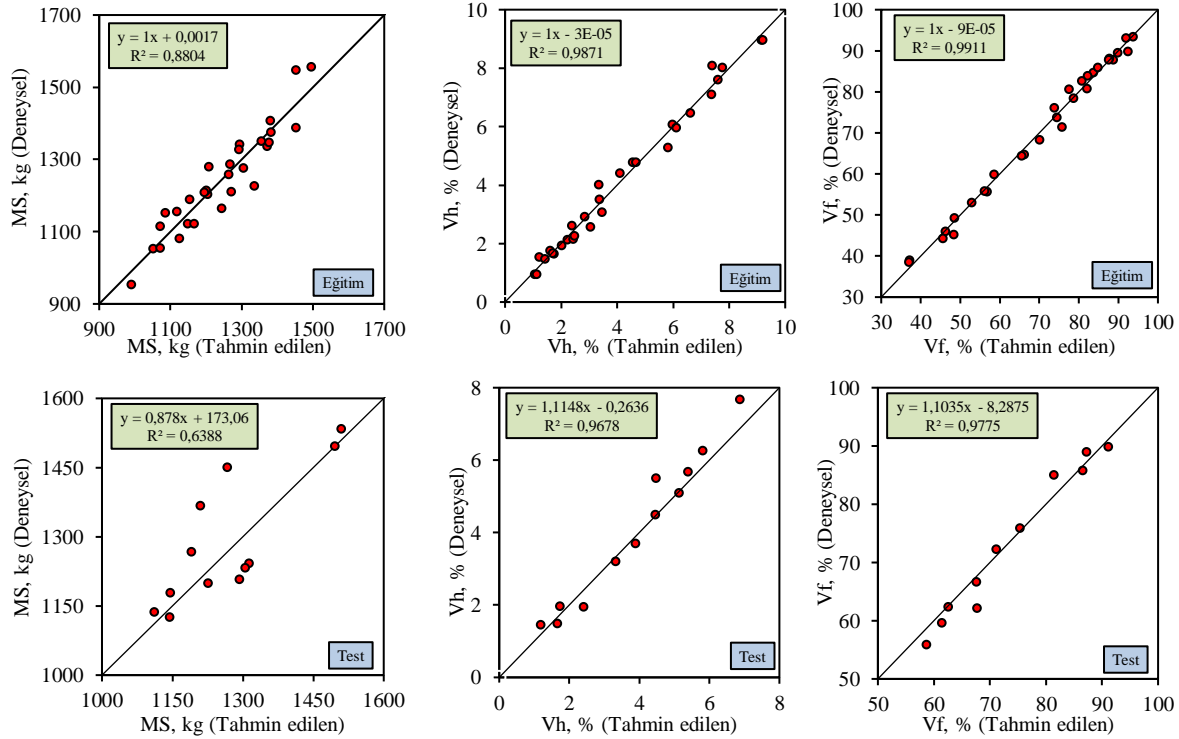
Veri seti	Eğitim				Test			
	LF	ÜF	EF	KF	LF	ÜF	EF	KF
Fonksiyon								
OKHK	71.2170	73.7950	70.7420	<b>47.5350</b>	99.2920	118.5390	98.5840	<b>84.2350</b>
OMH	56.6990	59.6510	57.7110	<b>38.8510</b>	85.7750	93.1920	83.2720	<b>64.4910</b>
SI	0.0570	0.0590	0.0570	<b>0.0380</b>	0.0770	0.0920	0.0770	<b>0.0650</b>
NS	0.7320	0.7120	0.7350	<b>0.8800</b>	0.4550	0.2230	0.4630	<b>0.6080</b>

**Tablo 9.**  $V_h$  için eğitim ve test verilerinin OKHK, OMH, SI ve NS değerleri  
*Table 9. RMSE, MAE, SI and NS values of training and test data for  $V_h$*

Veri seti	Eğitim				Test			
	LF	ÜF	EF	KF	LF	ÜF	EF	KF
Fonksiyon								
OKHK	0.5931	0.6649	0.3191	<b>0.0817</b>	0.6158	1.1791	0.5786	<b>0.4452</b>
OMH	0.4725	0.6907	0.2300	<b>0.2270</b>	0.5321	1.0897	0.4246	<b>0.3371</b>
SI	0.1436	0.1610	0.0773	<b>0.0198</b>	0.1526	0.2922	0.1434	<b>0.1103</b>
NS	0.9443	0.8947	0.9839	<b>0.9871</b>	0.9032	0.6452	0.9146	<b>0.9494</b>

**Tablo 10.**  $V_f$  için eğitim ve test verilerinin OKHK, OMH, SI ve NS değerleri  
*Table 10. RMSE, MAE, SI and NS values of training and test data for  $V_f$*

Veri seti	Eğitim				Test			
	LF	ÜF	EF	KF	LF	ÜF	EF	KF
Fonksiyon								
OKHK	3.1943	3.7662	3.2316	<b>1.6445</b>	3.3337	4.3124	3.3509	<b>2.5137</b>
OMH	2.4726	2.9823	2.5031	<b>1.3128</b>	2.8587	3.6597	2.8726	<b>3.5971</b>
SI	0.0453	0.0535	0.0459	<b>0.0233</b>	0.0469	0.0607	0.0472	<b>0.0354</b>
NS	0.9663	0.9532	0.9655	<b>0.9911</b>	0.9384	0.9029	0.9377	<b>0.9699</b>



**Şekil 3.** KF fonksiyonu ile elde edilen eğitim ve test veri setleri MS, Vh ve Vf tahmin sonuçları ile ölçüm değerlerinin karşılaştırılması

**Figure 3.** Training and test data sets obtained with the QF function (comparison of MS, Vh and Vf estimation results with measurement values)

Verilerin saçılım grafiklerinde köşegen üzerine dağılması tahmin değerlerinin ölçüm değerlerine çok yakın olduğunu göstermektedir. Bir başka deyişle köşegen üzerindeki noktaların RMSE ve MAE değerlerinin sıfır olduğu anlamına gelmektedir (Bayram & Kankal, 2015; Nacar vd., 2020). Şekil 3'te KF fonksiyonu kullanılarak üretilen saçılım grafikleri incelendiğinde; MS'ye ait eğitim verileri ile V<sub>h</sub> ve V<sub>f</sub>'ye ait eğitim ve test verilerinin büyük bir çoğunluğunun köşegen üzerinde dağıldığı görülmüştür. Bu durum, tahmin verilerinin deneysel verilere oldukça yakın olduğunu belirtmektedir. MS'ye ait test veri seti incelendiğinde ise test verilerinin saçılım grafiğindeki köşegenden biraz uzak olduğu görülmüştür. Ancak bu veri setine ait NS değerine bakıldığında 0.6080 olduğu, bu değer de NS performans istatistiğine göre "yeterli" düzeyinde yer aldığı görülmektedir.

### 3.2.2. Yapay sinir ağı (YSA) model sonuçları

#### 3.2.2. Artificial neural network (ANN) model results

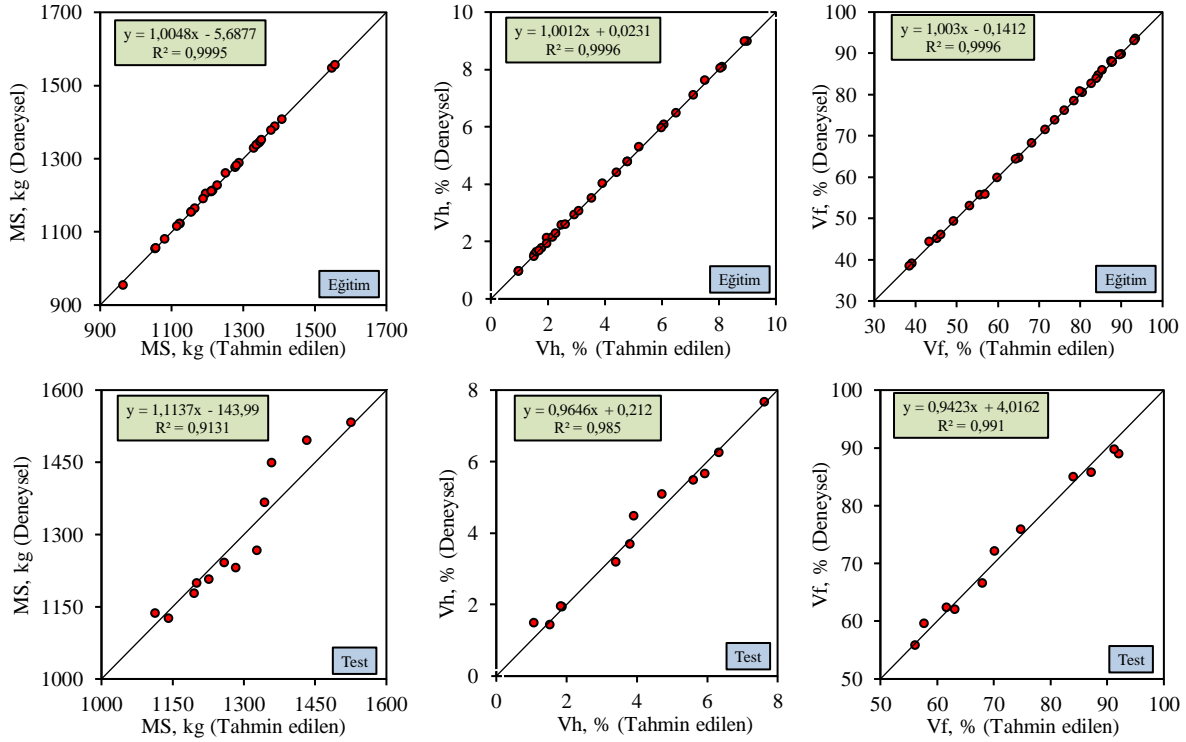
YSA modellemesinde, KRA'da eğitim ve test için ayrılan veri setleri aynen kullanılmış olup YSA'nın KRA'ya kıyasla tahmin sonuçlarını ne kadar iyileştirebildiği incelenmiştir. MS, V<sub>h</sub> ve V<sub>f</sub> için kurulan YSA modellerinde farklı nöron sayıları denenmiş ve optimum sonucu veren nöron sayıları belirlenmiştir. Tablo 11'de MS, V<sub>h</sub> ve V<sub>f</sub>'ye ait eğitim ve test veri setleri için optimum performans istatistiklerini veren nöron sayıları ve istatistik sonuçları sunulmuştur.

**Tablo 11.** Gizli katmandaki optimum nöron sayılarına ait tahminlerin performans değerleri

**Table 11.** Performance values of the estimations of the optimum number of neurons in the hidden layer

Parametre	Nöron sayısı	Eğitim				Test			
		OKHK	OMH	SI	NS	OKHK	OMH	SI	NS
MS	12	0.3195	0.1295	0.0001	0.9995	41.8147	32.7339	0.0325	0.9033
V <sub>h</sub>	18	0.0049	0.0026	0.0009	0.9997	0.2629	0.2051	0.0651	0.9824
V <sub>f</sub>	7	0.0329	0.0133	0.0004	0.9996	1.5177	1.3521	0.0214	0.9872

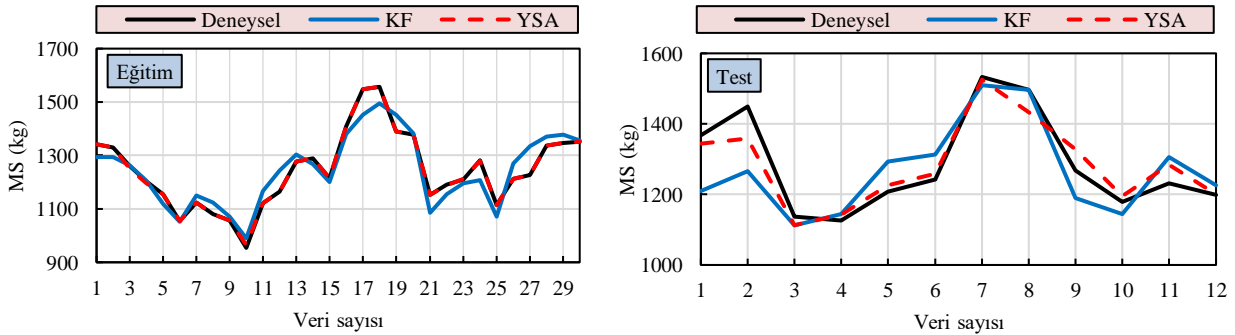
Ekler kısmında verilen Tablo 12, Tablo13 ve Tablo 14 incelendiğinde en düşük OKHK, OMH ve SI ile en yüksek NS değerlerini veren nöron sayılarının MS,  $V_h$  ve  $V_f$  için sırasıyla 12, 18 ve 7 olduğu tespit edilmiştir. Tablo 5’te görüldüğü üzere kurulan YSA modellerinin hem eğitim hem de test verileri için “çok iyi” düzeyde tahmin yaptığı belirlenmiştir (Moriyası vd., 2007). YSA modellerinden en iyi performansı gösteren nöron sayıları için elde edilen tahmin sonuçlarına ait saçılım grafikleri MS,  $V_h$  ve  $V_f$  için Şekil 4’te verilmiştir.



**Şekil 4.** YSA modelinden elde edilen eğitim ve test veri setleri; MS,  $V_h$  ve  $V_f$  tahmin sonuçları ile ölçüm değerlerinin karşılaştırılması

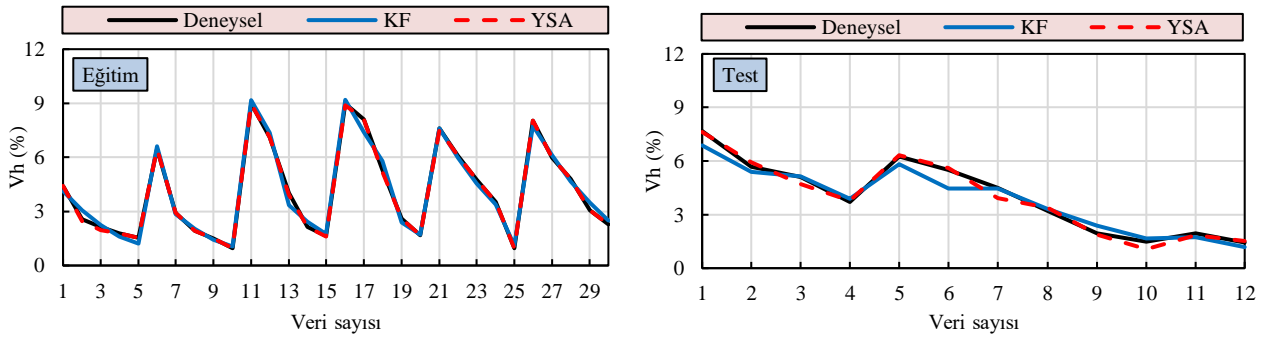
**Figure 4.** Training and test data sets obtained from the ANN model (comparison of MS,  $V_h$  and  $V_f$  estimation results and measurement values)

Şekil 4’te YSA modeli kullanılarak eğitim ve test verileri için elde edilen saçılım grafikleri incelendiğinde, verilerin büyük bir çoğunluğunun köşegen üzerinde dağıldığı görülmüştür. Bu durum, tahmin verilerinin deneysel verilere oldukça yakın olduğunu belirtmektedir. Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7’de KRA yönteminde en iyi performansı sergileyen KF fonksiyonu ve YSA modelleri ile tahmin edilen eğitim ve test verilerinin deneysel verilerle karşılaştırılması zaman serisi olarak gösterilmiştir. Verilen şekiller incelendiğinde, deneysel verilere en yakın sonuçların YSA modellerinden elde edildiği ve YSA’nın KRA modellerine kıyasla daha başarılı tahmin sonuçları verdiği görülmektedir. Bu durum literatürde yapılan çalışmalarla da uyum göstermiştir (Chandra vd., 2013; Kırbaş vd., 2018).



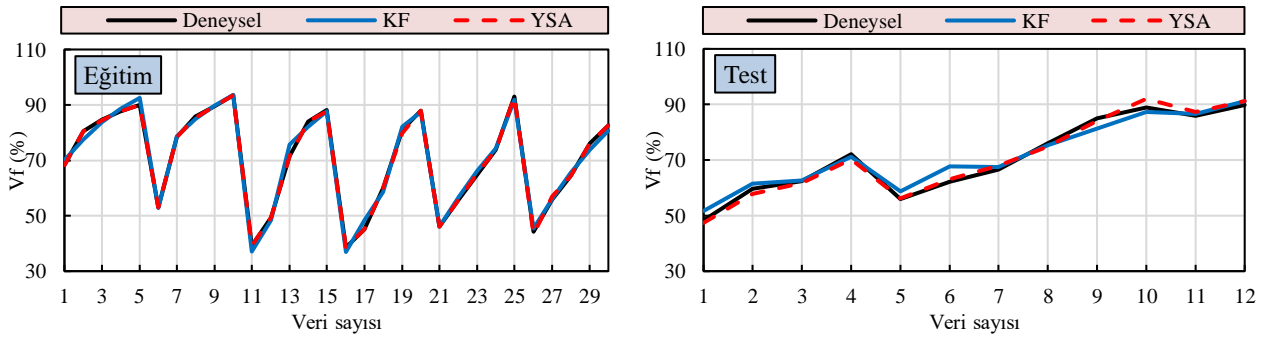
**Şekil 5.** MS için eğitim ve test veri setlerinin ölçüm-tahmin değerlerinin karşılaştırılması

**Figure 5.** Comparison of measurement-predictive values of training and test datasets for MS



**Şekil 6.**  $V_h$  için eğitim ve test veri setlerinin ölçüm-tahmin değerlerinin karşılaştırılması

**Figure 6.** Comparison of measurement-predictive values of training and test datasets for  $V_h$



**Şekil 7.**  $V_f$  için eğitim ve test veri setlerinin ölçüm-tahmin değerlerinin karşılaştırılması

**Figure 7.** Comparison of measurement-predictive values of training and test datasets for  $V_f$

## 4.Sonuçlar

### 4. Conclusions

Bu çalışma, iki aşamadan oluşturulmuştur. İlk aşamada mermer ve beton atıkları kullanılarak Marshall Tasarım Yöntemi ile asfalt numuneleri üretilmiştir. Üretilen numunelerin Marshall parametreleri belirlenerek şartnameye uygunluğu araştırılmıştır. İkinci aşamada ise kaba mermer agregası (KMA), ince beton agregası (İBA) ve bitüm oranı (BO) değerleri kullanılarak Klasik Regresyon Analizi (KRA) ve Yapay Sinir Ağı (YSA) yöntemleri ile asfalt numunelerine ait Marshall stabilitesi (MS), hava boşluğu ( $V_h$ ) ve bitümle dolu boşluk ( $V_f$ ) parametreleri tahmin edilmiştir. KRA yöntemi biri doğrusal diğer üçü doğrusal olmayan dört farklı fonksiyona uygulanmıştır. YSA yönteminde ise farklı nöron sayıları deneyerek optimum sonucu veren nöron sayıları belirlenmiştir. Son olarak KRA fonksiyonlarından ve YSA modellerinden elde edilen tahmin sonuçları kullanılarak fonksiyonlara ait performans istatistikleri belirlenmiş ve deneysel verilere en yakın tahmin değerlerini veren KRA fonksiyonu ile YSA modelleri kıyaslanmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmektedir;

- Atık mermerin kaba agregası olarak kullanıldığı karışımlarda stabilite genel olarak düşmüştür.
- Beton atığının kullanılması durumunda stabilite değerleri artış göstermiştir. Beton atığının porozitesi yüksek olduğu için bu durum optimum bitüm miktarını bir miktar artırmıştır. Fakat bu atıkların çevreye verdiği zararlar göz önüne alındığında, optimum bitüm miktarındaki artışlar göz ardı edilebilir. Ayrıca mermer atıklarının sebep olduğu stabilite düşüşlerinin beton atığı agregası ile giderilebileceği görülmüştür.
- Mermer ve beton atığının birlikte kullanıldığı karışımlarda stabilite değerlerinin kontrol karışımlarına yakın çıkması, bu iki farklı atığın birlikte kullanılarak yol kaplamaları gibi agreganın yüksek miktarda kullanıldığı yerlerde bertaraf edilebileceği tespit edilmiştir. Böylece büyük bir çevre kirliliği oluşturan bu atıkların önemli bir kısmı dönüştürülmüş olacaktır.
- Kaba agregası grubunda yer alan atık mermer agregası oranı, ince agregası grubunda yer alan atık beton agregası oranı ve bitüm oranı değerlerine bağlı olarak MS,  $V_h$  ve  $V_f$  gibi önemli parametrelerin KRA fonksiyonları ve YSA modeli ile yüksek doğrulukta tahmin edilebileceği tespit edilmiştir.

- KRA modellerinden elde edilen performans istatistikleri göz önüne alındığında, deneysel verilere en yakın tahmin değerlerinin KF'den elde edildiği görülmüştür.
- YSA'nın MS,  $V_h$  ve  $V_f$  parametrelerini tahmin etmede KF'den daha başarılı olduğu görülmüştür. YSA modelinin NS performansı KF ile kıyaslandığında; MS,  $V_h$  ve  $V_f$ 'nin eğitim veri setini sırasıyla %13.58, %1.28, %0.86 oranında iyileştirdiği, test veri setlerini ise sırasıyla %48.57, %3.48 ve %1.78 oranında iyileştirdiği görülmüştür.
- YSA modelinin Marshall parametreleri için oldukça önemli olan MS değerini, KF'den daha başarılı bir şekilde tahmin ettiği belirlenmiştir.
- Marshall parametrelerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen deneyler hem yorucu hem de zaman alıcı olabilmektedir. Çalışmada önerilen modeller sayesinde daha az veri ile daha az sürede ve yüksek doğruluk oranı ile Marshall parametrelerinin belirlenebileceği görülmüştür.

Marshall parametrelerinin sadece agrega oranı ve bitüm oranına bağlı olmadığı bilinmektedir. Sıcaklık, bitüm özelliği vs. birçok kriter de Marshall parametreleri üzerinde önemli etkiye sahiptir. Bu nedenle sonraki çalışmalarda farklı kriterler dikkate alınarak bulanık mantık, genetik programlama ve farklı regresyon analizi türleri gibi yöntemler de kullanılarak Marshall parametreleri tahmin edilebilir. Ayrıca mermer ve beton atıklarının BSK'da kullanılması ile ilgili maliyet analizlerinin yapılmasının ileriki çalışmalar için faydalı olacağı düşünülmektedir.

### **Teşekkür**

#### *Acknowledgement*

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde 2019/65 No'lu proje kapsamında maddi imkan sağlayan Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) birimine katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

### **Yazar katkısı**

#### *Author contribution*

Bu makalenin yazarları çalışmanın planlanması, gerekli hesaplama ve diğer işlemlerin yapılması, yorumlanması ve makalenin hazırlanması aşamalarına birlikte katkı sağlamışlardır.

### **Etik beyanı**

#### *Declaration of ethical code*

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

### **Çıkar çatışması beyanı**

#### *Conflicts of interest*

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

### **Kaynaklar**

#### *References*

- Ahmedzade, P., & Sengoz, B. (2009). Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete. *Journal of Hazardous Materials*, 165(1-3), 300-305. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.09.105>
- Akbulut, H., & Gürer, C. (2007). Use of aggregates produced from marble quarry waste in asphalt pavements. *Building and Environment*, 42(5), 1921-1930. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.03.012>
- Akbulut, H., Gürer, C., Çetin, S., & Elmacı, A. (2012). Investigation of using granite sludge as filler in bituminous hot mixtures. *Construction and Building Materials*, 36, 430-436. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.069>
- Arabani, M., Moghadas Nejad, F., & Azarhoosh, A. R. (2013). Laboratory evaluation of recycled waste concrete into asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 14(6), 531-539. <https://doi.org/10.1080/10298436.2012.747685>

- Arslan, D., & Bayırtepe, H. (2018). Bitümlü sıcak karışımlara ait akma değerinin regresyon modelleri ile tahmini. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6(1), 45-53. <https://doi.org/10.29109/http-gujsc-gazi-edu-tr.310405>
- Bayazıt, M. & Yeğen Oğuz (2005). *B. Mühendisler için istatistik* (1). Birsen Yayınevi.
- Bayazıt, M. (1981). *Hidrolojide İstatistik Yöntemler* (1). İTÜ Matbaası.
- Bayram, A., & Kankal, M. (2015). Artificial neural network modeling of dissolved oxygen concentration in a Turkish watershed. *Polish Journal of Environmental Studies*, 24(4), 1507-1515.
- Bayram, A., Uzlu, E., Kankal, M., & Dede, T. (2015). Modeling stream dissolved oxygen concentration using teaching-learning based optimization algorithm. *Environmental Earth Sciences*, 73, 6565-6576.
- Chandra, S., Sekhar, C. R., Bharti, A. K., & Kangadurai, B. (2013). Relationship between pavement roughness and distress parameters for Indian highways. *Journal of Transportation Engineering*, 139(5), 467-475.
- Chen, M. Z., Lin, J. T., Wu, S. P., & Liu, C. H. (2011a). Utilization of recycled brick powder as alternative filler in asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1532-1536. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.08.005>
- Chen, M., Lin, J., & Wu, S. (2011b). Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 25(10), 3909-3914. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.022>
- Ektas, S., & Karacasu, M. (2012). Use of recycled concrete in hot mix asphalt and an ANN model for prediction of resilient modulus. *Ekoloji Dergisi*, 21(83). doi: 10.5053/ekoloji.2012.836
- Ertaş, F. C., Döven, M. S. & Özyer, K., (2011). *Tokat ili mermer endüstrisi sektör araştırması ve rekabetçilik analizi. 2011 Yılı Doğrudan Faaliyet Desteği Programı*, Tokat Sanayi ve Ticaret İl Müdürlüğü, chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://www.oka.org.tr/assets/upload/dosyalar/tokat-ili-mermer-endustrisi-sektor-arastirmasi-ve-rekabetcilik-analizi.pdf>
- Gedik, A., Selcuk, S., & Lav, A. H. (2021). Investigation of recycled fluorescent lamps waste as mineral filler in highway construction: A case of asphaltic pavement layers. *Resources, Conservation and Recycling*, 168, 105290. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105290>
- Gültekin, M., Nayır, N., Ziya, U., Çalışkan, K. K., Öztürk, A., Tutan, S.N. & Komut, M. (2021). *Bitümlü karışımlar laboratuvar el kitabı* (1). Karayolları Genel Müdürlüğü, Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
- Huang, B., Dong, Q., & Burdette, E. G. (2009). Laboratory evaluation of incorporating waste ceramic materials into Portland cement and asphaltic concrete. *Construction and Building Materials*, 23(12), 3451-3456. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.024>
- Kandhal, P. S., Parker, F., & Mallick, R. B. (1997). *Aggregate tests for hot-mix asphalt: state of the practice*. Washington, DC: Transportation Research Board, National Research Council. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://www.eng.auburn.edu/research/centers/ncat/files/technical-reports/rep97-06.pdf>
- Kara, Ç., & Karacasu, M. (2017). Investigation of waste ceramic tile additive in hot mix asphalt using fuzzy logic approach. *Construction and Building Materials*, 141, 598-607. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.025>
- Karasu, S., Kankal, M., Nacar, S., Uzlu, E., & Yüksek, Ö. (2020). Prediction of parameters which affect beach nourishment performance using MARS, TLBO, and conventional regression techniques. *Thalassas: An International Journal of Marine Sciences*, 36(1), 245-260. <https://doi.org/10.1007/s41208-019-00173-z>
- Karavaşin, M., & Terzi, S. (2007). Evaluation of marble waste dust in the mixture of asphaltic concrete. *Construction and Building Materials*, 21(3), 616-620. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.12.001>
- Kırbaş, U., Karavaşin, M., Demir, B., Komut, M., & Ünal, E. N. (2018). Bitümlü sıcak karışım üstyapılarda görülen yüzey bozulmaları ile düzgünlük arasındaki ilişkilerin modellenmesinde bazı yaklaşımlar. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(2), 901-912. <https://doi.org/10.19113/sdufbed.32804>



- Kıyıldı, R. K. (2021). Yapay sinir ağları ile Marshall stabilite değerinin tahmini. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(2), 627-633. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.866566>
- Kok, B. V., Yılmaz, M., Sengoz, B., Sengur, A., & Avci, E. (2010). Investigation of complex modulus of base and SBS modified bitumen with artificial neural networks. *Expert Systems with Applications*, 37(12), 7775-7780. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.04.063>
- Maçın, K. E., & Demir, İ. (2018). Kentsel dönüşüm sürecinde İstanbul'da inşaat ve yıkıntı (İ&Y) atıkları yönetimi. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(9), 202-210.
- Mardani-Aghabaglou, A., Kankal, M., Nacar, S., Felekoğlu, B., & Ramyar, K. (2021). Assessment of cement characteristics affecting rheological properties of cement pastes. *Neural Computing and Applications*, 33(19), 12805-12826. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-05925-8>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Nacar, S., Kankal, M., & Hınıs, M. A. (2018). Çok değişkenli uyarlanabilir regresyon eğrileri (ÇDURE) ile günlük akarsu akımlarının tahmini-Haldizen deresi örneği. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(1), 38-47.
- Nacar, S., Mete, B. & Bayram, A. (2020). Günlük çözünmüş oksijen konsantrasyonunun çok değişkenli uyarlanabilir regresyon eğrileri ile tahmin edilmesi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 25(3), 1479-1498.
- Ozgan, E. (2011). Artificial neural network based modelling of the Marshall Stability of asphalt concrete. *Expert Systems with Applications*, 38(5), 6025-6030. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.11.018>
- Pourtahmasb, M. S., Karim, M. R., & Shamshirband, S. (2015). Resilient modulus prediction of asphalt mixtures containing recycled concrete aggregate using an adaptive neuro-fuzzy methodology. *Construction and Building Materials*, 82, 257-263. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.030>
- Sargin, Ş., Saltan, M., Morova, N., Serin, S., & Terzi, S. (2013). Evaluation of rice husk ash as filler in hot mix asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 48, 390-397. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.029>
- Shafabakhsh, G., & Tanakizadeh, A. (2015). Investigation of loading features effects on resilient modulus of asphalt mixtures using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. *Construction and Building Materials*, 76, 256-263. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.069>
- Şentürk, K. (2008). *Akım gözlem istasyonu olmayan havzalarda su potansiyelinin belirlenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]
- Terzi, S., & Vural, M. (2020). Bina beton atıklarının karayollarında bitümlü temelde agrega olarak kullanılabilirliğinin araştırılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(6), 1035-1041.
- Ünver, Ö. & Gamgam, H. (1996). *Uygulamalı İstatistik Yöntemler* (1). Siyasal Kitabevi.
- Xu, J., Fan, Z., Lin, J., Yang, X., Wang, D., & Oeser, M. (2021). Predicting the low-temperature performance of asphalt binder based on rheological model. *Construction and Building Materials*, 302, 124401. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124401>
- Yılmaz, M., Kök, B. V., & Kuloğlu, N. (2011). Effects of using asphaltite as filler on mechanical properties of hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 25(11), 4279-4286. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.072>
- Zehtabchi, A., Hashemi, S. A. H., & Asadi, S. (2018). Predicting the strength of polymer-modified thin-layer asphalt with fuzzy logic. *Construction and Building Materials*, 169, 826-834. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.002>

## Ekler

**Tablo 12.** MS için gizli katmandaki farklı nöron sayılarına ait tahminlerin performans değerleri  
**Table 12.** Performance values of estimations of different neuron numbers in the hidden layer for MS

Nöron sayısı	Eğitim				Test			
	OKHK	OMH	SI	NS	OKHK	OMH	SI	NS
4	14.0306	10.9441	0.0113	0.9598	66.4987	53.4010	0.0517	0.7555
5	9.7150	6.8607	0.0078	0.9581	68.2158	53.1667	0.0530	0.7427
6	2.2376	1.4007	0.0018	0.9497	68.2326	55.9873	0.0531	0.7426
7	0.3201	0.2585	0.0003	0.9662	58.8562	54.0153	0.0458	0.8085
8	0.3783	0.2059	0.0004	0.9712	61.8652	55.1475	0.0481	0.7884
9	0.4101	0.2226	0.0003	0.9646	59.5996	54.2092	0.0463	0.8036
10	0.4134	0.2620	0.0003	0.9796	54.6867	45.8032	0.0425	0.8347
<b>12</b>	<b>0.3195</b>	<b>0.1295</b>	<b>0.0001</b>	<b>0.9995</b>	<b>41.8147</b>	<b>32.7339</b>	<b>0.0325</b>	<b>0.9033</b>
14	0.4216	0.2547	0.0003	0.9912	51.1437	46.3631	0.0398	0.8554
16	0.3974	0.3341	0.0003	0.9939	57.9286	46.5354	0.0450	0.8145
18	0.4185	0.2086	0.0003	0.9882	59.3989	48.9163	0.0462	0.8049
20	0.4037	0.2103	0.0003	0.9809	47.3606	41.1154	0.0368	0.8760
25	0.3982	0.2404	0.0003	0.9963	67.0363	41.1844	0.0521	0.7516
30	0.4066	0.2140	0.0003	0.9958	54.7015	47.0652	0.0425	0.8346
40	0.4259	0.2490	0.0003	0.9971	63.0106	53.6787	0.0490	0.7805

**Tablo 13.**  $V_h$  için gizli katmandaki farklı nöron sayılarına ait tahminlerin performans değerleri  
**Table 13.** Performance values of estimations of different neuron numbers in the hidden layer for  $V_h$

Nöron sayısı	Eğitim				Test			
	OKHK	OMH	SI	NS	OKHK	OMH	SI	NS
4	0.1292	0.0991	0.0313	0.9735	0.4718	0.3830	0.1169	0.9432
5	0.0236	0.0133	0.0057	0.9691	0.7013	0.5064	0.1738	0.8744
6	0.0681	0.0310	0.0165	0.9527	0.4848	0.3642	0.1201	0.9400
7	0.0058	0.0040	0.0014	0.9901	0.5028	0.4339	0.1246	0.9355
8	0.0055	0.0036	0.0013	0.9199	0.5458	0.4664	0.1353	0.9237
9	0.0057	0.0042	0.0014	0.9825	0.4291	0.3963	0.1064	0.9530
10	0.0058	0.0035	0.0014	0.9635	0.6499	0.4688	0.1611	0.8922
12	0.0057	0.0031	0.0014	0.9582	0.5262	0.4598	0.1304	0.9293
14	0.0058	0.0041	0.0014	0.9637	0.4374	0.3788	0.1084	0.9512
16	0.0058	0.0035	0.0014	0.9468	0.5740	0.4967	0.1423	0.9159
<b>18</b>	<b>0.0049</b>	<b>0.0026</b>	<b>0.0009</b>	<b>0.9997</b>	<b>0.2629</b>	<b>0.2051</b>	<b>0.0651</b>	<b>0.9824</b>
20	0.0058	0.0033	0.0014	0.9867	0.4959	0.4547	0.1229	0.9372
25	0.0057	0.0039	0.0014	0.9666	0.5863	0.5045	0.1453	0.9123
30	0.0057	0.0043	0.0014	0.9890	0.5917	0.4868	0.1467	0.9107
40	0.0057	0.0035	0.0014	0.9771	0.6465	0.5171	0.1602	0.8933

**Tablo 14.**  $V_f$  için gizli katmandaki farklı nöron sayılarına ait tahminlerin performans değerleri  
**Table 14.** Performance values of estimations of different neuron numbers in the hidden layer for  $V_f$

Nöron sayısı	Eğitim				Test			
	OKHK	OMH	SI	NS	OKHK	OMH	SI	NS
4	0.7382	0.4933	0.0105	0.9820	2.9477	1.9875	0.0415	0.9518
5	0.6638	0.4709	0.0094	0.9855	2.4616	2.0325	0.0346	0.9664
6	0.4208	0.3090	0.0060	0.9492	2.4734	1.8174	0.0348	0.9661
<b>7</b>	<b>0.0329</b>	<b>0.0133</b>	<b>0.0004</b>	<b>0.9996</b>	<b>1.5177</b>	<b>1.3521</b>	<b>0.0214</b>	<b>0.9872</b>
8	0.0393	0.0154	0.0006	0.9918	2.1087	1.4690	0.0297	0.9753
9	0.0389	0.0207	0.0006	0.9772	2.2012	1.9547	0.0310	0.9731
10	0.0397	0.0208	0.0006	0.9891	2.7677	2.0590	0.0390	0.9575
12	0.0391	0.0198	0.0006	0.9789	2.1575	1.7195	0.0304	0.9742
14	0.0387	0.0172	0.0005	0.9907	2.5596	1.7697	0.0360	0.9637
16	0.0379	0.0183	0.0005	0.9899	3.1336	2.2750	0.0441	0.9455
18	0.0378	0.0229	0.0005	0.9687	3.1340	2.5052	0.0441	0.9455
20	0.0363	0.0185	0.0005	0.9790	3.9465	3.2854	0.0555	0.9136
25	0.0376	0.0203	0.0005	0.9339	3.4461	2.6930	0.0485	0.9341
30	0.0391	0.0277	0.0006	0.9786	3.8203	3.3910	0.0538	0.9191
40	0.0379	0.0318	0.0005	0.9906	3.2386	2.6263	0.0456	0.9418

## New Mixed Ni(II), Cu(II), and Co(II) Complexes derived from 2-((2-mercaptophenylimino)methyl)-4-methoxyphenol and 1,10-Phenanthroline: Synthesis and Characterization

*2-((2-merkaptofenilimino)metil)-4-metoksifenol ve 1,10-fenantrolinden Türetilen Yeni Karışık Ni(II), Cu(II) ve Co(II) Kompleksleri: Sentez ve Karakterizasyon*

Hatice Gamze SOGUKOMEROGULLARI <sup>\*1</sup> , Ahmet Oral SARIOĞLU <sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Health Services Vocational School, Gaziantep University, Gaziantep, 27310, Turkey

<sup>2</sup> Naci Topçuoğlu Vocational School, Gaziantep University, Gaziantep, 27310, Turkey

• Received: 23.09.2022

• Accepted: 05.02.2023

### Abstract

Three new mixed Ni(II), Co(II) and Cu(II) complexes have been created using 2-((2-mercaptophenylimino)methyl)-4-methoxyphenol and 1,10-phenanthroline. FT-IR, Elemental analysis, magnetic susceptibility, UV-Vis and molar conductivity technique have all been used to explore the structural characterisation of these compounds. Magnetic susceptibility readings for the L-Cu, L-Ni, and L-Co complexes were 1.97 BM, 2.92 BM, and 2.84 BM, respectively. The L-Co complex is thought to be antiferromagnetic. The structures of the mixed ligand metal complexes are thought to be octahedral geometry. There are no conductivity properties in the complexes; however, they exhibit molar conductivities that range from 2.46 to 9.04  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

**Keywords:** Schiff base, Mixed Ligand Metal complex, 1,10-phenanthroline, Characterization

### Öz

*2-((2-merkaptofenilimino)metil)-4-metoksifenol ve 1,10-fenantrolinden üç yeni karışık Ni(II), Co(II) ve Cu(II) kompleksi sentezlenmiştir. Bu bileşiklerin yapısal karakterizasyonu, FT-IR, elementel analiz, manyetik duyarlılık, UV-Vis ve molar iletkenlik teknikleri kullanılarak araştırılmıştır. Manyetik duyarlılık ölçümleri L-Cu, L-Ni ve L-Co kompleksleri için sırasıyla 1.97 BM, 2.92 BM, ve 2.84 BM olarak kaydedilmiştir. L-Co kompleksinin antiferromanyetik özellikte olduğu düşünülmektedir. Karışık ligand metal komplekslerinin yapılarının oktahedral geometriye sahip olduğu düşünülmektedir. Komplekslerin molar iletkenlik değerleri 2.46-9.04  $\mu\text{S}/\text{cm}$  arasında olduğundan dolayı iletkenlik göstermemektedir.*

**Anahtar kelimeler:** Karışık Ligand Metal kompleksi, Schiff baz, 1,10-fenantrolin, Karakterizasyon

<sup>\*1</sup> Hatice Gamze SOGUKOMEROGULLARI; hgcelikel@gantep.edu.tr

## 1. Introduction

The condensation of amines and carbonyl compounds, in which the carbonyl group is converted to an azomethine group or an imine group, results in the formation of Schiff bases, yet another type of adaptable chemical molecule. (Schiff, 1864; Fabbrizzi, 2020; Surendar et al., 2021; Surendar et al., 2021b). Schiff bases can also be utilized as a versatile ligand in the formation of metal coordinated complexes (Al Zoubi et al., 2017; Chohan et al., 1997). In coordination chemistry, the design and development of Schiff bases with many donor sites is a topic that is continually changing (Sahraei et al., 2017a; Sahraei et al., 2017b). In order to create transition metal complexes with structural, magnetic, electrical, and pharmacological characteristics, a sizable library of Schiff bases is frequently used (Bhardwaj et al., 2012; Ibrahim et al., 2021; Jafari et al., 2017). Schiff's bases have produced a huge number of medicinally active molecules (Kajal et al., 2013; da Silva et al., 2011). They have been discovered to have good anti-inflammatory, analgesic, and anti-tubercular qualities, among other things (Sondhi et al., 2006; Miri et al., 2013).

Here in we present, the preparation and structural elucidation of ligand and metal complexes. Molar conductivity experiments confirmed the complexes' electrolytic behavior. The interaction of 2-((2-mercaptophenylimino)methyl)-4-methoxyphenol and 1,10-phenanthroline produced the mixed ligand metal complexes. Mixed ligand metal complexes were investigated using a variety of techniques, including UV-Vis, elemental analysis, FT-IR, magnetic susceptibility, and molar conductivity.

## 2. Experimental

### 2.1. Material and method

Without any purification, commercial solvents and compounds from Sigma-Aldrich were utilized in the investigation. Table 1 includes a list of the device manufacturers and models utilized in the investigation.

**Table 1.** Brands and models of devices used in the study

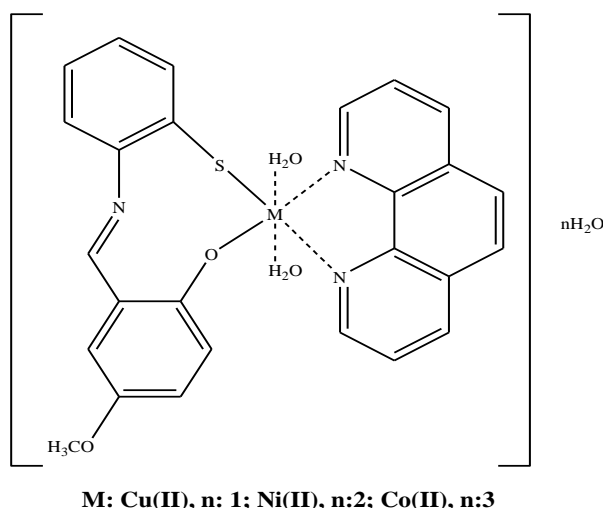
Device	Brands and models
FT-IR	Perkin-Elmer Spectrum 100 FTIR spectrophotometer (ATR)
Elemental Analysis	Thermo Scientific Flash EA 2000 CHNS
Molar Conductivity	ORION 4 STAR pH Conductivity Benchtop
Magnetic Susceptibility	Sherwood Scientific
UV-Vis	PG Instruments T80+UV/Vis spectrometer

### 2.2. Synthesis of the ligand (H<sub>2</sub>L)

The ligand (2-((2-mercaptophenylimino)methyl)-4-methoxyphenol) (**H<sub>2</sub>L**) was synthesized according to the literature (Muthu Tamizh et al., 2012).

### 2.3. General synthesis of complexes with H<sub>2</sub>L and 1,10-phenanthroline

The complex was created by mixing the solution of M(OAc)<sub>2</sub>·nH<sub>2</sub>O (0.25 mmol) (M=Cu, Ni and Co, n=1, 4, 4) in methanol and the ligand 2-((2-mercaptophenylimino)methyl)-4-methoxyphenol (**H<sub>2</sub>L**) (0.065 g, 0.25 mmol) and 1,10-phenanthroline (**phen**) (0.045 g, 0.25 mmol) solution in chloroform/methanol (1:1) with 1:1:1 ligand(H<sub>2</sub>L):metal:ligand(phen) mole ratio. The mixture used in the process was refluxed for 30 minutes. Filtered, washed with ice-cold methanol and water. The complex was purified from slowly vapor diffusion of Et<sub>2</sub>O with a MeOH solution of complexes and vacuum-dried, the end product was produced. (Figure 1).



**Figure 1.** General structure of mixed ligand complexes

**[Cu(L)phen(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>]·H<sub>2</sub>O (L-Cu):** The synthesized mixed ligand copper complex (**L-Cu**) is brown in color and purified in methanol (Figure 1). Yield: 0.097 g (70 %). 197.3 °C decomp. IR, (ATR)  $\nu$ , cm<sup>-1</sup>: 3396 (O-H), 3061 (C-H)<sub>arm.</sub>, 2935 (C-H)<sub>alp.</sub>, 1620 (C=N), 553 (M-N), 457 (M-O); UV-Vis (DMF)  $\lambda_{max}$  (Abs): 305 (0.624), 335 (0.374), 420 (0.315), 460 (0.355), 490 (0.22), nm;  $\mu_{eff}$ : 1.97 B.M.  $\Lambda_M$  (DMF, 10<sup>-3</sup> M,  $\mu$ S/cm): 9.04. Anal.Calc. For C<sub>26</sub>H<sub>25</sub>CuN<sub>3</sub>O<sub>5</sub>S (555.1); C, 56.26; H,4.54; N, 7.57; S, 5.78. Found: C, 55.80; H, 3.96; N, 7.08; S, 5.24 %.

**[Ni(L)phen(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>]·2H<sub>2</sub>O (L-Ni):** The synthesized mixed ligand copper complex (**L-Ni**) is reddish-brown in color and purified in methanol (Figure 1). Yield:0.115 g (80 %). m.p:154-155 °C. IR, (ATR)  $\nu$ , cm<sup>-1</sup>: 3385 (O-H), 3060 (C-H)<sub>arm.</sub>, 2974 (C-H)<sub>alp.</sub>, 1627 (C=N), 536 (M-N), 457 (M-O); UV-Vis (DMF)  $\lambda_{max}$  (Abs): 305 (0.619), 335 (0.301), 420 (0.218), 465 (0.300), 495 (0.223), 515 (0.164) nm;  $\mu_{eff}$ : 2.92 B.M.  $\Lambda_M$  (DMF, 10<sup>-3</sup> M,  $\mu$ S/cm): 2.46. Anal.Calc. for C<sub>26</sub>H<sub>27</sub>N<sub>3</sub>NiO<sub>6</sub>S (568.27); C, 54.95; H, 4.79; N, 7.39; S, 5.64. Found: C, 55.20; H, 4.52; N, 6.54; S, 5.29 %.

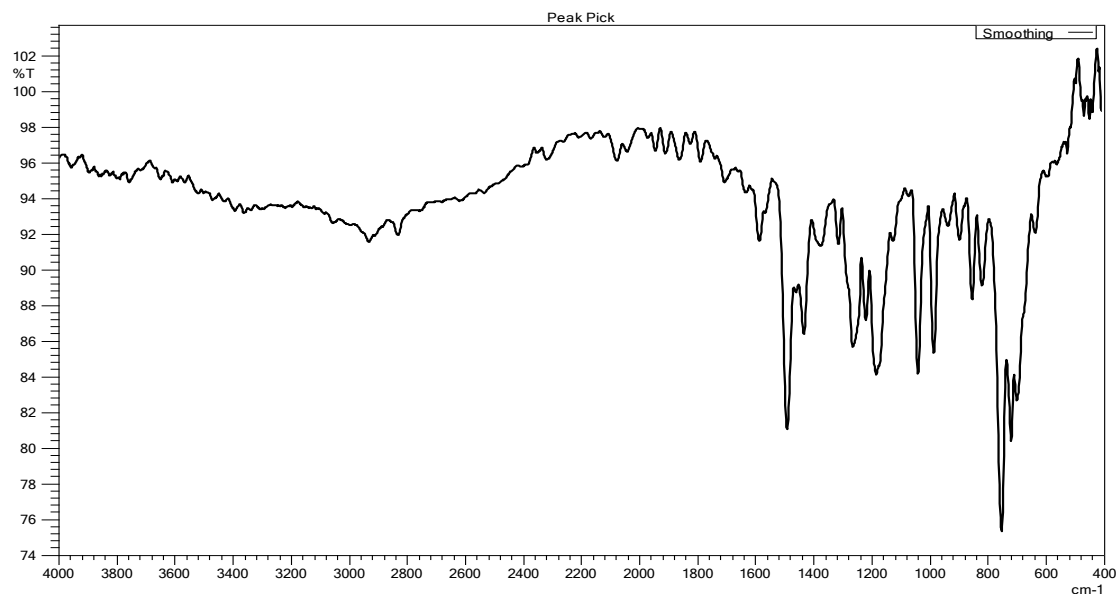
**[Co(L)phen(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>]·3H<sub>2</sub>O (L-Co):** The synthesized mixed ligand copper complex (**L-Co**) is dark brown in color and purified in methanol (Figure 1). Yield: 0.121 g (82%). m.p: 217.7 °C decomp. IR, (ATR)  $\nu$ , cm<sup>-1</sup>: 3358 (O-H), 3057 (C-H)<sub>arm.</sub>, 2976 (C-H)<sub>alp.</sub>, 1620 (C=N), 549 (M-N), 459 (M-O); UV-Vis (DMF)  $\lambda_{max}$  (Abs): 330 (1.205), 305 (1.290), 315 (1.547) nm;  $\mu_{eff}$ : 2.84 B.M.  $\Lambda_M$  (DMF, 10<sup>-3</sup> M,  $\mu$ S/cm): 3.24. Anal.Calc. for C<sub>26</sub>H<sub>29</sub>CoN<sub>3</sub>O<sub>7</sub>S (586.52); C, 53.24; H, 4.98; N, 7.16; S, 5.47. Found: C, 52.90; H, 4.27; N, 6.52; S, 4.70 %.

### 3. Results and discussion

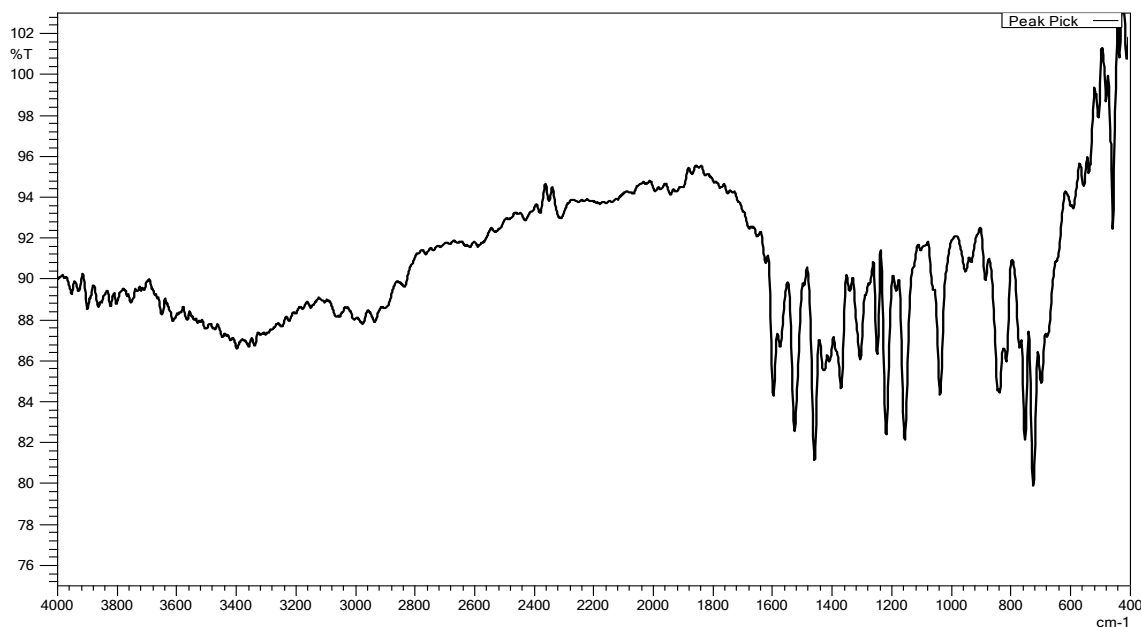
#### 3.1. Synthesis and characterization of compounds

The Schiff base (H<sub>2</sub>L) ligand has synthesized by condensing 2-hydroxy-5-methoxybenzaldehyde with 2-aminobenzenethiol in equimolar ratio 1:1 in MeOH (Muthu Tamizh et al., 2012). Mononuclear metal(II) coordination complex was formed as a result of the reaction between Schiff base (H<sub>2</sub>L) and 1, 10-phenanthroline with M(OAc)<sub>2</sub>.nH<sub>2</sub>O (M:Cu, Ni, Co, n:1,4,4). The mixed ligand metal complex elemental analysis results are consistent with calculated values, demonstrating that the complexes have a metal-ligand ratio of 1:1:1 (H<sub>2</sub>L:Metal:phen). O, N, and S-tridentate mode coordination of the Schiff base ligand with the Cu(II) ion is achieved. In chloroform, DMSO, MeOH, DMF, acetonitrile, and THF, the ligands are soluble. At room temperature, the recently created mixed ligand complexes are extremely solid-state stable. Although the ligand and complexes were crystallized, the desired single crystal could not be obtained. Based on the results of the elemental analysis, we have calculated that the general formula for mixed ligands is [ML(phen)H<sub>2</sub>O]·nH<sub>2</sub>O, where L is the anion of H<sub>2</sub>L. As indicated by the molar conductance measuring for 10<sup>-3</sup> M solutions in DMF falling in the range of 2.46-9.04  $\mu$ S/cm, these complexes display non-electrolytic activity (Sönmez et al., 2014; Maravalli et al., 1999).

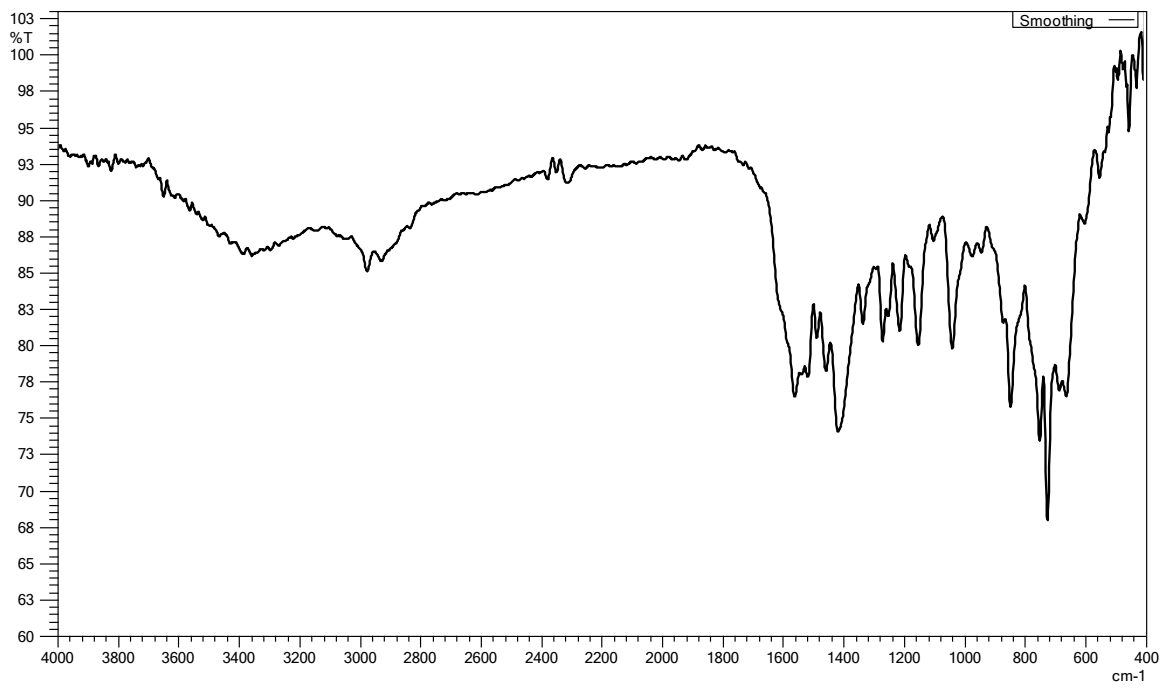
When the mixed ligand metal complexes' FT-IR spectra are studied, a broad band between  $3396\text{-}3358\text{ cm}^{-1}$  is observed, which is thought to be the  $\nu(\text{OH})$  stretching band. The stretching band of azomethine ( $\text{C}=\text{N}$ ) in the complexes was observed between  $1620\text{-}1626\text{ cm}^{-1}$ . The azomethine band of ligand was revealed at  $1633\text{ cm}^{-1}$  (Kesavan et al., 2012). Actually, in the mixed ligand complexes, this band was moved to lower ( $7\text{-}13\text{ cm}^{-1}$ ) wavenumbers, proving that azomethine nitrogen is involved in the coordination of metal ions (Dede et al., 2018). When the complexes' FT-IR spectra were analyzed, it was found that the  $\nu(\text{M-N})$  vibrations were between  $553\text{-}536\text{ cm}^{-1}$  and the  $\nu(\text{M-O})$  vibrations were between  $459\text{-}457\text{ cm}^{-1}$  (Sönmez et al., 2006; Sönmez and Şekerçi, 2003). (Figure 2-5)



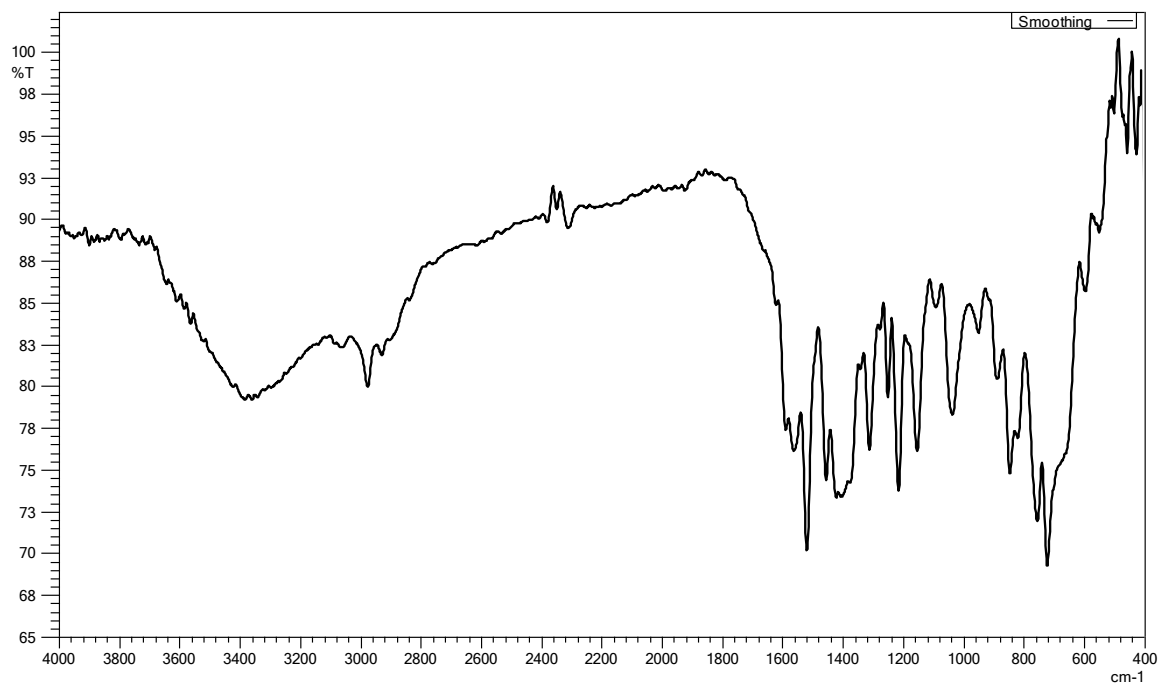
**Figure 2.** FT-IR spectrum of the ligand (H<sub>2</sub>L)



**Figure 3.** FT-IR spectrum of the L-Cu

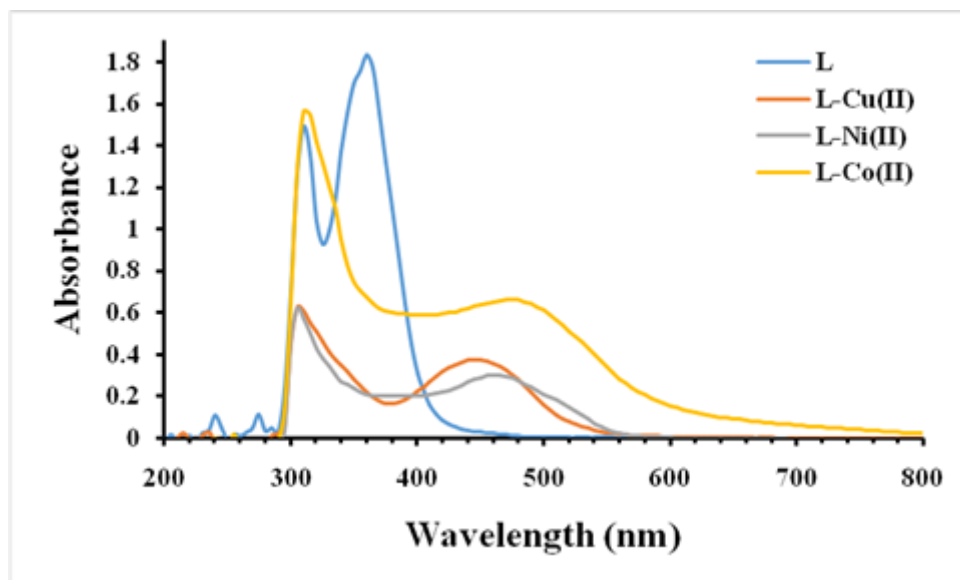


**Figure 4.** FT-IR spectrum of the L-Ni complex



**Figure 5.** FT-IR spectrum of the L-Co complex





**Figure 6.** UV-Vis spectrum of compounds

In the *N,N*-dimethyl formamide solvent at a concentration of  $2 \times 10^{-5}$  M, UV-Vis spectra in the region of 190-1100 nm were obtained. Examining the produced mixed ligand complexes' findings and UV-Vis spectra, it is thought that the transitions in the range of 305-335 nm in the complexes are the  $\pi$ - $\pi^*$  transitions of the phenyl and 1,10-phenanthroline rings (Figure 6) (Sönmez and Şekerçi, 2007). In addition, the absorption bands in the 335-365 nm range are thought to relate to the  $n$ - $\pi^*$  transitions of the 1,10-phenanthroline ring and the azomethine group. New bands appearing in the complexes in the 420-515 nm range were observed as charge transfer transitions. This indicates complex formation (Goorchibeygi et al., 2022). At 298 K, the complexes' magnetic susceptibility was measured. Considering the magnetic susceptibility values, the L-Cu, L-Ni and L-Co complexes were recorded as 1.97, 2.92 and 2.84 BM, respectively. The magnetic susceptibility value for L-Cu was found to be 1.97 BM. Octahedral and mononuclear structures have been proposed for the L-Cu complex (Ekmekcioglu et al., 2015; Gülcan and Sönmez, 2011; Salib et al., 2003). The measured value of 2.92 BM for the nickel complex (L-Ni) is in the range of 2.8-3.2 BM given in the literature, suggesting that the structure may be octahedral. (Salib et al., 2003). When the magnetic susceptibility data of the L-Co complex is examined, It has been noted that this value is lower than that of the octahedral structures in the literature. While the  $\mu_{\text{eff}}$  value of high spin cobalt complexes from  $d^7$  elements is expected to be 3.87 BM according to the formula  $(n(n+2))^{1/2}$  ( $n$ =number of unpaired electrons), the magnetic susceptibility value of the cobalt complex was found to be 2.84 BM. This shows that the Co(II) complex has antiferromagnetic properties (Min et al., 2007; Sogukomerogullari and Başaran, 2022). It is thought that the mixed ligand cobalt complex (L-Co) has an octahedral structure (Sogukomerogullari et al., 2019; Sogukomerogullari and Başaran, 2022).

#### 4. Conclusions

The nature of mixed ligand complexes is highlighted in this work. In the work, novel mixed Co(II), Ni(II), and Cu(II) complexes were created using the ligand (1,10-phenanthroline) and (2-((2-mercaptophenylimino)methyl)-4-methoxyphenol). Utilizing a variety of techniques, including elemental analysis, molar conductivity UV-Vis, magnetic susceptibility, and FT-IR the structures of the produced compounds were identified. The synthesized complexes are original and consistent with literature studies. The synthesized complexes were determined to have a  $H_2L$ :metal:phen (1:1:1) cytoichiometric ratio. The complexes are thought to be in six coordinated octahedral structures. Considering the application areas of mixed ligand Schiff base complexes in the literature, it is thought that this study will contribute to aiding research in the future.

#### Acknowledgement

The authors would like to thank Mehmet Sönmez for his kind technical assistance.

## Author contribution

Hatice Gamze Sogukomerogullari: Supervision, Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Writing—original draft, Validation, Conceptualization. Ahmet Oral Sarioglu: Investigation, Methodology, Writing—original draft, Validation, Conceptualization

## Declaration of ethical code

The author of this article declares that the materials and methods used in this study do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

## Conflicts of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

## References

- Al Zoubi, W., Al-Hamdani, A. A. S., & Ko, Y.G. (2017). Schiff bases and their complexes: recent progress in thermal analysis. *Separation Science and Technology*, 52, 1052–1069. <https://doi.org/10.1080/01496395.2016.1267756>
- Bhardwaj, V.K., Hundal, M.S., Corbella, M., Gomez, V., & Hundal, G. (2012). Salicylaldimine Schiff bases—generation of self-assembled and chiral complexes with Ni(II) and Zn (II) ions: an unusual antiferromagnetic interaction in a triplybridged Ni(II) dimer. *Polyhedron*, 38, 224–234. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2012.03.029>
- Chohan, Z.H., Praveen, M., & Ghaffar, A. (1997). Structural and biological behaviour of Co(II), Cu(II) and Ni(II) metal complexes of some amino acid derived Schiff-bases, *Metal-Based. Drugs*, 4, 803138. <https://doi.org/10.1155/MBD.1997.267>
- da Silva, C.M., da Silva, D.L., Modolo, L.V., Alves, R.B., de Resende, M.A., Martins, C.V.B., & de Fátima, Â. (2011). Schiff bases: a short review of their antimicrobial activities, *Journal of Advanced Research*, 2, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2010.05.004>
- Dede, B., Özen, N., & Görgülü, G. (2018). Synthesis, characterization, theoretical calculations and enzymatic activities of novel diimine-dioxime ligand and its homodinuclear Cu (II) complex, *Journal of Molecular Structure*, 1163, 357-367. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.03.015>
- Ekmekcioglu, P., Karabocek, N., Karabocek, S., & Emirik, M. (2015). Synthesis, structural and biochemical activity studies of a new hexadentate Schiff base ligand and its Cu(II), Ni(II), and Co(II) complexes. *Journal of Molecular Structure*, 1099, 189-196. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2015.06.051>
- Fabbrizzi, L. (2020). Beauty in chemistry: making artistic molecules with Schiff bases. *The Journal of Organic Chemistry*, 85, 12212–12226. <https://doi.org/10.1021/acs.joc.0c01420>
- Goorchibeygi, S., Bikas, R., Soleimani, M., Siczek, M., & Lis, T. (2022). Molecular structure and catalytic activity of Fe(III) coordination compound with ONO-donor hydrazone ligand in the oxidation of cyclooctene by H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *Journal of Molecular Structure*, 1250(1), 131774. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.131774>
- Gülcan, M., & Sönmez, M. (2011). Synthesis and characterization of Cu (II), Ni (II), Co (II), Mn (II), and Cd (II) transition metal complexes of tridentate Schiff base derived from o-vanillin and N-aminopyrimidine-2-thione. *Phosphorus Sulfur and Silicon*, 186, 1962-1971. <https://doi.org/10.1080/10426507.2011.553501>
- Ibrahim, F.M., & Abdalhadi, S.M. (2021). Performance of Schiff bases metal complexes and their ligand in biological activity: a review. *Al-Nahrain Journal of Science*, 24(1), 1–10. <https://doi.org/10.22401/ANJS.24.1.01>
- Jafari, M., Salehi, M., Kubicki, M., Arab, A., & Khaleghian, A. (2017). DFT studies and antioxidant activity of Schiff base metal complexes of 2-aminopyridine. Crystal structures of cobalt (II) and zinc (II) complexes. *Inorganica Chimica Acta*, 462, 329–335. <https://doi.org/10.1016/J.ICA.2017.04.007>
- Kajal, A., Bala, S., Kamboj, S., Sharma, N., & Saini, V. (2013). Schiff bases: a versatile phar- macophore, *Journal of Catalysis*, 2013, 893512. <https://doi.org/10.1155/2013/893512>

- Kesavan, D., Tamizh, M. M., Gopiraman, M., Sulochana, N., & Karvembu, R. (2012). Physicochemical studies of 4-substituted N-(2-Mercaptophenyl)Salicylideneimines: corrosion inhibition of mild steel in an acid medium. *Journal of Surfactants and Detergents*, 15(5), 567–576. <https://doi.org/10.1007/s11743-012-1338-z>
- Maravalli, P.B., Dhumwad, S.D., & Goudar, T.R. (1999). Synthetic, spectral, thermal and biological studies of lanthanide (III) complexes with a Schiff base derived from 3-N-Yetaylpiperidino-4-Amino-5-Yercapto-1,2,4-Triazole. *Synthesis and Reactivity in Inorganic and Metal-Organic Chemistry*, 29, 525-540. <https://doi.org/10.1080/00945719909349467>
- Min, K. S., DiPasquale, A. G., Golen, J. A., Rheingold, A. L., & Miller, J. S. (2007). Synthesis, structure, and magnetic properties of valence ambiguous dinuclear antiferromagnetically coupled cobalt and ferromagnetically coupled iron complexes containing the chloranilate(2-) and the significantly stronger coupling chloranilate(\*3-) radical trianion. *Journal of the American Chemical Society*, 129(8), 2360–2368. <https://doi.org/10.1021/ja067208q>
- Miri, R., Razzaghi-asl, N., & Mohammadi, M.K. (2013). QM study and conformational analysis of an isatin Schiff base as a potential cytotoxic agent. *Journal of Molecular Modeling*, 19, 727–735. <https://doi.org/10.1007/s00894-012-1586-x>
- Muthu Tamizh, M., Mereiter, K., Kirchner, K., & Karvembu, R. (2012). Ruthenium(II) carbonyl complexes containing ‘pincer like’ ONS donor Schiff base and triphenylphosphine as catalyst for selective oxidation of alcohols at room temperature. *Journal of Organometallic Chemistry*, 700, 194-201. <https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2011.12.016>.
- Sahraei, A., Kargar, H., Hakimi, M., & Tahir, M.N. (2017a). Distorted square-antiprism geometry of new zirconium (IV) Schiff base complexes: synthesis, spectral characterization, crystal structure and investigation of biological properties. *Journal of Molecular Structure*, 1149, 576–584. <https://doi.org/10.1016/J.MOLSTRUC.2017.08.022>
- Sahraei, A., Kargar, H., Hakimi, M., & Tahir, M.N. (2017b). Synthesis, characterization, crystal structures and biological activities of eight-coordinate zirconium (IV) Schiff base complexes. *Transition Metal Chemistry*, 42(6), 483–489. <https://doi.org/10.1007/s11243-017-0152-x>
- Salib, K.A.R., Saleh, A.A., Abu El-Wafa, S., & El-Shafiy, H.F.O. (2003). Preparation and characterization of novel asymmetrical Schiff-base ligands derived from 2-methyl-7-formyl-8-hydroxyquinoline and their metal complexes. *Journal of Coordination Chemistry*, 56(4), 283-298. <https://doi.org/10.1080/0095897031000069021>
- Schiff, H. (1864). Mittheilungen aus dem universitäts laboratorium in Pisa: eineneue Reiheorganischer basen, *Justus Liebigs Annalen der Chemie*, 131, 118–119. <https://doi.org/10.1002/jlac.18641310113>
- Sogukomerogullari, H.G., Sönmez, M. & Ceyhan, G. (2019). ONO tip Schiff baz komplekslerinin sentezi, karakterizasyonu, katalitik özellikleri ve termal çalışmaları. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23(3), 701-708. <https://doi.org/10.19113/sdufenbed.517882>
- Sogukomerogullari, H.G., & Başaran, E. (2022). Synthesis and characterization of new hydrazone derivatives Fe(II), Co(II), Ni(II) and Cu(II) complexes. *Süleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Sciences*, 26(2), 216-222. <https://doi.org/10.19113/sdufenbed.1031209>
- Sondhi, S.M., Singh, N., Kumar, A., Lozach, O., & Meijer, L. (2006). Synthesis, anti-inflammatory, analgesic and kinase (CDK-1, CDK-5 and GSK-3) inhibition activity evaluation of benzimidazole/benzoxazole derivatives and some Schiff's bases. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 14(11), 3758–3765. <https://doi.org/10.1016/j.bmc.2006.01.054>.
- Sönmez, M., Sogukomerogullari, H.G., Öztemel, F., & Berber, İ. (2014). Synthesis and biological evaluation of a novel ONS tridentate Schiff base bearing pyrimidine ring and some metal complexes. *Medicinal Chemistry Research*, 23, 3451-3457. <https://doi.org/10.1007/s00044-014-0925-0>
- Sönmez, M., & Hacıyusufoğlu, M. E. (2006). Synthesis, characterization and antimicrobial studies of Cu(II), Co(II), Ni(II) and Zn(II) Schiff base complexes derived from acetylaceton with 1-amino-5-benzoyl-4-phenyl-1H-pyrimidine-2-one. *Asian Journal of Chemistry*, 18(3), 2032-2036.
- Sönmez, M., & Şekerci, M. (2003). Synthesis, characterization and thermal investigation of copper(II), nickel(II), cobalt(II) and zinc(II) complexes with 5-Benzoyl-1-(phenylmethylenamino)-4-phenyl-1H-pyrimidine-2-thione. *Synthesis and Reactivity in Inorganic and Metal-Organic Chemistry*, 33(9), 1689-1700. <https://doi.org/10.1081/SIM-120025448>

- Sönmez, M., & Şekerci, M. (2007). The template synthesis, spectral characterization and thermal behavior of new binuclear Schiff base complexes derived from N-aminopyrimidine with 2, 3-butandion. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 72(3), 259-264. <https://doi.org/10.2298/JSC0703259S>
- Surendar, P., Pooventhiran, T., Al-Zaqri, N., Rajam, S., D. J. Rao., & Thomas, R. (2021). Synthesis of three quasi liquid Schiff bases between hexanal and adenine, cytosine, and *l*-leucine, structural interpretation, quantum mechanical studies and biological activity prediction. *Journal of Molecular Liquids*, 341, 117305. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117305>
- Surendar, P., Pooventhiran, T., Rajam, S., Bhattacharyya U., Bakht, A., & Thomas. R. (2021). Quasil liquid Schiff bases from trans-2-hexenal and cytosineand *l*-leucine with potential antieczematic and antiarthritic activities: synthesis, structure and quantum mechanical studies. *Journal of Molecular Liquids*, 334, 11644. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116448>

## Yaya yolculuk taleplerinin mahalle karakteristiklerine dayalı tahmini

### *Estimating pedestrian travel demands based on neighborhood characteristics*

Çağdaş KARA<sup>\*1</sup>, 

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 26040, Odunpazarı/Eskişehir

• Geliş tarihi / Received: 05.04.2021

• Kabul tarihi / Accepted: 21.02.2023

#### Öz

Tüm dünyada ulaştırma yatırımlarına verilen önem her geçen gün artmaktadır. Bu nedenle, etkin planlama gerek yeni ulaşım yatırımlarında gerekse mevcut ulaşım sisteminin iyileştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Ulaşım planlamasında, sürdürülebilir kentleşme ve sürdürülebilir hareketliliğin sağlanması için temel hedeflerden biri; yaya ve toplu taşıma öncelikli bir ulaşım sisteminin sağlanması olarak gösterilmektedir. Bu kapsamda birçok gelişmiş ve gelişmekte olan ülkede, özellikle yaya güvenliği ön planda tutulup, bunlarla ilgili uygulama ve çalışmalar geliştirilerek, çevre ve yaya dostu ulaşım sistemlerinin kullanımı yaygınlaştırılmaktadır. Yaya olarak seyahate teşvik edici uygulamalar ve politikalar geliştirilebilmek için öncelikle yaya karakteristikleri ve davranışları incelenmelidir. Bu çalışmada, diğer (sosyalleşme, eğlence, alışveriş, banka, spor, vb.) amaçlı yaya yolculuk davranışlarını etkileyen sosyo-ekonomik ve demografik karakteristikler araştırılmaktadır. Bu kapsamda 50 mahalleye ait karakteristikler ve toplamda yaklaşık 21000 hane halkı anketi kullanılmıştır. Çoklu Doğrusal Regresyon (ÇDR), Ridge Regresyonu (RR) ve Liu Regresyonu yöntemleriyle diğer amaçlı yaya yolculuk sıklığındaki değişimleri öngören modeller üretilmiştir. Üç yöntem, Hata Kareler Ortalaması (HKO), Akaike Bilgi Kriteri (ABK) ve Bayes Bilgi Kriteri (BBK) açısından değerlendirilmiştir. Her üç başarı ölçütü de RR'nin daha başarılı model ürettiğini göstermiştir. HKO'ya göre, RR ve Liu modellerinin ÇDR modeline kıyasla, sırasıyla yaklaşık %35 ve %27 daha başarılı olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Talep tahmini, Ulaşım planlaması, Yaya yolculukları, Yanlı tahmin teknikleri

#### Abstract

The importance given to transportation investments all over the world is increasing day by day. Therefore, effective planning plays an important role in both new transportation investments and improvement of the existing transportation system. In transportation planning, one of the main goals for sustainable urbanization and sustainable mobility is to provide a transportation system that gives priority to pedestrian and public transportation. In this context, in many developed and developing countries, especially pedestrian safety is prioritized and practices and studies are developed. Accordingly, the use of environment- and pedestrian-friendly transportation systems is being expanded. Pedestrian characteristics and behaviors should be examined first in order to develop practices and policies that encourage pedestrian travel. In this study, socio-economic and demographic characteristics that affect other-purpose (socializing, entertainment, shopping, banking, sports, etc.) pedestrian travel behaviors are investigated. In this context, characteristics of 50 neighborhoods and approximately 21000 household surveys were used. With the help of Multiple Linear Regression (MLR), Ridge Regression (RR) and Liu Regression methods, models explaining the changes in the frequency of pedestrian travel for other purposes were produced. Three methods were evaluated in terms of Mean Squares of Error (HKO), Akaike Information Criteria (AIC) and Bayesian Information Criteria (BIC). All three criterias showed that the RR produced more successful model. According to HKO, the RR and Liu models were found to be approximately 35% and 27% more successful than the MLR model, respectively.

**Keywords:** Demand forecast, Transportation planning, Pedestrian trips, Regularization techniques

## 1. Giriş

\* Çağdaş KARA; ckara@ogu.edu.tr

## 1. Introduction

Günümüzde sosyal, kültürel ekonomik gelişmeler ve nüfusun hızla artması, ulaşım ihtiyacını da önemli ölçüde arttırmaktadır. Ulaşıma olan taleplerin ve bu sektördeki yatırımların gün geçtikçe artması ve önem kazanması ulaştırma alanında etkin ve sistemli bir planlama ihtiyacı doğurmaktadır. Özellikle hızlı nüfus artışına sahip olan ve gelişmekte olan ülkelerde ulaşım planlarının etkin bir şekilde tasarlanması, ülke kaynaklarının en iyi şekilde değerlendirilmesi açısından oldukça önemlidir.

Başarılı bir kent içi ulaşım planı günlük ihtiyaçlara (okul, iş, sosyal ve günlük aktiviteler, sağlık, seyahat, vb.) ekonomik ölçütler gözetilerek en iyi şekilde karşılık verecek yapıya sahip olmalıdır (de Almeida Guimarães & Leal Junior, 2017; Yu vd., 2017). Bu ihtiyaçlar yolculuk taleplerini üretmekte ve bu talepler doğrultusunda kısa, orta ve uzun vade için tahminler yapılmaktadır. Bu noktada talep tahminlerinin belirlenmesi, planlama sürecinin ana bileşeni olarak karşımıza çıkmaktadır. Yatırım kararları, bu tahminler yardımıyla tasarlanan planlama sonucunda alınan kararlardır. Tahminlerdeki hatalar, yapılacak yatırımların etkinliğini azaltarak, yanlış yatırım kararlarının alınmasına sebep olmakta ve ülke ekonomisine verilen zararlarla sonuçlanabilmektedir (Khisty & Arslan, 2005). Diğer taraftan, yanlış yatırım kararları, kent içinde trafik sıkışıklığı yaşanması ve çevre kirletici etkenlerin artması ile insanların psikolojisinin ve sağlığının bozulması gibi birçok zararlı etkiye de sebep olabilmektedir. Böylelikle, kent içi planlamada sürdürülebilir ulaşım kapsamında yapılan birçok çalışma, yolculuk davranışlarını daha iyi anlamaya yarayan ve daha başarılı tahminlerin önünü açabilen analiz ve yöntemlere odaklanmaktadır (Papagiannakis vd., 2018; Primerano vd., 2008; Sorensen vd., 2017). Diğer taraftan, planlamada sürdürülebilir kentleşme ve sürdürülebilir hareketliliğin sağlanmasında temel hedeflerden biri; toplu taşıma ve yaya öncelikli, bir ulaşım sisteminin sağlanması olarak gösterilmektedir (Öğüt vd., 2017). Bu kapsamda birçok gelişmiş ve gelişmekte olan ülkede, özellikle yaya ve bisiklet güvenliği ön planda tutulmaktadır. Bu konudaki uygulama ve çalışmalar özellikle son yıllarda geliştirilerek, çevre ve insan dostu ulaşım sistemlerinin kullanımı yaygınlaştırılmaktadır (Deb vd., 2017; Jain vd., 2020; Rasouli vd., 2017; Ridel vd., 2018; Wells vd., 2018). Türkiye de son zamanlarda bu tür uygulamaları genişleten ülkelerden biri olarak, 2019 yılını “Öncelik Hayatın, Öncelik Yayanın” sloganıyla “Yaya Önceliği Yılı” olarak ilan etmiştir. 2918 sayılı Karayolları Trafik Kanunu’nun 74’üncü maddesinde 26 Ekim 2018 tarihinde yapılan değişiklikle; yaya önceliği ve güvenliğine dair yasal düzenleme getirilmiştir (Resmî Gazete, 2018). Sürdürülebilir bir ulaşım sisteminin oluşturulması için gerekli olan yasal düzenlemeler, bu konudaki yapılan planlama çalışmaları ile bir bütün halinde ele alındığında daha etkin olmaktadır. Yaya ulaşımına teşviğin sağlanması ve geliştirilen politikaların etkili olabilmesi için bireylerin yolculuk davranışları ve talepleri etkin bir şekilde değerlendirilmelidir. Bu noktada en önemli gereksinim yaya yolculuk taleplerinin belirlenmesi ve yolculuk modeli için güvenilir yöntemlerin kullanılmasıdır (Kim & Susilo, 2013).

Planlamada yolculuk davranışları ve talepleri, bireylerin karakteristikleriyle (sosyo-ekonomi, demografi vb.) ilişkili olarak modellenabilmektedir (de Dios Ortázar & Willumsen, 2011).

Bu çalışmada amaç, diğer amaçlı (sosyalleşme, eğlence, alışveriş, banka, spor, vb.) yaya yolculuk davranışlarını etkileyen karakteristiklerin araştırılması ve yolculuk davranışlarını en iyi belirleyen modelin değerlendirilmesidir. Bu doğrultuda Çoklu Doğrusal Regresyon (ÇDR) ve yanlı tahmin teknikleri (Ridge Regresyonu ve Liu Yöntemi) kullanılarak 7 farklı bağımsız değişken ile bağımlı değişkeni (Diğer amaçlı yaya yolculukları oranı) açıklayan modeller geliştirilmiştir. Çalışmada, 50 mahalleye ait yaklaşık 21000 hane halkı anketi kullanılmıştır. Bireylerin yaya olarak yolculuk yapma sıklıklarını açıklayan talep modelleri geliştirilmiş ve modeller ile Hata Kareler Ortalaması (HKO) kriterine göre karşılaştırılmıştır.

Çalışmada sonraki bölümde, geçmiş çalışmaların derlendiği Literatür kısmı bulunmaktadır. Ardından, kullanılan istatistiksel yöntemlerin kullanılmasındaki motivasyonun açıklandığı İstatistiksel Arka Plan bölümü gelmektedir. Materyal ve Yöntem bölümünde veriler, uygulanacak yöntemler ve geliştirilecek model tanıtılmıştır. Ardından gelen Bulgular bölümü, analiz sonuçlarının elde edilip değerlendirildiği ve bu sonuçların tartışıldığı bölümdür. Sonuçlar bölümünde ise çalışmanın ve sonuçlar genel olarak değerlendirilmiştir.

## 2. Literatür

## 2. Previous studies

Yaya ulaşımının, doğrudan insan sağlığına olumlu etkilerinin bulunması, çevre ve gürültü kirliliğini azaltması, ekonomik bir ulaşım türü olması gibi bir çok avantajı bulunmaktadır (Herrero-Fernández vd., 2020). Ancak bireylerin yaya ulaşımına teşvik edilmesi için öncelikle yolculuk davranışlarını etkileyen önemli faktörler incelenmelidir. Ancak bu şekilde Literatürde yaya yolculuklarının sıklığını etkileyen çalışmalarda gelir (Olvera vd., 2003; Sietchiping vd., 2012), otomobil sahipliği (Clifton, 2004; Schneider vd., 2009), aile büyüklüğü (Baran vd., 2008; Schneider vd., 2009), yaş (Baran vd., 2008; Schneider vd., 2009; Shay vd., 2006) istihdam (Pulugurtha ve Repaka, 2008), eğitim durumu (Pabayo vd., 2011) gibi sosyo-ekonomik faktörler incelenmiştir.

Bazı çalışmalar yoksul toplumlarda yaya yolculuklarının daha baskın yolculuk türü olduğunu göstermektedir (Olvera vd., 2003; Sietchiping vd., 2012). Bu durum, ekonomik yönden az gelişmiş ülkelerde toplu taşıma sistemlerinin de geliştirilmesi konusunda yaşanan zorluklardan kaynaklanabilmektedir. Bunun yanında yoksul kesimin ulaşım maliyetlerini karşılayamaması ve iş veya okul yolculuklarını yaya olarak gerçekleştirme durumu söz konusu olabilmektedir (Olvera vd., 2008). Pabayo vd. (2011), yetersiz gelire sahip veya daha düşük ücretli meslek kategorilerinde olan ebeveyne sahip öğrencilerin okula yürüyerek gitme eğilimlerinin daha yüksek olduğunu göstermiştir. Clifton (2004), daha düşük araç sahipliğinin ve daha düşük hane gelirinin daha yüksek yürüme sıklığı ile ilişkili olduğunu göstermiştir. Diğer taraftan yüksek gelire ve eğitime sahip bireylerin fiziksel aktivitelere daha fazla katılmaları beklenir ve bu durum onları yaya olarak yolculuk yapmaya teşvik etmektedir (Craig vd., 2002). Baran vd. (2008) ve Pabayo vd. (2011), hane büyüklüğü ve hanedeki çalışan sayısının artmasıyla eğlence amaçlı yolculukların azaldığını göstermişlerdir. Delice vd. (2019) yaş, istihdam ve otomobil sahipliğinin artması ile kırsal kesimde diğer amaçlı yaya yolculuklarının azaldığını; gelirin artması ile diğer amaçlı yolculukların arttığını belirlemişlerdir.

Geçmiş çalışmalarda iş ve okul yolculuklarının modellenmesi üzerine oldukça fazla sayıda çalışma bulunmaktadır. Ancak diğer (sosyalleşme, eğlence, alışveriş, banka, spor, vb.) amaçlı yaya yolculuklarının yolculuk davranışları ile ilgili çalışmalar kısıtlı sayıdadır. Bu nedenle geçmiş çalışmalarda incelenen parametreler ve yöntemler diğer amaçlı yaya yolculuklarını açıklamada kısıtlı ve yetersiz kalmaktadır. Bu çalışma, literatüre bu alandaki yapılabilecek çalışmalar, kullanılabilecek parametreler ve yöntemler konusunda katkıda bulunmaktadır. Üç devlet üniversitesinin bulunduğu Eskişehir’de il nüfusunun önemli kısmı öğrenci nüfusudur. Özellikle okul amaçlı yaya yolculukları için öğrenci miktarları yapılan çalışmalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak, bilindiği kadarıyla diğer amaçlı yaya yolculuklarının zonal karakteristiklerini değerlendirmede öğrenci yoğunluğunun kullanıldığı bir çalışma bulunmamaktadır. Bu noktada çalışmanın literatüre olan diğer bir katkısı, öğrenci yoğunluğunun diğer amaçlı yolculukların üzerindeki etkinin araştırılmasıdır.

## 3. İstatistiksel arka plan

### 3. Statistical background

Ulaşım planlamasında ve yolculuk davranışlarının analizlerini içeren çalışmalar (Dört Aşamalı Ulaştırma Modeli vb.) en sık kullanılan yöntemler EKK tabanlı ÇDR ve Lojistik Regresyon (LR) gibi yöntemlerdir. Bu yöntemler varsayımları sağlandığında başarılı ve yansız tahminler üretebilmektedir. Ancak, varsayımların bir veya birkaçı sağlanmadığında yöntemler başarılı tahminler üretememektedir (Kara & Bilgiç, 2021a). EKK'nın en önemli varsayımlarından biri, bağımsız değişkenler arasında çoklu doğrusal bağlantı (ÇDB) olmamasıdır. ÇDB iki veya daha fazla bağımsız değişken arasındaki anlamlı doğrusal ilişkilerin bulunması durumunda ortaya çıkabilen bir durum olarak tanımlanmaktadır (Gujarati, 2004). Yolculuk talep modelleri veya ulaştırma ana planı gibi kapsamlı çalışmalarda analizler oldukça büyük veri setleri ile yapılmaktadır. Bu veri setlerinde ÇDB problemi ile sıklıkla karşılaşmaktadır. Geleneksel olarak, ÇDB, yüksek korelasyonlu değişken gruplarından seçilenler veri setinden silinerek kalan değişkenlere EKK modeli uygulanmaktadır (de Dios Ortáozar & Willumsen, 2011). Ancak, bu şekilde bir yol izlendiğinde hangi verilerin silinmesi gerektiği net olmadığı için, yanlış değişkenlerin silinerek tahmin hatalarının artmasına neden olabilmektedir (Albayrak, 2005; Rathert vd., 2011; Topal vd., 2010). Bu durumda veri silmek yerine değişkenlerin tümü kullanılarak RR, Liu gibi yanlı tahmin tekniklerinin kullanılması önerilmektedir (Akçay & Sarıözkan, 2015; Kara & Bilgiç, 2021a, 2021b; Rathert vd., 2011; Üçkardeş vd., 2012). Böylelikle RR, Liu ve Temel Bileşenler Analizi gibi yanlı tahmin teknikleri OLS'den çok daha başarılı modeller üretilmektedir (Demirci, 2014; Özlem vd., 2010).

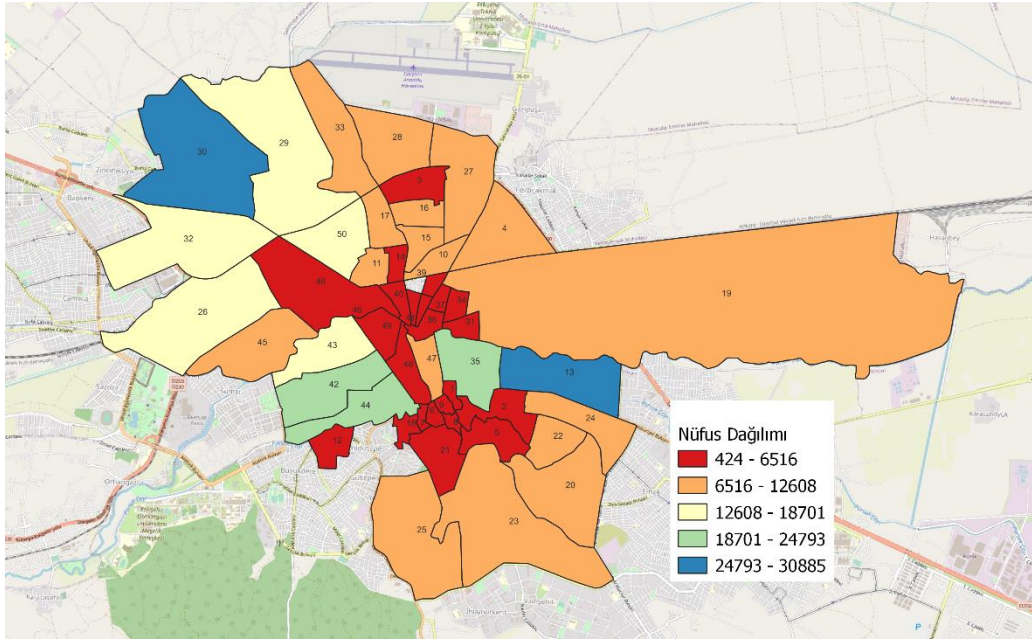
## 4. Materyal ve yöntem

### 4. Material and method

#### 4.1. Veriler

##### 4.1. Data

Çalışmada, Eskişehir Ulaştırma Ana Planı 2017 kapsamında yapılan hane halkı ham anket verisi ve belediyelerden mahalleler ile ilgili alınan veriler kullanılmıştır. Eksik veya hatalı veri satırları çıkartılarak ve gerekli hesaplamalar yapılarak, 50 zona ait toplamda yaklaşık 21000 geçerli anketten oluşan veri seti analizler için düzenlenmiştir. Şekil 1’de analize dahil edilen 50 mahalle ve bu mahallelere ait nüfus dağılımları görülmektedir.



**Şekil 1.** Analize dahil edilen 50 mahalle için elde edilen nüfus dağılımları

**Figure 1.** Population distributions obtained for 50 neighborhoods included in the analysis

#### 4.2. Değişkenler ve model yapısı

##### 4.2. Variables and model structure

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, otomobil ve ev sahipliği, gelir düzeyi, hane büyüklüğü, yaş, istihdam, sürücü belgesi olup olmaması, istihdam oranı gibi değişkenler yolculuk talep modellerini önemli ölçüde etkileyen değişkenler arasında yer almaktadır (Chang vd., 2014; Frank, 1995; Golob, 2000; Kroeger vd., 2018; Suel & Polak, 2017). Bu doğrultuda diğer amaçlı yaya yolculuklarını etkileyebileceği düşünülen bağımsız değişkenler şu şekilde belirlenmiştir:

**Otomobil Sahipliği Ortalaması (OtoS):** Zondaki ortalama otomobil sahipliği değerini ifade etmektedir.  $i$  zonundaki toplam otomobil sahipliği sayısının zondaki nüfusa oranı ile elde edilmiştir.

**Ev Sahipliği (EvS):** Zondaki ortalama ev sahipliği değerini ifade etmektedir.  $i$  zonundaki toplam ev sahipliği sayısının zon nüfusuna oranı ile elde edilmiştir.

**Gelir Ortalaması (GO):** Zondaki kişi başına düşen geliri ifade etmektedir.  $i$  zonundaki gelir toplamının, zon nüfusuna oranı ile elde edilmiştir.

**Ortalama Hane Büyüklüğü (OH):**  $i$  zonundaki toplam nüfusun zondaki hane sayısına oranı ile hesaplanmıştır.

**Ortalama Yaş (OY):**  $i$  zonundaki bireylere ait ortalama yaşını ifade etmektedir.

**Çalışan Oranı (ÇO):**  $i$  zonundaki çalışan birey sayısının zondaki nüfusa oranını ifade etmektedir.

**Öğrenci Oranı (ÖO):**  $i$  zonundaki öğrenci sayısının zondaki nüfusa oranını ifade etmektedir.

Bağımlı değişken ise,



*Diğer Amaçlı Yaya Yolculuk Oranı (DY)*: i zonunda yapılan diğer amaçlı yaya yolculuklarının zondaki nüfusa oranı ile hesaplanmıştır.

Yolculuk talep modelleri ile ilgili çalışmalarda, sosyo-ekonomik ve demografik değişkenlerin yolculuklara etkisi genellikle doğrusal ilişkilerle açıklanmaktadır (de Dios Ortázar & Willumsen, 2011). Bu kapsamda çalışmada kullanılan doğrusal model, DY bağımlı değişken tahmini ve  $X_i$  bağımsız değişkenler olmak üzere aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$\widehat{DY} = OtoSX_1 + EvSX_2 + GelirX_3 + OHX_4 + YOX_5 + ÇOX_6 + ÖOX_7 \quad (1)$$

### 4.3. Çoklu doğrusal regresyon

#### 4.3. Multiple linear regression

X bağımsız değişken veri seti, Y ise bağımlı değişken olmak üzere, ÇDR katsayıları aşağıdaki eşitlik yardımıyla bulunmaktadır:

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'Y \quad (2)$$

ÇDR'nin tutarlı tahminler yapabilmesi için bazı varsayımları bulunmaktadır. En önemli varsayımlarından bir tanesi bağımsız değişkenler arasında ÇDB bulunmamasıdır.

### 4.4. Çoklu doğrusal bağlantı tespiti ve alternatif yöntemler

#### 4.4. Detecting multicollinearity and alternative methods

Veri setinde ÇDB probleminin tespiti için bazı yöntemler kullanılmaktadır. Bunların başında bağımsız değişkenler arasındaki ilişkileri veren korelasyon tablosu gelmektedir (Alpar, 1997). Bunun yanı sıra Varyans Şişme Faktörü (VIF) analizi de ÇDB tespitinde kullanılan güçlü yöntemlerden biridir. ÇDB'nin bulunmaması durumunda ( $R_j^2 = 0$ ), VIF=1 olur. VIF>5 olması durumunda ÇDB'den bahsedilebilmektedir (Tari, 2010). Bu durumda ÇDB probleminin bulunması halinde geçmiş çalışmalarda en sık kullanılan yöntemler RR, Liu ve Temel Bileşenler analizidir (Alpu & Şamkar, 2010; Topal vd., 2010).

#### Ridge Regresyonu

RR bağımsız değişkenlerin birbiri üzerindeki ÇDB etkilerinin minimize edilerek daha kararlı katsayı tahminleri elde edebilmek amacı ile kullanılmaktadır (Üçkardeş vd., 2012). RR,

- Bağımsız değişkenler arasındaki ÇDB probleminin standardize edilmesi,
- Tahmin parametreleri için OLS'den daha küçük varyanslı değişkenler elde edilmesi gibi amaçlar için önerilmiştir.

ÇDB durumunda bağımsız değişkenler arasındaki ilişkinin anlamlı olması sebebiyle,  $X'X$  matris varyansı önemli ölçüde büyümektedir. Böyle durumlarda önemli olan parametreler, varyansın artması ile birlikte önemsiz görülebilmekte ve tahmin hataları artmaktadır. Bu sorunu ortadan kaldırmak için önerilen RR yöntemine göre, Denklem 3'te görülen  $X'X$  matrisinin köşegen elemanlarına pozitif bir "k" sabiti eklenerek varyans değeri önemli ölçüde küçültülebilmektedir.  $K=0$  değeri aldığıında RR tahmin edicisi OLS'ye dönüşür.

$$\hat{\beta}_{RR} = [X'X + kI]^{-1}X'Y \quad (3)$$

Burada I birim matristir. RR yöntemi için k'nın optimum değerinin bulunması oldukça önemlidir. Literatürde en iyi k değerinin tespit edilmesi üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Hoerl & Kennard, 1970; Kibria & Banik, 2020; Muniz vd., 2012; Muniz & Kibria, 2009; Thisted, 1976).

#### Liu Yöntemi

Liu tahmin edicisi EKK tahmin edicisinin doğrusal bir fonksiyonu olarak gösterilebilir (Küçük, 2019). d yanlılık parametresi ve  $\hat{\beta}_{MLR}$  ÇDR katsayıları olmak üzere Liu Yöntemi'nin katsayı değerleri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Adegoke vd., 2016):

$$\hat{\beta}_L = (X'X + I)^{-1}(X'X + dI)\hat{\beta}_{MLR} \quad (4)$$

ÇDB varlığında d değerinin belirlenen aralıkta aldığı herhangi bir değer OLS'den daha düşük HKO değeri sunmaktadır (Kaçıranlar & Sakallıoğlu, 2000). e d=1 alınırsa Liu tahmin edicisi EKK tahmin edicisine dönüşür. Geçmiş çalışmalarda d yanlılık parametresinin optimum değerini tespit etmek için çeşitli yöntemler önerilmiştir (Kejian, 1993; Liu, 2011).

#### 4.5. Değerlendirme kriterleri

##### 4.5. Evaluation criteria

Veri setinde ÇDB problemi varlığında, ÇDR modelin açıklayıcılık oranını ifade eden  $R^2$  değeri artmaktadır. Ancak ÇDB problemi varlığında  $R^2$  değerinin artması, modelin açıklama yeteneğinin artması anlamına gelmemektedir. Üstelik bu durumda  $R^2$  gereğinden fazla artarak "1" değerine çok yaklaşır ve bu durum ÇDB varlığına işaret edebilir. Eğer ÇDB problemi varsa  $R^2$  modelin başarısını gösteren bir ölçüt olmaktan çıkar. Model başarısını gösteren en önemli ölçütlerden biri olarak HKO kullanılmaktadır.

ÇDR tahmin edicisinin performansı şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$HKO_{MLR} = \hat{\sigma}^2 \sum_{i=1}^p \frac{1}{\lambda_i} \quad (5)$$

Burada p: bağımsız değişken sayısını,  $\lambda_i$  ( $i=1,2,3, \dots,p$ ):  $X'X$ 'e ait özdeğerleri,  $\hat{\sigma}$ : varyans değerini, ifade etmektedir (Alpar, 1997).

RR ve Liu yöntemlerine ait HKO aşağıdaki şekildedir (Adegoke vd., 2016; Alpu vd., 2010):

$$HKO_{RR} = \hat{\sigma}^2 \sum_{i=1}^p \frac{\lambda_i}{(\lambda_i+k)^2} + k \sum_{i=1}^p \frac{\hat{\alpha}_i^2}{(\lambda_i+k)^2} \quad (6)$$

$$HKO_{Liu} = \hat{\sigma}^2 \sum_{i=1}^p \frac{(\lambda_i+d)^2}{\lambda_i(\lambda_i+1)^2} + (d-1)^2 \sum_{i=1}^p \frac{\hat{\alpha}_i^2}{(\lambda_i+1)^2} \quad (7)$$

Burada,  $P = (n \times p)$  boyutlu ortogonal bir matris,  $\alpha_i = P' \hat{\beta}_{MLR}$  vektörünün elemanlarını ifade etmektedir.

Değerlendirme kriterlerinde Denklem 6 ve 7 de gösterildiği gibi, HKO değerleri Varyans ve Yanlılık toplamlarından oluşmaktadır. Toplanan kısımların sol tarafı varyans sağ tarafı ise yanlılık değerini ifade etmektedir. RR ve Liu yöntemleri,  $HKO_{RR}$  ve  $HKO_{Liu}$  değerlerini en küçükleyen k ve d değerlerini araştırır. HKO'nun yanı sıra çoklu model karşılaştırmalarında kullanılan en yaygın başarı ölçütleri arasında Akaike Bilgi Kriteri (ABK/AIC) (Portet, 2020) ve Bayesian Bilgi Kriteri (BBK-BIC) (Watanabe, 2013) yer almaktadır.

## 5. Bulgular

### 5. Findings

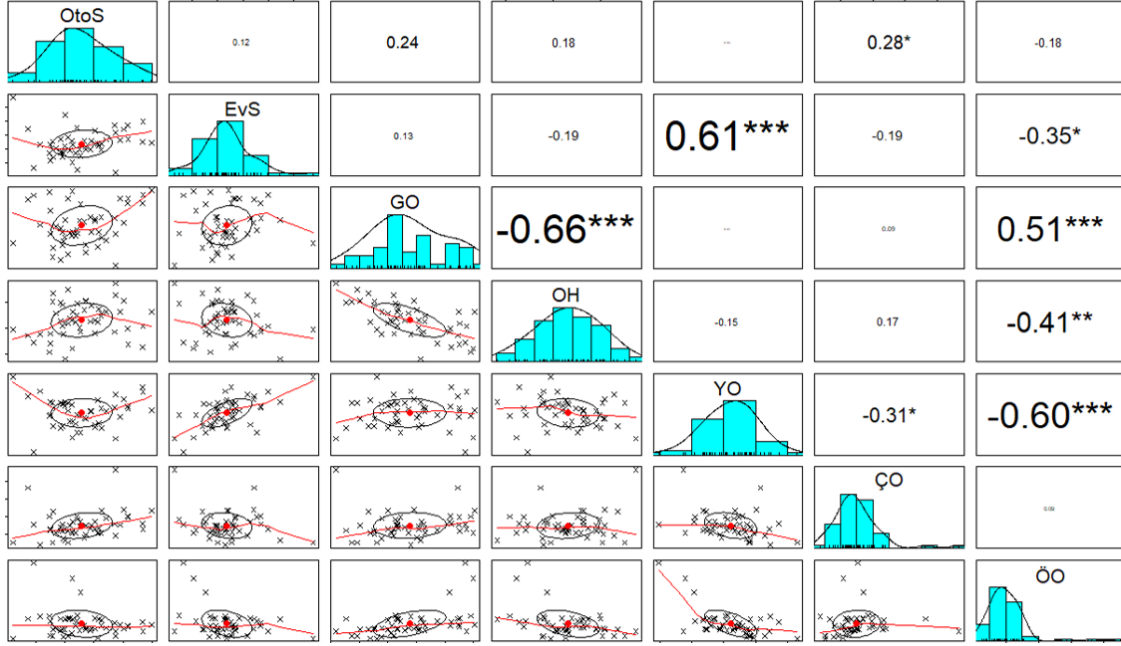
#### 5.1. Tanımlayıcı istatistikler

##### 5.1. Descriptive statistics

Veri setine ait SPSS istatistiksel hesaplama programı ile yapılan tanımlayıcı istatistik bilgileri Tablo 1'de verilmiştir. Korelasyon tablosu bağımsız değişkenler arasında ÇDB probleminin tespiti için yaygın olarak kullanılmaktadır. R paket programından faydalanılarak oluşturulan korelasyon tablosu Şekil 1'de gösterilmektedir (Revelle & Revelle, 2015).

**Tablo 1.** Tanımlayıcı İstatistikler  
*Table 1. Descriptive Statistics*

Değerler/Değişkenler	OtoS	EvS	GO	OH	YO	ÇO	ÖO	DY (Bağımlı değişken)
Ortalama	0.179	0.268	1.553	3.159	46.123	0.150	0.109	0.580
Varyans	0.003	0.002	0.065	0.106	17.058	0.005	0.006	0.027
En küçük değer	0.061	0.166	1.035	2.412	34.784	0.037	0.026	0.051
En büyük değer	0.299	0.437	2.006	3.867	56.553	0.467	0.449	0.867



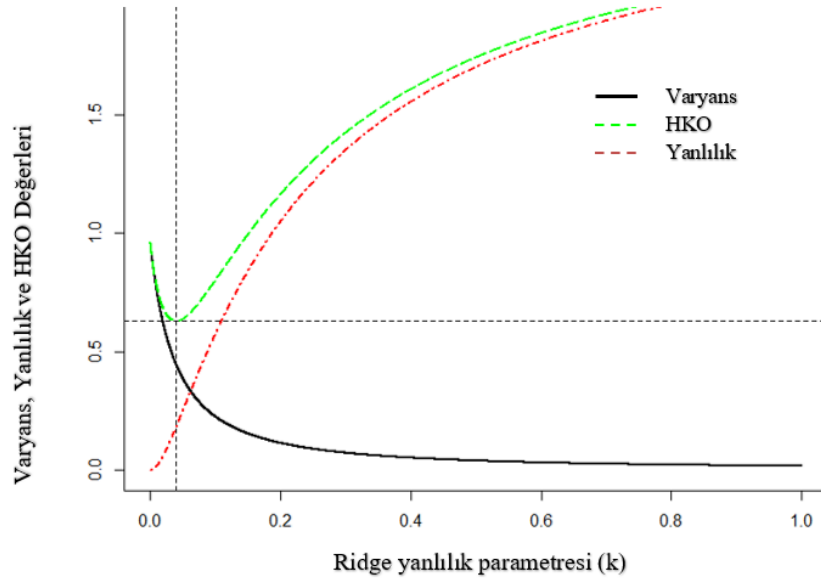
**Şekil 2.** Korelasyon Değerleri  
*Figure 2. Correlation Values*

Şekil 2'ye göre, GO ile OH, YO ile ÖO, GO ile ÖO ve EvS ile YO arasında %99 güven seviyesinde anlamlı ilişkiler tespit edilmiştir. Bu durum bağımsız değişkenler arasında ÇDB varlığına işaret etmektedir. Diğer taraftan VİF değerleri ise OtoS, EvS, GO, OH, YO, ÇO, ÖO için sırasıyla 20.603, 52.358, 113.590, 84.034, 215.167, 6.479, 8.488 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan VİF değerlerine bakıldığında birçoğunun 10'dan büyük olduğu görülmektedir. Bu durum değişkenler arasındaki ÇDB varlığını desteklemektedir.

## 5.2. İstatistiksel analiz sonuçları

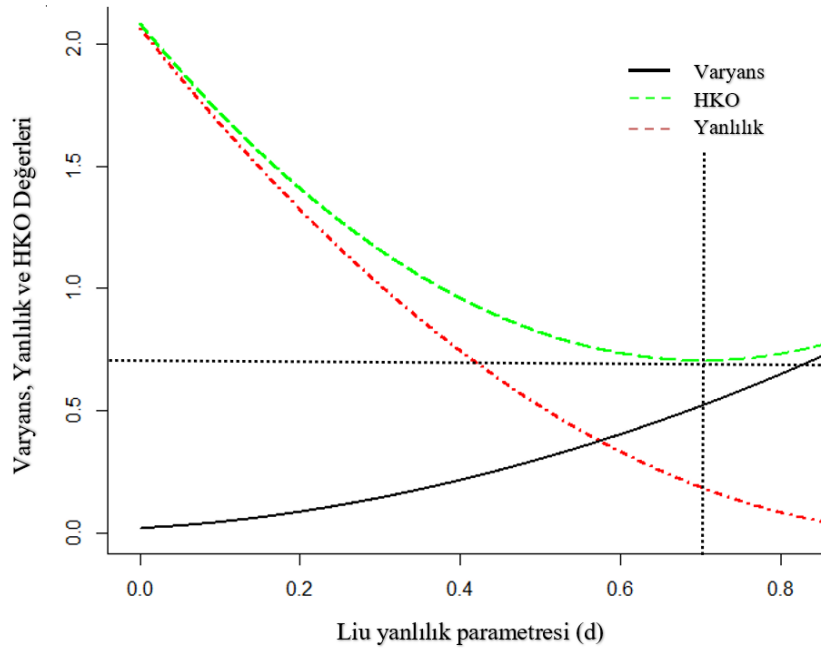
### 5.2. Statistical analysis results

ÇDR, RR, Liu yöntemleri ve yedi bağımsız değişkenin yaya yolculuklarındaki etkileri araştırılmıştır. Analizlerde R Studio yazılımında “lmridge” (Ullah vd., 2018) ve “liureg” (Imdadullah vd., 2017) paketlerinden faydalanılmıştır. RR tahin yöntemine göre yanlılık parametresi k değerine bağlı olarak değişen varyans yanlılık ve HKO değerleri Şekil 3'teki gibidir.



**Şekil 3.** RR yanlılık parametresinin Varyans ve yanlılık miktarına göre değişimi  
**Figure 3.** Variation of the RR bias parameter according to the variance and the amount of bias

Şekil 3'te görüldüğü gibi HKO'nun en küçük olduğu k değerinin 0.041 olduğu hesaplanmıştır. Aynı şekilde Liu yöntemine göre d değerinin varyans, yanlılık ve HKO değerlerine bağlı değişimi Şekil 4'te verilmiştir.



**Şekil 4.** Liu yanlılık parametresinin Varyans ve yanlılık miktarına göre değişimi  
**Figure 4.** Variation of Liu bias parameter according to variance and amount of bias

Şekil 4'e göre en küçük HKO değerinin hesaplandığı d değerinin yaklaşık 0.7 olduğu görülmektedir.

Hesaplanan yanlılık parametrelerine (k ve d) göre ÇDR, RR ve Liu tahmin yöntemlerine ait katsayılar, HKO, ABK ve BBK değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Yöntemlere ait katsayı ve HKO değerleri  
**Table 2.** Coefficient and PCR values of the methods

Katsayılar	ÇDR	RR ( $k_{opt}=0.041$ )	Liu ( $d_{opt}=0.695$ )
OtoS	-0.9236	-0.7138**	-0.6817*
EvS	-1.01	-0.6826*	-0.7258*
GO	-0.1361	-0.1425	-0.1218
OH	-0.0749	-0.0986	-0.0875
YO	0.0165	0.0113	0.0114
ÇO	0.2231	0.1479	0.1536
ÖO	0.8272	0.6404*	0.6057
<b>Başarı ölçütleri</b>			
MSE	0.9613	0.6292	0.7046
ABK (AIC)	-186	-187.037	-187.0000
BBK (BIC)	23	19.62	19.621

\*\* %95; \*%90 Güven aralığı

Tablo 2'deki model katsayılarına göre bağımlı değişken (DY), OtoS, EvS, GO ve OH ile negatif ilişkili; YO, ÇO ve ÖO ile pozitif ilişkilidir. HKO, ABK ve BBK değerlerine göre, en başarılı sonuçlar RR yönteminden, en başarısız sonuçlar ise ÇDR modelinden elde edilmiştir. Ancak, bütün yöntemler için katsayı işaretlerinin yönlerinin aynı olduğu görülmektedir. Katsayı yönlerine göre Tablo 2 sonuçları aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- Genel olarak geçmiş çalışmalar incelendiğinde, okul ve iş yolculukları yoğun olarak özel otomobil veya toplu taşıma ile gerçekleştirilmektedir. Ancak diğer amaçlı yapılan yolculuklarda yaya yolculukları oransal olarak artmaktadır. Bu yüzden diğer amaçlı yolculuk davranışlarını etkileyen unsurlar daha karmaşık olabilmekte ve farklılık gösterebilmektedir.
- DY ile OtoS arasındaki ilişkinin yönü negatiftir. Clifton (2004), daha düşük araç sahipliğinin ve daha düşük hane gelirinin daha yüksek yürüme sıklığı ile ilişkili olduğunu göstermiştir. Diğer bazı çalışmalarda, özellikle yoksul toplumlarda bu ilişkiyi destekleyen sonuçlar elde edilmiştir (Olvera vd., 2003; Sietchiping vd., 2012).
- Literatürde, gelir miktarının artması ile otomobil sahipliğinin ve kullanımının artması beklenen bir durumdur. Ancak diğer amaçlı yolculuk davranışları ile ilgili bulgular farklılaşmaktadır. Delice vd. (2019) kırsal kesimde diğer amaçlı yaya yolculuklarının gelirin artmasıyla arttığını belirlemiştir. Bu sonuç yüksek gelire sahip bireylerin fiziksel aktivitede bulunmak üzere yolculukları yaya olarak gerçekleştirebileceği fikrini desteklemektedir. (Greenwald, 2003). Diğer bir çalışmada sosyalleşme amaçlı yolculuklarda (spor, eğlence, vb.) gelir seviyesinin artması ile yaya yolculuklarının arttığı; sağlık ve alışveriş yolculuklarında ise gelir artışı ile yaya yolculuklarının azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu çalışmadaki sonuçlara göre, GO miktarının artması DY miktarını azaltmaktadır. Diğer bir ifadeyle, gelirdeki artış diğer amaçlı yolculuklarda yaya yolculuklarını azalttığına işaret etmektedir. Bu durum, gelir ile özel otomobil kullanımındaki pozitif ilişkinin, okul ve iş yolculuklarında olduğu gibi diğer yolculuklarda da görülebileceğini göstermektedir.
- DY ile EvS arasında negatif ilişkinin bulunduğu görülmektedir. Anket sonuçlarına göre, ev sahibi bireylerin arttığı bölgelerde, genellikle otomobil sahipliği ve gelirin de belirli bir düzeyde arttığı görülmektedir. Böylelikle, ev sahibi olanların yaya olarak yolculuk yapma eğilimini azaltmaktadır yorumu yapılabilir.
- OH değerinin artması, DY miktarının azalması ile sonuçlanmaktadır. Greenwald (2003) çalışmasında, hanedeki çocuk sayısının artması ile yaya olarak yapılan yolculukların otomobil yolculuklarına göre daha fazla tercih edildiğini göstermektedir. Hanedeki çocuk sayısının artması genel olarak hane büyüklüğünü arttırmaktadır.

- YO ile DY arasındaki ilişkinin yönü pozitifdir. Yaş değişkeninin DY üzerindeki etkisi geçmiş çalışmalarda farklılıklar göstermektedir. İsveç'te market alışverişi için yapılan yolculukları inceleyen bir çalışmada (Hagberg & Holmberg, 2017) daha yaşlı bireylerin yürümeyi diğer ulaşım türlerine göre daha az tercih ettiği ortaya konulmuştur. ABD'de yapılan bir diğer çalışma (Greenwald, 2003) ise yaş arttıkça bireylerin yürümeyi özel otomobile göre daha çok tercih ettiklerini göstermiştir. Bu durumda, yaşın tür tercihi davranışlarındaki etkilerinin farklı karakteristiklere sahip bölgelerde farklılık gösterebileceği söylenebilir.
- ÇO ile DY arasında pozitif ilişki bulunmaktadır. Çalışanların yoğunlukta olduğu bölgelerde yaya yolculuklarında bir miktar artış söz konusu olmuştur. Greenwald (2003) çalışmasında çalışan bireylerin daha az yaya yolculuğu yaptıklarını bulmuştur. Ancak bu çalışma sonucunda bulunan farklılık Eskişehir'in arazi kullanım yapısı ile ilgili birtakım farklılıklarından kaynaklanıyor olabilir. Eskişehir iş, alışveriş ve eğlence merkezlerinin bir arada toplandığı yoğun bir kent merkezine sahiptir. Birkaç mahalleyi içerisine alan bu kent merkezi aynı zamanda konut yoğunluğunun da fazla olduğu bir bölgedir. Kent merkezinde yayalaştırılmış cadde ve sokakların sayısının da fazla olması bu bölge veya yakın bölgelerdeki çalışan insanların yaya olarak yolculuk yapmasını teşvik ediyor olabilir.
- ÖO ile DY arasındaki ilişkinin yönü pozitifdir. Öğrencilerin yoğunlukta olduğu bölgelerde yaya olarak yapılan yolculuk miktarları da artmaktadır. Öğrencilerin diğer amaçlı yolculuklarını daha çok yaya olarak gerçekleştirmesinin sebebi gelirlerinin genellikle düşük olmasından kaynaklanabilir. Bunun yanı sıra, Eskişehir'de özellikle üniversite öğrencilerinin yoğunlukta olduğu bölgelerde, sosyal aktivite, alışveriş, eğlence amaçlı tesislerin de yoğunlukta olması olabilir. Böylelikle öğrenciler diğer amaçlı yolculuklarını yaya olarak gerçekleştirme eğilimindedirler. Bir diğer sebebi de öğrencilere ait özel otomobil sahipliği değerinin düşük olması olabilir.

## 6. Sonuçlar

### 6. Conclusion

Bu çalışmada diğer amaçlı yaya yolculuk oranlarını etkileyen değişkenler incelenmiş ve üç yönetime ait sonuçlar HKO açısından değerlendirilmiştir.

Geçmiş çalışmalarda iş ve okul yolculuklarının modellenmesi üzerine oldukça fazla çalışma bulunmasına karşın diğer amaçlı yaya yolculuklarının yolculuk davranışları ile ilgili çalışmalar kısıtlı sayıdadır. Böylelikle çalışma, diğer amaçlı yaya yolculuk davranışlarının açıklanması konusunda parametre ve yöntem açısından literatüre katkıda bulunmaktadır.

Veri setinde bağımsız değişkenler arasında ÇDB bulunduğu, ÇDR yöntemi ÇDB'ye duyarlılık göstererek kestirim başarılarını oldukça düşürmektedir. ÇDB problemine karşı duyarlı olmayan olan RR ve Liu yanlı tahmin teknikleri farklı alanlarda yapılan çalışmalardaki başarıları ile dikkat çekmiştir. Bu çalışmada HKO değerlerine bakıldığında, RR ve Liu yöntemlerinin ÇDR'ye göre sırasıyla yaklaşık %35 ve %27 daha başarılı olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmada, geçmiş birçok çalışmada, "ÇDB varlığında, aralarında korelasyon görülen bağımsız değişkenlerin arasından birer tanesinin seçilerek modele dahil edilmesi" gibi klasik bir uygulama yerine modeldeki değişkenlerin tamamının kullanılarak daha başarılı tahmin modelleri oluşturmaya odaklanılmıştır. Aksi takdirde, modelden yanlış bir değişkenin çıkartılması ile model başarıları düşebilmektedir. Çalışmada kullanılan değişkenler arasında en yüksek korelasyon değeri GO ve OH arasındadır (-%66). Genellikle, bu değer büyümeye ile birlikte ÇDR'nin tutarsızlığı ve başarısızlığı artmaktadır. Ancak değişkenler arasındaki ilişkinin en fazla %66 olmasına rağmen ÇDB problemi ÇDR analizinde büyük oranda (%35 ve %27) başarısızlığa sebep olmuştur. Korelasyon gücünün (-%66) artmasıyla birlikte ÇDR'nin tahmin başarıları daha fazla düşmektedir.

Ulaştırma planlaması genellikle hane halkı anketlerinin bulunduğu oldukça büyük veri setleri kullanılarak yapılmaktadır. Hane halkı yolculuk anketleri gibi büyük veri setlerinde ÇDB problemi ile sıklıkla karşılaşmaktadır. Çalışma bu yönüyle, ÇDR'den çok daha başarılı yanlı tahmin tekniklerinin ulaştırma planlamasında kullanılması konusunda da teşvik edicidir. Yanlı tahmin teknikleri, ev tabanlı okul veya iş amaçlı yolculukların modellenmesinde ve tür seçimi aşaması için ihtiyaç duyulan modellemelerde kullanılabilir.

**Etik beyanı***Declaration of ethical code*

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

**Çıkar çatışması beyanı***Conflicts of interest*

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

**Kaynaklar***References*

- Adegoke, A. S., Adewuyi, E., Ayinde, K., & Lukman, A. F. (2016). A comparative study of some robust ridge and liu estimators. *Science World Journal*, 11(4), 16-20.
- Akçay, A., & Sariözkan, S. (2015). Yumurta tavukçuluğunda gelirin Ridge Regresyon analizi ile tahmini. *Ankara Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 62(1), 69-74.
- Albayrak, A. S. (2005). Çoklu Doğrusal Bağlantı Halinde Enküçük Kareler Tekniğinin Alternatifi Yanlı Tahmin Teknikleri ve Bir Uygulama. *Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi*, 1(1), 105-126. [https://doi.org/Retrieved from https://dergipark.org.tr/pub/ijmeb/issue/54840/750869](https://doi.org/Retrieved%20from%20https://dergipark.org.tr/pub/ijmeb/issue/54840/750869)
- Alpar, R. (1997). *Uygulamalı çok değişkenli istatistiksel yöntemlere giriş-I*. Bağırhan Yayınları.
- Alpu, Ö., & Şamkar, H. (2010). Liu Estimator based on an M Estimator. *Türkiye Klinikleri Journal of Biostatistics*, 2(2), 49-53.
- Alpu, Ö., Şamkar, H., & Altan, E. (2010). Sağlam Ridge Regresyon Analizi ve Bir Uygulama. *Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 25(2).
- Baran, P. K., Rodríguez, D. A., & Khattak, A. (2008). Space syntax and walking in a new urbanist and suburban neighbourhoods. *Journal of Urban Design*, 13(1), 5-28. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/13574800701803498>
- Chang, J. S., Jung, D., Kim, J., & Kang, T. (2014). Comparative analysis of trip generation models: results using home-based work trips in the Seoul metropolitan area. *Transportation Letters*, 6(2), 78-88.
- Clifton, K. J. (2004). Built Environment And Trip Generation for Non-Motorized Travel.
- Craig, C. L., Brownson, R. C., Cragg, S. E., & Dunn, A. L. (2002). Exploring the effect of the environment on physical activity: a study examining walking to work. *American journal of preventive medicine*, 23(2), 36-43. [https://doi.org/10.1016/s0749-3797\(02\)00472-5](https://doi.org/10.1016/s0749-3797(02)00472-5)
- de Almeida Guimarães, V., & Leal Junior, I. C. (2017). Performance assessment and evaluation method for passenger transportation: a step toward sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 142, Part 1, 297-307. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.071>
- de Dios Ortáozar, J., & Willumsen, L. G. (2011). *Modelling transport*. John Wiley & Sons.
- Deb, S., Strawderman, L., DuBien, J., Smith, B., Carruth, D. W., & Garrison, T. M. (2017). Evaluating pedestrian behavior at crosswalks: Validation of a pedestrian behavior questionnaire for the US population. *Accident Analysis & Prevention*, 106, 191-201. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.05.020>
- Delice, Y., Ozen, H., & Amirnazmifshar, E. (2019). Suburban Passenger's Mode Choice Behavior Based on Trip Purpose. *International Journal of Management and Applied Science*, 5(8).
- Demirci, M. A. (2014). *Ridge Regresyonda Sapma Parametresi k'nın Elde Edilmesinde Genetik Algoritma Yaklaşımı* [Yüksek Lisans Tezi, 19 Mayıs Üniversitesi].
- Frank, L. D. (1995). *An analysis of relationships between urban form (density, mix, and jobs: housing balance) and travel behavior (mode choice, trip generation, trip length, and travel time)*.

- Golob, T. F. (2000). A simultaneous model of household activity participation and trip chain generation. *Transportation Research Part B: Methodological*, 34(5), 355-376.
- Greenwald, M. J. (2003). The road less traveled: New urbanist inducements to travel mode substitution for nonwork trips. *Journal of Planning Education Research* 23(1), 39-57. <https://doi.org/10.1177/0739456X03256248>
- Gujarati, D. (2004). *Basic Econometrics*. United States Military Academy, West Point. In: Tata McGraw-Hill.
- Hagberg, J., & Holmberg, U. (2017). Travel modes in grocery shopping. *International Journal of Retail Distribution Management*. <https://doi.org/10.1108/IJRDM-08-2016-0134>
- Herrero-Fernández, D., Parada-Fernández, P., Oliva-Macías, M., & Jorge, R. (2020). The influence of emotional state on risk perception in pedestrians: A psychophysiological approach. *Safety Science*, 130, 104857. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104857>
- Hoerl, A. E., & Kennard, R. W. (1970). Ridge regression: applications to nonorthogonal problems. *Technometrics*, 12(1), 69-82.
- Imdadullah, M., Aslam, M., & Altaf, S. (2017). liureg: A Comprehensive R Package for the Liu Estimation of Linear Regression Model with Collinear Regressors. *R J.*, 9(2), 232. <https://doi.org/10.32614/RJ-2017-048>
- Jain, A., Casas, S., Liao, R., Xiong, Y., Feng, S., Segal, S., & Urtasun, R. (2020). Discrete residual flow for probabilistic pedestrian behavior prediction. 3rd Conference on Robot Learning, Osaka, Japan.
- Kaçıranlar, S., & Sakalioğlu, S. (2000). Liu Ve Temel Bileşenler Regresyon Tahmin Edicilerinin Birleştirilmesi. *İstatistik Araştırma Sempozyumu*, 27-29.
- Kara, Ç., & Bilgiç, Ş. (2021a). Estimation of hospital trip characteristics in terms of transportation planning. *Journal of Transport & Health*, 20, 100987. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2020.100987>
- Kara, Ç., & Bilgiç, Ş. (2021b). Hospital Trip Production and Attraction Modeling for Future Predictions. *Journal of Urban Planning and Development*, 147(4), 05021049. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)UP.1943-5444.0000754](https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000754)
- Kejian, L. (1993). A new class of biased estimate in linear regression. *Communications in Statistics-Theory and Methods*, 22(2), 393-402. <https://doi.org/10.1080/03610929308831027>
- Khisty, C. J., & Arslan, T. (2005). Possibilities of steering the transportation planning process in the face of bounded rationality and unbounded uncertainty. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 13(2), 77-92. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2005.04.003>
- Kibria, B., & Banik, S. (2020). Some ridge regression estimators and their performances. *Journal of Modern Applied Statistical Methods*, 15(1). <https://doi.org/10.22237/jmasm/1462075860>
- Kim, N. S., & Susilo, Y. O. (2013). Comparison of pedestrian trip generation models. *Journal of Advanced Transportation*, 47(4), 399-412. <https://doi.org/10.1002/atr.166>
- Kroeger, L., Heinitz, F., & Winkler, C. (2018). Operationalizing a spatial differentiation of trip generation rates using proxy indicators of accessibility. *Travel Behaviour and Society*, 11, 156-173.
- Küçük, A. (2019). *Doğrusal regresyonda Ridge, Liu ve LASSO tahmin edicileri üzerine bir çalışma* [Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi].
- Liu, X.-Q. (2011). Improved Liu estimator in a linear regression model. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 141(1), 189-196. <https://doi.org/10.1016/j.jspi.2010.05.030>
- Muniz, G., Kibria, B., & Shukur, G. (2012). On developing ridge regression parameters: a graphical investigation. *Department of Mathematics and Statistics*. 10.
- Muniz, G., & Kibria, B. G. (2009). On some ridge regression estimators: An empirical comparisons. *Communications in Statistics—Simulation and Computation*, 38(3), 621-630. <https://doi.org/10.1080/03610910802592838>



- Olvera, L. D., Plat, D., & Pochet, P. (2003). Transportation conditions and access to services in a context of urban sprawl and deregulation. The case of Dar es Salaam. *Transport Policy*, 10(4), 287-298. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0967-070X\(03\)00056-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0967-070X(03)00056-8)
- Olvera, L. D., Plat, D., & Pochet, P. (2008). Household transport expenditure in Sub-Saharan African cities: measurement and analysis. *Journal of Transport Geography*, 16(1), 1-13. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2007.04.001>
- Öğüt, K. S., Tezcan, H. O., Sarısoy, G., Terzi, F., Gerçek, H., & Gedizlioğlu, E. (2017). *Eskişehir Ulaşım Ana Planı Sonuç Raporu*.
- Özlem, A., ŞAMKAR, H., & ALTAN, E. (2010). Sağlam ridge regresyon analizi ve bir uygulama. *Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 25(2), 137-148.
- Pabayo, R., Gauvin, L., & Barnett, T. A. (2011). Longitudinal changes in active transportation to school in Canadian youth aged 6 through 16 years. *Pediatrics*, 128(2), e404-e413. <https://doi.org/10.1542/peds.2010-1612>
- Papagiannakis, A., Baraklianos, I., & Spyridonidou, A. (2018). Urban travel behaviour and household income in times of economic crisis: Challenges and perspectives for sustainable mobility. *Transport Policy*, 65, 51-60. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2016.12.006>
- Portet, S. (2020). A primer on model selection using the Akaike Information Criterion. *Infectious Disease Modelling*, 5, 111-128. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.idm.2019.12.010>
- Primerano, F., Taylor, M. A., Pitaksringkarn, L., & Tisato, P. (2008). Defining and understanding trip chaining behaviour. *Transportation*, 35(1), 55-72. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11116-007-9134-8>
- Pulugurtha, S. S., & Repaka, S. R. (2008). Assessment of models to measure pedestrian activity at signalized intersections. *Transportation Research Record*, 2073(1), 39-48. <https://doi.org/https://doi.org/10.3141/2073-05>
- Rasouli, A., Kotseruba, I., & Tsotsos, J. K. (2017). Understanding pedestrian behavior in complex traffic scenes. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 3(1), 61-70. <https://doi.org/10.1109/TIV.2017.2788193>
- Rathert, T. Ç., Üçkardeş, F., Nariç, D., & Aksoy, T. (2011). Comparison of principal component regression with the least square method in prediction of internal egg quality characteristics in japanese quails. *Kafkas Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 17(5).
- Resmî Gazete. (2018). *Karayolları Trafik Kanunu İle Bazı Kanunlarda Değişiklik Yapılması Hakkında Kanun*. Resmî Gazete: Resmî Gazete
- Revelle, W., & Revelle, M. W. (2015). Procedures for Psychological, Psychometric, and Personality Research. *The comprehensive R archive network*, 337, 338.
- Ridel, D., Rehder, E., Lauer, M., Stiller, C., & Wolf, D. (2018). A literature review on the prediction of pedestrian behavior in urban scenarios. 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC),
- Schneider, R. J., Arnold, L. S., & Ragland, D. R. (2009). Pilot model for estimating pedestrian intersection crossing volumes. *Transportation Research Record*, 2140(1), 13-26. <https://doi.org/https://doi.org/10.3141/2140-02>
- Shay, E., Fan, Y., Rodríguez, D. A., & Khattak, A. (2006). Drive or walk? Utilitarian trips within a neotraditional neighborhood. *Transportation research record*, 1985(1), 154-161. <https://doi.org/https://doi.org/10.1177/036119810619850011>
- Sietchiping, R., Permezel, M. J., & Ngomsı, C. (2012). Transport and mobility in sub-Saharan African cities: An overview of practices, lessons and options for improvements. *Cities*, 29(3), 183-189. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cities.2011.11.005>
- Sorensen, H., Bogomolova, S., Anderson, K., Trinh, G., Sharp, A., Kennedy, R., . . . Wright, M. (2017). Fundamental patterns of in-store shopper behavior. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 37, 182-194. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2017.02.003>
- Suel, E., & Polak, J. W. (2017). Development of joint models for channel, store, and travel mode choice: Grocery shopping in London. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 99, 147-162.

- Tarı, R. (2010). *Ekonometri, Genişletilmiş 6*.
- Thisted, R. (1976). *Ridge regression, minimax estimation, and empirical Bayes methods*. [PhD thesis, Stanford University].
- Topal, M., Eydurhan, E., Yağanoğlu, A. M., Sönmez, A., & Keskin, S. (2010). Çoklu Doğrusal Bağlantı Durumunda Ridge ve Temel Bileşenler Regresyon Analiz Yöntemlerinin Kullanımı. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 41(1), 53-57.
- Ullah, M. I., Aslam, M., & Altaf, S. (2018). Inridge: A Comprehensive R Package for Ridge Regression. *R J.*, 10(2), 326.
- Üçkardeş, F., Ercan, E., Narinç, D., & Aksoy, T. (2012). Japon bildircinlarında yumurta ak indeksinin ridge regresyon yöntemiyle tahmin edilmesi. *Akademik Ziraat Dergisi*, 1(1), 11-20.
- Watanabe, S. (2013). A widely applicable Bayesian information criterion. *Journal of Machine learning research*, 14(27), 867-897.
- Wells, H. L., McClure, L. A., Porter, B. E., & Schwebel, D. C. (2018). Distracted pedestrian behavior on two urban college campuses. *Journal of community health*, 43(1), 96-102. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10900-017-0392-x>
- Yu, B., Zhang, J., & Li, X. (2017). Dynamic life course analysis on residential location choice. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2017.01.009>

## Farklı savak yüksekliğine ve konfigürasyona sahip dairesel labirent savakların deneysel modellenmesi

*Experimental modeling of circular labyrinth weirs with different weir heights and configurations*

Ali YILDIZ<sup>\*1</sup> , Ali İhsan MARTI<sup>1</sup> , Mustafa GÖĞÜŞ<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 42550, Konya

<sup>2</sup>Çankaya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06330, Ankara

• Geliş tarihi / Received: 23.11.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 24.02.2023

### Öz

Labirent savaklar plan görünümünde zikzaklı geometrilerinden dolayı, doğrusal savaklara göre baraj gövdesinde veya yerleştirildiği kanallarda daha az genişliğe ihtiyaç duyarlar. Bu çalışmada yarım daire şeklindeki labirent savakların içerdikleri göz sayılarının ( $N$ ) ve yüksekliklerinin ( $P$ ) debi verimine olan etkisi incelenmiştir. Yarım daire şeklindeki labirent savaklar üçgen ve trapez labirent savakların aksine, kesişim köşelerindeki akış kapasitesini azaltan bölgeleri daha verimli hale getirerek ve akışın savak duvarlarına daha dik doğrultuda hareket etmesini sağlayarak deşarj verimini arttırmırlar. Deneyler dairesel savaklar için içerdikleri yarım daire sayısına bağlı olarak ( $N=2, 3$  ve  $4$ ) olarak 3 farklı konfigürasyon üzerinde yürütülmüştür. Bütün konfigürasyonlarda toplam 3 adet savak yüksekliği ( $P=0.20, 0.30$  m ve  $0.40$  m) kullanılmış olup 9 adet deney seti hazırlanmıştır. Ayrıca dairesel savaklardan elde edilen sonuçlara referans oluşturması amacıyla doğrusal savaklar ile 3 farklı savak yüksekliğinde ( $P=0.20, 0.30$  m ve  $0.40$  m) deneyler yapılmış olup toplamda 12 adet deney yapılmıştır. Dairesel savakların içerdikleri göz sayısı ( $N$ ) arttıkça debi verimi düşmüştür ve yüksekliğin debi verimi üzerine belirgin bir etkisi olmamıştır. Dairesel labirentler savak deneylerinden elde edilen sonuçlar önceki çalışmalar ile karşılaştırılmış ve yarım daire labirent savakların, üçgen kesitli labirent savaklara göre daha yüksek debi-deşarj kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca yarım daire şeklindeki labirent savaklar aynı kanal genişliğinde üçgen forma göre daha uzun efektif kret uzunluğu sağlamışlardır ve aynı savak yükünde yüksek debi geçirmişlerdir.

**Anahtar kelimeler:** Açık kanal hidroliği, Dairesel savaklar, Deneysel modelleme, Labirent savaklar

### Abstract

Due to their zigzag geometry in plain view, labyrinth weirs require less crest length compared to linear weirs in the dam body or in the channels where they are placed. In this study, the effect of the number of cycles ( $N$ ) and weir heights ( $P$ ) of the semi-circular labyrinth weirs on the flow efficiency was investigated. Semi-circular labyrinth weirs, unlike triangular and trapezoidal labyrinth weirs, increase the discharge efficiency by making the areas that reduce the flow capacity at the intersection areas more efficient and by allowing the flow to move in a more perpendicular direction to the weir walls. The experiments were carried out on 3 different configurations ( $N=2, 3$  and  $4$ ) depending on the number of semi-circles they contain. In all configurations, a total of 3 weir heights ( $P=0.20, 0.30$  m and  $0.40$  m) were used and 9 test setups were prepared. In addition, to reference the results obtained from circular weirs, experiments were carried out with linear weirs at 3 different weir heights ( $P=0.20, 0.30$  m and  $0.40$  m), and a total of 12 experiments were carried out. In this study, the effect of the number of cycles ( $N$ ) and weir heights ( $P$ ) of the semicircular labyrinth weirs on the discharge efficiency was investigated. The results obtained from the circular labyrinth weir experiments were compared with previous studies and it was seen that the semi-circular labyrinth weirs had higher discharge capacity than the triangular labyrinth weirs. In addition, semi-circular labyrinth weirs provided a longer effective crest length than the triangular form with the same channel width, they provide higher flow rates at the same weir load.

**Keywords:** Open channel hydraulic, Circular sectioned weirs, Experimental modeling, Labyrinth weirs

\* Ali YILDIZ; ayildiz@ktun.edu.tr

## 1. Giriş

### 1. Introduction

Dolusavaklar, baraj gövdesini korumak ve mansaba giden akımı düzenlemek için kullanılan, akışı güvenli bir şekilde mansap tarafına geçiren güvenlik yapılarıdır. Dolusavaklar tarafından mansap tarafına geçirilecek debinin miktarı son derece önemlidir. Yüksek taşkın ihtimalinin bulunduğu bölgelerde dolusavağın akış kapasitesi çok daha büyük önem taşır (Tingey, 2011). Çünkü rezervuardaki fazla su seviyeleri baraj gövdesinde hasarlara yol açabilmektedir. Bu nedenle suyun baraj gövdesine zarar vermeden mansaba aktarılabilmesi için, taşkın dönemlerinde dolusavakların yeterli debi-deşarj kapasitesine sahip olması gerekmektedir. Dolusavaklarda işletim esnasında oluşan yapısal hasarların %22'si dolusavakların kapasitelerinin yetersizliğinde kaynaklanmaktadır (ICOLD, 1995).

İnşaat maliyeti ve inşaat sahasının coğrafi koşulları nedeniyle, doğrusal dolusavaklar gerekli debi kapasitesini sağlamada yetersiz kalabilmektedirler. Bu durumda problemin çözümü, debi-deşarj kapasitesini artırmak için labirent dolusavaklar kullanılarak efektif kret uzunluğunun artırılmasıdır (Wormleaton & Tsang, 2000).

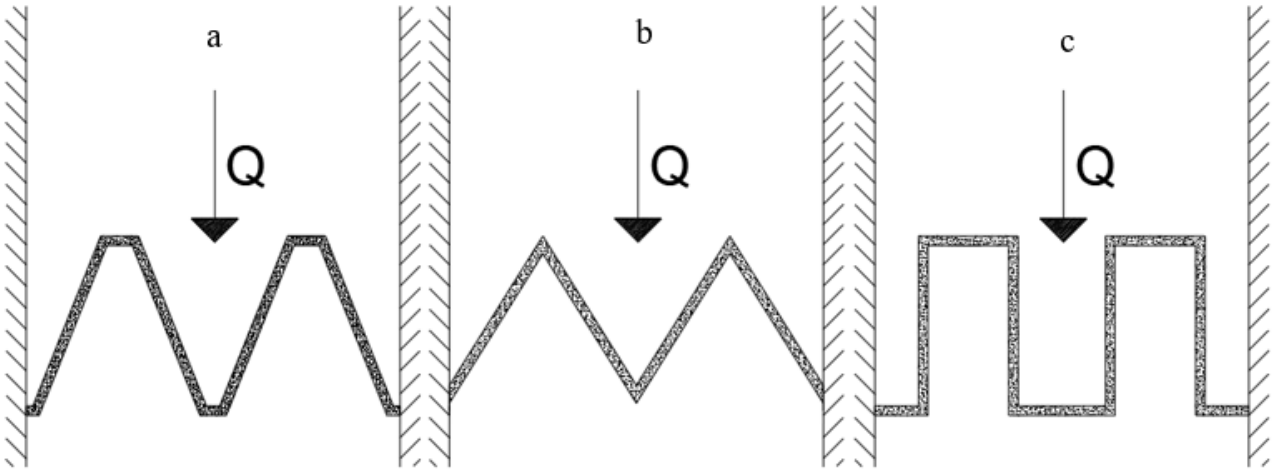
Bir labirent savak, üstten görünüşte bir doğrusal savağın katlanmış halidir. Labirent savaklar geometrilerinden dolayı doğrusal savaklara göre birçok avantaja sahiptirler. Labirent savaklar, belirli bir kanal genişliğinde efektif kret uzunluğunu arttırarak sabit bir savak yükünde debi kapasitesini arttırmış olurlar. Bu yüzden doğrusal savaklara göre aynı kret uzunluğunda, daha az savak açıklığı gerektirirler. Labirent dolusavaklar, düz bir hat veya yay hattı üzerine yerleştirilebilirler. Crookston & Tullis (2012) yaptığı deneysel çalışmada, labirent savakların verimini arttırmak için doğrusal bir hat yerine, yay şeklinde bir hat kullanmıştır.



**Şekil 1.** Ute Dam labirent dolusavağı

**Figure 1.** Ute dam labyrinth spillway ([https://www.youtube.com/watch?v=cmb\\_G0ucN0c](https://www.youtube.com/watch?v=cmb_G0ucN0c))

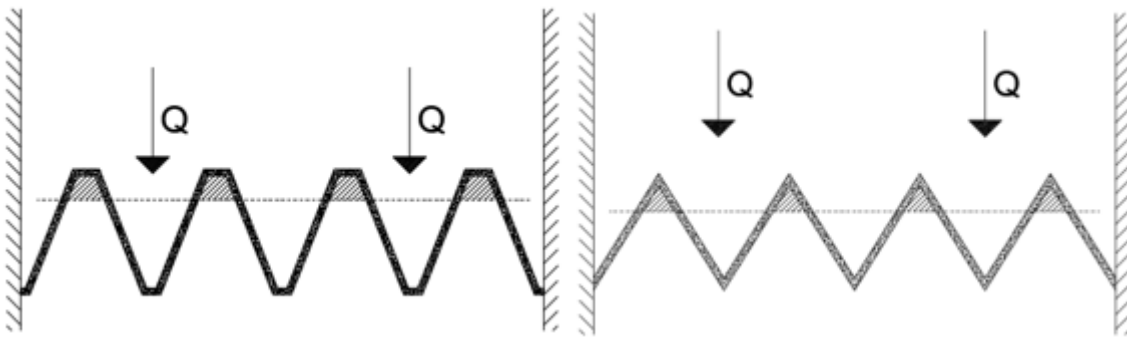
Labirent savakların çok farklı geometrik konfigürasyonları vardır, ancak yapısal olarak üçgen, yamuk ve dikdörtgen olarak sınıflandırılabilir (Şekil 2). Labirent dolusavakların tasarımı ile ilgili ilk detaylı bilgiler Taylor (1968) tarafından verilmiştir. Geniş bir uygulama alanı için bir labirent savağın deşarj verimini etkileyen temel faktörleri vermek için deneysel verilere ve teorik bilgilere bağlı olarak çözümler önermişlerdir. Bunu Hay & Taylor (1970) yamuk ve üçgen labirent dolusavaklar için bir tasarım prosedürünün hazırlanmasına yönelik bir çalışma ile takip etmiştir. Bilhan vd. (2018) dairesel labirent savakların deşarj verimini araştırmak için 3 farklı savak yüksekliğinde (P=10, P=15 ve P=20 cm) ve 56 cm çapında, yarım daire şeklindeki savaklar üzerinde deneyler yapmışlardır. Deneylerden elde edilen sonuçlar nümerik model ile karşılaştırılarak, nümerik modellerin doğrulukları test edilmiştir ve nümerik model ve deneysel veriler %96 oranında tutarlı çıkmıştır.



**Şekil 2.** Farklı labirent savak geometrileri. (a) trapez, (b) üçgen, (c) dikdörtgen

**Figure 2.** Different labyrinth weir geometries. (a) trapezoidal, (b) triangular, (c) rectangular

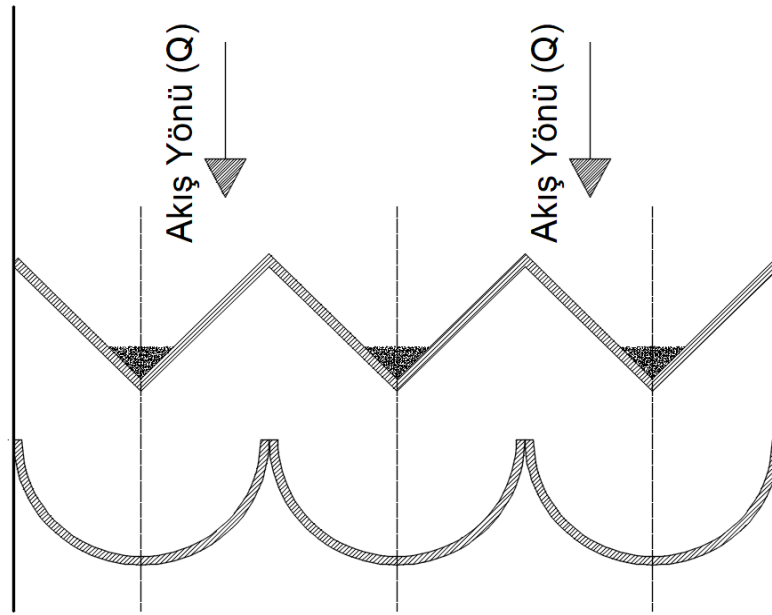
Labirent savak üzerinden geçen akımı matematiksel ifadelerle açıklamak zordur, çünkü labirent savak üzerinden geçen akış üç boyutlu olup akım ani genişlemelerle ve daralmalarla karşılaşmaktadır (Amanian, 1987). Enerji, momentum, süreklilik, nap akımı altındaki basınç, nap akımının havalanma durumu, nap akımı girişimi, batıklık, savak geometrisi ve kret tepe şekli gibi özellikler dikkate alınmalıdır. Labirent savaklarda debi, deneysel veriler sonucunda elde edilen ampirik olarak belirlenmiş katsayılara sahip bir savak denklemleri ile hesaplanır. Nap akımlarının girişimi, bitişik iki duvardan gelen akımların çakışması sonucu oluşur (Şekil 3). Bu iki akımın çakışması bölgesel bir batıklık etkisine neden olur (Crookston, 2010). Bilhan vd. (2016) yaptıkları çalışmada trapez ve dairesel labirent savaklara nap akımlarının girişimlerini engellemek için duvar üzerine kırıcılar yerleştirmişlerdir. Özellikle yan duvar açılarının çok küçük olduğu zaman nap girişiminin etkisi artmaktadır. Labirent savak üzerinden geçen akım kret tepe şeklinden de etkilenmektedir. Labirent savakta kullanılan göz sayısı nap girişiminin olduğu bölge sayısını etkilemektedir.  $N$ , labirent savakta kullanılan dairenin sayısıdır. Sabit bir kret uzunluğunda,  $N$ 'yi artırarak labirent dolusavağın etkin kret uzunluğu artırabilir, ancak 3 gözlü bir savak, apeks sayısındaki artış ve nap akımlarından etkilenen bölgelerinin artması nedeniyle debi-deşarj kapasitesi bakımından 20 gözlü bir savaktan daha verimli olabilir.



**Şekil 3.** Üçgen ve trapez kesitli labirent savaklar nap akımı girişimlerini oluşturan bölgeler (taralı olarak gösterilen)

**Figure 3.** Regions where nappe flow interferences occurs in triangular and trapezoidal labyrinth weirs, (shown as shaded)

Bu çalışmanın amacı, farklı kesitteki dairesel savak konfigürasyonları kullanarak düz bir hat üzerinde labirent savağın deşarj verimliliğini artırmaktır. Labirent savaklarda debiyi azaltan nap bölgelerini deşarj bakımından daha verimli hale getirmek ve suyun mümkün olduğunca savaklara dik akmasını sağlamak amacıyla bu savaklar dairesel formda Şekil 4'te görüldüğü gibi yeniden tasarlanmıştır. Dairesel kesitli labirent savakların, üçgen kesitli labirent savaklara göre bir diğer avantajı da daha uzun kret uzunluğu sağlayacak olmasıdır. Dairesel formulu labirentlerde akışın daha az nap noktasına maruz kalacağı ve akış hızını olumlu yönde etkileyeceği düşünülmektedir. Bu amaçla laboratuvarında bir dizi deney yapılmıştır.



**Şekil 4.** Dairesel forma tasarlanan labirent savakların üçgen savaklar ile kıyaslanması

**Figure 4.** Comparison of labyrinth weirs designed in semi-circular form with triangular weirs

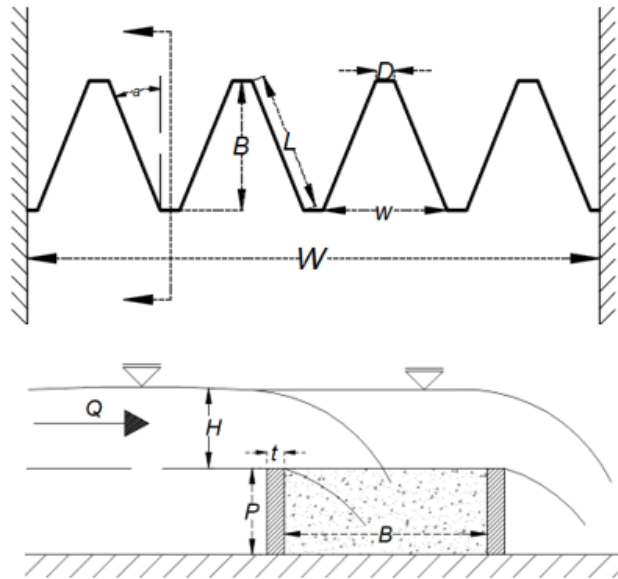
## 2. Materyal ve metot

### 2. Material and method

#### 2.1. Labirent savaklar

##### 2.1. Labyrinth weirs

Labirent savakların tasarımını ve hidrolik performansını etkileyen değişkenleri bulmak için birçok çalışma yapılmıştır. Bu bölümde labirent savaktaki akışı etkileyen temel parametreler üzerinde durulmuştur (Şekil 5).



**Şekil 5.** Labirent savaklarda akımı etkileyen parametreler

**Figure 5.** Parameters affecting the flow in labyrinth weirs

Bir labirent savak üzerinden akışı etkileyen ana parametreler Şekil 5'te görülmektedir. Burada;  $B$ : savak yan duvarının kesit uzunluğunu,  $w$ : bir gözün genişliğini,  $L$ : savak yan duvarının uzunluğu,  $D$ : labirent gözünün alın uzunluğu,  $W$ : kanal genişliği,  $a$ : yan duvar açısı,  $P$ : savak yüksekliği,  $H$ : savak üzerindeki toplam savak yükünü,  $Q$ : debi ve  $t$ : duvar kalınlığıdır. Tullis vd. (1995), bir labirent savağın debi-deşarj kapasitesinin, toplam savak yükünün ( $H$ ), efektif kret uzunluğuna ( $L$ ) ve debi katsayısına ( $C_d$ ) bağlı olarak bir fonksiyonunu önermişlerdir. Temelde doğrusal bir savağın üzerinden geçen debiyi hesaplamak için kullanılan keskin kenarlı savak denklemi, bir labirent savak üzerinden geçen debiyi hesaplamak için kullanılabilir. Labirent savaklarda debiyi hesaplamak için denklem-1 kullanılır.

$$Q = \frac{2}{3} \times C_d \times L \times \sqrt{2 \times g} \times H^{1.5} \quad (1)$$

Burada;  $C_d$  debi katsayısı,  $g$ : yerçekimi ivmesi,  $L$ : savağın efektif kret uzunluğu ve  $H$ : toplam savak yüküdür.

## 2.2. Deneysel çalışma

### 2.2. Experimental Study






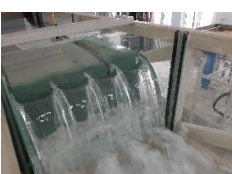



Dairesel labirent savaklar üzerinde deneyler yapılırken savak yüksekliği ( $P$ ) ve savakta kullanılan yarı daire ( $N$ ) sayısı olmak üzere iki temel parametre dikkate alınmıştır. Bu iki parametrenin debi ve savak yükü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneyler dairesel kesitli savaklar için içerdikleri yarı daire sayısına bağlı olarak ( $N=2, 3$  ve  $4$ ) olarak 3 farklı konfigürasyon üzerinde yürütülmüştür. Bütün konfigürasyonlarda toplam 3 adet savak yüksekliği ( $P=0.20, 0.30$  m ve  $0.40$  m) kullanılmış olup toplam 9 adet deney seti hazırlanmıştır. Yapılan deneylerin deney görünüşleri ve kullanılan değişkenler Tablo 1 de verilmiştir.

Göz sayısından ( $N$ ) ve savak yüksekliğinden ( $P$ ) bağımsız olarak dairesel kesitli labirent savakların toplam efektif kret uzunluğu  $L_{\text{efektif}}=0.9424$  m olmaktadır.  $N=2$  daire içeren savaklarda tek bir gözün uzunluğu ( $L_c$ )<sub>efektif2 daire</sub> $=0.4712$  m,  $N=3$  daire içeren savaklarda tek bir gözün uzunluğu ( $L_c$ )<sub>efektif3 daire</sub> $=0.3141$  m ve  $N=4$  daire içeren savaklarda tek bir gözün uzunluğu ( $L_c$ )<sub>efektif4 daire</sub> $=0.2356$  m olmaktadır. Toplam göz sayısı ( $N$ ), tek bir gözün uzunluğu ( $L_c$ ) ile çarpıldığında, savağın toplam kret uzunluğunu vermektedir ve bu değer bütün savaklar için  $L_{\text{efektif}}=0.9424$  m olmaktadır. Deneylerde kullanılan dairesel labirent savakların genel görünüşleri (toplam 9 adet) Şekil 6'da gösterilmiştir.

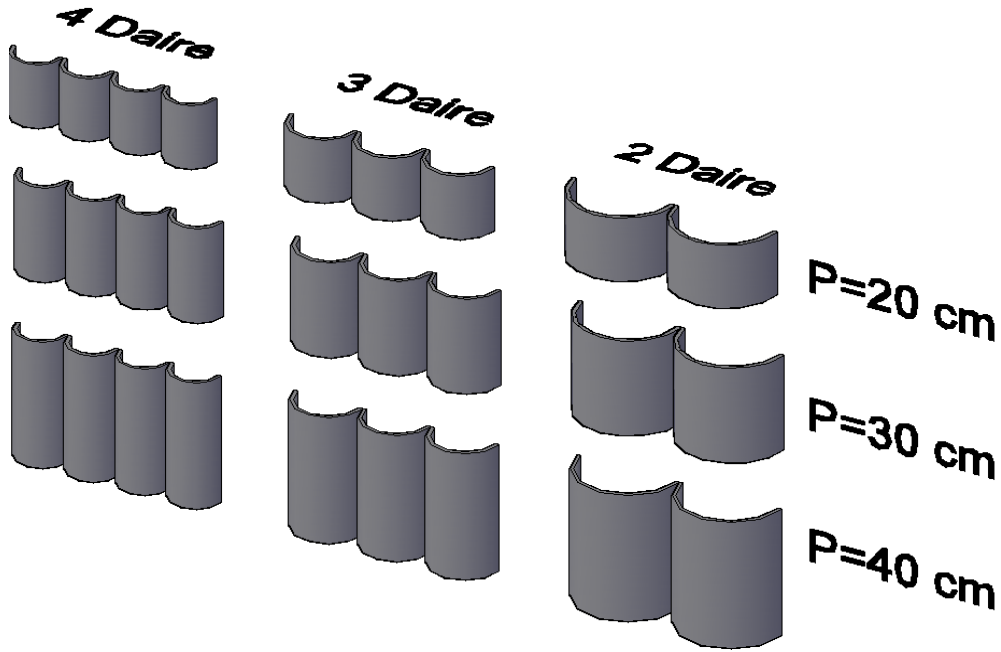
Göz sayısından ( $N$ ) ve savak yüksekliğinden ( $P$ ) bağımsız olarak dairesel kesitli labirent savakların toplam efektif kret uzunluğu  $L_{\text{efektif}}=0.9424$  m olmaktadır.  $N=2$  daire içeren savaklarda tek bir gözün uzunluğu ( $L_c$ )<sub>efektif2 daire</sub> $=0.4712$  m,  $N=3$  daire içeren savaklarda tek bir gözün uzunluğu ( $L_c$ )<sub>efektif3 daire</sub> $=0.3141$  m ve  $N=4$  daire içeren savaklarda tek bir gözün uzunluğu ( $L_c$ )<sub>efektif4 daire</sub> $=0.2356$  m olmaktadır. Toplam göz sayısı ( $N$ ), tek bir gözün uzunluğu ( $L_c$ ) ile çarpıldığında, savağın toplam kret uzunluğunu vermektedir ve bu değer bütün savaklar için  $L_{\text{efektif}}=0.9424$  m olmaktadır. Deneylerde kullanılan dairesel labirent savakların genel görünüşleri (toplam 9 adet) Şekil 6'da gösterilmiştir.

Dairesel kesitli savakların fiziksel modellemesi için kullanılan deney düzeneği Şekil 7'de görülmektedir. Deneylerde kullanılan açık kanal düzeneği  $6.50$  m uzunluğunda,  $0.60$  m genişliğinde ve  $0.50$  m yüksekliğindedir. Deney düzeneğinin açık kanalındaki akış, sisteme paralel bağlı iki pompa ile sağlanmaktadır. Pompaların basacağı debi miktarı, pompaların bağlı olduğu panoda bulunan frekans değiştiriciler tarafından ayarlanmaktadır. Böylece sisteme verilen debi aralığı  $0.001$  ile  $0.0045$  m<sup>3</sup>/s arasında değişmektedir. Pompalardan sonra borular arasına yerleştirilen ultrasonik debimetre ile debi değeri okunmaktadır. Açık kanal sistemi suyun sirkülasyonu ile çalışmaktadır.

**Tablo 1.** Deney düzenekleri ve kullanılan parametreler  
**Table 1.** Experimental setups and used parameters

Deney No:	Dairesel kesitli labirent savaklar	Savak yüksekliği (P)	Göz sayısı (N)	Tek gözün kret uzunluğu ( $L_c$ )	Tek gözün plan gör. uzunluğu (w)
1		0.20 m	2	0.4712 m	0.30 m
2		0.20 m	3	0.3141 m	0.20 m
3		0.20 m	4	0.2356 m	0.15 m
4		0.30 m	2	0.4712 m	0.30 m
5		0.30 m	3	0.3141 m	0.20 m
6		0.30 m	4	0.2356 m	0.15 m
7		0.40 m	2	0.4712 m	0.30 m
8		0.40 m	3	0.3141 m	0.20 m
9		0.40 m	4	0.2356 m	0.15 m





Şekil 6. Deney setleri  
Figure 6. Experimental Setups



Şekil 7. Deneylerde kullanılan açık kanal düzeneği  
Figure 7. Open channel system used in experiments

### 3. Bulgular ve tartışma 3. Results and discussion

Dairesel savaklar ile yapılan deneylerin amacı aynı kanal genişliğinde üçgen ve trapez savaklara göre daha yüksek debi değeri elde etmektir. Diğer bir deyişle, aynı savak yükü ( $H$ ) ile daha fazla debi geçişini sağlayarak savağın debi-deşarj kapasitesini arttırmaktır. Dairesel labirent savaklar aynı kanal genişliğinde üçgen savaklara göre daha fazla kret uzunluğu sağlar. Etketif kret uzunluğunun ( $L_{\text{efektif}}$ ) artırılması, debi üzerinde doğrudan olumlu bir etkiye sahiptir. Deneylerden elde edilen sonuçlar, savak yüksekliğinin ( $P$ ) ve içerdiği daire sayısına bağlı olarak savağın şeklinin ( $N$ ) etkisi olarak 2 kısımda incelenmiştir.

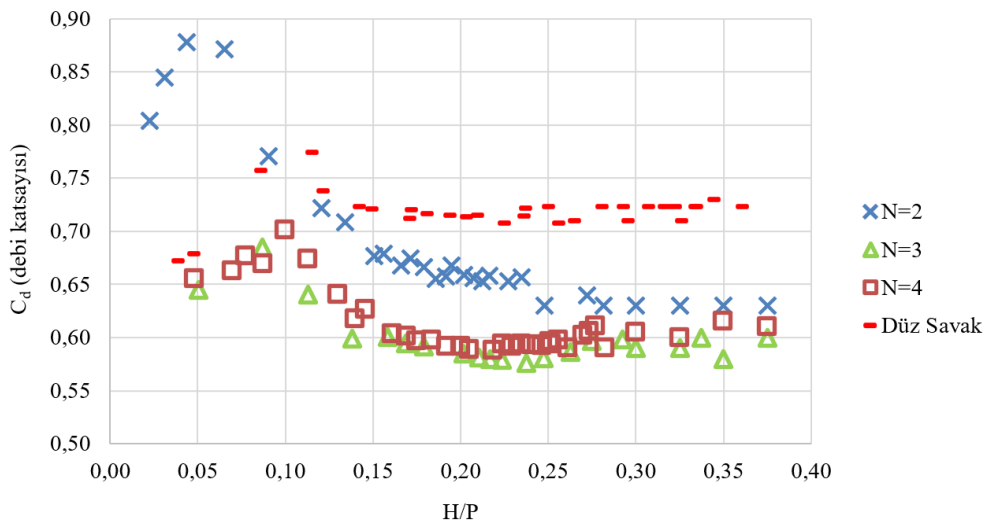
### 3.1. Aynı savak yüksekliğindeki (P) dairesel labirent savakların, farklı göz sayıları (N) için karşılaştırılması

#### 3.1. Comparison of different configurations at the same weir height (P)

İlk olarak kullanılan göz sayısına (N) bağlı olarak savak şeklinin debilere olan (Q) etkisi incelenmiştir. Aynı savak yüksekliğindeki (P) farklı tipteki savak şekillerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Farklı tipteki dairesel savakların deşarj verimlerini daha doğru analiz etmek ve performanslarını karşılaştırmak için Şekil 8, 9 ve 10'da debi katsayıları ( $C_d$ ) incelenmiştir. Debi katsayılarının ( $C_d$ ) karşılaştırılmasındaki amacı, savakların efektif kret uzunluklarının ( $L_{efektif}$ ) debiye olan etkisini ortadan kaldırmaktır. Bu sayede dairesel savaklar üçgen ve doğrusal savaklar ile karşılaştırılabilecektir. Debi katsayıları ( $C_d$ ) ve boyutsuz savak yükleri ( $H/P$ ) aynı grafikler üzerinde gösterilmiştir. Kullanılan daire sayısına bakılmaksızın tüm dairesel kesitli labirent savaklar için ( $N=2, 3$  ve  $4$  daire) kretin toplam efektif uzunluğu  $L_{efektif} = 0.9424$  m'dir. Doğrusal savak için kullanılan savağın efektif kret uzunluğu ise  $0.60$  m'dir. Debi katsayıları ( $C_d$ ), deneylerde ölçülen debi değerlerine göre aşağıdaki Denklem (2) den hesaplanmıştır. Debi katsayısı savağın kret uzunluğunun etkisini ortadan kaldırarak, savağın şeklinin debi üzerine olan etkisini göstermektedir. Denklem (1)'in yeniden düzenlenmesiyle elde edilen debi katsayısı ( $C_d$ ) denklemi elde edilir;

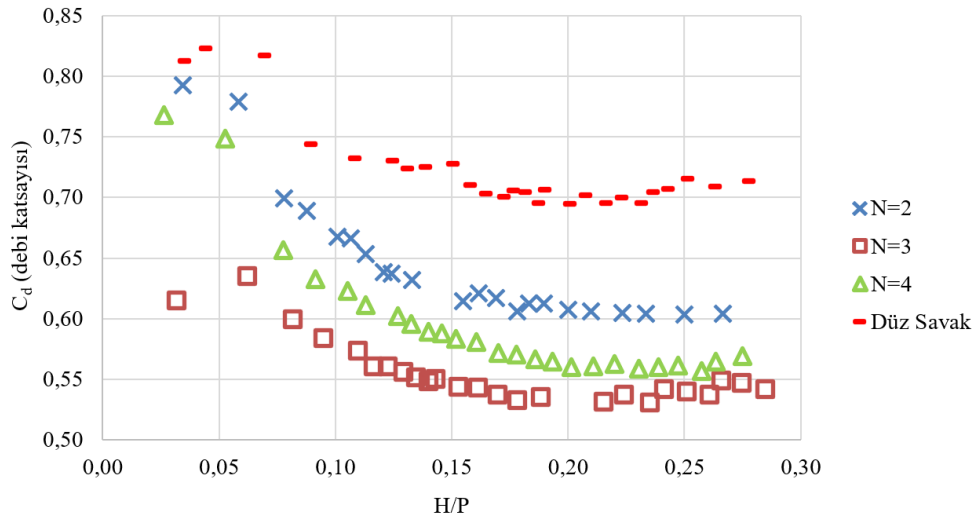
$$C_d = \frac{Q}{\frac{2}{3} \times L \times \sqrt{2 \times g} \times H^{1.5}} \quad (2)$$

Sonuçlar incelendiğinde  $N=2$  daire içeren labirent savakların, aynı savak yüksekliğinde (P) diğer daire labirent savaklara göre daha fazla debi katsayısına sahip olduğu görülmektedir. Bu durum  $P=0.20$  m,  $P=0.30$  m ve  $P=0.40$  m olmak üzere bütün savak yüksekliklerinde gözlemlenmektedir.  $N=2$  daire içeren savaklardan sonra deşarj verimliliği açısından  $N=3$  daire ve  $N=4$  daire içeren labirent savaklar yer gelmektedir. Savak katsayıları kıyaslandığında  $C_d \text{ Doğrusal} > C_d \text{ N=2 Daire} > C_d \text{ N=3 Daire} > C_d \text{ N=4 Daire}$  olmaktadır. Doğrusal savağın debi katsayısı ( $C_d$ ) dairesel savaklara göre daha yüksek çıkmıştır. Bu fark, suyun savaklara yaklaşma açısındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır. Doğrusal savakta su, yaklaşık  $90^\circ$  açıda doğrudan savağa yaklaşırken, dairesel savaklarda bu açı azalır ve bu da debi katsayısını ( $C_d$ ) düşürür. Ayrıca dairesel savaklarda akım yine girişimlere maruz kalmaktadır. Doğrusal savağın boşaltma katsayısının ( $C_d$ ) dairesel savaktan daha yüksek olması doğrusal savağı daha verimli hale getirmeyecektir. Çünkü dairesel labirent savaklar aynı kanal genişliğini daha verimli kullanılır ve doğrusal savaklara göre daha uzun efektif kret uzunluğu ( $L_{efektif}$ ) sağlarlar.  $N=2$  daire içeren savakların diğer dairesel savaklardan ( $N=3$  ve  $N=4$  daire içeren) daha iyi sonuç vermesi girişim bölgelerinin daha az olmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 10). Bu, savak üzerinde aynı savak yükünde (H) ile  $Q_{N=2 \text{ Daire}} > Q_{N=3 \text{ Daire}} > Q_{N=4 \text{ Daire}} > Q_{\text{Doğrusal}}$  olduğu anlamına gelir.



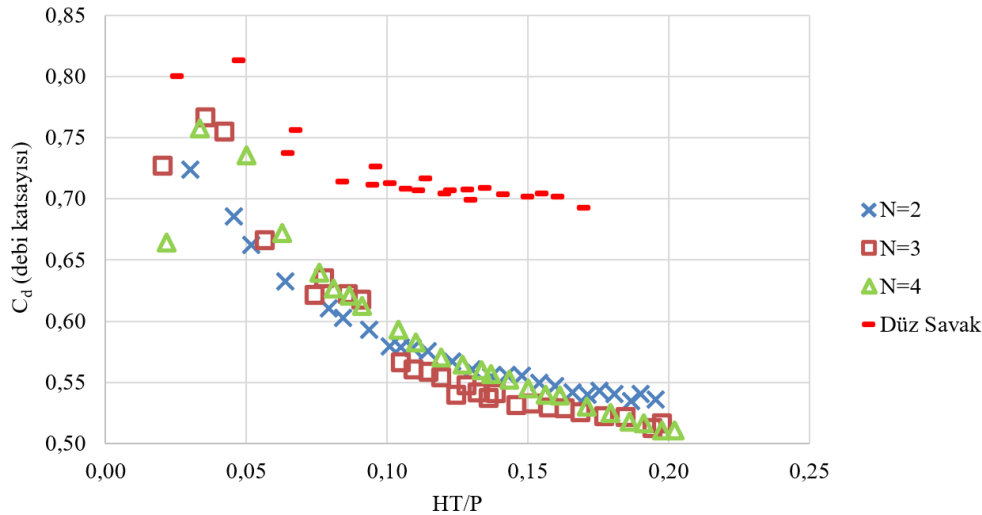
Şekil 8.  $P=0.20$  m yüksekliğindeki dairesel kesitli labirent savaklar ve doğrusal savağın karşılaştırılması

Figure 8. Comparison of circular sectioned weirs with a weir height of  $P=0.20$  m and a linear weir



**Şekil 9.**  $P=0.30$  m yüksekliğindeki dairesel kesitli labirent savaklar ve doğrusal savağın karşılaştırılması

**Figure 9.** Comparison of circular sectioned weirs with a weir height of  $P=0.30$  m and a linear weir



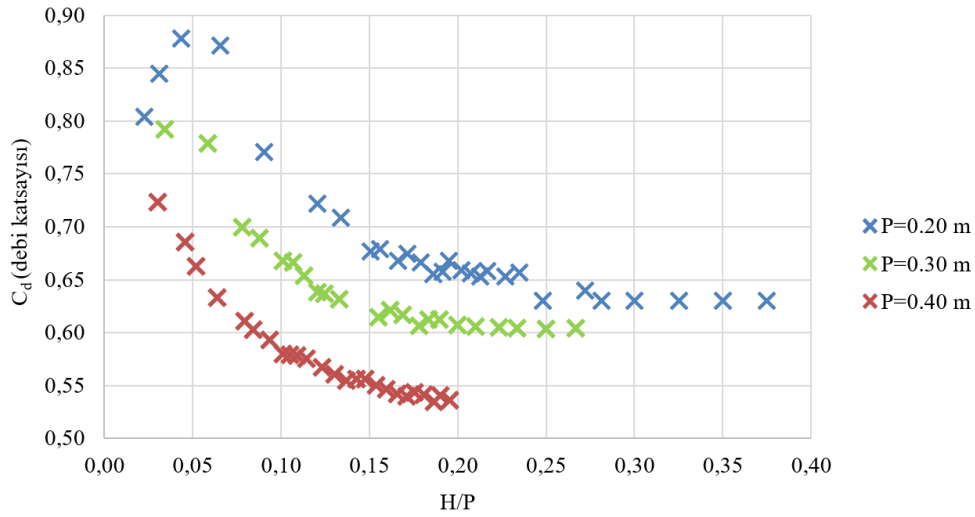
**Şekil 10.**  $P=0.40$  m yüksekliğindeki dairesel kesitli labirent savaklar ve doğrusal savağın karşılaştırılması

**Figure 10.** Comparison of circular sectioned weirs with a weir height of  $P=0.40$  m and a linear weir

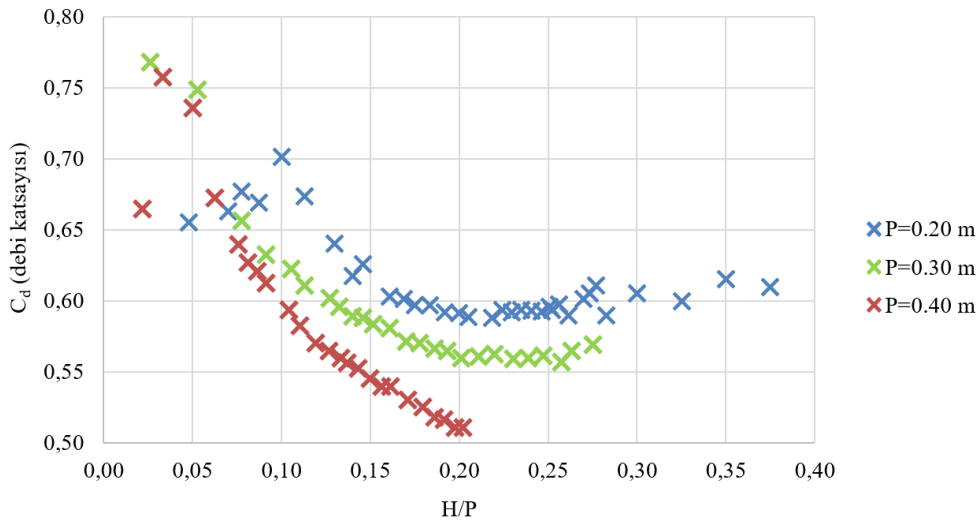
### 3.2. Eşit sayıda göz içeren ( $N$ ) dairesel labirent savakların, farklı savak yüksekliğinde ( $P$ ) karşılaştırılması

#### 3.2. Comparison of configurations of the same type at different weir heights ( $P$ )

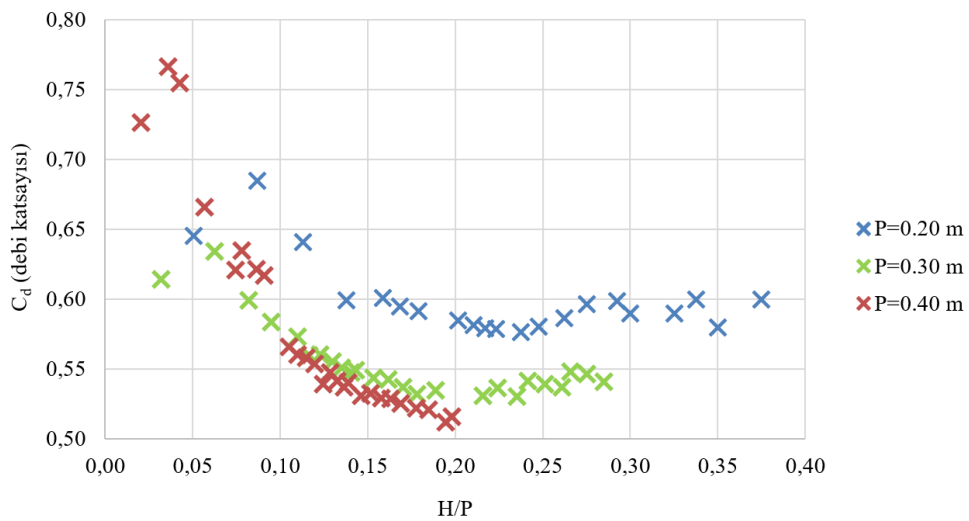
Farklı savak yüksekliklerine ( $P$ ) sahip aynı tip savaklar, debi katsayısı ( $C_d$ ) ve boyutsuz savak yükü ( $H/P$ ) için karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmanın amacı savak yüksekliğinin ( $P$ ) debi katsayısına ( $C_d$ ) olan etkisini incelemektir (Şekil 11, Şekil 12 ve Şekil 13). Savak yüksekliği ( $P$ ) azaldıkça, debi katsayısının ( $C_d$ ) arttığı görülmektedir. Bu durum  $N=2$ ,  $N=3$  ve  $N=4$  olmak üzere bütün dairesel savak tiplerinde görülmektedir. Bunun nedeni, savak yüksekliği ( $P$ ) azaldıkça savak mansabındaki havalandırma azalır ve daha fazla vakum etkisi oluşur. Vakumun etkisiyle daha fazla su çekilir ve debi ( $Q$ ) artarken ve savak üzerindeki toplam savak yükü ( $H$ ) azalmaktadır.



**Şekil 11.** N=2 adet göz sayısına sahip dairesel savakların karşılaştırılması  
**Figure 11.** Comparison of circular weirs which include N=2 semi-circular weir



**Şekil 12.** N=3 adet göz sayısına sahip dairesel savakların karşılaştırılması  
**Figure 12.** Comparison of circular weirs which include N=3 semi-circular weir

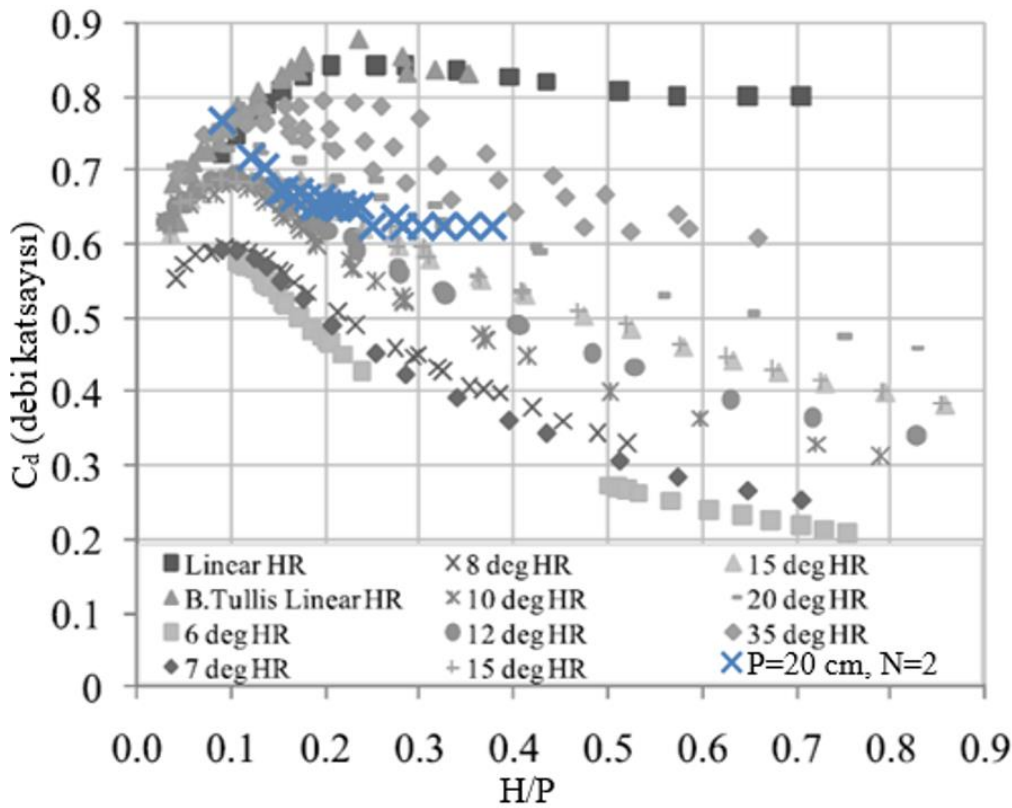


**Şekil 13.** N=4 adet göz sayısına sahip dairesel savakların karşılaştırılması  
**Figure 13.** Comparison of circular weirs which include N=4 semi-circular weir

Dairesel savak deneylerinden hesaplanan debi katsayıları ( $C_d$ ) daha önce yapılan çalışmalarla da karşılaştırılmıştır. Labirent savaklar ile ilgili en önemli çalışmalardan biri Crookston & Tullis (2013) yapılmıştır. Crookston & Tullis (2013), farklı yan duvar açılarında, trapez labirent savaklar ile yaptığı deneylerden elde edilen debi katsayısı değerlerini boyutsuz parametrelere,  $C_d$  ve  $H/P$  bağlı olarak paylaşmışlardır. Tullis ve Crookston çalışmalarında maksimum  $35^\circ$  yan duvar açısına sahip trapez labirent savak kullanmışlardır.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar incelendiğinde, yapılan deneyler arasında deşarj kapasitesi bakımından en verimli savak  $N=2$  göz sayısına sahip  $P=0.2$  m yüksekliğine sahip dairesel labirent savak olmuştur. Dairesel savakların geometrilerinden dolayı ortaya koyduğu hidrolik avantajı daha net değerlendirmek için, bu savaktan elde edilen sonuç Crookston & Tullis (2013) tarafından yapılan trapez labirent savak deneyleri ile Şekil 14'te karşılaştırılmıştır. Öncesinde de bahsedildiği gibi elde edilen savak yükü ve debi sonuçlarını başka çalışmalar ile kıyaslayabilmek için sonuçlar boyutsuz debi katsayıları ( $C_d$ ) ve boyutsuz savak yükü ( $H/P$ ) olarak verilmiştir.

Sonuçlar karşılaştırıldığında dairesel labirent savakların,  $20^\circ$  dereceden az yan duvar açısına sahip trapez labirent savaklara göre daha yüksek debi katsayılarına sahip oldukları görülmektedir.  $20^\circ$  dereceden fazla yan duvar açısına sahip trapez labirent savaklar, bu çalışmadaki en verimli dairesel savaktan yüksek debi katsayıları vermiştir. Ayrıca  $N=2$  daire içeren dairesel labirent savaktan elde edilen debi katsayılarının ( $C_d$ ) trapez savaklardan elde edilen debi katsayıları ile tutarlı sonuçlar vermesi deneylerin doğruluğunu göstermektedir. Deneylerde kullanılan açık kanal siteminin kanal yüksekliği, maksimum savak yükünü sınırladığı için  $H/P$  oranı  $0,4'$ ü geçememektedir. Bu yüzden Şekil 14'te, Crookston & Tullis (2013) tarafından yapılan deneylerde  $H/P$  oranı  $0,8'$ e kadar ulaşırken, bu çalışmada  $0,4'$ e kadar çıkabilmiştir.



Şekil 14. Tullis (1995) tarafından üçgen savaklar için hesaplanan debi katsayıları ( $C_d$ ) ve  $N=2$  daire içeren  $P=0.20$  m yüksekliğinde labirent savaklar ile karşılaştırılması

Figure 14. Discharge coefficients ( $C_d$ ) calculated for triangular weirs by Tullis (1995) and comparison of circular sectioned labyrinth weirs with  $P=0.2$  m and  $N=2$

## 4. Tartışma ve sonuçlar

### 4. Discussion and conclusions

Bu çalışmada dairesel kesitli labirent savaklar ile deneyler yapılmıştır. Deneylerde kullanılan dairesel kesitli savaklar farklı savak yüksekliklerine ( $P$ ) ve yarım daire sayılarına ( $N$ ) sahiptirler. Bu çalışmanın amacı, üçgen ve trapez labirent savaklarda bulunan ve nap akımlarının girişimine sebep olan kesişim bölgelerini kaldırarak labirent savakları deşarj kapasitesi açısından daha verimli hale getirmektir. Ayrıca dairesel savaklar ile deneyler yapılırken savak yüksekliğinin ( $P$ ) ve savağın içerdiği yarım daire sayısının ( $N$ ) debi katsayısına ( $C_d$ ) olan etkileri de araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre,

Savağın içerdiği daire sayısı ( $N$ ) arttıkça debi katsayısı ( $C_d$ ) azalmaktadır. Bu durumun en önemli nedeni daire sayısı ( $N$ ) arttıkça, akımın maruz kalacağı kesişim bölgelerinin sayısı da artmasıdır. Bu yüzden göz sayıları bakımından kıyaslandığında en verimli deşarj kapasitesine sahip labirent savak  $N=2$  daire içeren savaklar çıkmıştır.

Savak yüksekliği ( $P$ ) arttıkça, debi katsayısı ( $C_d$ ) azalmaktadır. Bu durumun başlıca sebebi savak yüksekliği azaldıkça savakların mansap tarafında oluşan nap akımındaki havalanma azalmakta ve vakum etkisi artmaktadır. Vakum etkisi ile savaklardan daha fazla su çekilmekte ve bu da debi katsayısını arttırmaktadır. Ayrıca deney sonuçları literatürdeki verilerle karşılaştırılarak deneylerin doğruluğu test edilmiştir. Deneyler, önceki çalışmalarla tutarlı sonuçlar vermiştir. Bu çalışmanın en önemli kısmı daire kesitli savakların üçgen kesitli savaklara göre daha iyi hidrolik performans göstermesidir.

### Yazar katkısı

#### Author contribution

Bu çalışma Ali YILDIZ'ın "Dairesel labirent savakların hidrolik özellikleri, deneysel tasarımı ve nümerik modellenmesi" isimli doktora tez çalışmasından üretilmiştir.

Ali YILDIZ: Deneysel çalışma, verilen toplanması, makalenin hazırlanması

Ali İhsan MARTI: Kaynak araştırması, makalenin hazırlanması, derleme

Mustafa GÖĞÜŞ: Makalenin hazırlanması, derleme

### Etik beyanı

#### Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

### Çıkar çatışması beyanı

#### Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder

### Kaynaklar

#### References

Amanian, N. (1987). *Performance and design of labyrinth spillway* [Doktora Tezi, Utah State University].

Bilhan, O., Aydın, M. C., Emiroglu, M. E., & Miller, C. J. (2018). Experimental and CFD analysis of circular labyrinth weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 144(6). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001301](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001301)

Bilhan, O., Emiroglu, M. E., & Miller, C. J. (2016). Experimental investigation of discharge capacity of labyrinth weirs with and without nappe breakers. *World Journal of Mechanics*, 6(7). <http://doi.org/10.4236/wjm.2016.67017>

Crookston, B. M. (2010). *Labyrinth weirs* [Doktora Tezi, Utah State University].

- Crookston, B. M., & Tullis, J. P. (2012). Arced labyrinth weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(6), 555-562. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000553](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000553)
- Crookston, B. M., & Tullis, J. P. (2013). Hydraulic design and analysis of labyrinth weirs. I: discharge relationships. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(5), 363-370. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000558](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000558)
- Hay, N., & Taylor, G. (1970). Performance and design of labyrinth weirs. *Journal of the Hydraulics Division*, 96(11), 2337-2357. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0002766>
- ICOLD (International Commission of Large Dams). (1995). *Dam failures - statistical analysis* (Bulletin 99). <https://www.icold-cigb.org/GB/publications/bulletins.asp>
- Taylor, G. (1968). *The performance of labyrinth weirs* [Doktora Tezi, University of Nottingham].
- Tingey, S. E. (2011). *Discharge Coefficients of Oblique Weirs* [Doktora Tezi, Utah State University].
- Tullis, J. P., Amanian, N., & Waldron, D. (1995). Design of labyrinth spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(3), 247-255. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1995\)121:3\(247\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:3(247))
- Wormleaton, P. R. & Tsang, C. C. (2000). Aeration performance of rectangular planform labyrinth weirs. *Journal of Environmental Engineering*, 126(5), 456-465. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2000\)126:5\(456\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2000)126:5(456))

## A comparison of Apache Solr and Elasticsearch technologies in support of large-scale data analysis

*Büyük ölçekli veri analizini desteklemek için Apache Solr ve Elasticsearch teknolojilerinin karşılaştırması*

Ayşenur DENİZ<sup>id</sup>, Muhammed Mehdi ELÖMER<sup>id</sup>, Ahmet Arif AYDIN<sup>\*</sup>,<sup>id</sup>

Inonu University, Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, 44280, Malatya

• Received: 01.12.2022

• Accepted: 10.03.2023

### Abstract

In the era of big data, data has never been more important because it contains hidden insights. Additionally, it is necessary and challenging to extract usable information from enormous volumes of data. When attempting to perform data processing and analytics in a variety of domains, developers of data-intensive systems have consequently met several challenges. In addition, full-text search is one of the most significant components of big data processing and analytics for discovering fragments of required data among large volumes of data. Due to the importance of the subject, this article begins with an examination of the characteristics, capabilities, and technical comparisons of full-text search technologies, followed by a systematic comparison of Apache Solr and Elasticsearch in terms of indexing times and queries on three separate datasets. According to our findings, based on default configuration, Apache Solr has better performance when looking at indexing times measured on three machines with different hardware specifications. Likewise, Apache Solr outperforms Elasticsearch in seven out of ten search queries. Regarding our results, on computers with restricted hardware resources, we recommend utilizing Apache Solr instead of Elasticsearch. In addition, this study provides researchers and developers of data-intensive systems with a complete comparison and suggestions for choosing the most effective full-text search engine for their task.

**Keywords:** Apache Lucene, Apache Solr, Big data, Elasticsearch, Full-text search, Searching

### Öz

*Büyük veri çağında, gizli içgörüler içerdiği için veriler hiç bu kadar önemli olmamıştı. Ayrıca, çok büyük hacimli verilerden kullanılabilir bilgileri çıkarmak zaruri ve zordur. Çeşitli alanlarda veri işleme ve analitiği gerçekleştirmeye çalışırken, veri yoğunluklu sistem geliştiricileri çok çeşitli zorluklarla karşılaşmaktadır. Ayrıca, tam metin arama, büyük veriler içinde gerekli verilerin istenilen kısımlarını ortaya çıkarmak için büyük veri işleme ve analitiğinin en önemli bileşenlerinden biridir. Konunun önemi nedeniyle bu makale, tam metin arama teknolojilerinin özelliklerinin, yeteneklerinin ve teknik karşılaştırmalarının incelenmesiyle başlamakta, ardından Apache Solr ve Elasticsearch'ün indeklemeye süreleri üç ayrı veri seti kullanılarak sorgulama açısından sistematik bir karşılaştırması ile devam etmektedir. Bulgularımıza göre, karşılaştırılan teknolojilerin varsayılan konfigürasyonlarını baz alarak, Apache Solr, farklı donanım özelliklerine sahip üç makinede ölçülen indeklemeye sürelerine bakıldığında daha iyi performansa sahiptir. Aynı şekilde, on arama sorgusunun yedisinde Apache Solr Elasticsearch'ten daha iyi performans göstermektedir. Sonuçlarımıza göre, kısıtlı donanım kaynaklarına sahip bilgisayarlarda, Elasticsearch yerine Apache Solr kullanmanızı öneririz. Buna ek olarak, bu çalışma, araştırmacılara, veri yoğunluklu sistem geliştiricilerine, gerçekleştirecekleri görevleri için en uygun tam metin arama teknolojisini seçmeleri için eksiksiz bir karşılaştırma ve öneriler sağlamaktadır.*

**Anahtar kelimeler:** Apache Lucene, Apache Solr, Büyük veri, Elasticsearch, Tam metin arama, Arama

\* Ahmet Arif AYDIN; arif.aydin@inonu.edu.tr



## 1. Introduction

With the advancement of technology, ubiquitous internet access, and affordability, the rate of data growth continues to accelerate. Various sources, services, software tools, and hardware devices have been generating large amounts of data in various formats, sizes, and speeds. The data that reached exabytes and zettabytes became known as “Big Data” (Halevi & Moed, 2012). Big data is defined as large amounts of data that cannot be processed at once and require sophisticated processing tools, technologies, and methods. The daily production of vast quantities of diverse data types from numerous sources (Domo Company, 2022) increases the significance of big data since data includes hidden insight for organizations to stay competitive in the job market. In the context of big data, big data is described with five Vs. These properties consist of *volume* (amounts of data), *velocity* (speed of incoming data), *veracity* (trustworthiness), *variety* (various types and different forms), and *value* (beneficial information) (Lashkaripour, 2020). Each one of these characteristics has introduced various challenges for the developers of data-intensive systems. To handle these challenges, various tools have been developed to handle streaming, storage, and analytics with the purpose of fulfilling domain requirements and user needs (Rao et al., 2018).

In this era of big data, gleaning useful information out of large amounts of data in a reasonable amount of time is crucial since time is money. Moreover, one size does not fit all; various demands, different data types, diverse time restrictions and priorities, and the available resources of the underlying hardware all have an impact on software developers’ choices on technology, methods, and approach selection when developing a data-intensive system to perform actions quickly as demanded by the user. Thus, choosing a set of appropriate tools for a data processing job is a vital task since the technology choice impacts the entire data processing task. In addition, searching is another important concept to find related portions of a data set regarding user requests (Barrenechea et al., 2017). On the other hand, it is very difficult to get results quickly with traditional methods due to the large amount of data. Therefore, new technologies are needed to perform analysis on large amounts of big data.

Searching is one of the most important concepts in the context of big data research, and it is performed by the built-in searching capabilities of various data processing tools, ad-hoc codes written in various programming languages, or full-text search technologies such as Apache Lucene, Apache Solr, and Elasticsearch. Full-text search technologies are crucial and have been implemented in a variety of data-intensive systems (Anderson et al., 2015), information retrieval applications (Wang et al., 2022), including search engines, e-commerce applications, education platforms (Y. Aldailamy et al., 2018), smart city and IoT applications (Bellini et al., 2019), including search engines, e-commerce applications, social networking platforms, mobile banking apps, and video streaming services. Due to the significance of full-text search and utilizing the appropriate technology for searching activities, the purpose of this article is to compare Apache Solr and Elasticsearch technologies. We examined the indexing and search times of both technologies. We have calculated indexing times for each technology using three distinct datasets and three distinct machines. Moreover, search times have been computed using 10 queries for each technology on one machine which has good indexing performance.

The organization of the paper is as follows: In Section 2, summaries of relevant research are provided. The comparison and overview of Full-Text Search Technologies, Apache Solr, and Elasticsearch is presented in Section 3. Section 4 provides details on the environments utilized, datasets, and queries. Section 5 presents Apache Solr and Elasticsearch's indexing and search results. In comparison to previous research, Section 6 evaluates the indexing and search performance of Apache Solr versus Elasticsearch. In Section 7, a conclusion is presented by summarizing the paper's contributions.

## 2. Related works

There are several research applications that employ Apache Solr and Elasticsearch to perform a variety of tasks in big data processing and analytics systems. This section particularly provides articles that compare the technologies Apache Solr and Elasticsearch.

In Oussous and Benjelloun (2022), the authors provide a detailed analysis of full-text search. It provides a comprehensive comparison of search engines, particularly Solr and Elasticsearch, based on relevant publications in the relevant literature. The authors analyzed existing search and indexing technologies using a

variety of factors, including use cases, indexing performance, searching, sharding, and rebalancing, data visualization, and data sources, among others. In this work, the authors examine previous research on full-text search and present a comprehensive technical comparison.

In [Elasticsearch vs. Solr Performance: Round 2 \(2015\)](#), querying and indexing speeds, ease of use, and difficulties between Solr and Elasticsearch are analyzed in terms of configuration forms and architectures. Similar to our study, indexing and search speed were compared for both technologies. Although similar ideas can be reached at some points, the testing environment is different from our working environment.

In [Luburić and Ivanovic \(2016\)](#), the authors examine the common features and differences between Apache Solr and Elasticsearch by comparing them. Luburić and colleagues presented a detailed and comprehensive review by examining other published studies based on the comparison of these two technologies. Similarly, in our study, we presented a comparison of Apache Solr and Elasticsearch based on their capabilities for indexing performance on three machines (see Table 2 for hardware configurations) and we have conducted the search queries through one machine that performed better indexing performance with respect to other two machines.

In [Kılıç and Karabey \(2016\)](#), Apache Lucene, Apache Solr, and Elasticsearch are mentioned based on their working principles. Then, Solr and Elasticsearch are examined independently with regard to capabilities such as full-text searching, advanced filtering, Rest API, and content insertion. In other words, Solr and Elasticsearch are compared in terms of effectiveness, usability, speed, and security, and the advantages and disadvantages of both search engines are outlined. Finally, both technologies are examined in terms of security configurations and controls. A similar aspect of our study is that it compares both technologies in technical terms. In contrast to this article, our study does not compare technology in terms of security.

In [Hansen et al. \(2018\)](#), the memory and time consumption, functionality, and indexing efficiency of the full-text search processes of the search engines Solr and Elasticsearch are compared. By analyzing the outcomes of a series of experiments, the authors demonstrate that Elasticsearch is superior over Solr in terms of index size and indexing time, whereas Solr performs better with large-scale datasets. This paper is the most similar to our study in terms of methodology and testing among the related literature. In contrast to other test environments, ours is based on the most recent versions and capabilities of Apache Solr and Elasticsearch technologies.

In [Voit et al. \(2017\)](#), full-text search technologies, including Apache Solr, Elasticsearch, Sphinx, and Xapian, are compared in terms of indexing, searching, and several technical characteristics. However, it is not an article in which a comparison is made and detailed. The conference work [D.S. \(2016\)](#) mentioned by the authors has been written in Russian. Due to this, it has not been examined in depth.

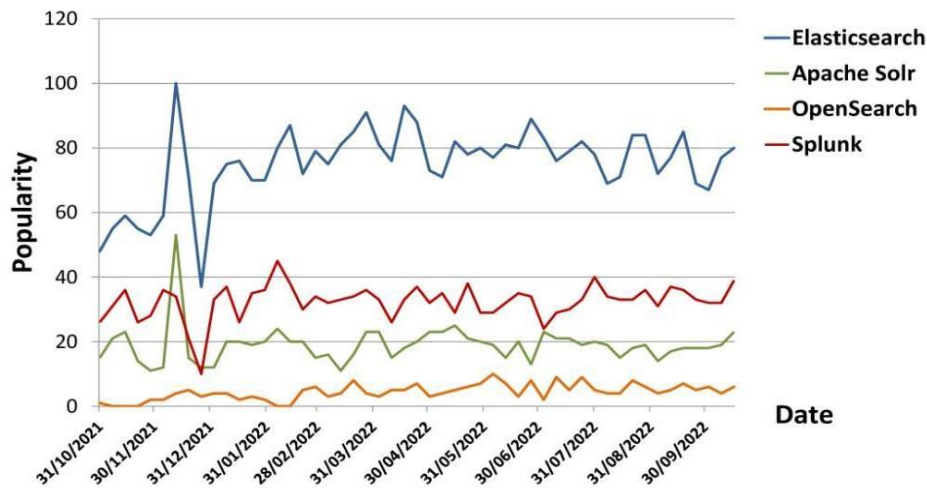
In [Yurtsever et al. \(2022\)](#), the authors developed an application on image texts in Big Data. The best fit-for-purpose technology is sought for a fast and effective search in these image texts. Therefore, a comparison is made between Apache Solr and Elasticsearch technologies. In a similar way to our study, the authors compared the search times of the two technologies in this study.

In [Gonçalves and Sunye \(2020\)](#), the authors provide a benchmark for Apache Solr and Elasticsearch using the DSpace repository platform. They compare the advantages and disadvantages of these two technologies in terms of indexing time, size of RAM used, and index size created. Unlike our work, median precision-at-10 and binary preference metrics are also compared for all search queries in Apache Solr or Elasticsearch.

### 3. Background: technologies for full-text search

This section provides a background on full-text search and related popular technologies. Full-text search is a widely used search method for massive datasets. It appears in numerous areas, such as web search engines, corporate search sites, and various data-intensive systems. In full-text search, there are two major steps: indexing and searching. Initially, a dataset is indexed, and then based on the created indexes, various searching requests are performed. Full-text search applications mostly use inverted indexes. Moreover, Figure 1 shows the popularity of the top four technologies (Apache Solr, Elasticsearch, OpenSearch, and Splunk) in the rankings for search engines by DB-Engines ([DB-Engines, 2022](#)), and Figure 1 is created with data provided

by Google Trends ([Google Trends, 2022](#)). All four technologies are based on the full-text search method. Elasticsearch is at the top of the rankings, while Apache Solr is the third most used search engine.



**Figure 1.** Popularity of full-text search tools over the past year ([Google Trends, 2022](#))

The following subsections provide detailed information about Apache Lucene, Apache Solr, and Elasticsearch technologies.

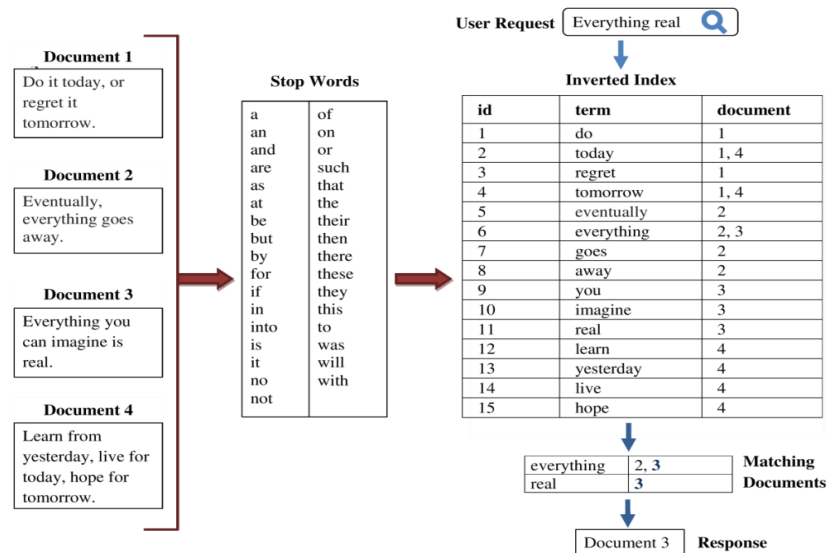
### 3.1. Apache Lucene

Apache Lucene is a Java-based, open-source search library endorsed by the Apache Software Foundation ([Apache Lucene, 2022](#)). It provides robust indexing and search functionality. It is therefore a prominent library in terms of full-text search. Additionally, Apache Lucene has been implemented in a wide range of programming languages, including Python (PyLucene), .Net (DotLucene), and C (CLucene). Furthermore, there are other studies including apps like PyLucene ([Lokoč et al., 2021](#)) and DotLucene ([Lakhara & Mishra, 2017](#)).

Apache Lucene is essential since it forms the basis for the Apache Solr and Elasticsearch search engines. In addition, Java developers may utilize Apache Lucene with ease. Also, the helpful and user-friendly interfaces that Apache Solr and Elasticsearch have created may be viewed as abstractions that facilitate the direct usage of Apache Lucene. During the development of Apache Lucene, system requirements are considered based on the number of documents, the number of hits, the size of the documents, and so on. It can provide scalable and efficient indexing. For instance, it utilizes less RAM with only 1 MB of heap, and the index is about one-third the size of the indexed data. Moreover, the indexing process is considerably optimized.

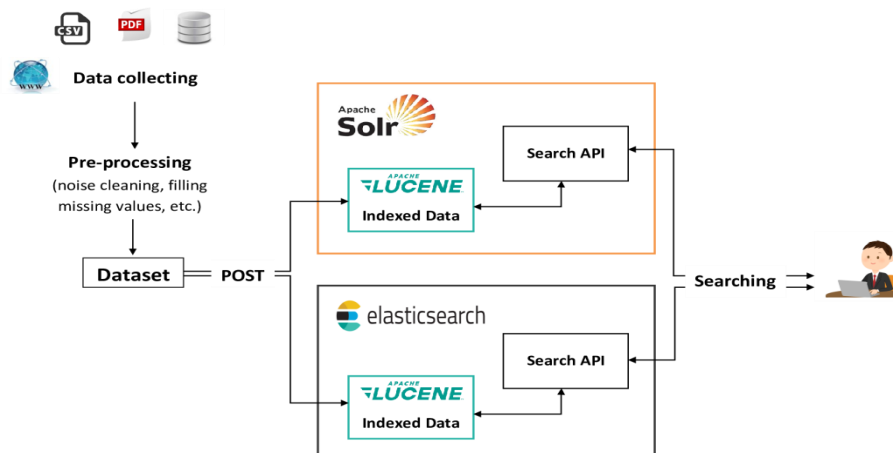
Apache Lucene provides an inverted index mechanism that enables fast and effective access to search engines. In Figure 2, an example of the inverted index mechanism is shown. Documents provide the set of data to be indexed. In other words, the documents can be thought of as each row in a relational database. The expressions in the stop word set are ignored, and the associated documents for each term are added to the inverted index structure. For example, as in Figure 2, the expression “everything real” is searched. For this purpose, matching documents are found for every word searched in the inverted index. In these found documents, the document common to each expression is filtered, and a response is returned. Consequently, document 3 was returned as the appropriate answer.

Examining the Apache Lucene library's search capabilities reveals why it is the foundation of two popular technologies, such as Apache Solr and Elasticsearch. Apache Lucene provides an accurate, powerful, and efficient search, and one of the prominent features ([Apache Lucene, 2022](#)) are providing ranked searching on the principle that best results are returned first; supporting many query types, such as range queries, phrase queries, and proximity queries; capability of searching through any field such as title, name, age; sorting capability by any field and enabling flexible faceting, highlighting, joins and result grouping.



**Figure 2.** Mechanism of the inverted index

Figure 3 demonstrates the relationship between Apache Lucene and the two tools, Apache Solr and Elasticsearch. Prior to indexing a dataset using the aforementioned methods, the dataset is pre-processed by removing noise or filling in missing values, depending on the goals. Each technique then employs Apache Lucene to index datasets. Lastly, different search requests from users are answered by using the search APIs of both technologies on Apache Lucene indexed and stored datasets.



**Figure 3.** Apache Lucene and related technologies

### 3.2. Apache Solr

Apache Solr is an open-source full-text search engine that is built on Apache Lucene. It is designed to perform a high-performance search of large datasets. One of its major advantages is that it provides a convenient interface. Apache Solr works on text-based structured data. The data is basically indexed as JSON, but it can also be used for other formats such as CSV and PDF. Apache Solr provides three options for indexing datasets: through the Solr dashboard, command-line curl, and a client API.

Apache Solr is able to respond rapidly to complex queries with multi-domain and faceted searching. It also has powerful mathematical expressions that collapse and aggregate the results. Undoubtedly, its most important characteristic is that it can be used effectively in large-volume and data-intensive applications. It provides the ability to work in a distributed system across multiple servers when running only one server is a problem on large datasets. Nowadays, some well-known sites that use Apache Solr, such as Macy's, eBay, and Zappo's, are examples of its use in high-volume and data-intensive applications ([Resources Apache Solr, 2022](#)).

Figure 4 provides an example response that is in a key-value JSON format and includes the following responseHeader, and response. The responseHeader key reports the query parameters (params), the processing time performed (QTime), and whether the operation was carried out without error (status). Additionally, the response key provides information about the number (numFound) and content (docs) of documents found following the request.

```
{
  "responseHeader":{
    "status":0,
    "QTime":29,
    "params":{
      "q":"*:*",
      "rows":"1"}},
  "response":{"numFound":64295,"start":0,"numFoundExact":true,"docs":[
    {
      "App":["10 Best Foods for You"],
      "Translated_Review":["nan"],
      "Sentiment":["nan"],
      "Sentiment_Polarity":["nan"],
      "Sentiment_Subjectivity":["nan"],
      "id":"68dfde9f-f28b-434c-ace8-58a673e7c276",
      "_version_":1745872260939382784}
  ]}
}
```

**Figure 4.** An example of Apache Solr response

### 3.3. Elasticsearch

Elasticsearch is a free and open-source JSON-based search and analytics engine written in Java and based on Apache Lucene. Elasticsearch is an effective tool for storing, searching, and analyzing textual, quantitative, geographic, structured, and unstructured data. Elasticsearch, recognized for its extensive and powerful REST APIs, distributed architecture, real-time support, efficiency, flexibility, and scalability, supports 34 languages. Using Elasticsearch, Logstash, and Kibana, it facilitates search, analysis, and visualization.

In addition, Elasticsearch is well-suited for time-sensitive use cases like security analytics and infrastructure monitoring ([Elastic Installation and Upgrade Guide \[8.4\], 2022](#)). Today, it is utilized in projects such as Elasticsearch, Mozilla, Foursquare, and GitHub for content search, data analysis, and queries. Moreover, Figure 5 shows an example of an Elasticsearch response, which contains the time the request was submitted (took), the status of the timeout (timed out), and the quantity and content (hits) of documents discovered.

```
{
  "took" : 37,
  "timed_out" : false,
  "_shards" : {
    "total" : 1,
    "successful" : 1,
    "skipped" : 0,
    "failed" : 0
  },
  "hits" : {
    "total" : {
      "value" : 10000,
      "relation" : "gte"
    },
    "max_score" : 1.0,
    "hits" : [
      {
        "_index" : "apps_reviews",
        "_id" : "GPYMsYMB9ZTBF8qgpnd6",
        "_score" : 1.0,
        "_source" : {
          "App" : "10 Best Foods for You",
          "Sentiment_Polarity" : "nan",
          "Sentiment_Subjectivity" : "nan",
          "Translated_Review" : "nan",
          "Sentiment" : "nan"
        }
      }
    ]
  }
}
```

**Figure 5.** An example of Elasticsearch response

### 3.4. Feature Comparison

This section describes the characteristics of Apache Solr and Elasticsearch. The following terminology is utilized by both systems: field, value, document, node, core/index, collection, and documents/hits. The “field” describes how the data is defined, whereas the value provides the information that corresponds to this definition. It is also possible to describe it as a field-value pair. A “core” represents an Apache Solr logical index. In other words, an instance of Solr. And this term's equivalent in Elasticsearch is “indice”. A document with one or more fields is considered an index unit. A “collection” consists of one or more documents, and each collection has shards or cores that create a single logical index. Additionally, each collection can provide different and flexible settings and schema designs. A “node” describes a single instance of Apache Solr or Elasticsearch that is operating on a physical system or server. Multiple nodes comprise a “cluster”, with each node containing an Apache Solr or Elasticsearch instance. In Apache Solr, the result of a query is referred to as “documents”, but in Elasticsearch it is referred to as “hits”.

Table 1 gives a comparison of Apache Solr and Elasticsearch's general features. The comparison is based on the following characteristics: first release date, built-in functionality, developer, current release, access protocols, supported data formats, and client libraries. Elasticsearch supports a greater variety of programming languages than Solr. Versions 9.0.0 of Apache Solr and 8.4.2 of Elasticsearch were utilized. The Apache Solr 9.X version used requires a minimum of Java 11 and the Elasticsearch version requires a minimum of Java 17. In our experiments, we utilized Java 17.

**Table 1.** Feature comparison of Apache Solr and Elasticsearch

Feature	Apache Solr	Elasticsearch
<b>Release year</b>	2004	2010
<b>Built on</b>	Apache Lucene	Apache Lucene
<b>Developer</b>	Apache software foundation	Elastic
<b>License</b>	Open source	Open source or commercial
<b>Current version</b>	9.0.0	8.4.2
<b>Web admin interface</b>	Built-in	With apps (Kibana, Marvel, etc.)
<b>Access protocols</b>	REST API (used HTTP)	REST API (used HTTP)
<b>Data importing tools</b>	Data import handler (DIH), Apache Tika (PDF, Word, etc.)	Kibana (JSON, CSV, NDJSON)
<b>Supported data formats</b>	CSV, XML, JSON	JSON
<b>Client libraries</b>	Java, Python, Ruby, PHP, C# / .NET, Scala, Perl, JavaScript / JSON, Node.js, Clojure, Go, Rust, R, C++, Lua	B4J, C++, Clojure, ColdFusion (CFML), Erlang, Go, Haskell, Java, JavaScript, Kotlin, Lua, .NET, Perl, PHP, Python, R, Ruby, Rust, Scala, Smalltalk, Swift, Vert.x
<b>Operating system compatibility</b>	All OS includes Java VM	All OS with includes VM

Elasticsearch has three configuration files that are `elasticsearch.yml` (editing properties), `jvm.options` (configuring JVM settings), and `log4j2.properties` (configuring logging). In the same way, there are basically three configuration files in the Solr Core that are `solrconfig.xml` (configures high-level behaviors), `schema.xml/managed-schema.xml` (arrangement of various definitions), and `core.properties` (defines certain characteristics). When these files are examined, the default values and definitions of some properties for a single node can be explained as follows:

- Apache Solr searches for 10 results by default and prints them to the screen.
- Elasticsearch searches for up to 10,000 but only prints 10 data to the window.
- The RAM buffer size in Apache Solr is 100 MB and the maximum number of documents that can be buffered is 1000.

- The minimum buffer size for Elasticsearch is 48 MB.
- The cache size is defined as unlimited in the default settings of Elasticsearch.
- In the default settings of Elasticsearch, the cache size is defined as unlimited. For Apache Solr, it is 512 MB as an initial value.

In addition, Apache Solr's security settings are initially disabled, but Elasticsearch's default is enabled. Therefore, the `xpack.security.enabled`, `xpack.security.enrollment.enabled`, and `xpack.security.http.ssl` properties in `elasticsearch.yml` have been updated to false. Thus, the security settings for both technologies were disabled. In this study, with the purpose of performing a fair comparison, we utilized the default configuration (except security settings) for both technologies.

#### 4. Environment, datasets and queries

This section includes details about our environment setup, settings, datasets, and queries. Each one is explained in detail next.

##### 4.1. Hardware specification and configuration

The indexing and searching operations were performed on three computers with distinct RAM, processors, hard drives, CPU cores, and operating systems. The specifications of the machines utilized in the experiments are presented in Table 2.

**Table 2.** Features of the three machines

Component	Machine 1	Machine 2	Machine 3
Memory (RAM)	32 GB	16 GB	12 GB
Processor (CPU)	Intel(R) Core(TM) i7-12700H 2.50 GHz	Intel(R) Core(TM) i7-9750H 2.60 GHz	Intel(R) Core(TM) i5-4210M 2.60 GHz
Storage	1 TB M.2 3.0 SSD	256 GB M.2 3.0 SSD	256 GB SATA 3.0 SSD
CPU core	14 cores	6 cores	2 cores
Operating system	Win 11	Win 11	Win 10

##### 4.2. Datasets

In this section, we present the three datasets utilized to perform a fair comparison between Apache Solr and Elasticsearch technologies. Also, detailed information about the dimensions and contents of the three datasets are presented next and Table 3 provides an overview of the datasets.

**Table 3.** Features of the three datasets

	Dataset 1	Dataset 2	Dataset 3
Name	Google Play Store Apps (Google Play Store Apps, 2022)	Web of Science (Kowsari et al., 2018)	Dota 2 Matches (Dota 2 Matches, 2022)
Size in MBs	~ 17 MB	~ 75 MB	~ 300 MB
Cardinality	64295	46985	1500000
Data types	Text and numeric App,	Text	Numeric
Fields	Translated_Review, Sentiment, Sentiment_Polarity, Sentiment_Subjectivity	Y, Y2, Y1, Domain, Area, Keywords, Abstract	match_id, player_slot, buybacks, damage, deaths, gold_delta, xp_end, xp_start

The dataset 1 contains user opinions about the applications in the Google Play Store (see Figure 6). There are two files in this dataset. We only used the text-heavy one. The file has five attributes: App (application name), Translated\_Review (user opinion translated from different languages), Sentiment (positive or negative opinion), Sentiment\_Polarity, Sentiment\_Subjectivity.

```
App,Translated_Review,Sentiment,Sentiment_Polarity,Sentiment_Subjectivity
10 Best Foods for You,nan,nan,nan,nan
10 Best Foods for You,"I like eat delicious food. That's I'm cooking food myself, case ""10
Best Foods"" helps lot, also ""Best Before (Shelf Life)""",Positive,1,0.533333333
```

**Figure 6.** A screenshot example from dataset 1

The dataset 2 provides information on 46,985 documents with 134 categories, including seven Web of Science parent categories (see Figure 7).

```
Y1,Y2,Y,Domain,Area,Keywords,Abstract
0,12,12,CS,Symbolic computation, (2+1)-dimensional non-linear optical waves; erbium-doped optical
fibre; symbolic computation; soliton solution; soliton interaction,"(2 + 1)- dimensional non-linear
optical waves through the coherently excited resonant medium doped with the erbium atoms can be
described by a (2 + 1)-dimensional non-linear Schrodinger equation coupled with the self-induced
transparency equations. For such a system, via the Hirota method and symbolic computation, linear
forms, one-, two-and N-soliton solutions are obtained. Asymptotic analysis is conducted and suggests
that the interaction between the two solitons is elastic. Bright solitons are obtained for the fields
E and P, while the dark ones for the field N, with E as the electric field, P as the polarization in
the resonant medium induced by the electric field, and N as the population inversion profile of the
dopant atoms. Head-on interaction between the bidirectional two solitons and overtaking interaction
between the unidirectional two solitons are seen. Influence of the averaged natural frequency. on the
solitons are studied: (1). can affect the velocities of all the solitons; (2) Amplitudes of the
solitons for the fields P and N increase with. decreasing, and decrease with. increasing; (3) With.
decreasing, for the fields P and N, one-peak one soliton turns into the two-peak one, as well as
interaction type changes from the interaction between two one-peak ones to that between a one-peak
one and a two-peak one; (4) For the field E, influence of. on the solitons cannot be found. The
results of this paper might be of potential applications in the design of optical communication
systems which can produce the bright and dark solitons simultaneously."
```

**Figure 7.** A screenshot example from dataset 2

Following are features of the dataset 2 as shown in Figure 7: Y1 (target value), Y2 (target value of level one-parent label), Y (target value of level one-child label), Domain (including seven primary domains: computer science, electrical engineering, psychology, mechanical engineering, civil engineering, medical science, and biochemistry), Area (subdomain), Keywords (papers' keywords), Abstract (include text sequences of published papers).

The dataset 3 includes 50000 ranked ladder matches from the Dota 2 data dump generated by Opendota (see Figure 8). There are 19 files in the dataset, but only teamfights\_players.csv is used in this study. The file has eight properties: match\_id (individual player ids), player\_slot (link to other files in the dataset), buybacks, damage, deaths, gold\_delta (status of winning or losing gold), xp\_end (experience at the end of the game), xp\_start (gain experience early in the game).

```
match_id,player_slot,buybacks,damage,deaths,gold_delta,xp_end,xp_start
0,0,0,105,0,173,536,314
0,1,0,566,1,0,1583,1418
```

**Figure 8.** A screenshot example from dataset 3

### 4.3. Queries

In this section, the indexing and search queries that will be utilized in the study are explained. After explaining the file structures employed by Apache Solr and Elasticsearch, the indexing queries are examined. Finally, search queries were explained in detail. Moreover, there are restrictions on the kind of files that may be indexed by Elasticsearch indexing queries. It is possible to index just New Delimited JSON (ND-JSON) files using curl. There is no such restriction with Apache Solr; JSON, CSV, and XML files may also be indexed using a curl query. However, in order to give a more accurate comparison with Elasticsearch, it was determined that Apache Solr would also employ a JSON file. Figure 9 provides a simple two-document JSON file showing the general structure of JSON files to be indexed in Apache Solr.



```
[
  {
    "App": "10 Best Foods for You",
    "Translated_Review": "nan",
    "Sentiment": "nan",
    "Sentiment_Polarity": "nan",
    "Sentiment_Subjectivity": "nan"
  },
  {
    "App": "10 Best Foods for You",
    "Translated_Review": "I like eat delicious food. That's I'm cooking food myself, case '10 Best Foods' helps lot, also 'Best Before (Shelf Life)'",
    "Sentiment": "Positive",
    "Sentiment_Polarity": "1",
    "Sentiment_Subjectivity": "0.533333333"
  }
]
```

**Figure 9.** A simple example for JSON

Figure 10 depicts the two-document structure of Elasticsearch-generated ND-JSON files. In contrast to the JSON file, the content does not begin and stop with [ ] brackets. Additionally, lines containing index information ({"index": {...}}) must be included in each document. ND-JSON is a collection of JSON items that are separated by "\n". Creating ND-JSON also requires cost and time.

```
{"index": {"_index": "apps_reviews", "_id": "1"}}
{"App": "10 Best Foods for You", "Translated_Review": "nan", "Sentiment": "nan",
"Sentiment_Polarity": "nan", "Sentiment_Subjectivity": "nan"}
{"index": {"_index": "apps_reviews", "_id": "2"}}
{"App": "10 Best Foods for You", "Translated_Review": "I like eat delicious food. That's I'm
cooking food myself, case '10 Best Foods' helps lot, also 'Best Before (Shelf Life)'",
"Sentiment": "Positive", "Sentiment_Polarity": "1", "Sentiment_Subjectivity": "0.533333333"}
```

**Figure 10.** A simple example for ND-JSON

Apache Solr runs on port 8983 on the local computer, and Elasticsearch runs on port 9200. As seen in Table 4, the general structures of indexing queries for both technologies are given. In Apache Solr, the core name for the dataset to be processed is written in the **core\_name** field, while in Elasticsearch it is written in the **indice\_name** field. The core/indice names used in the query structure are apps\_reviews for dataset 1, wos\_papers for dataset 2, and teamfights\_players for dataset 3. Subsequently, for the files to be indexed in both Apache Solr and Elasticsearch, a file named example was created in their respective directories. In the file posted for indexing, the json file for Apache Solr is named with core\_name while in Elasticsearch the nd-json file is generated using **nd\_** per indice\_name. For example, the curl query for dataset 1 will be core/indice name apps\_reviews, while the file to be posted to Apache Solr will be apps\_reviews.json, and the file to be posted to Elasticsearch will be nd\_apps\_reviews.json. In addition, the indexing query performs the indexing process by specifying the type of the query as POST and showing the file path.

**Table 4.** General structures for indexing queries

Technology	Indexing query
Apache Solr	curl -H "Content-Type: application/json" -XPOST http://localhost:8983/solr/ <b>core_name</b> /update -T "C:/solr- 9.0.0/example/ <b>core_name</b> .json"
Elasticsearch	curl -H "Content-Type: application/x-ndjson" -XPOST http://localhost:9200/_bulk -- data-binary @C:/elasticsearch-8.4.2/example/nd_ <b>indice_name</b> .json

In Table 5, a general query format for Apache Solr and Elasticsearch search operations is provided. The query content element is shared by both technologies. Elasticsearch also uses the Kibana Query Language (KQL) format, but the Lucene query language, which is supported by both platforms, is utilized to monitor search times more accurately. In addition, the Elasticsearch query's **track\_total\_hits** option, which is false by default, was changed to true. Because Apache Solr detects all results during a search, Elasticsearch does not focus on the remaining data once it has found a particular threshold. As with Apache Solr, setting the **track\_total\_hits**

argument is essential for Elasticsearch to locate all hits. The default value of the **track\_total\_hits** option in Elasticsearch is 10,000.

**Table 5.** General structures of the searching queries

Technology	Searching query
Apache Solr	http://localhost:8983/solr/ <b>core_name</b> /select?q= <b>query content</b>
Elasticsearch	http://localhost:9200/ <b>indice_name</b> /_search?q= <b>query content</b> &track_total_hits=true

Table 6 demonstrates that a total of 10 queries with varying levels of complexity were executed: Q1-Q4 applied for the dataset 1, Q5-Q7 prepared for the dataset, and Q8-Q10 applied for the dataset 3. Each data set's queries were constructed in a manner that increases query complexity. AND and OR are utilized to query several fields. In the Lucene Query Language, the symbol \* indicates that the word might be an expression at the beginning or end, whereas the expression [number1 TO number2] specifies values between the numbers number1 and number2.

**Table 6.** Searching queries used for the three datasets

Dataset	Query	Purpose	query content
Dataset 1	Q1	List Translated_Review values equal to 'nan'	Translated_Review:nan
	Q2	List Sentiment_Subjectivity value between 0.1 and 0.746	Sentiment_Subjectivity:[0.1 TO 0.746]
	Q3	List App value equal to 'Food' and Sentiment value equal to 'Positive' and Translated_Review value equal to 'Full' or 'great' or 'good' or 'enjoy'	App:*Food* AND Sentiment:Positive AND Translated_Review:*Full* OR Translated_Review:*great* OR Translated_Review:*good* OR Translated_Review:*enjoy*
	Q4	List Sentiment_Subjectivity value between 0.79 and 0.82 and Sentiment_Polarity value equal to 0.716666667	Sentiment_Subjectivity:[0.79 TO 0.82] AND Sentiment_Polarity:0.716666667
Dataset 2	Q5	List Keywords value equal to 'Parkinson'	Keywords:*Parkinson*
	Q6	List Keywords value equal to 'algorithm' or Abstract value equal to 'algorithm'	Keywords:*algorithm* OR Abstract:*algorithm*
	Q7	List Keywords value equal to 'analysis' or Domain value equal to 'CS' or Abstract value equal to 'system'	Keywords:analysis OR Domain:*CS* OR Abstract:system
Dataset 3	Q8	List xp_end value equal to 32417	xp_end:32417
	Q9	List buybacks value equal to 1 and deaths value equal to 1	buybacks:1 AND deaths:1
	Q10	List buybacks value equal to 0 and deaths value equal to 1 and damage value equal to 0 or gold_delta value 0	buybacks:0 AND deaths:1 AND damage:0 OR gold_delta:0

## 5. Results and evaluation

This section compares and contrasts Apache Solr with Elasticsearch's indexing and search capabilities. Then, every aspect of the comparison is described in depth.

## 5.1. Indexing

In this section, a comparison of Apache Solr and Elasticsearch regarding indexing is performed on three datasets utilizing three different hardware configurations (see Table 2). First, the difference in indexing times for the default heap size is measured. Then, the indexing times for different file sizes on the most efficient machine (Machine 1) are compared based on and different heap sizes in GB (6, 8, 12, 16, 20, and 24) as shown in Table 8 to learn more about how heap size affects indexing.

As shown in Table 4, indexing performance is assessed using curl requests on each system via the Windows command line. In Figure 11, the output of a query run on command prompt is shown. To calculate the indexing time, the timecmd command is added at the beginning of the Apache Solr and Elasticsearch curl queries given in Table 4. This command refers to a batch file that calculates the runtime of curl queries. Command took is the time calculated by the timecmd batch script. In this study, command took times are considered.

```
C:\>timecmd curl -H "Content-Type: application/json" -XPOST http://localhost:8983/solr/apps_reviews/update -T "C:/solr-9.0.0/example/apps_reviews.json"
{
  "responseHeader":{
    "status":0,
    "QTime":5030}}
command took 0:0:5.13 (5.13s total)

C:\>
```

**Figure 11.** A curl query submitted in the command prompt

After the indexing queries given in Table 4 that have been run for the three datasets, Figure 12 presents information (health status, number of replicas, count of documents) about the three indices and indices created in Elasticsearch. This is a screenshot taken using Kibana. Likewise, Figure 13 shows the cores created in Apache Solr and some details (the paths where the core is created and the data is found, the number of documents, the core's active status, log dates).

Name	Health	Status	Primaries	Replicas	Docs count
apps_reviews	● yellow	open	1	1	64295
teamfights_players	● yellow	open	1	1	1500000
wos_papers	● yellow	open	1	1	46985

**Figure 12.** Indices created in Elasticsearch

apps_reviews	teamfights_players	wos_papers	Core
			startTime: less than a minute ago instanceDir: C:\solr-9.0.0\server\solr\apps_reviews dataDir: C:\solr-9.0.0\server\solr\apps_reviews\data\
			<b>Index</b> lastModified: a day ago version: 22 numDocs: 64295 maxDoc: 64295 deletedDocs: 0 current: ✓

**Figure 13.** Cores created in Apache Solr

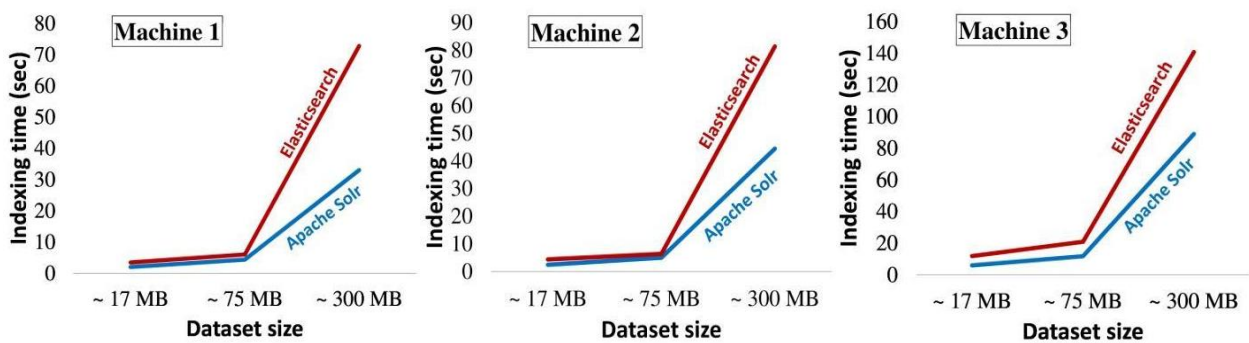
Table 7, on the default heap size, displays the indexing times for Apache Solr and Elasticsearch based on the size of the datasets. Apache Solr's heap size is 512 MB by default, but Elasticsearch's heap size is half of its RAM capacity. In addition, for each curl query, each indexing request was executed five times, and the average

values were computed and averaged. Before each indexing attempt, Apache Solr and Elasticsearch Tools indexes and data are removed and parameters are reset to default.

**Table 7.** Indexing times (sec) for default heap size

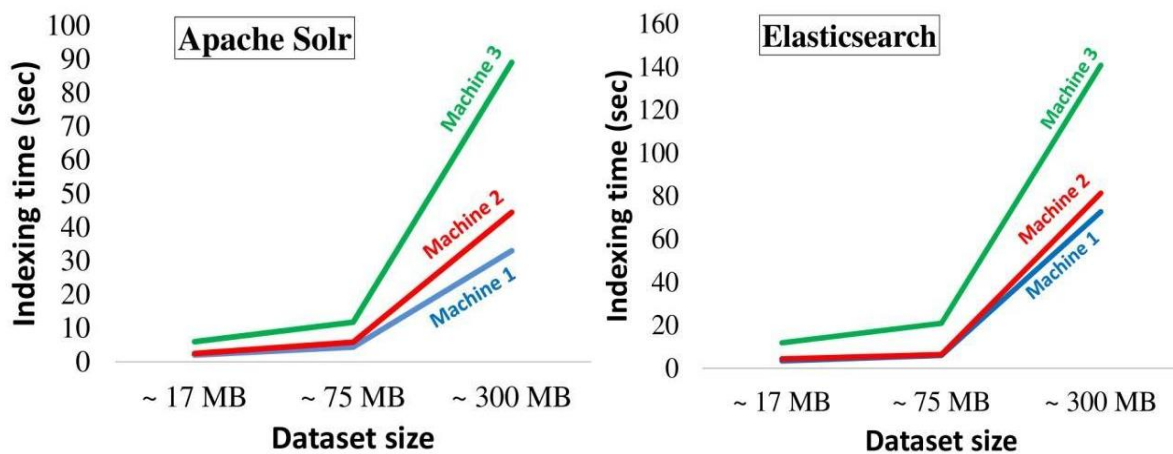
Dataset size	Machine 1		Machine 2		Machine 3	
	Apache Solr	Elasticsearch	Apache Solr	Elasticsearch	Apache Solr	Elasticsearch
~17 MB	2.004	3.445	2.46	4.386	5.968	11.852
~75 MB	4.36	6	5.818	6.382	11.758	20.922
~300 MB	33.012	72.752	44.426	81.37	89.028	140.788

Figure 14 illustrates a graph of the average indexing times listed in Table 7. Apache Solr outperforms Elasticsearch on used computers in terms of average indexing speeds across three distinct datasets. As seen in Figure 14, indexing time increases as dataset size grows.



**Figure 14.** Comparison of indexing times (sec) regarding different machines

Figure 15 illustrates the relationship between the indexing times on various computers and the heap size for Apache Solr and Elasticsearch technologies. Machine 1 is faster at indexing than the other two computers since it has more accessible system resources (see Table 2). Therefore, powerful computers' capabilities are advantageous for indexing. However, it would be misleading to assert that the most efficient machine is necessarily the best. By adjusting the heap size, the indexing performance of the two tools is now similar in the continuing of this study.



**Figure 15.** Indexing performance of both technologies on different machines

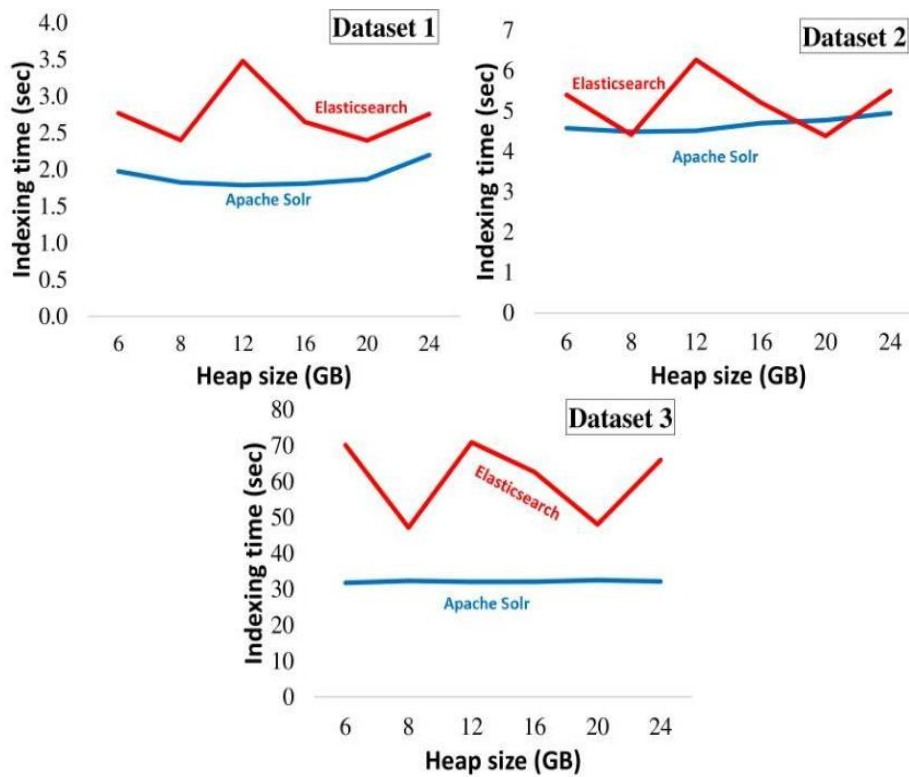
Table 8 illustrates the indexing times for six different heap sizes on Machine 1, which has the best computer resources. These are increment values that were picked at random. The objective is to compare the performance

of both tools based on the size of the heap. In this context, the reindexing times for the three datasets for the two technologies are measured.

**Table 8.** A comparison of indexing times (sec) based on heap size

Heap size	Apache Solr			Elasticsearch		
	Dataset 1	Dataset 2	Dataset 3	Dataset 1	Dataset 2	Dataset 3
6 GB	1.976	4.574	31.788	2.768	5.398	70.106
8 GB	1.824	4.486	32.32	2.4	4.41	47.148
12 GB	1.788	4.51	32.072	3.478	6.266	70.908
16 GB	1.808	4.698	32.104	2.648	5.208	62.638
20 GB	1.868	4.772	32.528	2.396	4.378	48.038
24 GB	2.198	4.942	32.176	2.756	5.494	65.986

In Figure 16, the two technologies' indexing performances are compared regarding the size of the heap. Considering the performance of Apache Solr, it is seen that it is not as dependent on machine features as Elasticsearch. Increasing the heap size does not seem to noticeably affect the indexing performance of Apache Solr. In contrast, the indexing performance has changed for Elasticsearch due to an increase in heap size. Moreover, the performance of Elasticsearch is not linear in terms of the linearly raised heap size. It shows better results at 8 GB and 20 GB. In this situation, too large a heap size does not always give the best performance. In this case, there is no ideal or fixed size for manually setting the heap size. Developers need to experiment and find a way that fits their work environment and the purpose of the project. Moreover, according to experts, heap size should not exceed 50% of total memory. They also recommend keeping the heap size at its default for Elasticsearch. Furthermore, while indexing, Elasticsearch prints the data to the command screen; this situation has a slight negative impact on search time.

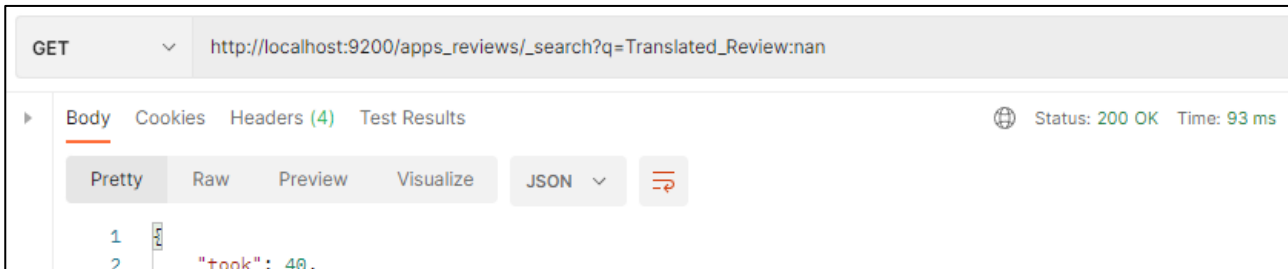


**Figure 16.** Change of indexing time according to machine heap size

As a result, according to our results, Apache Solr performs better for indexing than Elasticsearch. We can also say that, when it comes to indexing, hardware resources are more important for Elasticsearch than for Apache Solr.

## 5.2. Searching

In this study, Postman, an API platform for creating, constructing, and testing APIs, is utilized to monitor search times. The queries (see Table 6) are provided as a request, and responses are retrieved from Postman. It took ten attempts for each query to be answered, and the mean values of all were added to the tables. In addition, Figure 17 shows the Postman interface and a submitted search request. URL requests were performed using the GET method. Time found on the right side of the screenshot shows the search times used in this study.



**Figure 17.** A screenshot of the Postman interface

Table 9 displays the average search time for each query and the number of records obtained for the Apache Solr and Elasticsearch technologies when each query is submitted ten times. Pseudocode for a query is as follows:

1. Create query string (based on user requests)
2. Submit query request via Postman
3. Get searching time
4. Receive results

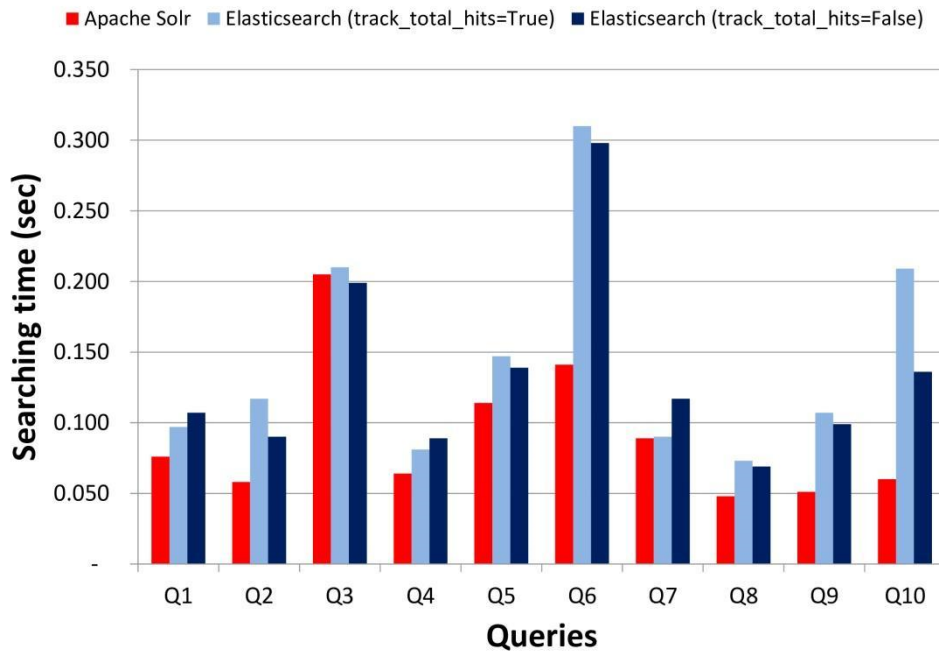
Changing the default value of the `track_total_hits` parameter in Elasticsearch reveals differences in search time. The field type specifies the data type of each query field. During the search, the highest number of received data points was 55263 in Q10. The track total hits level is therefore set to 60000, which accounts for the quantity of data points returned by all queries. This threshold was set to 60000 in our example for testing purposes; however, this quantity may be altered based on the datasets employed and expected outcomes.

**Table 9.** Comparison of searching times (sec)

Query	Apache Solr	Elasticsearch / track_total_hits		Field types	Result (count)
		= True	= False		
Q1	0.076	0.097	0.107	Text	26863
Q2	0.058	0.117	0.09	Numeric	26866
Q3	0.205	0.21	0.199	Text	6
Q4	0.064	0.081	0.089	Numeric	6
Q5	0.114	0.147	0.139	Text	294
Q6	0.141	0.31	0.298	Text	3955
Q7	0.089	0.09	0.117	Text	14926
Q8	0.048	0.073	0.069	Numeric	237
Q9	0.051	0.107	0.099	Numeric	26089
Q10	0.06	0.209	0.136	Numeric	55263

The searching times shown in Table 9 indicate that total hits were determined for both technologies, but only 10 values were printed. Thus, a fair comparison is achieved. While Q3 and Q7 queries have approximately the same search time for both technologies, Q6 and Q10 queries have a significant difference. As a result, based on our datasets and the queries, overall, Apache Solr performs better than Elasticsearch in demanding searching

jobs. Moreover, as shown in Table 9, despite the fact that the returned results for Q1 and Q2 are many times greater than the query Q3, the retrieval times for Q1 and Q2 are faster than Q3. The fact that Q3 is a more complex query (see Table 6) causes the search time to increase, while it is seen that the number of results and search times are not directly proportional. In another case, Q3 and Q4 return 6 results, but for both Apache Solr and Elasticsearch, Q4 has a better search time than Q3. When both queries given in Table 6 are examined in the same dataset, the fields in Q3 have text content, while the fields in Q4 have numerical data. Thus, in this case, the search time has also been significantly impacted by the data and field types. Figure 18 provides the graphical representation of the query results presented in Table 9.



**Figure 18.** Results of searching times regarding to prepared queries

In Figure 18, if the track\_total\_hits parameter is false in Elasticsearch, it causes a decrease in the search time, except for the queries Q1, Q4, and Q7. A more detailed search for queries Q1, Q4, and Q7 may allow for better results, or increasing the number of trials for each query in this study may improve the search time for these three queries. As a result, setting Elasticsearch's track\_total\_hits parameter to true or false also significantly impacts the search speed. To sum up, despite these two situations, Apache Solr overall performs better than Elasticsearch in terms of searching times.

## 6. Discussion and future work

In our investigation, we performed several comparisons between Apache Solr and Elasticsearch. In terms of technical features, both technologies are significant and lead in terms of full-text search. Then, we compared the indexing and search speeds of Apache Solr and Elasticsearch based on the queries and indexing times described in Section 5. In terms of indexing speeds, according to our findings, Solr is superior to Elasticsearch. In addition, we observed that improving the hardware capabilities of the system utilized for Elasticsearch is more critical. Based on a comparison of search times, Apache Solr performs better than Elasticsearch. Moreover, the fact that both solutions are built on Apache Lucene demonstrates that they share several robust characteristics.

Apache Solr is a project that has been established by a strong community of Apache Software Foundation. This brought features such as faceting search, feature filtering, real-time analytics to Apache Solr in this development process. Apache Solr is also more advantageous than Elasticsearch, which was released four years after Apache Solr, when it comes to project development based on user feedback. Because it provided an opportunity to take the project to a more mature stage. Nowadays, both technologies have reached a certain level. This study demonstrates that Apache Solr is more pro-user in terms of usage and search functionality. Because it has developed into a simpler and clearer structure. Moreover, Apache Solr seems to be good at both

indexing and searching. While hardware specifications are important for Elasticsearch, Apache Solr performs better with the same hardware specifications. This indicates that Apache Solr is more stable.

Furthermore, we present insight comparisons between our work and previous studies on the performance comparison of Apache Solr and Elasticsearch. Table 10 contains comparison parameters and insight for experiences similar to this study. While studies [Yurtsever et al. \(2022\)](#) and [D.S. \(2016\)](#) have the same opinion as our study for indexing performance, studies [Elasticsearch vs. Solr Performance: Round 2 \(2015\)](#), [Hansen et al. \(2018\)](#), and [Gonçalves and Sunye \(2020\)](#) indicate that Elasticsearch has a better indexing time in terms of indexing performance. Considering the searching times, Apache Solr is better in terms of queries per second in [Elasticsearch vs. Solr Performance: Round 2 \(2015\)](#). On the other hand, according to [Hansen et al. \(2018\)](#), and [D.S. \(2016\)](#), Elasticsearch is better at searching. At the same time, we also observed similar results as in [Hansen et al. \(2018\)](#) about Elasticsearch's use of virtual memory. In addition, some of the datasets in the related literature were not accessible, and some were not appropriate for this study. Therefore, the numerical values could not be compared. However, future studies may use the datasets we used in this study.

**Table 10.** Comparison of regarding related works

Paper	Comparison criteria	Compared technologies	Insight
<a href="#">Elasticsearch vs. Solr Performance: Round 2 (2015)</a>	Search test with indexing, search test with indexing load, queries per second (QPS) test	Apache Solr vs. Elasticsearch	Regarding indexing time, Elasticsearch is good on small data whereas Solr is better on large data. Elasticsearch is good to test with indexing load. Solr is good on the QPS test.
<a href="#">Hansen et al. (2018)</a>	Indexer and searcher performance, use virtual machine	Apache Solr vs. Elasticsearch	Elasticsearch is better for index size and indexing time. In search, first run Elasticsearch is good, second run Solr is better. Elasticsearch uses more virtual memory.
<a href="#">Yurtsever et al. (2022)</a>	Insert times	Apache Solr vs. Elasticsearch	Apache Solr is faster and better.
<a href="#">D.S. (2016)</a>	Indexing speed, search speed	Apache Solr, Elasticsearch, Sphinx, Xapian	Apache Solr is good for indexing, while Elasticsearch is good for searching.
<a href="#">Gonçalves and Sunye (2020)</a>	Indexing time, RAM usage, index disk space	Apache Solr vs. Elasticsearch	Generally, Elasticsearch performs better than Apache Solr.

In this study, we evaluated the performance of Apache Solr and Elasticsearch on individual machines. In the future, we want to do this work in a distributed environment to develop multi-node Apache Solr and Elasticsearch in order to evaluate the indexing and searching performance of both technologies in a distributed environment in order to determine the various aspects of this study. In this way, we will clearly see how the distributed indexing performance and the search process on these distributed data compare to the performance in a single node.

## 7. Conclusion

In conclusion, we provide a comprehensive report on full-text search methods used for processing and analyzing large amounts of data. Initially, the features and technical comparison of Apache Solr and Elasticsearch technologies are provided in depth. Second, a comprehensive and fair comparison of both systems is conducted based on indexing times and carefully designed queries on three separate textual and numeric datasets. Furthermore, a detailed related work is provided to present similarities, differences, and our insights on how to use Apache Solr and Elasticsearch technologies in terms of underlying hardware. According to our results, in general Apache Solr performs better than Elasticsearch. We suggest using Apache Solr with



computers that have low hardware resources. Our work offers researchers with background information on full-text search methods, and our findings shed light on selecting the optimal alternative for full-text searching activities in terms of accessible hardware sources, data type, and data size.

### Author contribution

Ayşenur Deniz has worked on all stages of writing, coding, making figures, studying related works, collecting querying results, revising, and comparing technologies on different machines. Muhammed Mehdi Elömer has worked at writing, studying related works, and collecting querying results. Ahmet Arif Aydin has worked on entire stages of writing, editing, revising, and consulting with co-authors.

### Declaration of ethical code

The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee approval or special legal permission.

### Conflicts of interest

The authors declare that they do not have any conflict of interest.

### References

- Anderson, K. M., Aydin, A. A., Barrenechea, M., Cardenas, A., Hakeem, M., & Jambi, S. (2015). Design challenges/solutions for environments supporting the analysis of social media data in crisis informatics research. *2015 48th Hawaii International Conference on System Sciences, 2015-March*, 163–172. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2015.29>
- Apache Lucene*. (2022). <https://lucene.apache.org/>
- Barrenechea, M., Jambi, S., Aydin, A. A., Hakeem, M., & Anderson, K. M. (2017). Getting the query right for crisis informatics design issues for web-based analysis environments. *Journal of Web Engineering*, *16*(5), 399–432. <https://journals.riverpublishers.com/index.php/JWE/article/view/3269/2153>
- Bellini, P., Bugli, F., Nesi, P., Pantaleo, G., Paolucci, M., & Zaza, I. (2019). Data flow management and visual analytic for big data smart city/IOT. *Proceedings - 2019 IEEE SmartWorld, Ubiquitous Intelligence and Computing, Advanced and Trusted Computing, Scalable Computing and Communications, Internet of People and Smart City Innovation, SmartWorld/UIC/ATC/SCALCOM/IOP/SCI 2019*, 1529–1536. <https://doi.org/10.1109/SmartWorld-UIC-ATC-SCALCOM-IOP-SCI.2019.00276>
- DB-Engines*. (2022). <https://db-engines.com/en/>
- Domo Company. (2022). *Data Never Sleeps 9.0*. <https://www.domo.com/learn/infographic/data-never-sleeps-9>
- Dota 2 Matches*. (2022). <https://www.kaggle.com/datasets/devinanzelmo/dota-2-matches>
- D.S., S. (2016). A quick search on the projects with a high loads and a large amount of data. *Modern Technologies: Current Issues, Achievements and Innovations — Collection of Articles III International Scientific Conference / under the General Editorship of G. Yu Gulyaev — Penza MCNS « Science and Education »*, 23–32.
- Elastic Installation and Upgrade Guide [8.4]*. (2022). <https://www.elastic.co/guide/en/elastic-stack/8.4/index.html>
- Elasticsearch vs. Solr Performance: Round 2*. (2015). <https://www.flax.co.uk/blog/2015/12/02/elasticsearch-vs-solr-performance-round-2/>
- Gonçalves, A. A. S., & Sunye, M. S. (2020). Comparison of search servers for use with digital repositories. *ICEIS 2020 - Proceedings of the 22nd International Conference on Enterprise Information Systems, 1*, 256–260. <https://doi.org/10.5220/0009577102560260>
- Google Play Store Apps*. (2022). <https://www.kaggle.com/datasets/lava18/google-play-store-apps>

- Google Trends. (2022). <https://trends.google.com/trends/>
- Halevi, G., & Moed, H. (2012). The evolution of big data as a research and scientific topic: overview of the literature. *Research Trends*, 30(36), 3–6.
- Hansen, J., Porter, K., Shalaginov, A., & Franke, K. (2018). Comparing open source search engine functionality, efficiency and effectiveness with respect to digital forensic search. *NISK 2018 - 11th Norwegian Information Security Conference*, 108-121.
- Kılıç, U., & Karabey, I. (2016). Comparison of solr and elasticsearch among popular full-text search engines and their security analysis. *UBMK'16 - International Conference on Computer Science and Engineering, 2016 October*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24563.32803>
- Kowsari, K., Brown, D., Heidarysafa, M., Meimandi, K. J., Gerber, M., & Barnes, L. (2018). Web of science dataset. 6. *Mendeley Data*. <https://doi.org/10.17632/9RW3VKCFY4.6>
- Lakhara, S., & Mishra, N. (2017). Desktop full-text searching based on Lucene: a review. *2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI)*, 2434–2438. <https://doi.org/10.1109/ICPCSI.2017.8392154>
- Lashkaripour, Z. (2020). The era of big data: a thorough inspection in the building blocks of future generation data management. *International Journal of Scientific and Technology Research*, 9, 321–330.
- Lokoč, J., Veselý, P., Mejzlík, F., Kovalčík, G., Souček, T., Rossetto, L., Schoeffmann, K., Bailer, W., Gurrin, C., Sauter, L., Song, J., Vrochidis, S., Wu, J., & Jónsson, B. Þór. (2021). Is the reign of interactive search eternal? findings from the video browser showdown 2020. *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications*, 17(3), 1–26. <https://doi.org/10.1145/3445031>
- Luburić, N., & Ivanovic, D. (2016). Comparing Apache Solr and Elasticsearch search servers. *6th International Conference on Information Society and Technology - ICIST 2016*. [http://www.eventiotic.com/eventiotic/files/Papers/URL/icist2016\\_54.pdf](http://www.eventiotic.com/eventiotic/files/Papers/URL/icist2016_54.pdf)
- Oussous, A., & Benjelloun, F. (2022). A comparative study of different search and indexing tools for big data. *Jordanian Journal of Computers and Information Technology*, 8(1), 1. <https://doi.org/10.5455/jjcit.71-1637097759>
- Rao, T. R., Mitra, P., Bhatt, R., & Goswami, A. (2018). The big data system, components, tools, and technologies: a survey. *Knowledge and Information Systems*, 60(3), 1165. <https://doi.org/10.1007/s10115-018-1248-0>
- Resources Apache Solr*. (2022). <https://solr.apache.org/resources.html>
- Voit, A., Stankus, A., Magomedov, S., & Ivanova, I. (2017). Big data processing for full-text search and visualization with elasticsearch. *IJACSA - International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 8(12). [www.ijacsa.thesai.org](http://www.ijacsa.thesai.org)
- Wang, J.-F., Wang, X.-F., & Li, H. (2022). Design of multimedia distance teaching auxiliary system based on MOOC platform. *ICMTMA 2022 - 14th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, 1179–1186. <https://doi.org/10.1109/ICMTMA54903.2022.00237>
- Y. Aldailamy, A., Abdul Hamid, N. A. W., & Abdulkarem, M. (2018). Distributed indexing: performance analysis of Solr, Terrier and Katta information retrievals. *Malaysian Journal of Computer Science*, 87–104. <https://doi.org/10.22452/mjcs.sp2018no1.7>
- Yurtsever, M. M. E., Özcan, M., Taruz, Z., Eken, S., & Sayar, A. (2022). Figure search by text in large scale digital document collections. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 34(1). <https://doi.org/10.1002/CPE.6529>

## Kırşehir ili nohut üretim alanlarında antraknoz (*Ascochyta rabiei* (Pass) Labr.) hastalığının yaygınlık ve bulunma oranlarının belirlenmesi

*Determination of the prevalence and presence rates of Ascochyta blight (Ascochyta rabiei (Pass) Labr.) in chickpea production areas in Kırşehir province*

Yusuf BAYAR , Melih YILAR , Kadir AKAN\* 

Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü, 40100, Kırşehir

• Geliş tarihi / Received: 08.05.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 13.03.2023

### Öz

Kırşehir ili Türkiye'de, nohut (*Cicer arietinum* L.) ekiliş alanı ve üretimi olarak değerlendirildiğinde ilk sıralarda yer almaktadır. Nohut bitkisinde üretimi ve kaliteyi sınırlayan abiyotik ve biyotik birçok etmenin varlığı bilinmekle birlikte, en önemli biyotik etmenlerden birisi antraknoz hastalığı (Etmen: *Ascochyta rabiei* (Pass) Labr.)'dir. Epidemiy için uygun koşulların oluştuğu yetiştiricilik sezonlarında %100'e varan ürün kayıpları meydana gelmektedir. Oluşan kayıpların engellenebilmesi için hastalığın kontrolünde yoğun şekilde fungusit uygulamaları yapılmaktadır. Kimyasal kullanımına karar verilmesinde hastalığın tarlada bulunma oranı ve yaygınlığının belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu çalışma, 2021 yılı Kırşehir ili nohut üretim alanlarında nohut antraknozu hastalığının bulunma oranı ve yaygınlığını tespit etmek amacıyla Akçakent, Akpınar, Boztepe, Çiçekdağı, Kaman, Merkez, Mucur ilçelerinde yürütülmüştür. Survey çalışmasında, 57 farklı noktada bulunan 8.425 da üretim alanı incelenmiştir. Survey çalışmasında 12.600 bitki incelenmiş olup sadece 51 adet bulaşık bitki belirlenmiştir. Toplanan örneklerden yapılan izolasyonlar sonucu elde edilen izolatların koloni morfolojisi ve konidilerin özellikleri dikkate alınarak etmenin varlığı doğrulanmıştır. Ayrıca, survey yapılan nohut ekim alanlarında hastalık etmeninin yaygınlığı (%) ve hastalık oranı (%) da hesaplanmıştır. Survey çalışması sonucu il geneli hastalık yaygınlık oranı %29.8 olarak ve hastalık oranı %0.40 olarak hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda, Kırşehir nohut üretim alanlarında antraknoz hastalığı değişen düzeylerde gözlenmekle birlikte iklime bağlı olarak 2021 üretim sezonunda hastalığın bulunma oranı ve yaygınlığının sınırlı olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Antraknoz hastalığı (*Ascochyta rabiei*), Bulunma oranı, Kırşehir, Nohut (*Cicer arietinum*), Survey, Yaygınlık oranı

### Abstract

Kırşehir is in the first rank in Türkiye in terms of cultivation area and production of chickpea (*Cicer arietinum* L.). Although many abiotic and biotic factors are known to limit production and quality in chickpea plant, one of the most important biotic factors is *Ascochyta blight* (caused by: *Ascochyta rabiei* (Pass) Labr.). Product losses of up to 100% occur during production seasons when conditions are suitable for epidemics. In order to prevent these losses, fungicide applications are made intensively to prevent disease of *Ascochyta blight*. It is important to determine the incidence and prevalence of *Ascochyta blight* in the field in deciding on which chemicals are needed to be used. This study was conducted in Akçakent, Akpınar, Boztepe, Çiçekdağı, Kaman, Merkez, Mucur districts to determine the incidence and prevalence of *Ascochyta blight* in the chickpea fields of Kırşehir province in 2021. In the survey study, 8,425 da production areas located at 57 different points were examined. In the survey study, 12,600 plants were examined and only 51 infected plants were determined. The presence of factor was confirmed by considering the colony morphology of the isolates obtained as a result of the isolations made from the collected samples and the characteristics of conidia. In addition, the prevalence (%) and *Ascochyta blight* rate (%) in the surveyed chickpea cultivation areas were, also, calculated. Results showed that, the location-wide *Ascochyta blight* prevalence rate was as 29.8% and *Ascochyta blight* rate was 0.40%. To conclude, although *Ascochyta blight* was observed at varying levels in Kırşehir chickpea production areas, the incidence and prevalence of *Ascochyta blight* in the 2021 production season were limited number, more likely, due to the climate conditions in 2021.

**Keywords:** *Ascochyta blight (Ascochyta rabiei)*, Incidence, Kırşehir, Chickpea (*Cicer arietinum*), Survey, Prevalence

\* Kadir AKAN; kadir.akan@ahievran.edu.tr

## 1. Giriş

### 1. Introduction

Nohut (*Cicer arietinum* L.), Fabaceae (Baklagiller) familyasının Faboideae alt familyasına dahil *Cicer* cinsi içerisinde yer alan bir baklagil türüdür. Nohut, ülkemizin de dahil olduğu Uzak Doğu, Yakın Doğu, Akdeniz, Orta Amerika ve Güney Amerika da bulunan bazı ülkelerde uzun yıllardır yetiştirilmektedir. İnsan ve hayvan beslenmesinin yanı sıra yeşil gübreleme uygulamalarında da kullanılabilir (Eser & Soran, 1978). İnsan beslenmesinde önemli bir yeri olan nohut, içeriğinde bulunan ve insan beslenmesi için mutlak gerekli olan proteinler ve önemli amino asitlerce zengindir (Babagil, 2010). Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) tarafından hazırlanan raporlara göre; 2021 üretim sezonunda dünyada 50’den fazla ülkede 15.004.885 ha üretim alanı da 15.871.845 ton nohut üretilmiş ve ortalama verimin 105.78 kg/da olduğu bildirilmiştir. Türkiye, dünya da nohut üretim alanı olarak Hindistan, Pakistan ve Rusya’dan sonra dördüncü sırada, üretim miktarında ise Hindistan’dan sonra ikinci sırada yer almaktadır (Anonim, 2023). Dünya nohut üretiminin yaklaşık %69.75’i Hindistan tarafından gerçekleştirilmekte olup diğer önemli üretici ülkeler ise Türkiye (%4.42), Rusya (%3.55), Myanmar (%3.50) ve Pakistan (%3.14)’dir (Anonim, 2022a). 2020 yılı verilerine göre, dünya’da 450.276 ton (236.608 USD) ile en fazla nohut ihracatı yapan ülke Avustralya olup, Türkiye 310.07 ton (148.857 USD) ihracatla, dünya da ihracatta ikinci ülke konumundadır (Anonim, 2022a). Ülkemizde 2020 yılında Ankara (716.987 da ve 93.476 ton), Yozgat (712.618 da ve 86.417 ton), Kırşehir (535.057 da ve 77.687 ton), Kırıkkale (394.740 da ve 29.133 ton) ve Konya (366.721 da ve 50.112 ton) illeri en fazla nohut ekilişinin yapıldığı illerdir. Kırşehir ili 535.057 da ile Türkiye nohut ekim alanlarının %10.45’ini oluşturmakta ve toplam üretimin %12’sini sağlamaktadır (Anonim, 2022a; Anonim, 2022b).

Türkiye’de iç tüketimde ve ihracatta önemli bir yeri olan nohut yetiştiriciliğini, farklı düzeylerde etkileyen 50’den fazla fitopatojen etmenin varlığı bilinmektedir. Bu fitopatojenler nohutta değişen düzeylerde verim ve kaliteyi etkilemektedir. Nohut için en önemli biyotik stres faktörlerinden birisi olarak kabul edilen “yanıklık veya halk arasındaki adıyla antraknoz” (Etmen; *Ascochyta rabiei* (Pass.) Labr. (Eşeyli dönemi: *Didymella rabiei* (Kovatsch) Arx. Sinonimi: *Mycosphaerella rabiei* Kovatsch.) hastalığı 1867 yılında ilk kez rapor edilmiş olup uzun süren tartışmaların ardından Labrousse tarafından 1931 yılında bugün kullanılan ismi verilmiştir (Nene, 1982). Etmen nedeniyle oluşan ürün kayıplarına ilişkin ilk raporlar 1930’lu yıllarda yayınlanmaya başlamış ve bu tarihten itibaren sadece 20 yıl içerisinde Fas’tan Bulgaristan’a, Yunanistan’dan Pakistan’a ve İspanya’ya kadar birçok ülkede hastalığın varlığına ve kayıplara ilişkin raporlar yayınlanmıştır. Rastlanan kayıtlar bir araya getirildiğinde 1930’lu yıllardan itibaren hastalığın çok defa yaşanan epidemilerin sonucu olarak önemli ürün kayıplarına neden olduğu ortaya konulmuştur (Nene, 1982). Örneğin 1996 yılında hastalığın epidemi oluşturması nedeniyle beş kıtada 35 ülkede önemli kayıpların yaşandığı bildirilmiştir. Diğer taraftan hastalığın taşınmasında önemli rol oynayan bitki artıkları nedeniyle kayıpların sadece epidemi yılları ile sınırlı olmadığı, bir sonraki yılda veya devam eden yıllarda da etkisini göstererek önemli ürün kayıplarına neden olduğu bildirilmiştir (Deokar vd., 2019; Salotti & Rossi, 2021).

Hastalığın bir sonraki üretim sezonuna geçişinde hastalık kaynağı olarak hastalıklı bitki parçaları veya enfekteli tohumların rol oynadığı bilinmektedir. Diğer taraftan hastalığın gelişmesinde ve yayılmasında özellikle sıcaklık, yağmur ve rüzgâr gibi çevresel faktörlerin kritik düzeyde önemli olduğu bilinmektedir. Etmenin gelişmesi için en uygun sıcaklık aralığı 20-25 °C olup, etmenin sporları 8-10 °C’den daha düşük ve 32-35 °C’den daha yüksek sıcaklıklarda çimlenmemektedir. Ekim sonrası düşen yağış ve nem miktarı hastalık gelişiminin de kritik derecede önemli olan faktörlerdendir (Küsmenoğlu, 1990). 15 °C üzerindeki sıcaklıklar ile %60 ve üzerinde nisbi nem ve yaz sezonunda bitki üzerine düşen 350-400 mm toplam yağışın hastalığın gelişimini artırdığı rapor edilmiştir (Açıkgöz, 1994). Açıkgöz’ün (1994) *Luthra* vd. (1935)’ne atfen bildirdiğine göre; Ekim ve Nisan ayları arasında alınan toplam yağış miktarının 150 mm veya daha fazla olduğu durumlarda hastalık önemli ekonomik zararlara neden olmaktadır. Yağış miktarının 90 mm ve daha az olduğu üretim alanlarında hastalık yer yer ortaya çıkmakta ve sınırlı düzeyde etkili olduğu bildirilmiştir. Çiçeklenme ve bakla bağlama döneminde yağışların devam etmesi durumunda üründe birkaç gün içinde önemli zararlar meydana gelmekte hatta nohut tamamen yok olabilmektedir. Ancak çiçeklenme ve bakla bağlama döneminde ekiliş üzerine yağış alınmazsa hastalık gelişimi olamamakta veya hastalık gelişimi tamamen durmaktadır (Açıkgöz, 1994). Hastalığın takibinde ve kontrol uygulamalarına karar verilebilmesi için üretim alanlarında her yıl düzenli olarak yapılacak olan survey çalışmaları ile hastalığın bulunma oranı, yaygınlığı ve şiddetinin belirlenmesi önemlidir. Yürütülen survey çalışmaları ile uygun zamanda yapılacak kontrol uygulamaları ile verim ve kalite kayıplarının en aza indirilmesi mümkün görülmektedir.

Bu survey çalışması, Kırşehir ili Merkez, Akçakent, Akpınar, Boztepe, Çiçekdağı, Kaman ve Mucur ilçelerinde nohut üretiminin yoğun olarak yapıldığı üretim alanlarında 2021 yılı üretim sezonunda “antraknoz hastalığının” bulunma oranı (%) ve yaygınlığının (%) belirlenmesi amacıyla yürütülmüştür.

## 2. Materyal ve metot

### 2. Material and method

### 2.1. Meteorolojik veriler

#### 2.1. Meteorological data

Kırşehir ilinin 2021 yılına (Mart – Ağustos dönemi) ilişkin iklim verileri Tablo 1’de verilmiştir (Anonim, 2022c). Mart ve ağustos ayları (dahil) arasında toplam yağış; Akçakent ilçesinde 6.0 mm, Akpınar ilçesinde 5.3 mm, Boztepe ilçesinde 3.8 mm, Çiçekdağı ilçesinde 8.9 mm, Kaman ilçesinde 3.4 mm, Merkez ilçede 5.1 mm, Mucur ilçesinde 4.9 mm olarak ölçülmüştür.

**Tablo 1.** Kırşehir lokasyonu 2021 yılı Mart-Ağustos ayları arası bazı iklim verileri  
*Table 1. Some climate data for Kırşehir location between March and August 2021*

İlçeler	Parametreler	2021 yılı						Toplam Yağış
		Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	
Akçakent	Sıcaklık (°C)	1.1	8.6	15.1	15.1	20.4	20.4	6.0
	Nem (%)	79.8	76.5	50.0	67.6	51.0	51.3	
	Yağış (mm)	2.4	0.7	0.6	1.6	0.4	0.4	
Akpınar	Sıcaklık (°C)	3.3	10.6	16.8	17.0	22.6	22.4	5.3
	Nem (%)	72.3	60.8	47.5	63.4	46.3	47.2	
	Yağış (mm)	1.9	1.1	0.2	1.9	0.2	0.1	
Boztepe	Sıcaklık (°C)	2.8	10.4	16.3	17.5	22.5	21.8	3.8
	Nem (%)	73.5	61.1	49.6	58.8	45.0	49.4	
	Yağış (mm)	2.4	0.4	0.2	0.5	0.0	0.2	
Çiçekdağı	Sıcaklık (°C)	4.9	12.9	19.2	19.3	24.9	24.5	8.9
	Nem (%)	67.0	54.6	42.5	57.8	42.7	44.3	
	Yağış (mm)	5.0	0.7	0.2	2.3	0.4	0.3	
Kaman	Sıcaklık (°C)	3.4	10.8	17.0	17.3	22.8	22.7	3.4
	Nem (%)	67.3	87.7	46.7	61.0	44.8	44.5	
	Yağış (mm)	0.4	0.9	0.3	1.7	0.1	0.1	
Merkez	Sıcaklık (°C)	4.6	12.1	18.2	19.4	25.0	31.9	5.1
	Nem (%)	65.8	56.3	45.5	55.0	40.3	43.4	
	Yağış (mm)	3.0	0.6	0.3	1.1	0.0	0.2	
Mucur	Sıcaklık (°C)	3.5	11.0	17.4	18.3	23.8	23.0	4.9
	Nem (%)	68.2	56.6	44.5	54.0	40.8	45.9	
	Yağış (mm)	2.6	0.6	0.4	0.8	0.1	0.4	

### 2.2. Survey çalışması

#### 2.2. Survey study

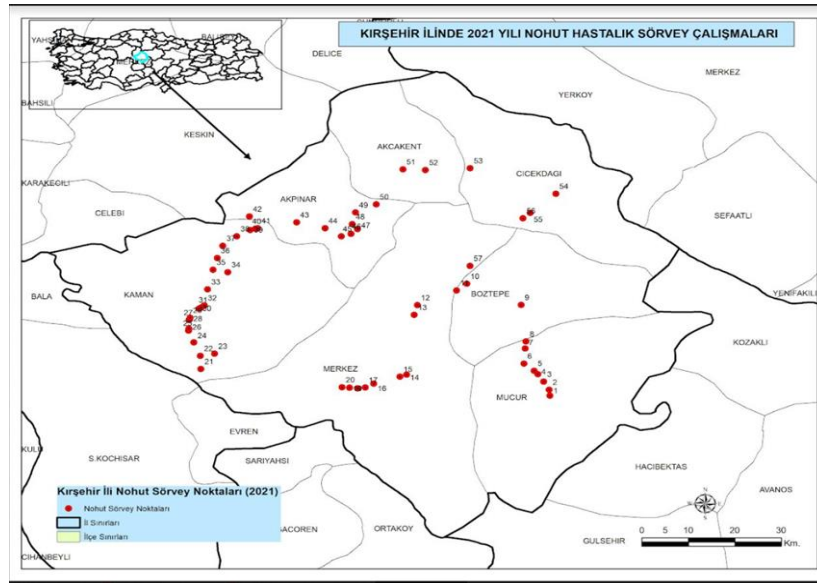
Survey çalışmaları, Kırşehir ili Merkez, Akçakent, Akpınar, Boztepe, Çiçekdağı, Kaman ve Mucur ilçelerinde nohut ekilişinin yoğun olarak yapıldığı alanlarda Haziran-Temmuz 2021 döneminde yürütülmüştür. Atasagun (2009) tarafından Konya nohut üretim alanlarında yürütülen bir araştırmada, survey çalışması yürütülen her ilçenin üretim alanlarının en az %1’inde inceleme ve örnekleme yapılmıştır. Yürütülen bu çalışmada da benzer bir yöntem kullanılarak, ilçe düzeyinde inceleme yapılmasının değerlendirme için daha kolay olması nedeniyle, her ilçenin 2020 yılı nohut üretim alanlarının en az %1’inde inceleme ve örnekleme yapılmıştır (Tablo 2). Surveyler sırasında incelenen üretim alanlarının imkanlar ölçüsünde coğrafi konum ve üretim alanlarının büyüklüğü de dikkate alınarak aralarındaki mesafenin 5 km’den az olmamasına ve farklı vejetasyon dönemi tercih edilmeye çalışılmıştır. İncelenen alanlarda öncelikle antraknoz hastalığının varlığı değerlendirilmiş olup hastalığın belirlendiği üretim alanlarında bulunma oranı ve yaygınlığı tespit edilmiştir.

**Tablo 2.** Kırşehir ili 2020 yılı nohut üretim alanları (Anonim, 2022b), survey yapılması planlanan üretim alanları (da), survey yapılan üretim alanlarının sayısı (adet), büyüklüğü (da) ve 2020 yılı üretim alanına oranı (%)

**Table 2.** Chickpea production areas in Kırşehir location in 2020 (Anonymous, 2022b), production areas planned to be surveyed (da), number of production areas surveyed (unit), size (da) and ratio to 2020 production area (%)

İlçe	2020 yılı nohut üretim alanı (da)	İncelemesi planlanan üretim alanı (da)	İncelenen üretim alanı sayısı	İncelenen üretim alanı (da)	2020 yılı üretim alanına oranı (%)
Akçakent	24.246	242	2	315	1.3
Akpınar	11.250	115	9	2.060	18.3
Boztepe	29.312	293	3	345	1.2
Çiçekdağı	36.983	369	5	380	1.0
Kaman	273.384	2.733	21	2.885	1.1
Merkez	101.382	1.013	9	1.800	1.8
Mucur	58.500	585	8	640	1.1
<b>Toplam</b>	<b>535.057</b>	<b>5.350</b>	<b>57</b>	<b>8.425</b>	<b>1.6</b>

Merkez, Akçakent, Akpınar, Boztepe, Çiçekdağı, Kaman ve Mucur ilçelerinde survey yapılan tüm alanlara ilişkin GPS (Global Positioning System; Küresel Yer Belirleme Sistemi ya da Küresel Konumlandırma Sistemi) noktaları Şekil 1’de verilmiştir.



**Şekil 1.** Kırşehir ili nohut üretim alanlarında antraknoz hastalığı için survey çalışması yürütülen ilçeler ve GPS noktaları

**Figure 1.** Districts and GPS points where surveys were conducted for *Ascochyta blight* in chickpea production areas in Kırşehir location

Surveyler sırasında inceleme ve örnekleme yapılan üretim alanlarında kontrol edilen bitki sayısı, incelenen üretim alanı büyüklüğüne göre Tablo 3’te verildiği şekilde belirlenmiştir (Atasagun, 2009).

**Tablo 3.** İncelenen üretim alanı büyüklüğüne göre, inceleme ve örnekleme yapılan bitki sayısı

**Table 3.** According to the size of the examined production area, the number of plants examined and sampled

Üretim alanı (de)	İncelenen bitki sayısı (adet)
1-5	25
6-10	50
11-50	100
50-100	150

Survey çalışmaları sırasında inceleme ve örnekleme yapılan her bir üretim alanı, sonra her ilçe için, sonrasında ise Kırşehir iline ilişkin, hastalık yaygınlık oranı (%) ve hastalıklı bitki oranı (%), tartılı ortalamaya göre belirlenmiştir (Bora & Karaca, 1970).

Hastalık yaygınlık oranının hesaplaması, inceleme ve örnekleme yapılan üretim alanlarında bulunan hastalıklı bitkilerin varlığı esas alınarak yapılmıştır. Üretim alanında bir hastalıklı bitkinin belirlenmesi bile inceleme yapılan üretim alanının hastalıkla bulaşık olduğunun bir göstergesi olarak kabul edilmiştir. Hastalık yaygınlık oranının (%) belirlenmesinde aşağıda verilen formül kullanılarak (Atasagun, 2009) elde edilen değerler 100'den çıkartılarak hesaplanmıştır.

$$“y = a-c/a*100” \quad (1)$$

y = Hastalığın yaygınlık oranı (%)

a = İncelenen üretim alan sayısı

c = Hastalık gözlenen üretim alanı sayısı.

Hastalık oranının hesaplanmasında ise, inceleme ve örnekleme yapılan her bir üretim alanında incelenen bitkilerin “hastalık belirtisi gösterip göstermediği” dikkate alınarak aşağıda verilen formül kullanılarak (Atasagun, 2009) elde edilen değerler 100'den çıkartılarak hesaplanmıştır.

$$“h = x-z/x*100” \quad (2)$$

h = Hastalık oranı (%)

x = İncelenen toplam bitki sayısı

z = Hastalıklı bitki sayısı.

### 2.3. Patojenin izolasyonu

#### 2.3. Isolation of the pathogen

Üretim alanlarından toplanan hastalıklı bitki örneklerinden etmenin varlığının doğrulanması için patojen izole edilmiştir. İzolasyon için, hastalık belirtisi gösteren 51 örneğin gövde, yaprakçık ve kapsül kısımları %1.5'lük NaOCl çözeltisinde 4 dakika süreyle yüzey sterilizasyonu uygulaması yapılmıştır. Daha sonra 3 kez steril dH<sub>2</sub>O durulama uygulaması yapılmıştır. Steril kurutma kâğıtları arası 15-20 dakika bekletilerek nemi alınan örnekler, her petride 4-5 adet örnek bulunacak şekilde Patates Dekstroz Agar (PDA) besi ortamına ekilmiştir. Kültürler 22±2°C sıcaklığa ayarlanmış inkübatörlerde 6-8 gün süreyle tutulmuştur. Gelişen kolonilerden saflaştırma yapılmış ve daha sonra koloni morfolojisi ve konidi örneklerinde etmenin varlığı değerlendirilmiştir. Süre sonunda kültür ortamı üzerinde gelişen koloni morfolojisi ve konidilerin özellikleri dikkate alınarak etmenin varlığı değerlendirilmiştir (Can vd., 2007; Frenkel vd., 2007; Özkılınç, 2010). Bu amaçla araziden getirilen örneklerden yapılan izolasyon sonucu elde edilen izolatların incelenmesinde etmenin tipik morfolojik özellikleri olan armut şekilli veya ostiollü piknitleri tespit edilmiştir. Konidilerin başlangıçta piknitler içerisinde tek hücreli, renksiz (şeffaf) ve oval şekilli olduğu, olgun döneme yaklaştıkça nem oranıyla da ilişkili olarak yaklaşık %10'undan fazlasının iki hücreli yapı oluşturduğu belirlenmiştir (Atasagun, 2009). Ayrıca konidioforların kısa, piknidiumların da bir musilaj içinde gömülü olduğu tespit edilmiştir.

### 3. Bulgular ve tartışma

#### 3. Results and discussion

2021 yılı Kırşehir ili Akçakent, Akpınar, Boztepe, Çiçekdağı, Kaman, Merkez ve Mucur nohut üretim alanlarında antraknoz hastalığının yaygınlık oranı (%) Tablo 4'te verilmiştir.

Yapılan survey çalışmasında incelenen ve değerlendirilen 57 adet üretim alanından 17 üretim alanında hastalık gözlemlenmiştir. Akçakent ilçesinde 1, Akpınar ve Kaman'da 5, Boztepe, Çiçekdağı ve Merkez'de 2 adet üretim alanında hastalığa rastlanılmıştır. Mucur ilçesinde ise hastalığa rastlanılmamıştır. Yapılan değerlendirmede, Kırşehir ili nohut üretim alanlarında antraknoz hastalığının Boztepe'de %66.7, Akpınar'da %55.6, Akçakent'te %50.0, Çiçekdağı'nda %40.0, Kaman'da %23.8, Merkez'de %22.0 oranında yaygınlık gösterdiği belirlenmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde ise Kırşehir ilinde hastalığın yaygınlık oranı %29.8 olarak belirlenmiştir (Tablo 4).

**Tablo 4.** Kırşehir nohut üretimi alanlarında hastalığın yaygınlık ve bulunma oranı (%)**Table 4.** The incidence and prevalence of the *Ascochyta blight* in the Kırşehir chickpea production areas (%)

İlçe	Hastalık gözlenen üretim alanı sayısı	İncelenen bitki sayısı	Hastalığın yaygınlık oranı (%)	Hastalık gözlenen bitki sayısı	Hastalık oranı (%)
Akçakent	1	465	50.0	3	0.65
Akpınar	5	3.040	55.6	15	0.49
Boztepe	2	495	66.7	6	1.21
Çiçekdağı	2	570	40.0	6	1.05
Kaman	5	4.530	23.8	15	0.33
Merkez	2	2.600	22.2	6	0.23
Mucur	0	900	0.0	0	0.00
<b>İl Toplam</b>	<b>17</b>	<b>12.600</b>	<b>29.8</b>	<b>51</b>	<b>0.40</b>

Nohutta antraknoz hastalığının kontrolünde entegre mücadele uygulamaları için öncelikle her yıl düzenli olarak survey çalışmaları ile durum tespitinin yapılması gereklidir. Kırşehir ili nohut üretim alanlarında gerçekleştirilen surveylerde incelen bitkilerin 51 tanesinde (%0.99) hastalık belirtisi tespit edilmiştir. Hastalık belirtileri daha çok kapsüllerde görülmüştür. Bununla birlikte çok sınırlı düzeyde yaprakçıklar üzerinde ve gövdede (sap) de belirtilere rastlanılmıştır. Hastalık oranı ise; Akçakent ilçesinde %0.65, Akpınar ilçesinde %0.49, Boztepe ilçesinde %1.21, Çiçekdağı ilçesinde %1.05, Kaman ilçesinde %0.33, Merkez ilçede %0.23 olarak hesaplanmıştır. Hastalığın il genelinde bulunma oranı (%0.40) olarak tespit edilmiştir.

**Endes (2021)** tarafından Kırşehir ve Kırıkkale illerinde 2019 yılında yürütülen çalışmada da nohut üretim alanlarında antraknoz hastalığının varlığı belirlenmiştir. Nohut üretim sezonu boyunca tesadüf örnekleme yöntemi kullanılarak yürütülen survey çalışmasında, 14 ilçede bulunan 87 nohut üretim alanında toplam 4.350 bitki hastalık varlığı yönüyle kontrol edilmiştir. Kırşehir ilinde 52 tarlada 15 Mayıs-09 Haziran 2019 arasında 2.063 da alanda survey çalışmaları yürütülmüş ve üretim alanının tamamında hastalık tespit edilmiştir. Yürüttüğümüz bu çalışmada ise 57 üretim alanının ancak 17 tanesinde hastalık tespit edilmiştir. Çalışmalar aynı lokasyonda olmasına rağmen dikkat çekici düzeyde bir farklılık bulunmaktadır. Bu durum üzerinde, bölgedeki yağış miktarının etkili olduğu düşünülmektedir. **Endes (2021)**'in çalışmayı yürüttüğü dönemde Kırşehir lokasyonunda Mart-Temmuz dönemi toplam yağış miktarının 149.7 mm olduğu bildirilmiştir. Bu çalışma da ise tüm ilçelerde Mart ve Ağustos ayları arasında toplam yağış miktarı 10 mm altındadır (Tablo 1). Bölgedeki yağış miktarının düşüklüğü hastalık varlığını oldukça etkilemiştir. **Açıkgöz'ün (1994) Luthra vd., (1935)**'na atfen bildirdiğine göre; Ekim ve Nisan ayları süresince toplam yağış miktarının 150 mm veya daha fazla olmasının hastalık gelişiminde oldukça etkili olduğunu ve önemli ekonomik zararlara neden olduğunu bildirmiştir. Bu bilgi doğrultusunda, yağış miktarının daha fazla olduğu 2019 yılında %100 hastalık varlığı tespit edilirken, yağış miktarının daha sınırlı olduğu 2021 yılında (Mart-Ağustos dönemi) hastalığın varlığı %29.8 gibi daha sınırlı bir düzeyde görülmesini açıklayabilir. Aynı çalışmada, Mucur ve Akpınar ilçelerinde hastalığın bulunma oranı sırasıyla %84.3 ve %55.6 olarak rapor edilmiştir. Yürütülen bu çalışma da ise her iki ilçede de hastalığın bulunma oranı %1 gibi düşük bir oranda belirlenmiştir. Tüm ilçelerde 2021 yılında özellikle Mart-Haziran dönemi toplam yağış miktarının 6 mm'den daha düşük olması hastalığın bulunma oranının, çok düşük düzeyde kalmasının bir nedeni olarak düşünülmektedir.

Hastalık etmeninin üretim alanlarında dağılmasında en önemli iklim faktörleri sıcaklık, yağmur ve rüzgâr gibi çevresel faktörlerdir (**Nene & Reddy, 1987; Trapero-Casas & Kaiser, 1992; Gayacharan vd., 2020**). Ülkemizin de dahil olduğu Akdeniz ülkelerinin bazı bölgelerinde serin ve yağışlı yetiştiricilik koşullarında hastalık sıklıkla ve yüksek şiddette gözlenebilmektedir (**Sharma & Ghosh, 2016**). Her ne kadar sıcaklık ve rüzgâr hastalığın yayılmasında etkili olsa da hastalığın epidemi oluşturabilmesi için en önemli çevresel faktör yağmurdur. Hastalık etmeninin yağışlı mevsimlerde daha fazla görülmesi, etmenin yağmur damlalarının hastalıklı bitkiden sağlam bitkiye sıçraması ile yayılmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca yağışlı mevsimlerde ortamdaki nem miktarının yükselmesi hastalık gelişimi için uygun koşulların oluşmasına ve hastalığın daha fazla görülmesine neden olmaktadır (**Nene & Reddy, 1987; Akem, 1999**).



Tablo 1’de de görüldüğü üzere, Mart ve Ağustos ayları arasında toplam yağış miktarı 10 mm’den daha az olarak ölçülmüştür. Tüm ilçelerde toplam yağış miktarının özellikle Mayıs ayında 1 mm, Haziran ayında 2.5 mm ve Temmuz ayında 0.5 mm altında olması dikkat çekicidir. Yağış ve nem hastalığın gelişimi için kritik faktörlerdir. Hastalık gelişimi için 15 °C üzerindeki sıcaklıklar ile %60’ın üzerinde nisbi nem önemlidir. Ayrıca üretim sezonunun yaz dönemi süresince ekiliş üzerine 350-400 mm yağış alınmasının hastalık gelişimi için uygun olduğu rapor edilmiştir (Açıkgöz, 1994). Diğer taraftan Açıkgöz’ün (1994) bildirdiğine göre Luthra vd., (1935)’na atfen; yağış miktarının 90 mm ve daha az olduğu durumlarda hastalığın önemli olmadığı bildirilmiştir. Diğer taraftan, çiçeklenme ve bakla bağlama döneminde ekiliş üzerine yağış alınmazsa hastalık gelişimi olamamakta veya hastalık gelişiminin tamamen durduğu bildirilmiştir (Açıkgöz, 1994). Açıkgöz (1994) tarafından yürütülen çalışma ile mevcut çalışma uyumlu olup Mart-Ağustos ayları arasında tüm ilçelerinde yağışın 10 mm’den daha az olmasının bir sonucu olarak 2021 yılı Kırşehir ili nohut üretim alanlarında antraknoz hastalığının bulunma oranı ve yaygınlığının beklenenin aksine sınırlı olduğu değerlendirilmiştir.

Benzer şekilde Konya nohut üretim alanlarında (9 farklı ilçesinde) 2006 ve 2007 yıllarında yürütülen bir araştırmada, antraknoz hastalığının yaygınlığı, oranı ve şiddeti tespit edilmiştir. Çalışma sonucu iki yılın ortalaması olarak hastalığın yaygınlığı %61.94, hastalığın oranı %54 ve hastalığın şiddeti %32.66 olarak rapor edilmiştir. Konya ili geneli olarak, 2006 yılında hastalığın yaygınlığı %60.55, hastalığın oranı %52.77, hastalığın şiddeti %32.44, 2007 yılında hastalığın yaygınlığı %63.33, hastalığın oranı %55.00, hastalığın şiddeti %32.88 olarak tespit edilmiştir (Atasagun, 2009). Yürütülen çalışma sonucu Kırşehir ili nohut üretim alanlarında hastalığın yaygınlığı %29.8, hastalığın oranı %0.40 olarak belirlenmiştir. Konya ve Kırşehir illeri nohut üretim alanlarında benzer çeşitlerin, benzer teknikler kullanılarak yetiştirilmesi ve benzer hastalık kontrol yöntemleri kullanılarak üretimin yapılması ihtimali oldukça yüksektir. Kırşehir nohut üretim alanlarında, Konya ili nohut üretim alanlarından farklı olarak hastalığın sınırlı görülmesinin veya hastalığın görülmemesinin temel nedeni olarak yağış miktarının hastalığın gelişimi için yeterli olmamasına bağlanmıştır. Etiyopya’da 2015 yılı Ağustos ayında ve 2016 yılı Şubat ayında nohut yetiştiricilik alanlarında antraknoz hastalığının durumunu tespit etmek için yürütülen bir çalışmada gözlem yapılan 251 üretim alanının 30’unda hastalık belirlenmiş olup, hastalık yaygınlığı en fazla %25, hastalık oranı %0.00-%45.6 arasında değişmekle birlikte ortalama %10 olarak rapor edilmiştir. Hastalık 1-7 skala değerleri şiddetinde belirlenmiş olup ortalama hastalık şiddeti 1-3.2 skala değeri olarak sınırlı olduğu bildirilmiştir. 2015/2016 üretim sezonunda gözlemlenen hastalığın görülme sıklığının ve şiddetinin düşük olmasının El Nino koşullarının neden olduğu kuraklıkla ilişkilendirilmiştir (Tadesse vd., 2017). Bu çalışmada olduğu gibi kurak koşullarda düşük hastalık gelişimi yürüttüğümüz mevcut çalışma bulgularıyla benzerlik göstermektedir.

#### 4. Sonuçlar

##### 4. Conclusions

Yürütülen bu çalışma ile, Kırşehir nohut üretim alanlarında antraknoz hastalığının varlığı sınırlı düzeyde belirlenmiştir. Survey çalışmaları sonucu üretim alanlarında gözlenen ve değerlendirilen hastalık nedeniyle önemli verim ve kalite kayıplarının olmadığı düşünülmektedir. Hastalık gelişiminin sınırlı olması ve hastalık epidemisi oluşmamasının en önemli nedeni, yeterli yağış miktarı ve nem düzeyi olmak üzere uygun çevre koşullarının oluşmamasıdır. Kırşehir ili nohut üretim alanlarında antraknoz hastalığının bulunma oranı ve yaygınlığının belirlenmesine ilişkin sınırlı çalışmaya rastlanmıştır. Çalışma sonuçlarının, hem bu konuda yapılmış öncü çalışmalardan biri olması hem de gelecek üretim sezonlarında yapılacak sonraki çalışmalara ilham kaynağı olması yönüyle önemli olduğu düşünülmektedir.

#### Teşekkür

##### Acknowledgement

Bu çalışma Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından ZRT.A4.21.027 nolu proje kapsamında finanse edilmiştir. Destekleri nedeniyle Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi’ne teşekkür ederiz.



- Eser, D., & Soran, H., (1978). *Yerli ve yabancı kökenli nohut çeşitlerinin orta anadolu çevre koşullarında erkencilik, verimlilik ve hastalıklara dayanıklılık yönünden mukayeseli incelenmesi*. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, 684, S-44, Ankara.
- Frenkel, O., Shtienberg, D., Abbo, S., & Sherman, A. (2007), The sympatric *Ascochyta* complex of wild *Cicer judaicum* and domesticated chickpea. *Plant Pathology*, 56, 464-471. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2006.01552.x>
- Gayacharan, R. U., Singh, S., Basandrai, A. K., Rathee, V. K., Tripathi, K., Singh, N., Dixit, G. P., Rana, J. C., Pandey, S., Kumar, A., & Singh K. (2020), Identification of novel resistant sources for *Ascochyta* blight (*Ascochyta rabiei*) in chickpea. *PLoS ONE* 15(10), e0240589. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240589>
- Küsmenoğlu, İ. (1990). *Ascochyta blight of chickpea: inheritance and relationship to seed size, morphological traits and isozyme variation*. [Degree of Master of Science in Agronomy Washington State University Department of Agronomy and Soils. 81p., U.S.A.]
- Luthra, J. C., Sattar, A., & Singh, K. (1935). *Life – history of gram blight. (Ascochyta rabiei (Pass) Trot. on gram (Cicer arietinum L.) and its control in the Punjab*. Agriculture and Livestock in India. 5, 489-498.
- Nene, Y. L. (1982). A review of *Ascochyta* blight of chickpea. *International Journal of Pest Management*, 28(1), 61-70.
- Nene, Y. L., & Reddy, M. (1987). *The chickpea*. In: M.C. Saxena & K.B. Singh (Eds.), *Chickpea Diseases and Their Control*. pp: 233-270, CAB International, Oxon, UK.
- Özkılınç, H. 2010. *Yabani ve kültüre alınan Cicer spp.'de Ascochyta yanıklık etmeni Didymella rabiei (Anamorf: Ascochyta rabiei) 'nin genetik, ekolojik ve patojenik açıdan populasyon analizleri*. [Doktora Tezi, Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyoloji Bölümü 146 sayfa Gaziantep, Türkiye]
- Salotti, I., & Rossi, V. (2021). A mechanistic weather-driven model for *Ascochyta rabiei* infection and disease development in chickpea. *Plants* 10(3), 464; <https://doi.org/10.3390/plants10030464>
- Sharma, M., & Ghosh, R. (2016) An update on genetic resistance of chickpea to *Ascochyta* blight. *Agronomy*, 6(1), 18.
- Tadesse, M., Turoop, L., & Ojiewo, C. O. (2017). Survey of chickpea (*Cicer arietinum* L) *Ascochyta* Blight (*Ascochyta rabiei* Pass.) disease status in production regions of Ethiopia. *Plant* 5(1), 23-30. <https://doi.org/10.11648/j.plant.20170501.15>
- Trapero-Casas, A., & Kaiser, W. J. (1992). Development of *Didymella rabiei*, the teleomorph of *Ascochyta rabiei*, on chickpea straw. *Phytopathology*. 82, 1261-1266.

## Yüksek mertebe sonlu eleman modeliyle fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin serbest titreşim ve statik analizi

*Free vibration and static analysis of functionally graded beams with the higher-order finite element model*

Muhittin TURAN\*, Mahmut İler HACIOĞLU

Bayburt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 69010, Bayburt

• Geliş tarihi / Received: 06.10.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 08.04.2023

### Öz

Bu çalışmada, fonksiyonel derecelendirilmiş (FD) kirişlerin yüksek mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorisine dayalı sonlu eleman yöntemiyle serbest titreşim ve statik analizleri incelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi için 5 düğümlü ve 16 serbestlikli bir sonlu eleman önerilmiştir. FD kirişin malzeme özelliği kiriş kalınlığı boyunca belli bir kuvvet kuralı fonksiyona bağlı olarak değişmektedir. Lagrange eşitliği ile denge denklemleri türetilmiştir. Farklı kuvvet fonksiyonu üst indisine ( $p$ ), farklı sınır şartlarına ve farklı narinliklere ( $L/h$ ) göre FD kirişin boyutsuz doğal frekansları, boyutsuz yer değiştirmeleri, boyutsuz normal ve kayma gerilmeleri elde edilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar literatür ile karşılaştırılmış ve önerilen sonlu elemanın FD kirişler için oldukça uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Önerilen yüksek mertebeden kayma deformasyonlu kiriş elemanının bu tip problemlerin çözümünde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Kuvvet fonksiyonu üst indis değerinin artmasıyla birlikte boyutsuz doğal frekanslar azalmakta, boyutsuz maksimum yer değiştirmeler ise artmaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Fonksiyonel derecelendirilmiş kiriş, Serbest titreşim analizi, Statik analiz, Sonlu eleman yöntemi, Yüksek mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorisi

### Abstract

In this study, free vibration and static analysis of functionally graded (FG) beams with the finite element method based on high-order shear deformation beam theory are investigated. A finite element with 5 nodes and 16 degrees of freedom is proposed for the finite element method. The material property of the FG beam changes depending on a specific power-law function along the beam thickness. Equilibrium equations are derived from the Lagrange's equation. Dimensionless natural frequencies, dimensionless displacements, and dimensionless normal and shear stresses of FG beam were obtained according to different power-law indexes ( $p$ ), various boundary conditions, and various slenderness ( $L/h$ ). The results obtained from the study were compared with the literature and it was seen that the proposed finite element gave very good results for FG beams. It is concluded that the proposed high-order shear deformation beam element can be used to solve such problems. With the power-law index value increase, the dimensionless natural frequencies decrease while the dimensionless maximum displacements increase.

**Keywords:** Functionally graded beam, Free vibration analysis, Static analysis, Finite element method, Higher-order shear deformation beam theory

\* Muhittin TURAN; mturan@bayburt.edu.tr

## 1. Giriş

### 1. Introduction

Teknolojinin sürekli gelişme içerisinde olması malzeme biliminin de sürekli olarak gelişim ve değişim içerisinde olmasına neden olmaktadır. Malzeme biliminde meydana gelen gelişmeler uzay alanı gibi yüksek teknolojiye gereksinim duyan alanların ihtiyacını olan malzemelerin keşfedilmesine sebep olmaktadır. Uzay araçlarının atmosferden geçişi sırasında maruz kaldıkları mekanik ve ısı etkilere karşı koyabilmek için ilk olarak tabakalı kompozit malzemeler kullanılmıştır. Tabakalı kompozit malzemelerin malzeme özellikleri arasında keskin bir geçiş olduğu için gerilmeye bağlı yapısında çatlaklar meydana gelmektedir. Gerilme çatlaklarının oluşumu ortadan kaldırmak için malzeme özelliği belirli bir fonksiyona bağlı olarak değişen fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM) geliştirilmiştir. FDM'ler Dünyada ilk kez Japonya da uzay sanayisinde roketlerin dış yüzeylerinde hem mekanik hem de ısı etkilere karşı koymak için tasarlanmıştır. Uzay sanayisi için geliştirilen bu malzemeler gün geçtikçe endüstri, tıp, savunma, enerji ve inşaat gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Yapı elemanlarının maruz kaldığı ısı ve mekanik etkilerin olumsuzlukları en aza indirmek için günümüzde kirişler, plaklar ve kabuklar FDM'ler ile tasarlanmaya başlamıştır. Fonksiyonel derecelendirilmiş (FD) kirişler normal betonarme kirişlere göre daha yüksek mukavemetli, hafif ve yüksek ısı dirençlere sahip oldukları için araştırmacılar tarafından oldukça ilgi görmüştür.

Literatüre göre, araştırmacılar FD kirişlerin burkulma, dinamik ve statik analizlerinde farklı kiriş teorilerine göre birçok sayısal ve analitik yöntemler kullanmışlardır. Bunları sıralayacak olursak; [Aboudi vd. \(1999\)](#), fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler için Kartezyen koordinat tabanlı yüksek mertebeli teori geliştirmişlerdir. [Chakraborty vd. \(2003\)](#), FD kirişlerin termoelastik davranışlarını incelemek için birinci mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorisine göre yeni bir sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. [Aydogdu ve Taskin \(2007\)](#), basit mesnetli FD kirişlerin serbest titreşim davranışlarını Navier tipi çözüm yöntemiyle incelemişlerdir. [Oyekoya vd. \(2009\)](#), sonlu elemanlar yöntemini kullanarak FD kompozit yapıların serbest titreşim ve burkulma analizleri için FD plaka kullanarak Midlin ve Reissner tipi eleman geliştirmişlerdir. [Şimşek \(2010\)](#), FD kirişlerin serbest titreşim analizleri için birbirinden farklı yüksek mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorilerini ve birinci mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorisini kullanmıştır. [Alshorbagy vd. \(2011\)](#), Euler-Bernoulli kiriş teorisini kullanarak sonlu elemanlar yöntemiyle FD kirişlerin serbest titreşim analizlerini yapmışlardır. [Thai ve Vo \(2012\)](#), FD kirişlerin eğilme ve serbest titreşim davranışlarını incelemek için çeşitli yüksek mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorileri geliştirmişlerdir. [Nguyen vd. \(2013\)](#), eksenel olarak yüklenmiş FD kirişlerin statik ve serbest titreşim analizlerini birinci mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorisi ile yapmışlardır. [Vo vd. \(2014\)](#), yüksek mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorisini kullanarak FD sandviç kirişlerin burkulma ve serbest titreşim davranışlarını tespit edebilmek için yeni bir sonlu eleman önermişlerdir. [Jin ve Wang \(2015\)](#), Euler-Bernoulli kiriş teorisine göre FD kirişlerin serbest titreşim analizlerini klasik kiriş teorisi ve diferansiyel kareleme yöntemini kullanarak yapmışlardır. [Filippi vd. \(2015\)](#), FD kirişlerin statik analizini bir boyutlu Carrera birleştirilmiş formülasyonu ile yapmışlardır. [Vo vd. \(2015\)](#), FD sandviç kirişlerin serbest titreşim ve burkulma analizleri için yüksek mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorisine göre kalınlık yönündeki gerilme ve kesme deformasyon etkilerini de dikkate alarak sonlu eleman modeli önermişlerdir. [Yarasca vd. \(2016\)](#), FD kirişlerin statik analizlerini yüksek mertebeden kayma deformasyonlu 3D hibrit kiriş teorisi kullanarak yedi serbestlik derecesine sahip sonlu eleman ile yapmışlardır. [Kahya ve Turan \(2017\)](#), FD kirişlerin burkulma ve serbest titreşim davranışlarını incelemek için birinci mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorisini dikkate alarak 5 düğüm noktasına ve 10 serbestlik derecesine sahip yeni bir kayma deformasyonlu eleman modeli sunmuşlardır. [Akbaş \(2017\)](#), yayılı yük altında ortotropik FD kirişlerin serbest titreşim ve statik analizlerini düzlem parçalı sürekli ortam modelini kullanarak sonlu elemanlar yöntemiyle yapmıştır. [Turan ve Kahya \(2018\)](#), Navier çözüm yöntemini kullanarak FD kirişlerin serbest titreşimlerini birinci mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorisine göre incelemişlerdir. [Turan \(2018\)](#), tabakalı kirişlerin serbest titreşim, burkulma ve statik analizleri için kayma deformasyon etkilerini hesaba katan bir sonlu eleman modeli geliştirmiştir. Tabakalı kompozit kirişler ve FD sandviç kirişler için ayrı ayrı analizler yaparak modelin doğruluğunu ispatlamıştır. [Kahya ve Turan \(2018\)](#), tabakalı kompozit ve sandviç kirişlerin titreşim ve burkulma davranışları için  $N$  tabakalı,  $9N+7$  serbestlik derecesine sahip sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. [Li vd. \(2019\)](#), FD sandviç kirişlerin statik analizi için yüksek mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorisine göre bir sonlu eleman modeli geliştirdiler. [Reddy vd. \(2020\)](#), FD kirişlerin doğrusal olmayan analizleri için çift ağı sonlu alan yöntemini kullanarak sonlu eleman modeli geliştirdiler. [Avcar vd. \(2021\)](#), çeşitli konfigürasyonlara sahip sigmoid FD sandviç kirişlerin doğal frekanslarını yüksek mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorisine göre hesaplamışlardır. [Turan ve](#)

**Kahya (2021)**, FD sandviç kirişlerin serbest titreşim ve burkulma analizlerini birinci mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorisini kullanarak farklı sınır şartları altında Navier tipi çözüm yöntemiyle yapmışlardır. **Akbaş (2021)**, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeden yapılmış bir konsol kirişin harmonik bir yük altında zorlanmış titreşim tepkilerini araştırmıştır. **Koutoati vd. (2021)**, malzeme özelliği doğrusal olmayan FD kirişlerin serbest titreşim ve statik analizleri için Timoshenko kiriş teorisine göre ve Reddy'nin yüksek mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorisine göre sonlu eleman modeli önermişlerdir. Kirişin yer değiştirme alanlarını zikzak teorisine tanımlamışlardır. **Yıldırım (2022)**, iki doğrultulu FD kirişlerin serbest titreşim analizlerinde kullanılan sonlu elemanlar yöntemine alternatif bir yöntem olarak yapay sinir ağları yaklaşımını kullanmıştır. **Belarbi vd. (2022)**, FD sandviç kirişlerin eğilme analizi için yüksek mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorisi önererek sonlu elemanlar yöntemiyle çözüm yapmışlardır. Sonlu eleman modelleri iki düğüm noktasına sahiptir. **Turan (2022)**, birinci mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorisini kullanarak farklı sınır şartlarına sahip iki doğrultulu FD kirişlerin eğilme analizlerini Navier tipi çözüm yöntemiyle yapmıştır.

Literatür incelendiğinde, yazarların bildiği kadarıyla FD kirişlerin serbest titreşim ve statik analizlerinin önerilen 5 düğüm noktalı 16 serbestlik dereceli sonlu eleman ile incelenmediği kanaatine varılmıştır. Bu sebeple yapılan çalışma kapsamında, etkili ve doğru sonuç veren aynı zamanda yüksek mertebeden eleman olduğundan dolayı kayma gerilmelerini doğru tahmin edebilen sonlu eleman ile FD kirişlerin serbest titreşim ve statik analizleri gerçekleştirilmiştir. Önerilen sonlu elemanın avantajlarını belirtecek olursak; elemanımız enine kayma deformasyonlarının etkisini hesaba katabilmektedir ve bu sebeple FD kirişin kalınlığı doğrultusunda kayma gerilme değerlerini doğru tahmin edebilmektedir. Bunun yanında sonlu elemanımız, kirişin malzeme özelliği değişse bile oldukça hızlı ve doğru sonuçlar elde etmemize imkân vermektedir. FD kirişin malzeme özelliği kiriş yüksekliği boyunca değişmekte ve hareket denklemleri Lagrange prensibiyle elde edilmektedir. FD kirişin statik ve serbest titreşim analizleri önerilen sonlu eleman modeliyle farklı sınır şartları, farklı kuvvet fonksiyonu üst indisi ( $p$ ) ve farklı narinlik değerleri ( $L/h$ ) için yapılmıştır. Analizlerden elde edilen FD kirişe ait boyutsuz doğal frekans, boyutsuz yer değiştirme, boyutsuz normal ve kayma gerilme değerleri elde edilmiştir.

## 2. Materyal ve metot

### 2. Material and method

#### 2.1. Malzeme özellikleri

##### 2.1. Material properties

FD kiriş olarak Şekil 1'de görülen homojen olmayan  $L$  uzunluğunda,  $b \times h$  boyutlarında dikdörtgen kesitli izotropik bir kiriş kullanılmıştır. FD kiriş, alt yüzeyinde ve üst yüzeyinde sırasıyla metal ve seramik olmak üzere iki malzemeden oluşmaktadır. Ayrıca FD kirişin malzeme davranışı Hooke yasasına uymakla birlikte, malzeme özelliği kiriş kalınlığı boyunca (1)'deki gibi sürekli olarak değişmektedir.

$$P(z) = (P_s - P_m)V_s(z) + P_m \quad (1)$$

(1)'deki  $P_s$  ve  $P_m$  seramik ve metalin malzeme özelliklerini göstermektedir. Ele alınan FD kirişin seramik faza ait hacimsel seramik oran fonksiyonu  $V_s$  (2)'deki gibidir.

$$V_s(z) = \left( \frac{2z - h}{2h} \right)^p, \quad -\frac{h}{2} \leq z \leq \frac{h}{2} \quad (2)$$

Burada  $p$ , FD kirişin kalınlık boyunca malzeme dağılımını değiştiren negatif olmayan bir sayıdır. Şekil 2'de kirişin kalınlığı boyunca elastisite modülünün ( $E$ ) ve öz kütlelerinin ( $\rho$ ),  $p$  değerine bağlı değişimi verilmiştir.

#### 2.2. Teori ve sonlu elemanlar metodu

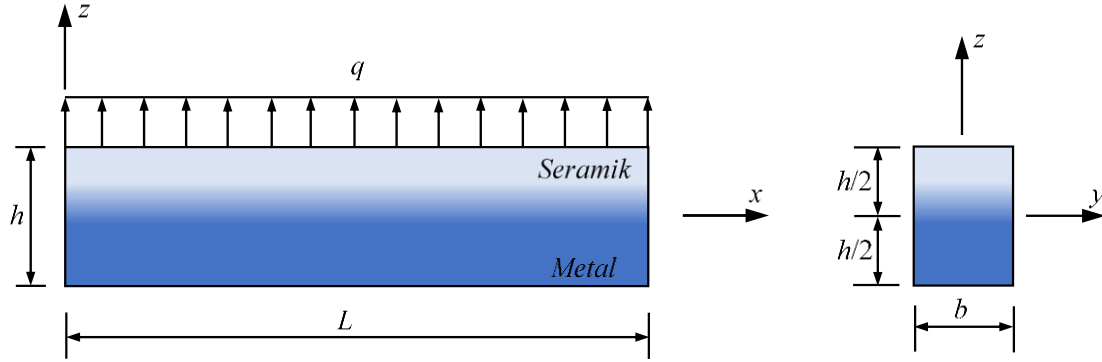
##### 2.2. Theory and finite element method

Şekil 3'te sonlu elemanlar çözümünde kullanılan 5 düğüm noktasına ve 16 serbestlik derecesine sahip olan sonlu eleman modeli görülmektedir.  $L_e$  elemanın uzunluğunu ifade etmektedir. Çalışma kapsamında yüksek

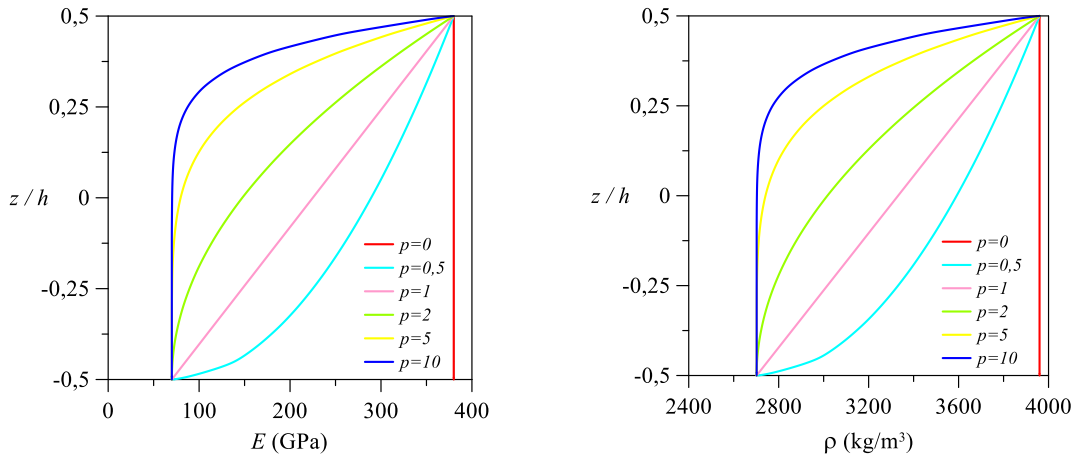
mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorisi kullanılarak sonlu elemanlar yöntemine göre önerilen sonlu eleman modeline ait yer değiştirme vektörü (3)'te verilmiştir.

$$\mathbf{u} = (u_i \ w_j \ \phi_i \ \beta_{1i} \ \beta_{2i}), \quad i=1, 2, 3; \quad j=1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

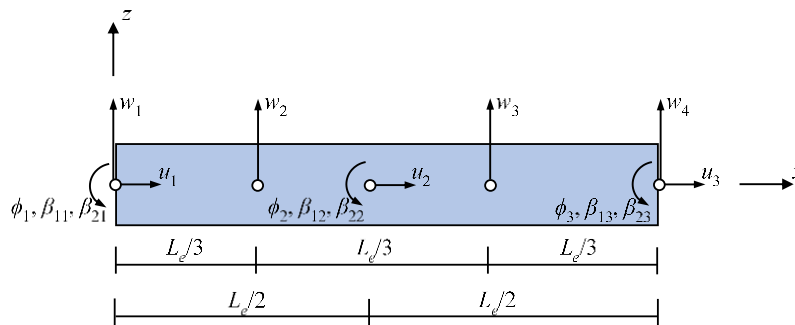
Burada sırasıyla  $u$  yatay yer değiştirmeleri,  $w$  düşey yer değiştirmeleri,  $\phi$  ve  $\beta$  ise dönme terimlerini ifade etmektedir.



**Şekil 1.** Fonksiyonel derecelendirilmiş kirişin koordinat eksenleri ve geometrisi  
**Figure 1.** Coordinate axes and geometry of the functionally graded beam



**Şekil 2.**  $p$  değerine bağlı olarak  $E$  ve  $\rho$ 'nun değişimi  
**Figure 2.** Variation of  $E$  and  $\rho$  depending on the value of  $k$



**Şekil 3.** 5 düğüm noktasına sahip 16 serbestlik dereceli sonlu kiriş elemanı  
**Figure 3.** Finite beam element with 16 degrees of freedom with 5 nodes

Yüksek mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorisine göre FD kirişin herhangi bir noktasındaki  $U$  ve  $W$  yer değiştirme ifadeleri (4)'te verilmiştir.

$$U(x, z, t) = u(x, t) - z\phi(x, t) - z^2\beta_1(x, t) - z^3\beta_2(x, t),$$

$$W(x, z, t) = w(x, t) \tag{4}$$

Burada  $t$  zamanı ifade etmektedir. FD kirişin şekil değiştirme ve yer değiştirme bağıntıları sırasıyla (5)'te verilmiştir.

$$\varepsilon_{xx} = u_{,x} - z\phi_{,x} - z^2\beta_{1,x} - z^3\beta_{2,x}, \quad \gamma_{xz} = w_{,x} - \phi - 2z\beta_1 - 3z^2\beta_2 \tag{5}$$

Burada,  $(\bullet)_{,x}$  ifadesi  $x$ 'e göre türevi ifade etmektedir. Kirişin normal gerilmesi  $\sigma_{xx}$  ve kayma gerilmesi  $\tau_{xz}$  sırasıyla (6)'da verilmiştir.

$$\sigma_{xx} = E(z)\varepsilon_{xx}, \quad \tau_{xz} = G(z)\gamma_{xz} \tag{6}$$

Burada,  $E, G$  sırasıyla elastisite modülü ve kayma modülüdür.  $E$  ve  $G$  kiriş kalınlığı boyunca değişmektedir. Problemin çözümü için  $u, w, \phi, \beta_1$  ve  $\beta_2$  ifadeleri (7)'de tanımlanmıştır.

$$u(x, t) = \sum_{i=1}^3 \varphi_i(x)u_i(t), \quad w(x, t) = \sum_{j=1}^4 \psi_j(x)w_j(t), \quad \phi(x, t) = \sum_{i=1}^3 \varphi_i(x)\phi_i(t),$$

$$\beta_1(x, t) = \sum_{i=1}^3 \varphi_i(x)\beta_{1i}(t), \quad \beta_2(x, t) = \sum_{i=1}^3 \varphi_i(x)\beta_{2i}(t) \tag{7}$$

(7)'deki  $u_i(t), w_i(t), \phi_i(t), \beta_{1i}(t)$  ve  $\beta_{2i}(t)$  genelleştirilmiş yer değiştirmeleri,  $\varphi_i(x)$  ve  $\psi_i(x)$  ise şekil fonksiyonlarını ifade etmektedir. FD kirişin hareket denklemleri (8)'deki Lagrange eşitliği kullanılarak elde edilmektedir.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \Pi}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} = 0 \tag{8}$$

Denklem (8)'deki  $\dot{q}_i$  ve  $q_i$  bağımsız değişkenleri ifade etmekte olup, Lagrangian ifadesi  $\Pi = T - (U + V)$  şeklinde yazılmaktadır. FD kirişin şekil değiştirme enerjisi (9)'daki gibi elde edilmektedir.

$$U = \frac{1}{2} \int_0^{L_e} \int_A (\sigma_{xx}\varepsilon_{xx} + \tau_{xz}\gamma_{xz}) dA dx = \frac{1}{2} \int_0^{L_e} \left\{ X_0 (u_{,x})^2 - 2X_1 u_{,x} \phi_{,x} + X_2 \left( (\phi_{,x})^2 - 2u_{,x} \beta_{1,x} \right) + 2X_3 (\phi_{,x} \beta_{1,x} - u_{,x} \beta_{2,x}) \right.$$

$$+ X_4 (\beta_{1,x}^2 + \phi_{,x} \beta_{2,x}) + 2X_5 \beta_{1,x} \beta_{2,x} + X_6 \beta_{2,x}^2 + Y_0 \left( (\phi)^2 - 2\phi w_{,x} + (w_{,x})^2 \right)$$

$$\left. + 4Y_1 \beta_1 (\phi - w_{,x}) + 2Y_2 (2\beta_1^2 + 3\phi \beta_2 - 3\beta_2 w_{,x}) + 12Y_3 \beta_1 \beta_2 + 9Y_4 \beta_2^2 \right\} dx \tag{9}$$

Burada  $X_k$  ve  $Y_l$  malzeme sabitlerini kapsayan katsayılardır. (10)'da bu katsayılar açık halde ifade edilmiştir.

$$X_k = \int_A E(z) z^k dA, \quad Y_l = \int_A G(z) z^l dA, \quad (k = 0, 1, \dots, 6; \quad l = 0, 1, \dots, 4) \tag{10}$$

FD kirişin kinetik enerjisi ise (11)'deki gibi elde edilmiştir.

$$T = \frac{1}{2} \int_0^{L_e} \int_A \rho(z) (\dot{U}^2 + \dot{W}^2) dA dx = \frac{1}{2} \int_0^{L_e} \left\{ I_0 (\dot{u})^2 - 2I_1 \dot{u} \dot{\phi} + I_2 \left( (\dot{\phi})^2 - 2\dot{u} \dot{\beta}_1 \right) + 2I_3 (\dot{\phi} \dot{\beta}_1 - \dot{u} \dot{\beta}_2) \right.$$

$$\left. + I_4 (\dot{\beta}_1^2 + 2\dot{\phi} \dot{\beta}_2) + 2I_5 \dot{\beta}_1 \dot{\beta}_2 + I_6 \dot{\beta}_2^2 + I_0 (\dot{w})^2 \right\} dx \tag{11}$$



(11)'deki  $I_k$  katsayısı malzeme sabitlerine bağlı olan bir katsayıdır. Açık olarak (12)'de ifade edilmiştir.

$$I_k = \int_A \rho(z) z^k dA \quad (k = 0, 1, \dots, 6) \quad (12)$$

FD kirişe uygulanan dış yayılı yükün  $q$  yapmış olduğu iş  $V$ , (13)'teki gibidir.

$$V = \int_0^{L_e} q w dx \quad (13)$$

Denklem (9), (11) ve (13)'te tanımlanan sırasıyla yer değiştirme, şekil değiştirme ve iş-enerji denklemleri Langrange eşitliğinde yerine yazılarak tek tabakalı yüksek mertebeden FD kiriş elemanına ait hareket denklemi (14)'te elde edilmiştir.

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{k}\mathbf{u} = \mathbf{f} \quad (14)$$

Burada  $\mathbf{f}$  yük vektörünü,  $\mathbf{m}$ ,  $\mathbf{k}$  sırasıyla eleman kütle ve rijitlik matrislerini ifade etmekte olup aşağıdaki şekilde yazılabilirler. Buradaki matrislerin de açık ifadeleri Ekler bölümünde verilmiştir.

$$\mathbf{m} = \begin{bmatrix} \mathbf{m}_{11} & \mathbf{0} & \mathbf{m}_{13} & \mathbf{m}_{14} & \mathbf{m}_{15} \\ & \mathbf{m}_{22} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ & & \mathbf{m}_{33} & \mathbf{m}_{34} & \mathbf{m}_{35} \\ & & & \mathbf{m}_{44} & \mathbf{m}_{45} \\ \text{sim.} & & & & \mathbf{m}_{55} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{k} = \begin{bmatrix} \mathbf{k}_{11} & \mathbf{0} & \mathbf{k}_{13} & \mathbf{k}_{14} & \mathbf{k}_{15} \\ & \mathbf{k}_{22} & \mathbf{k}_{23} & \mathbf{k}_{24} & \mathbf{k}_{25} \\ & & \mathbf{k}_{33} & \mathbf{k}_{34} & \mathbf{k}_{35} \\ & & & \mathbf{k}_{44} & \mathbf{k}_{45} \\ \text{sim.} & & & & \mathbf{k}_{55} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{f}_2 \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad (15)$$

Boyu  $L$  olan FD kirişinin tamamının hareket denklemi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak (16)'teki gibi elde edilmiştir.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{F} \quad (16)$$

Burada  $\mathbf{M}$  sistem kütle matrisini,  $\mathbf{K}$  sistem rijitlik matrisini,  $\mathbf{F}$  ise sistem yük vektörünü ifade etmektedir. (16)'da  $\mathbf{M}$  kütle matrisi sıfıra eşitlenir ve  $\mathbf{X}=\mathbf{U}$  varsayımına göre çözüm yapılırsa kirişin statik analizinde kullanılacak olan denge denklemi (17)'de ki gibi elde edilmektedir.

$$\mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{F} \quad (17)$$

FD kirişin serbest titreşim analizi için gerekli olan denge denklemini elde etmek için (16) denklemindeki  $\mathbf{F}=0$  olarak kabul edilir ve çözüm için  $\mathbf{X}=\mathbf{U}e^{i\omega t}$  şeklinde düşünülürse (18) denklemi elde edilir.

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})\mathbf{U} = \mathbf{0} \quad (18)$$

Burada  $\omega$  FD kirişin doğal frekansını göstermektedir. (18) denklemi bir özdeğer problemidir. Bu denklemin kat sayılar matrisini sıfır yapan  $\omega$  değerleri FD kirişin doğal frekanslarıdır.

### 3. Bulgular ve tartışma

#### 3. Results and discussion

Bu bölümde ele alınan FD kirişin önerilen sonlu eleman ile sırasıyla serbest titreşim ve statik analizlerine ilişkin bulgular yer almaktadır. Çalışma kapsamında kullanılan malzemeler Tablo 1' de verilmiştir. FD kirişin serbest titreşim ve statik analizlerinde farklı malzemeler, farklı narinlik oranları ( $L/h$ ) farklı kuvvet fonksiyonu üst indisi ( $p$ ) ve farklı sınır şartları dikkate alınarak önerilen sonlu elemanın doğruluğu araştırılmıştır. Farklı sınır şartları olarak basit mesnetli (B-B), iki ucu ankastre (A-A) ve konsol (A-S) kirişler kullanılmıştır. Çalışmada elde edilen doğal frekanslar, yer değiştirmeler ve gerilmeler sırasıyla (19)'da ki gibi boyutsuz olarak verilmiştir.

$$\bar{\omega} = \frac{\omega L^2}{h} \sqrt{\frac{\rho_m}{E_m}}, \quad \bar{w} = \frac{100E_m b h^3}{qL^4} w(x,0), \quad \bar{\sigma}_{xx} = \frac{bh}{qL} \sigma_{xx}(x,z), \quad \bar{\tau}_{xz} = \frac{bh}{qL} \tau_{xz}(x,z) \quad (19)$$

**Tablo1.** Malzeme özellikleri  
**Table 1.** Material properties

Metal	$E_m$ (GPa)	$\rho_m$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\nu$	Seramik	$E_s$ (GPa)	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\nu$
Alüminyum (Al)	70	2702	0,30	Alüminyum oksit (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	380	3960	0,30
Çelik (SUS304)	201,04	8166	0,28	Alüminyum nitrit (Al <sub>2</sub> N <sub>3</sub> )	310	3260	0,30

**Tablo 2.** Farklı sınır şartlarına sahip Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> FD kirişlerinin  $L/h=5$  ve  $p=1$  için boyutsuz doğal frekanslarının eleman sayısı ile değişimi

**Table 2.** Variation of dimensionless fundamental frequencies of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> FG beams with different boundary conditions for  $L/h=5$  and  $p=1$  with number of element

Sınır Şartları	Eleman Sayısı							
	4	8	10	12	14	16	18	20
A-A	8,0190	8,0055	8,0043	8,0038	8,0035	8,0034	8,0033	8,0032
B-B	4,0504	4,0497	4,0494	4,0494	4,0494	4,0494	4,0494	4,0494
A-S	1,4742	1,4741	1,4741	1,4739	1,4741	1,4741	1,4742	1,4741

**Tablo 3.** Farklı sınır şartlarına sahip Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> FD kirişlerinin boyutsuz doğal frekansları

**Table 3.** Dimensionless fundamental frequencies of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> FG beams with different boundary condition

Kiriş	Teori	$p = 0$	$p = 0,5$	$p = 1$	$p = 2$	$p = 5$	$p = 10$	$p \rightarrow \infty$
<i>L/h=5</i>								
A-A	Bu çalışma	10,11770	8,79850	8,0035	7,2187	6,51896	6,18612	5,25710
	Turan (2018) <sup>(1)</sup>	10,08647	8,75479	7,98414	7,27155	6,71481	6,37413	5,24085
	Şimşek (2010) <sup>(2)</sup>	10,0705	8,74674	7,95034	7,17674	6,49349	6,16515	5,23254
	Vo vd. (2015a) <sup>(3)</sup>	10,1851	8,8641	8,0770	7,3039	6,5960	6,2475	-
B-B	Bu çalışma	5,22230	4,4722	4,0494	3,6827	3,4531	3,3292	2,71342
	Turan (2018) <sup>(1)</sup>	5,22193	4,46926	4,04967	3,69360	3,48818	3,36434	2,71328
	Şimşek (2010) <sup>(2)</sup>	5,15274	4,41108	3,99042	3,62643	3,40120	3,28160	2,67732
	Vo vd. (2015a) <sup>(3)</sup>	5,1618	4,4240	4,0079	3,6442	3,4133	3,2903	-
A-S	Bu çalışma	1,9080	1,6295	1,4741	1,3430	1,2692	1,2275	0,99142
	Turan (2018) <sup>(1)</sup>	1,90772	1,62865	1,47394	1,34469	1,27515	1,26363	0,99124
	Şimşek (2010) <sup>(2)</sup>	1,89523	1,61817	1,46328	1,33254	1,25916	1,21834	0,98474
	Vo vd. (2015a) <sup>(3)</sup>	1,9055	1,6313	1,4804	1,3524	1,2763	1,2308	-
<i>L/h=20</i>								
A-A	Bu Çalışma	12,2361	10,4386	9,4420	8,6067	8,1533	7,8945	6,3578
	Turan (2018) <sup>(1)</sup>	12,2350	10,4357	9,4416	8,6144	8,1798	7,9213	6,3572
	Şimşek (2010) <sup>(2)</sup>	12,2238	10,4287	9,4316	8,5975	8,1446	7,8858	-
	Vo vd. (2015a) <sup>(3)</sup>	12,2660	10,4948	9,5277	8,7142	8,2445	7,9543	-
B-B	Bu Çalışma	5,4659	4,6559	4,2096	3,8406	3,6529	3,5431	2,8400
	Turan (2018) <sup>(1)</sup>	5,4659	4,6557	4,2097	3,8414	3,6555	3,5458	2,9996
	Şimşek (2010) <sup>(2)</sup>	5,4603	4,6516	4,2050	3,8361	3,6485	3,5390	-
	Vo vd. (2015a) <sup>(3)</sup>	5,4610	4,6659	4,2347	3,8765	3,6824	3,5590	-
A-S	Bu Çalışma	1,9504	1,6612	1,5017	1,3704	1,3041	1,2652	1,0135
	Turan (2018) <sup>(1)</sup>	1,9505	1,6611	1,5018	1,3704	1,3045	1,2656	1,0705
	Şimşek (2010) <sup>(2)</sup>	1,9495	1,6605	1,5011	1,3696	1,3033	1,2645	-
	Vo vd. (2015a) <sup>(3)</sup>	1,9527	1,6681	1,5139	1,3862	1,3176	1,2736	-

<sup>(1)</sup> Birinci mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorisi ile sonlu eleman çözümü

<sup>(2)</sup> Parabolik kayma deformasyonu teorisi ile analitik çözüm

<sup>(3)</sup> Üç boyutlu kiriş teorisi ile sonlu eleman metodu

### 3.1. Serbest titreşim analizi

#### 3.1. Free vibration analysis

Serbest titreşim analizlerini gerçekleştirmek için öncelikle problemin çözümünde kullanılan sonlu eleman yönteminde yeterli sonlu eleman sayısını tespit etmek için yakınsama çalışması yapılmalıdır. Farklı sınır şartları altında  $L/h=5$  ve  $p=1$  değerlerine göre FD kirişin maksimum boyutsuz doğal frekanslarının eleman sayısına bağlı değişimleri Tablo 2’de verilmiştir. Tablodan görüleceği üzere eleman sayısı arttıkça elde edilen değerler yakınsamaktadır. Yapılan sayısal hesaplarda istenilen doğrulukta sonuç elde etmek için 14 elemanın yeterli olduğu görülmektedir. Bu sebeple, bu bölümde sayısal sonuçlar 14 elemana göre türetilmiştir.

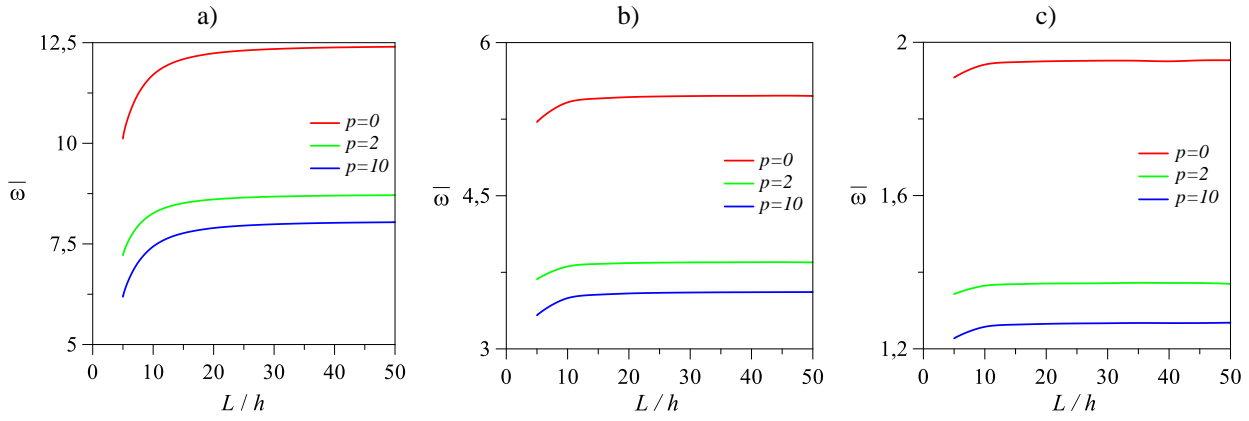
Önerilen sonlu elemanın doğruluğu ortaya koymak için metal malzeme olarak alüminyum (Al) ve seramik malzeme olarak alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ) kullanılmış ve elde edilen sonuçların literatür ile karşılaştırılması Tablo 3’de verilmiştir. Farklı sınır şartları, farklı  $L/h$  oranı ve farklı  $p$  değerlerine göre bu çalışmanın sonuçları, birinci mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorisine göre sonlu elemanlar yöntemine göre çözüm yapan Turan (2018), parabolik kayma deformasyonlu kiriş teorisine göre analitik çözüm yapan Şimşek (2010) ve üç boyutlu kiriş teorisini kullanarak sonlu elemanlar yöntemine göre çözüm yapan Vo vd. (2015a) ile kıyaslanmıştır. Sonuçların oldukça uyumlu oldukları görülmektedir. Literatüre katkı sağlamak için ayrıca Al/ $Al_2N_3$ , SUS304/ $Al_2O_3$  ve SUS304/ $Al_2N_3$  malzemelerine göre de analizler yapılarak Tablo 4’te sonuçlar verilmiştir. Tablolardan görüleceği üzere  $p$  değerinin artmasıyla birlikte FD kirişin hacmindeki metal malzeme özelliği artacağından kirişin rijitliği azalmaktadır. Bu sebeple kirişin boyutsuz doğal frekans değerleri de azalmaktadır. Farklı sınır şartları arasındaki kıyaslamaya bakıldığında en küçük boyutsuz doğal frekans değerleri konsol (A-S) kirişte en büyük boyutsuz doğal frekans değerleri ise iki ucu ankastre (A-A) kirişte meydana gelmektedir. Narinlik değerinin ( $L/h$ ) artmasıyla boyutsuz doğal frekans değerleri artmaktadır.

Şekil 4’te çeşitli sınır şartlarına sahip FD kirişin farklı kuvvet fonksiyonu üst indisi ( $p$ ) ve farklı narinlik ( $L/h$ ) değerlerine göre boyutsuz doğal frekanslarının değişimleri verilmiştir. Grafiklere bakıldığında narinlik oranı arttıkça boyutsuz doğal frekans değerinin belli bir  $L/h$  değerine kadar arttığı daha sonrasında sabit kaldığı görülmektedir.  $p$  değerinin sıfır olduğu yani FD kirişin tamamının seramik fazdan oluştuğu durumlarda en büyük boyutsuz doğal frekans değerleri elde edilmiştir. Seramik fazın hacimsel oranının git gide azalmasıyla yani  $p$  değerinin artmasıyla boyutsuz doğal frekansların azaldığı bu grafiklerden de görülmektedir.

**Tablo 4.**  $L/h$  ve  $p$ ’ye göre farklı tip malzemeli FD kirişin boyutsuz doğal frekansları

**Table 4.** Dimensionless fundamental frequencies of FG beam with different types of material according to  $L/h$  and  $p$

Malzeme	Kiriş	$p = 0$	$p = 0,5$	$p = 1$	$p = 2$	$p = 5$	$p = 10$	$p \rightarrow \infty$
<i><math>L/h=5</math></i>								
Al/ $Al_2N_3$	A-A	10,07191	8,64779	7,85474	7,10040	6,42205	6,09196	5,25710
	B-B	5,19856	4,40258	3,98730	3,63934	3,40095	3,26069	2,71342
	A-S	1,89942	1,60449	1,45236	1,32832	1,24976	1,20075	0,99141
SUS304/ $Al_2O_3$	A-A	10,37895	8,09887	7,26201	6,57611	5,98458	5,71200	5,27074
	B-B	5,35710	4,15544	3,73144	3,40244	3,12591	2,98194	2,71535
	A-S	1,95726	1,51654	1,36223	1,24386	1,14496	1,09202	0,99178
SUS304/ $Al_2N_3$	A-A	10,33194	7,87131	7,05690	6,40917	5,86336	5,62168	5,27074
	B-B	5,33277	4,04655	3,63300	3,31531	3,04933	2,92093	2,71535
	A-S	1,94847	1,47737	1,32675	1,21194	1,11589	1,06870	0,99178
<i><math>L/h = 20</math></i>								
Al/ $Al_2N_3$	A-A	12,1807	10,2802	9,3046	8,5147	8,0283	7,7187	6,3578
	B-B	5,4411	4,5859	4,1497	3,8013	3,5966	3,4619	2,8400
	A-S	1,9416	1,6361	1,4805	1,3563	1,2840	1,2361	1,0135
SUS304/ $Al_2O_3$	A-A	12,5520	9,7218	8,7333	7,9779	7,3480	7,0082	6,3593
	B-B	5,6070	4,3401	3,8995	3,5647	3,2865	3,1343	2,8401
	A-S	2,0007	1,5485	1,3914	1,2721	1,1173	1,1187	1,0135
SUS304/ $Al_2N_3$	A-A	12,4952	9,4718	8,5069	7,7728	7,1594	6,8561	6,3593
	B-B	5,5815	4,2293	3,7991	3,4729	3,2007	3,0647	2,8402
	A-S	1,9917	1,5091	1,3557	1,2394	1,1423	1,0937	1,0135



**Şekil 4.** a) İki ucu ankastre, b) basit mesnetli, c) konsol Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> FD kirişlerin  $L/h$ 'ye göre boyutsuz doğal frekanslarının değişimi

**Figure 4.** Variation of dimensionless fundamental frequencies of a) clamped two ends, b) simply supported, c) cantilever Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> FG beams with respect to  $L/h$

### 3.2. Statik analiz

#### 3.2. Static analysis

Bu bölümde, düzgün  $q$  yayılı yükü yüklenmiş farklı sınır şartları, farklı  $L/h$  ve farklı  $p$  değerleri için FD kirişin statik analizi yüksek mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorisine göre sonlu elemanlar yöntemiyle yapılmıştır. Analizler sonucunda kirişin boyutsuz yer değiştirme değerleri, boyutsuz normal ve kayma gerilme değerleri elde edilmiştir. Çalışmada, yayılı yük  $q=10000\text{N/m}$ ,  $L=2\text{m}$ ,  $b=0,1\text{m}$  olarak alınmış ve  $L/h=5$  ve  $20$  için analizler yapılmıştır.

Statik analizde de ilk olarak yakınsama çalışması yapılarak sonlu eleman yöntemi için yeterli sonlu eleman sayısı belirlenmektedir. Yakınsama çalışması için  $L/h=5$  ve  $p=1$  değerlerine göre farklı sınır şartları için boyutsuz maksimum yer değiştirme değerlerinin eleman sayısı ile değişimi Tablo 5'te verilmiştir. Tablo incelendiğinde eleman sayısı arttıkça maksimum boyutsuz yer değiştirmeler belli bir değere kadar artmış ve bu değerden itibaren sabit kalarak yakınsamıştır. Tabloya göre 14 sonlu eleman sayısının yeterli olduğu görülmektedir. Statik analizlerde bütün sayısal sonuçlar 14 eleman sayısına göre elde edilmiştir.

Önerilen sonlu elemanın doğruluğu araştırmak için metal malzeme olarak Al ve seramik malzeme olarak da Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kullanılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sayısal sonuçlar, birinci mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorisine göre sonlu elemanlar yöntemi ve analitik yöntem ile çözüm yapan Turan (2018), birinci ve üçüncü mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorilerine göre analitik çözüm yapan Vo vd. (2015b) ile karşılaştırmalı olarak Tablo 6'da verilmiştir. Tablo incelendiğinde sonuçların oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Literatüre katkı sağlamak amacıyla Al/Al<sub>2</sub>N<sub>3</sub>, SUS304/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve SUS304/Al<sub>2</sub>N<sub>3</sub> malzemeleri kullanılarak elde edilen boyutsuz yer değiştirmeler Tablo 7'de verilmiştir. Tabloya göre farklı malzemelerden oluşturulan FG kirişlerin statik davranışlarının oldukça değiştiği görülmektedir. Elastisite modülü küçük malzemeler kullanıldığında kirişin rijitliği düştüğü için daha büyük yer değiştirmeler meydana gelmektedir. Ayrıca Tablo 6 ve 7'ye bakıldığında tüm sınır şartlarında geçerli olmak üzere en küçük yer değiştirme  $p=0$  (kirişin tamamı seramik) durumunda, en büyük yer değiştirme ise  $p \rightarrow \infty$  (kirişin tamamı metal) durumunda meydana gelmektedir.

Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> malzemesine göre basit mesnetli FD kirişin boyutsuz normal ve kayma gerilme değerleri Tablo 8'de Turan (2018) ve Vo vd. (2015b) ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tablo incelendiğinde elde edilen sonuçların literatürle oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca tablodan görüldüğü üzere farklı  $L/h$  değerleri için elde edilen boyutsuz normal gerilmeler, kirişin malzeme özelliğinin seramikten metale doğru artmasıyla (yani  $p$ 'nin artırılmasıyla) artmaktadır. Buna ilave olarak  $L/h$  değerinin artmasıyla normal gerilmelerin arttığı da söylenebilmektedir. Boyutsuz kayma gerilmeleri ise malzeme özelliğinin seramikten metale doğru geçmesiyle yani  $p$  değerinin artmasıyla beraber belli bir kurala göre değişim göstermemektedir. Ancak  $L/h$  değerinin artmasıyla az da olsa artmaktadır. Tablo 9'da FD kirişte Al/Al<sub>2</sub>N<sub>3</sub>, SUS304/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve SUS304/Al<sub>2</sub>N<sub>3</sub> malzemeleri kullanılarak elde edilen boyutsuz normal ve kayma gerilmeleri verilmiştir.

Şekil 5'te sırasıyla iki ucu ankastre, basit mesnetli ve konsol Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> malzemeli FD kirişlerin farklı kuvvet fonksiyonu üst indisine ( $p$ ) göre elde edilen boyutsuz maksimum yer değiştirmelerin  $L/h$ 'ye göre değişim grafikleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde  $p$  değeri arttıkça boyutsuz maksimum yer değiştirme değerlerinin arttığı, ancak  $L/h$  oranının artmasıyla boyutsuz yer değiştirme değerlerinin azaldığı ve belli bir değerden sonra sabit seyrettiği görülmüştür.

**Tablo 5.** Farklı sınır şartlarına sahip Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> FD kirişlerin  $L/h=5$  ve  $p=1$  için maksimum boyutsuz yer değiştirmelerinin eleman sayısı ile değişimi

**Table 5.** Variation of maximum dimensionless deflections of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> FG beams with different boundary conditions for  $L/h=5$  and  $p=1$  with the number of elements

Sınır Şartları	Eleman Sayısı							
	4	6	8	10	12	14	16	20
A-A	1,6289	1,6308	1,6316	1,6320	1,6322	1,6323	1,6323	1,6324
B-B	6,2608	6,2608	6,2608	6,2608	6,2608	6,2608	6,2608	6,2608
A-S	21,0680	21,0720	21,0736	21,0744	21,0748	21,0750	21,0751	21,0752

**Tablo 6.** Farklı sınır şartlarına sahip Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> FD kirişlerin boyutsuz maksimum yer değiştirmeleri

**Table 6.** Dimensionless maximum deflections of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> FG beams with different boundary conditions

Kiriş	Teori	$p = 0$	$p = 0,5$	$p = 1$	$p = 2$	$p = 5$	$p = 10$	$p \rightarrow \infty$
<i>L/h=5</i>								
A-A	Bu Çalışma	0,8577	1,2702	1,6323	2,1396	2,8033	3,2141	4,2707
	Turan (2018) <sup>(1)</sup>	0,8630	1,2827	1,6403	2,1101	2,6477	3,0337	4,2817
	Turan (2018) <sup>(2)</sup>	0,8547	1,2713	1,6262	2,0918	2,6216	3,0014	4,2384
	Vo vd. (2015b) <sup>(2)</sup>	0,8630	-	1,6398	2,1092	2,6468	3,0331	-
	Vo vd. (2015b) <sup>(3)</sup>	0,8501	-	1,6179	2,1151	2,7700	3,1812	-
B-B	Bu Çalışma	3,1654	4,8286	6,2608	8,0770	9,8412	10,9419	15,4480
	Turan (2018) <sup>(1)</sup>	3,1657	4,8349	6,2599	8,0303	9,6483	10,7194	15,4310
	Turan (2018) <sup>(2)</sup>	3,1657	4,8349	6,2600	8,0304	9,6485	10,7196	15,4311
	Vo vd. (2015b) <sup>(2)</sup>	3,1657	-	6,2599	8,0303	9,6483	10,7194	-
	Vo vd. (2015b) <sup>(3)</sup>	3,1654	-	6,2594	8,0677	9,8281	10,9381	-
A-S	Bu Çalışma	28,7706	44,1677	57,3656	73,7185	88,3009	97,4906	139,7827
	Turan (2018) <sup>(1)</sup>	28,7811	44,2042	57,3774	73,5629	87,5977	96,6782	139,7664
	Turan (2018) <sup>(2)</sup>	28,7473	44,1577	57,3202	73,4886	87,4922	96,5477	139,5909
	Vo vd. (2015b) <sup>(2)</sup>	28,7811	-	57,3756	73,5593	87,5939	96,6757	-
	Vo vd. (2015b) <sup>(3)</sup>	28,7555	-	57,3323	73,6482	88,2044	97,4151	-
<i>L/h=20</i>								
A-A	Bu Çalışma	0,5935	0,9122	1,1851	1,5220	1,8175	2,0039	2,8881
	Turan (2018) <sup>(1)</sup>	0,5936	0,9127	1,1852	1,5194	1,8063	1,9909	2,8806
	Turan (2018) <sup>(2)</sup>	0,5931	0,9119	1,1843	1,5182	1,8045	1,9888	2,8778
	Vo vd. (2015b) <sup>(2)</sup>	0,5936	-	1,1848	1,5186	1,8053	1,9903	-
	Vo vd. (2015b) <sup>(3)</sup>	0,5933	-	1,1843	1,5203	1,8155	2,0027	-
B-B	Bu Çalışma	2,8962	4,4644	5,8049	7,4426	8,8190	9,6907	14,0307
	Turan (2018) <sup>(1)</sup>	2,8962	4,4648	5,8049	7,4396	8,8069	9,6767	14,0297
	Turan (2018) <sup>(2)</sup>	2,8962	4,4648	5,8049	7,4397	8,8069	9,6767	14,0297
	Vo vd. (2015b) <sup>(2)</sup>	2,8962	-	5,8049	7,4397	8,8069	9,6767	-
	Vo vd. (2015b) <sup>(3)</sup>	2,8962	-	5,8049	7,4421	8,8182	9,6905	-
A-S	Bu Çalışma	27,7031	42,7223	55,5573	71,2114	84,2787	92,5611	134,1646
	Turan (2018) <sup>(1)</sup>	27,7034	42,7242	55,5575	71,2005	84,2320	92,5074	134,1623
	Turan (2018) <sup>(2)</sup>	27,7008	42,7204	55,5528	71,1944	84,2237	92,4974	134,1487
	Vo vd. (2015b) <sup>(2)</sup>	27,7034	-	55,5556	71,1968	84,2282	92,5048	-
	Vo vd. (2015b) <sup>(3)</sup>	27,7029	-	55,5546	71,2051	84,2712	92,5571	-

<sup>(1)</sup> Birinci mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorisi ile sonlu eleman çözümü

<sup>(2)</sup> Birinci mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorisi ile analitik çözümü

<sup>(3)</sup> Üçüncü mertebeye kayma deformasyonu teorisi ile analitik çözüm

**Tablo 7.**  $L/h$  ve  $p$ 'ye göre farklı tip malzemeli FD kirişin boyutsuz maksimum yer değiştirmeleri  
**Table 7.** Dimensionless maximum deflections of FD beam with different types of material according to  $L/h$  and  $p$

Malzeme	Kiriş	$p = 0$	$p = 0,5$	$p = 1$	$p = 2$	$p = 5$	$p = 10$	$p \rightarrow \infty$
$L/h=5$								
Al/Al <sub>2</sub> N <sub>3</sub>	A-A	1,0514	1,5142	1,8931	2,3893	3,0093	3,3926	4,3471
	B-B	3,8801	5,7387	7,2151	8,9379	10,5687	11,6716	15,7936
	A-S	35,2672	52,4588	66,0217	81,4264	94,8702	104,2928	143,0525
SUS304/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A-A	2,4633	2,9893	3,2877	3,5916	3,9262	4,1336	4,5447
	B-B	9,0909	11,1594	12,2391	13,1931	14,1603	14,9238	16,7641
	A-S	82,6292	101,6849	111,4487	119,7705	128,0147	134,9623	152,3561
SUS304/Al <sub>2</sub> N <sub>3</sub>	A-A	3,0196	3,4657	3,6942	3,9163	4,1567	4,3045	4,5784
	B-B	11,1437	12,8894	13,7018	14,3923	15,1179	15,6833	16,9155
	A-S	101,2874	117,3529	124,6710	130,6801	136,9447	142,1318	153,7860
$L/h = 20$								
Al/Al <sub>2</sub> N <sub>3</sub>	A-A	0,7275	1,0833	1,3636	1,6805	1,9528	2,1448	2,9490
	B-B	3,5502	5,3003	6,6753	8,2108	9,4768	10,3855	14,3682
	A-S	33,9587	50,7189	63,8815	78,5514	90,5673	99,2188	137,4011
SUS304/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A-A	1,7045	2,0986	2,2998	2,4702	2,6382	2,7815	3,1428
	B-B	2,8962	4,4644	5,8050	7,4426	8,8190	9,6907	14,0307
	A-S	79,5634	98,0876	107,4571	115,2341	122,7993	129,4907	146,6921
SUS304/Al <sub>2</sub> N <sub>3</sub>	A-A	2,0894	2,4215	2,5723	2,6952	2,8232	2,9304	3,1725
	B-B	10,1962	11,8263	12,5588	13,1468	13,7562	14,2812	15,4835
	A-S	97,5293	113,1354	120,1379	125,7429	131,5498	136,5750	148,1061

**Tablo 8.** Basit mesnetli Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> FD kirişin boyutsuz normal ve kayma gerilmeleri  
**Table 8.** Dimensionless normal and shear stresses of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> FD beam with simply supported

Kiriş	Teori	$p = 0$	$p = 0,5$	$p = 1$	$p = 2$	$p = 5$	$p = 10$	$p \rightarrow \infty$
$L/h=5$								
$\bar{\sigma}_{xx}(L/2, h/2)$	Bu Çalışma	3,8147	5,0111	5,9117	6,9334	8,1809	9,7576	17,6662
	Turan (2018) <sup>(1)</sup>	3,7750	4,9534	5,8345	6,8127	7,9957	9,5863	17,5253
	Turan (2018) <sup>(2)</sup>	3,7507	4,9215	5,7969	6,7689	7,9442	9,5246	17,4125
	Vo vd. (2015b) <sup>(2)</sup>	3,7500	-	5,7959	6,7676	7,9428	9,5228	-
	Vo vd. (2015b) <sup>(3)</sup>	3,8020	-	5,8836	6,8826	8,1106	9,7122	-
$\bar{\tau}_{xz}(0,0)$	Bu Çalışma	0,7365	0,7530	0,7365	0,6836	0,6131	0,6639	0,7173
	Turan (2018) <sup>(1)</sup>	0,6000	0,6272	0,6000	0,5106	0,3930	0,4296	0,5748
	Turan (2018) <sup>(2)</sup>	0,5827	0,6091	0,5827	0,4958	0,3816	0,4172	0,5582
	Vo vd. (2015b) <sup>(2)</sup>	0,5976	-	0,5976	0,5085	0,3914	0,4279	-
	Vo vd. (2015b) <sup>(3)</sup>	0,7332	-	0,7332	0,6706	0,5905	0,6467	-
$L/h=20$								
$\bar{\sigma}_{xx}(L/2, h/2)$	Bu Çalışma	15,0639	19,7678	23,2861	27,1980	31,9317	38,2711	69,9224
	Turan (2018) <sup>(1)</sup>	15,0099	19,8137	23,3379	27,2508	31,9828	38,3451	70,1010
	Turan (2018) <sup>(2)</sup>	15,0027	19,6861	23,1876	27,0754	31,7769	38,0983	69,6498
	Vo vd. (2015b) <sup>(2)</sup>	15,0000	-	23,1834	27,0704	31,7711	38,0913	-
	Vo vd. (2015b) <sup>(3)</sup>	15,0129	-	23,2053	27,0991	31,8130	38,1385	-
$\bar{\tau}_{xz}(0,0)$	Bu Çalışma	0,7478	0,7639	0,7478	0,6962	0,6268	0,6778	0,7286
	Turan (2018) <sup>(1)</sup>	0,6000	0,6272	0,6000	0,5106	0,3930	0,4296	0,5748
	Turan (2018) <sup>(2)</sup>	0,5827	0,6091	0,5827	0,4958	0,3816	0,4172	0,5582
	Vo vd. (2015b) <sup>(2)</sup>	0,5976	-	0,5976	0,5085	0,3914	0,4279	-
	Vo vd. (2015b) <sup>(3)</sup>	0,7451	-	0,7451	0,6824	0,6023	0,6596	-

<sup>(1)</sup> Birinci mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorisi ile sonlu eleman çözümü

<sup>(2)</sup> Birinci mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorisi ile analitik çözümü

<sup>(3)</sup> Üçüncü mertebede kayma deformasyonu teorisi ile analitik çözüm

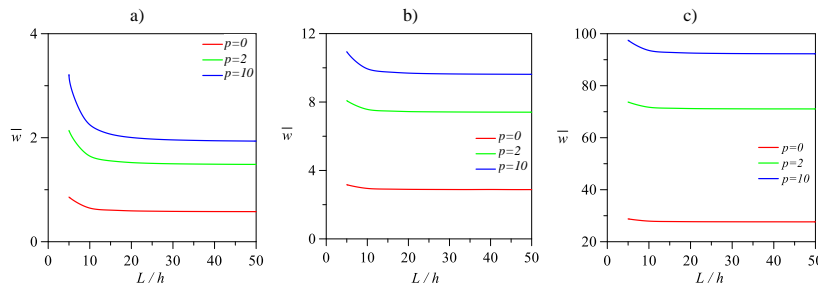
Şekil 6'da sırasıyla iki ucu ankastre, basit mesnetli ve konsol Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> malzemeli FD kirişlerin  $L/h=5$  için farklı  $p$  değerlerine göre  $x/L$  boyunca boyutsuz yer değiştirmelerinin değişimi verilmektedir. Basit mesnetli ve

iki ucu ankastre mesnetli kirişte en büyük boyutsuz yer değiştirme değerleri kirişin orta kesitinde meydana gelmektedir. Konsol FD kirişte ise boyutsuz en büyük yer değiştirmeler kirişin serbest ucunda meydana gelmektedir. Ayrıca  $p$ 'nin artmasıyla boyutsuz yer değiştirme değerleri de artmaktadır.

Şekil 7a'da basit mesnetli Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> FDM kirişin farklı  $p$  değerlerine göre elde edilen sırasıyla boyutsuz normal ve kayma gerilmelerinin  $L/h=5$ 'e göre değişimleri verilmiştir. Basit mesnetli kirişin boyutsuz normal gerilme değerlerine kirişin orta kesitinde, kayma gerilmesine ise sol kenarda bakılmaktadır. Mutlak değerce en büyük boyutsuz normal gerilme değerleri kiriş kesitinin üst yüzeyinde ve  $p=10$  olması durumunda meydana gelmektedir. Boyutsuz kayma gerilmeleri kirişin alt ve üst yüzeylerinde beklenildiği gibi sıfır olmakta ve en büyük kayma gerilmesi  $p=2$  için kesitin yaklaşık olarak  $z/h=0,25$ 'lik noktasında meydana gelmektedir. Şekil 7b'de FD kirişin iki ucu ankastre mesnet sınır şartına göre boyutsuz normal ve kayma gerilmelerinin  $L/h=5$  için  $z/h$ 'ye göre değişimleri verilmiştir. Gerilmelerin dağılımları basit mesnetli FD kirişe benzemektedir, fakat büyüklükleri farklıdır. Ayrıca kayma gerilmelerine  $L/4$ 'de bakılmıştır. Basit mesnetli FD kiriş için yapılan yorumlara benzer yorumlar bunun içinde yapılabilir. Şekil 7c'de konsol Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> FD kirişin  $L/h=5$ 'e göre boyutsuz normal ve kayma gerilmelerinin  $z/h$  ile değişimi verilmektedir. Boyutsuz normal gerilmeler için kirişin sol kenar kesitine bakılmakta, kayma gerilmeleri için  $L/4$ 'deki kesite bakılmaktadır. FD kirişin çekme bölgesi kirişin alt kısmında basınç bölgesi ise kirişin üst kısmında oluşmaktadır. Kirişin alt yüzeyinden üst yüzeyine doğru çıkıldıkça mutlak değerce en büyük boyutsuz normal gerilmeler artmaktadır. Kesitin üst yüzeyinde mutlak değerce en büyük normal gerilme  $p=10$ 'da, en küçük ise  $p=0$ 'da oluşmaktadır.

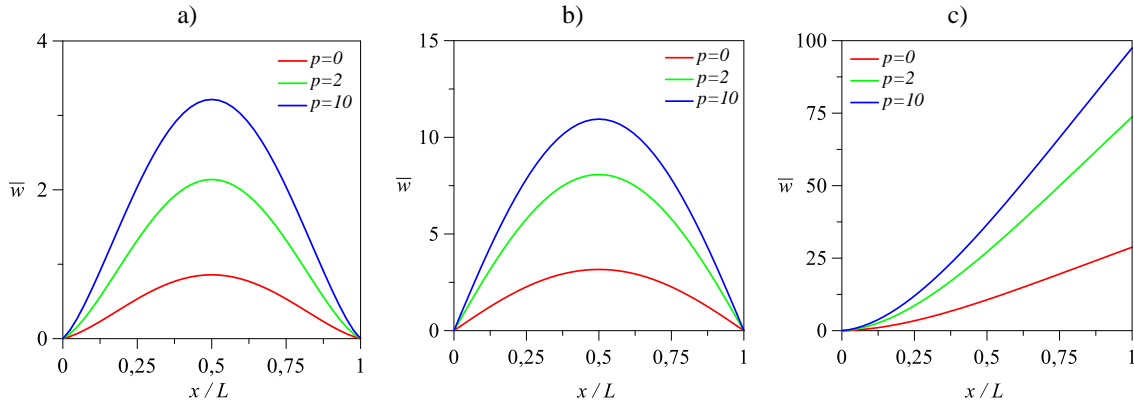
**Tablo 9.** Basit mesnetli FD kirişin farklı malzemelere göre boyutsuz normal ve kayma gerilmeleri  
**Table 9.** Dimensionless normal and shear stresses of simply supported FG beam for different materials

Malzeme	Gerilme	$p = 0$	$p = 0,5$	$p = 1$	$p = 2$	$p = 5$	$p = 10$	$p \rightarrow \infty$
$L/h=5$								
Al/Al <sub>2</sub> N <sub>3</sub>	$\bar{\sigma}_{xx}(L/2, h/2)$	3,8147	4,9118	5,6833	6,5168	7,6060	8,9797	14,9044
	$\bar{\tau}_{xz}(0,0)$	0,7365	0,7517	0,7365	0,6897	0,6339	0,6769	0,7206
SUS304/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\bar{\sigma}_{xx}(L/2, h/2)$	3,8147	4,3571	4,6331	4,9098	5,3586	5,8233	6,9668
	$\bar{\tau}_{xz}(0,0)$	0,7366	0,7443	0,7366	0,7177	0,7169	0,7169	0,7317
SUS304/Al <sub>2</sub> N <sub>3</sub>	$\bar{\sigma}_{xx}(L/2, h/2)$	3,8147	4,1935	4,3718	4,5524	4,8482	5,1329	5,7590
	$\bar{\tau}_{xz}(0,0)$	0,7366	0,7420	0,7367	0,7242	0,7158	0,7239	0,7336
$L/h=20$								
Al/Al <sub>2</sub> N <sub>3</sub>	$\bar{\sigma}_{xx}(L/2, h/2)$	15,0639	19,3753	22,3833	25,5674	29,7415	35,2794	58,9704
	$\bar{\tau}_{xz}(0,0)$	0,7478	0,7626	0,7478	0,7021	0,6473	0,6904	0,7319
SUS304/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\bar{\sigma}_{xx}(L/2, h/2)$	15,0639	17,1910	18,2604	19,3245	21,1025	22,9823	27,5339
	$\bar{\tau}_{xz}(0,0)$	0,7478	0,7553	0,7478	0,7293	0,7156	0,7286	0,7428
SUS304/Al <sub>2</sub> N <sub>3</sub>	$\bar{\sigma}_{xx}(L/2, h/2)$	15,0639	16,5489	17,2397	17,9375	19,1150	20,2665	22,7554
	$\bar{\tau}_{xz}(0,0)$	0,7478	0,7530	0,7478	0,7356	0,7274	0,7354	0,7446

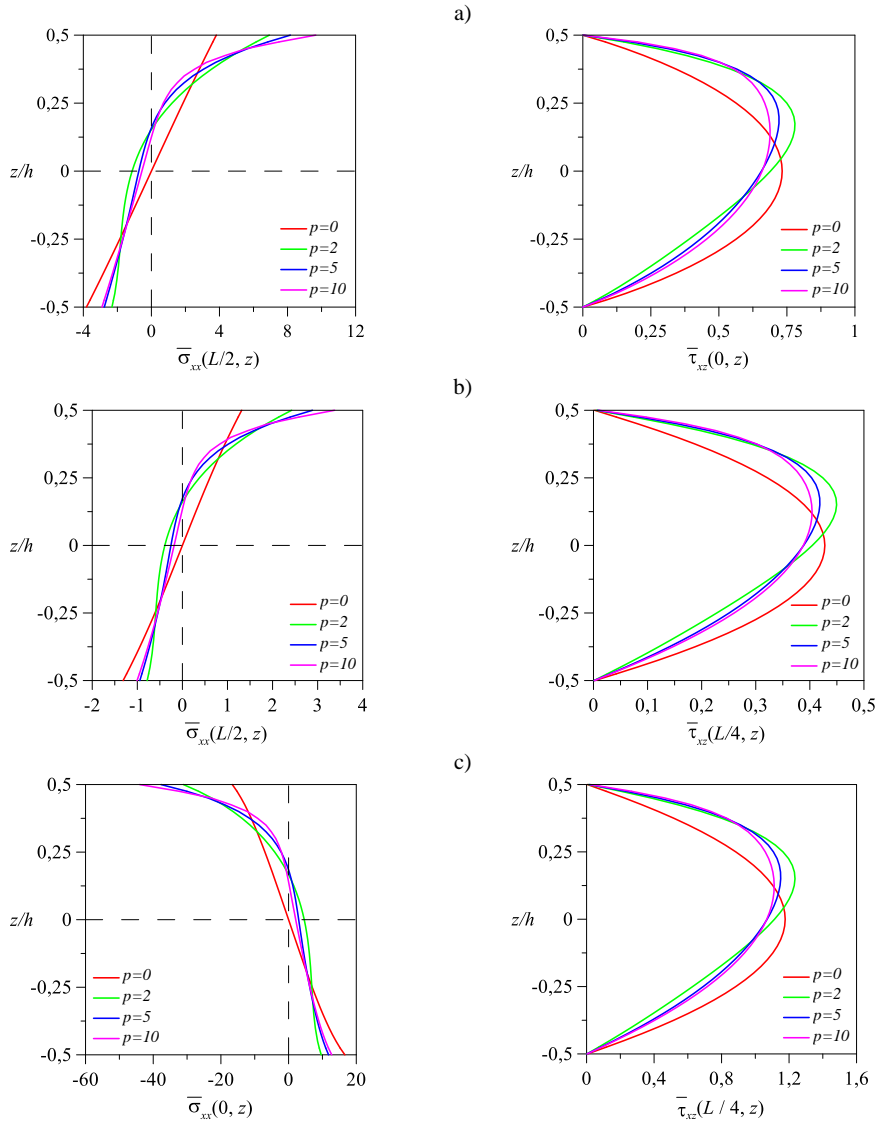


**Şekil 5.** a) İki ucu ankastre, b) basit mesnetli, c) konsol Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> FD kirişlerin  $L/h$ 'ye göre boyutsuz maksimum yer değiştirmelerinin değişimi

**Figure 5.** Variation of dimensionless maximum deflections of a) clamped two ends, b) simply supported, c) cantilever Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> FG beams with respect to  $L/h$



**Şekil 6.** a) İki ucu ankastre, b) basit mesnetli, c) konsol Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> FD kirişlerin  $x/L$ 'ye göre boyutsuz yer değiştirmelerinin değişimi ( $L/h=5$ )  
**Figure 6.** Variation of dimensionless deflections of a) clamped two ends, b) simply supported, c) cantilever Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> FG beams with respect to  $x/L$  ( $L/h=5$ )



**Şekil 7.** a) Basit mesnetli, b) iki ucu ankastre, c) konsol Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> FD kirişlerin  $z/h$ 'ye göre boyutsuz normal ve kayma gerilmelerinin değişimi ( $L/h=5$ )  
**Şekil 7.** Variation of dimensionless normal and shear stresses of a) simply supported, b) clamped two ends, c) cantilever Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> FG beams with respect to  $z/h$  ( $L/h=5$ )



## 4. Sonuçlar

### 4. Conclusions

Bu çalışmada, yüksek mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorisine göre sonlu elemanlar modeliyle farklı malzemeli FD kirişlerin serbest titreşimi ve statik analizi incelenmiştir. Sonlu eleman yöntemi için beş düğüm noktalı ve on altı serbestlik dereceli yüksek mertebeli kiriş elemanı önerilmiştir. FD kirişin serbest titreşim ve statik analizi farklı sınır şartları, farklı  $p$  değerleri ve farklı narinlik oranlarına ( $L/h$ ) göre incelenmiş ve kirişe ait boyutsuz doğal frekanslar, boyutsuz yer değiştirmeler, boyutsuz gerilmeler elde edilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Önerilen yüksek mertebeden kayma deformasyonlu kiriş elemanı, farklı sınır koşullarına sahip FD kirişlerin doğal frekanslarını, yer değiştirme ve gerilme değerlerini doğru şekilde tahmin edebilmektedir.
- En büyük boyutsuz doğal frekanslar iki ucu ankastre sınır şartında, en küçük doğal frekanslar ise konsol kiriş durumunda elde edilmiştir.
- $p$ 'nin artmasıyla kiriş hacmindeki metal oranı artacağı için rijitlik azalmaktadır ve bu sebeple doğal frekanslar da azalmaktadır.
- Narinlik arttıkça boyutsuz doğal frekanslarda artmaktadır.
- $p$ 'nin artmasıyla birlikte boyutsuz maksimum yer değiştirmeler artmaktadır.
- $L/h$  değerinin artmasıyla boyutsuz maksimum yer değiştirmeler azalmaktadır.
- $p$ 'nin artmasıyla bütün sınır şartları için kesitin üst yüzeyinde mutlak değerce en büyük boyutsuz normal gerilmeler artmaktadır. Kayma gerilmelerinde ise en büyük değerler kesitin ortasından üste doğru kaymaktadır.

### Yazar katkısı

#### Author contribution

Çalışmanın tamamı yazarlar tarafından eşit katkıyla yapılmıştır.

### Etik beyanı

#### Declaration of ethical code

Bu çalışmada, Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi” kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin “Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederim.

### Çıkar çatışması beyanı

#### Conflicts of interest

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederim.

### Kaynaklar

#### References

- Aboudi, J., Pindera, M. J., & Arnold, S. M. (1999). Higher-order theory for functionally graded materials. *Composites Part B: Engineering*, 30(8), 777–832. [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(99\)00053-0](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(99)00053-0)
- Akbaş, Ş. D. (2017). Fonksiyonel derecelendirilmiş ortotropik bir kirişin statik ve titreşim davranışlarının incelenmesi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20(1), 1–14. <https://doi.org/10.25092/baunfbed.343227>
- Akbaş, Ş. D. (2021). Forced vibration responses of axially functionally graded beams by using Ritz method. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 7(1), 109–115. <https://doi.org/10.22055/jacm.2020.34865.2491>
- Alshorbagy, A. E., Eltaher, M. A., & Mahmoud, F. F. (2011). Free vibration characteristics of a functionally graded beam by finite element method. *Applied Mathematical Modelling*, 35(1), 412–425. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.07.006>
- Avcar, M., Hadji, L., & Civalek, Ö. (2021). Natural frequency analysis of sigmoid functionally graded sandwich beams in the framework of high order shear deformation theory. *Composite Structures*, 276(June). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114564>

- Aydogdu, M., & Taskin, V. (2007). Free vibration analysis of functionally graded beams with simply supported edges. *Materials and Design*, 28(5), 1651–1656. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.02.007>
- Belarbi, M. O., Houari, M. S. A., Hirane, H., Daikh, A. A., & Bordas, S. P. A. (2022). On the finite element analysis of functionally graded sandwich curved beams via a new refined higher order shear deformation theory. *Composite Structures*, 279(September 2021). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114715>
- Chakraborty, A., Gopalakrishnan, S., & Reddy, J. N. (2003). A new beam finite element for the analysis of functionally graded materials. *International Journal of Mechanical Sciences*, 45(3), 519–539. [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(03\)00058-4](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(03)00058-4)
- Filippi, M., Carrera, E., & Zenkour, A. M. (2015). Static analyses of FGM beams by various theories and finite elements. *Composites Part B: Engineering*, 72, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.12.004>
- Jin, C., & Wang, X. (2015). Accurate free vibration analysis of Euler functionally graded beams by the weak form quadrature element method. *Composite Structures*, 125, 41–50. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.01.039>
- Kahya, V., & Turan, M. (2017). Finite element model for vibration and buckling of functionally graded beams based on the first-order shear deformation theory. *Composites Part B: Engineering*, 109, 108–115. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.10.039>
- Kahya, V., & Turan, M. (2018). Vibration and buckling of laminated beams by a multi-layer finite element model. *Steel and Composite Structures*, 28(4), 415–426. <https://doi.org/10.12989/scs.2018.28.4.415>
- Koutoati, K., Mohri, F., Daya, E. M., & Carrera, E. (2021). A finite element approach for the static and vibration analyses of functionally graded material viscoelastic sandwich beams with nonlinear material behavior. *Composite Structures*, 274(February), 114315. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114315>
- Li, W., Ma, H., & Gao, W. (2019). A higher-order shear deformable mixed beam element model for accurate analysis of functionally graded sandwich beams. *Composite Structures*, 221(March), 110830. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.04.002>
- Nguyen, T. K., Vo, T. P., & Thai, H. T. (2013). Static and free vibration of axially loaded functionally graded beams based on the first-order shear deformation theory. *Composites Part B: Engineering*, 55, 147–157. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.06.011>
- Oyekoya, O. O., Mba, D. U., & El-Zafrany, A. M. (2009). Buckling and vibration analysis of functionally graded composite structures using the finite element method. *Composite Structures*, 89(1), 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.07.022>
- Reddy, J. N., Nampally, P., & Srinivasa, A. R. (2020). Nonlinear analysis of functionally graded beams using the dual mesh finite domain method and the finite element method. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 127(August), 103575. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2020.103575>
- Şimşek, M. (2010). Fundamental frequency analysis of functionally graded beams by using different higher-order beam theories. *Nuclear Engineering and Design*, 240(4), 697–705. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2009.12.013>
- Thai, H. T., & Vo, T. P. (2012). Bending and free vibration of functionally graded beams using various higher-order shear deformation beam theories. *International Journal of Mechanical Sciences*, 62(1), 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2012.05.014>
- Turan, M. (2018). *Tabakalı kirişlerin statik, serbest titreşim ve burkulma analizleri için bir sonlu eleman modeli*. [Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Turan, M., & Kahya, V. (2018). Fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin Navier methodu ile serbest titreşim analizi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 8(2), 119–130. <https://doi.org/10.31466/kfbd.453833>
- Turan, M., & Kahya, V. (2021). Free vibration and buckling analysis of functionally graded sandwich beams by Navier's method. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(2), 743–757. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.599928>
- Turan, M. (2022). Bending analysis of two-directional functionally graded beams using trigonometric series functions. *Archive of Applied Mechanics*, 92(6), 1841–1858. <https://doi.org/10.1007/s00419-022-02152-y>
- Vo, T. P., Thai, H. T., Nguyen, T. K., Maheri, A., & Lee, J. (2014). Finite element model for vibration and buckling of

functionally graded sandwich beams based on a refined shear deformation theory. *Engineering Structures*, 64, 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.01.029>

Vo, T. P., Thai, H. T., Nguyen, T. K., Inam, F., & Lee, J. (2015a). A quasi-3D theory for vibration and buckling of functionally graded sandwich beams. *Composite Structures*, 119, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.08.006>

Vo, T. P., Thai, H. T., Nguyen, T. K., Inam, F., & Lee, J. (2015b). Static behaviour of functionally graded sandwich beams using a quasi-3D theory. *Composites Part B: Engineering*, 68, 59–74. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.08.030>

Yarasca, J., Mantari, J. L., & Arciniega, R. A. (2016). Hermite-Lagrangian finite element formulation to study functionally graded sandwich beams. *Composite Structures*, 140, 567–581. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.01.015>

Yildirim, S. (2022). Free vibration of axially or transversely graded beams using finite-element and artificial intelligence. *Alexandria Engineering Journal*, 61(3), 2220–2229. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.07.004>

**Ekler**

*Appendices*

$$\mathbf{m}_{11} = \begin{bmatrix} 224\gamma_0 & 112\gamma_0 & -56\gamma_0 \\ 112\gamma_0 & 896\gamma_0 & 112\gamma_0 \\ -56\gamma_0 & 112\gamma_0 & 224\gamma_0 \end{bmatrix}, \mathbf{m}_{13} = \begin{bmatrix} -224\gamma_1 & -112\gamma_1 & 56\gamma_1 \\ -112\gamma_1 & -896\gamma_1 & -112\gamma_1 \\ 56\gamma_1 & -112\gamma_1 & -224\gamma_1 \end{bmatrix}, \mathbf{m}_{14} = \begin{bmatrix} -224\gamma_2 & -112\gamma_2 & 56\gamma_2 \\ -112\gamma_2 & -896\gamma_2 & -112\gamma_2 \\ 56\gamma_2 & -112\gamma_2 & -224\gamma_2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{m}_{15} = \begin{bmatrix} -224\gamma_3 & -112\gamma_3 & 56\gamma_3 \\ -112\gamma_3 & -896\gamma_3 & -112\gamma_3 \\ 56\gamma_3 & -112\gamma_3 & -224\gamma_3 \end{bmatrix}, \mathbf{m}_{22} = \begin{bmatrix} 128\gamma_0 & 99\gamma_0 & -36\gamma_0 & 19\gamma_0 \\ 99\gamma_0 & 648\gamma_0 & -81\gamma_0 & -36\gamma_0 \\ -36\gamma_0 & -81\gamma_0 & 648\gamma_0 & 99\gamma_0 \\ 19\gamma_0 & -36\gamma_0 & 99\gamma_0 & 128\gamma_0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{m}_{33} = \begin{bmatrix} 224\gamma_2 & 112\gamma_2 & -56\gamma_2 \\ 112\gamma_2 & 896\gamma_2 & 112\gamma_2 \\ -56\gamma_2 & 112\gamma_2 & 224\gamma_2 \end{bmatrix}, \mathbf{m}_{34} = \begin{bmatrix} 224\gamma_3 & 112\gamma_3 & -56\gamma_3 \\ 112\gamma_3 & 896\gamma_3 & 112\gamma_3 \\ -56\gamma_3 & 112\gamma_3 & 224\gamma_3 \end{bmatrix}, \mathbf{m}_{35} = \mathbf{m}_{44} = \begin{bmatrix} 224\gamma_4 & 112\gamma_4 & -56\gamma_4 \\ 112\gamma_4 & 896\gamma_4 & 112\gamma_4 \\ -56\gamma_4 & 112\gamma_4 & 224\gamma_4 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{m}_{45} = \begin{bmatrix} 224\gamma_5 & 112\gamma_5 & -56\gamma_5 \\ 112\gamma_5 & 896\gamma_5 & 112\gamma_5 \\ -56\gamma_5 & 112\gamma_5 & 224\gamma_5 \end{bmatrix}, \mathbf{m}_{55} = \begin{bmatrix} 224\gamma_6 & 112\gamma_6 & -56\gamma_6 \\ 112\gamma_6 & 896\gamma_6 & 112\gamma_6 \\ -56\gamma_6 & 112\gamma_6 & 224\gamma_6 \end{bmatrix}, \mathbf{k}_{11} = \begin{bmatrix} 7\alpha_0 & -8\alpha_0 & \alpha_0 \\ -8\alpha_0 & 16\alpha_0 & -8\alpha_0 \\ \alpha_0 & -8\alpha_0 & 7\alpha_0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{k}_{13} = \begin{bmatrix} -7\alpha_1 & 8\alpha_1 & -\alpha_1 \\ 8\alpha_1 & -16\alpha_1 & 8\alpha_1 \\ -\alpha_1 & 8\alpha_1 & -7\alpha_1 \end{bmatrix}, \mathbf{k}_{14} = \begin{bmatrix} -7\alpha_2 & 8\alpha_2 & -\alpha_2 \\ 8\alpha_2 & -16\alpha_2 & 8\alpha_2 \\ -\alpha_2 & 8\alpha_2 & -7\alpha_2 \end{bmatrix}, \mathbf{k}_{15} = \begin{bmatrix} -7\alpha_3 & 8\alpha_3 & -\alpha_3 \\ 8\alpha_3 & -16\alpha_3 & 8\alpha_3 \\ -\alpha_3 & 8\alpha_3 & -7\alpha_3 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{k}_{22} = \begin{bmatrix} 444\beta_0 & -567\beta_0 & 162\beta_0 & -39\beta_0 \\ -567\beta_0 & 1296\beta_0 & -891\beta_0 & 162\beta_0 \\ 162\beta_0 & -891\beta_0 & 1296\beta_0 & -567\beta_0 \\ -39\beta_0 & 162\beta_0 & -567\beta_0 & 444\beta_0 \end{bmatrix}, \mathbf{k}_{23} = \begin{bmatrix} 83L_e\beta_0 & 44L_e\beta_0 & -7L_e\beta_0 \\ -99L_e\beta_0 & 108L_e\beta_0 & -9L_e\beta_0 \\ 9L_e\beta_0 & -108L_e\beta_0 & 99L_e\beta_0 \\ 7L_e\beta_0 & -44L_e\beta_0 & -83L_e\beta_0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{k}_{24} = \begin{bmatrix} 166L_e\beta_1 & 88L_e\beta_1 & -14L_e\beta_1 \\ -198L_e\beta_1 & 216L_e\beta_1 & -18L_e\beta_1 \\ 18L_e\beta_1 & -216L_e\beta_1 & 198L_e\beta_1 \\ 14L_e\beta_1 & -88L_e\beta_1 & -166L_e\beta_1 \end{bmatrix}, \mathbf{k}_{25} = \begin{bmatrix} 249L_e\beta_2 & 132L_e\beta_2 & -21L_e\beta_2 \\ -297L_e\beta_2 & 324L_e\beta_2 & -27L_e\beta_2 \\ 27L_e\beta_2 & -324L_e\beta_2 & 297L_e\beta_2 \\ 21L_e\beta_2 & -132L_e\beta_2 & -249L_e\beta_2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{k}_{33} = \begin{bmatrix} 7\alpha_2 + 16L_e^2\beta_0 & -8\alpha_2 + 8L_e^2\beta_0 & \alpha_2 - 4L_e^2\beta_0 \\ -8\alpha_2 + 8L_e^2\beta_0 & 16\alpha_2 + 64L_e^2\beta_0 & -8\alpha_2 + 8L_e^2\beta_0 \\ \alpha_2 - 4L_e^2\beta_0 & -8\alpha_2 + 8L_e^2\beta_0 & 7\alpha_2 + 16L_e^2\beta_0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{k}_{34} = \begin{bmatrix} 7\alpha_3 + 32L_e^2\beta_1 & -8\alpha_3 + 16L_e^2\beta_1 & \alpha_3 - 8L_e^2\beta_1 \\ -8\alpha_3 + 16L_e^2\beta_1 & 16\alpha_3 + 128L_e^2\beta_1 & -8\alpha_3 + 16L_e^2\beta_1 \\ \alpha_3 - 8L_e^2\beta_1 & -8\alpha_3 + 16L_e^2\beta_1 & 7\alpha_3 + 32L_e^2\beta_1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{k}_{35} = \begin{bmatrix} 7\alpha_4 + 48L_e^2\beta_2 & -8\alpha_4 + 24L_e^2\beta_2 & \alpha_4 - 12L_e^2\beta_2 \\ -8\alpha_4 + 24L_e^2\beta_2 & 16\alpha_4 + 192L_e^2\beta_2 & -8\alpha_4 + 24L_e^2\beta_2 \\ \alpha_4 - 12L_e^2\beta_2 & -8\alpha_4 + 24L_e^2\beta_2 & \alpha_4 + 48L_e^2\beta_2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{k}_{44} = \begin{bmatrix} 7\alpha_4 + 64L_e^2\beta_2 & -8\alpha_4 + 32L_e^2\beta_2 & \alpha_4 - 16L_e^2\beta_2 \\ -8\alpha_4 + 32L_e^2\beta_2 & 16\alpha_4 - 256L_e^2\beta_2 & -8\alpha_4 + 32L_e^2\beta_2 \\ \alpha_4 - 16L_e^2\beta_2 & -8\alpha_4 + 32L_e^2\beta_2 & 7\alpha_4 + 64L_e^2\beta_2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{k}_{45} = \begin{bmatrix} 7\alpha_5 + 96L_e^2\beta_3 & -8\alpha_5 + 48L_e^2\beta_3 & \alpha_5 - 24L_e^2\beta_3 \\ -8\alpha_5 + 48L_e^2\beta_3 & 16\alpha_5 - 384L_e^2\beta_3 & -8\alpha_5 + 48L_e^2\beta_3 \\ \alpha_5 - 24L_e^2\beta_3 & -8\alpha_5 + 48L_e^2\beta_3 & 7\alpha_5 + 96L_e^2\beta_3 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{k}_{55} = \begin{bmatrix} 7\alpha_6 + 144L_e^2\beta_4 & -8\alpha_6 + 72L_e^2\beta_4 & \alpha_6 - 36L_e^2\beta_4 \\ -8\alpha_6 + 72L_e^2\beta_4 & 16\alpha_6 + 576L_e^2\beta_4 & -8\alpha_6 + 72L_e^2\beta_4 \\ \alpha_6 - 36L_e^2\beta_4 & -8\alpha_6 + 72L_e^2\beta_4 & 7\alpha_6 + 144L_e^2\beta_4 \end{bmatrix}, \mathbf{f}_2 = \{L_e q/8 \quad 3L_e q/8 \quad 3L_e q/8 \quad L_e q/8\}^T$$

Buradaki katsayılar  $\alpha_k = \frac{X_k}{3L_e}$ ,  $\beta_l = \frac{Y_l}{120L_e}$ ,  $\gamma_k = \frac{L_e I_k}{1680}$ , ( $k = 0, 1, \dots, 6$ ;  $l = 0, 1, \dots, 4$ ) şeklindedir.

## Çimentoya mineral katkı olarak Kütahya Çayca Tüfünün kullanımı

*Use of Kütahya Çayca Tuff as a mineral additive to cement*

İbrahim KEÇEK<sup>1</sup> , Ahmet ÖZCAN<sup>1</sup> , Mehmet Uğur TOPRAK<sup>\*</sup> , Mehmet DEMİRBİLEK<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 43100, Kütahya

<sup>2</sup>Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 43100, Kütahya

• Geliş tarihi / Received: 10.11.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 17.03.2023

### Öz

Bu çalışmada Çayca/Kütahya'dan alınan tüflerin çimentoda mineral katkı maddesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çayca tüfünün toplam  $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$  içeriği %85.34'tür. Çayca tüfünün volkanik birimleri riyodasitik tüf, dasitik tüf, andezitik tüf bileşimleridir. Kirli beyaz, sarımsı, grimsi, pembemsi ve bej renkler gösteren Çayca tüflerinin çok hızlı (10 saniyede  $4476\text{ cm}^2/\text{g}$ ) öğütülebildiği görülmüştür. Farklı tane boyutlarında öğütülen tüfler ( $4476, 5017$  ve  $5175\text{ cm}^2/\text{g}$ ) Portland çimentosu yerine ağırlıkça %25 oranında ikame edilerek hazırlanan katkılı çimento pastalarının kıvam ve priz süreleri incelenmiş, katkılı harçların 2, 7, 28 ve 56 günlük fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Harçlara standart su kürü ve otojen kür uygulanmıştır. Çayca tüfünün tane boyutu küçüldükçe priz başlangıç ve bitiş süreleri uzamış, basınç dayanımları artmıştır. En yüksek basınç dayanımı otojen kür uygulanan katkısız harçlarda elde edilmiştir. Çayca tüfü içeren harç numunelerinin 2 ve 28 günlük basınç dayanımları TS EN 197-1 (2012)'de belirtilen seviyeye ulaşamamışlardır.

**Anahtar kelimeler:** Çayca tüfü, Mekanik özellikler, Otojen kür, Portland çimentosu

### Abstract

In this study, the evaluation of tuffs taken from Çayca/Kütahya as a mineral additive in cement was investigated. The total  $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$  content of Çayca tuff was 85.34%. The volcanic units of the Çayca tuff were rhyodacitic tuff, dacitic tuff and andesitic tuff compositions. It was observed that the Çayca tuffs, which show off-white, yellowish, grayish, pinkish and beige colors, could be milled very quickly ( $4476\text{ cm}^2/\text{g}$  in 10 seconds). The consistency and setting times of the cement pastes prepared by substituting 25% by weight tuff milled in different grain sizes ( $4476, 5017$  and  $5175\text{ cm}^2/\text{g}$ ) by Portland cement were examined and the 2, 7, 28 and 56-day physical and mechanical properties of these mortars were determined. Standard water curing and autogenous curing were applied to the mortars. As the grain size of Çayca tuff decreased, the setting times of the pastes extended and the strength of the mortars increased. The highest compressive strength was obtained in autogenously cured additive-free mortars. The 2 and 28-day compressive strengths of the mortar samples containing Çayca tuff could not reach the level specified in TS EN 197-1 (2012).

**Keywords:** Çayca tuff, Mechanical properties, Autogenous curing, Portland cement

\* Mehmet Uğur TOPRAK; mugur.toprak@dpu.edu.tr

## 1. Giriş

### 1. Introduction

Çimentoda endüstriyel atıklar veya doğal puzolanlar gibi katkı malzemelerinin kullanımı çimento maliyetlerini ve çimento üretimi kaynaklı CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltmaktadır. Dolayısıyla katkı malzemelerinin özellikleri ve bu katkı malzemelerinin çimentonun özelliklerine etkisinin belirlenmesi önemlidir. Bu katkı maddeleri reaktif ve inert maddeler olarak sınıflandırılmaktadırlar. Portland çimentosuna puzolanik reaksiyon yapan katkıların eklenmesi, çimento matrisini ve çimento agrega ara yüzeyini güçlendirerek çimentonun dayanım ve dayanıklılığını artırır. Ayrıca bu katkı boyutuna, parçacık boyutunun dağılımına ve özgül yüzey alanına bağlı olarak mikrodolgu etkisi ile çimento bağlayıcılı malzemelerin daha boşluksuz ve daha yüksek dayanımlı olmasını sağlamaktadırlar (Kubiliute vd., 2018).

Mineral katkı maddelerinin (zeolitler, SiO<sub>2</sub> tozu vb.) çimento üretiminde puzolan madde olarak kullanımı, yüksek performanslı betonlar, ağır metalleri emen veya radyoaktif radyasyonu bastıran özel betonlar gibi yeni yapı malzemelerinin geliştirilmesinde kullanılmaktadırlar. Bu katkı maddeleri, Portland çimentosunun hidrasyon sürecini, fiziksel özelliklerini ve mekanik davranışını etkilemektedir. Yüksek oranda SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeren zeolitler, Ca(OH)<sub>2</sub> ile reaksiyona girerek ilave C-S-H oluşturabilme nedeni ile beton dayanımını artırabilmektedirler (Nagrochienė vd., 2017).

Pereira-de-Oliveira vd. (2012) cam ve kırmızı kil seramik atıklarının puzolanik aktivitelerini araştırmışlardır. Bu atıklar 0-45µ, 45-75µ ve 75-150µ arasında öğütülmüştür. Cam ve kırmızı kil seramik atıkları kullanılarak hazırlanan harç numunelerinin sonuçları incelendiğinde, bu atıkların beton üretiminde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Shi vd. (2015) süper incelikteki çelik cürufunun puzolanik aktivite değişiminin incelenmesi amacıyla yapılan çalışmada, Portland çimentosuna farklı boyutlarda çelik cürufuları ikame edilmiştir. Yapılan çalışma ile çelik cürufunun inceliği arttıkça puzolanik aktivitenin artış gösterdiği, 2.52µ boyutundaki çelik cürufunun puzolanik aktivitesinin 13.3µ boyutundaki çelik cürufuna göre %95 daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Zhao vd. (2020)'nin atık kil tuğla tozlarının çimento üretiminde katkı malzemesi olarak kullanılması ile çimentonun puzolanik aktivitesinin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmalarında, farklı özgül yüzey alanlarına (253.3, 367.2, 554.4 ve 795.4 m<sup>2</sup>/kg) sahip olan tuğla tozlarının puzolanik aktivite değişimleri belirlenmiştir. Tuğla tozlarının özgül yüzey alanları arttıkça, harç numunelerinin basınç dayanımlarının artış gösterdiği belirlenmiştir. dos Santos ve Cordeiro (2021) farklı boyutlardaki diatomitlerin (7.2, 17.7, 21.5, 38.4, 58.6 ve 108.3µ) puzolanik aktivitelerini belirlemişlerdir. Diatomitlerin incelikleri arttıkça harç numunelerinin basınç dayanımları artmıştır. Cordeiro vd. (2011) atık pirinç kabuğu külünün özgül yüzey alanı arttıkça, puzolanik aktivitesinin de arttığını belirtmişlerdir. Çullu vd. (2016) farklı türdeki volkanik kayaların puzolanik aktivitesini belirlemek için çimentoya %10, 20, 30, 40 ve 50 oranlarında volkanik kayaç ikame etmişlerdir. Sonuçlar incelendiğinde puzolanik aktive açısından çimentoya ikame edilecek en uygun puzolan miktarının çimento ağırlığının %10'u olduğunu bildirmişlerdir. Rodier vd. (2016) bambu sapı külünü çimentoya ikame ederek, puzolanik aktivitesini incelemişlerdir. 7 ve 28 günde, ağırlıkça %10 bambu sapı külü içeren harçların %75'in üzerinde bir dayanım aktivite indeksi sahip olduğu belirlenmiştir. Tseng vd. (2005) petrol şirketlerinin kullanılmış sıvı katalitik parçalama katalizörlerinden biri olan denge katalizörünün puzolanik aktivitesini incelemişlerdir. 650 °C sıcaklıkta kalsine edilen denge katalizörler içeren harçların basınç dayanımları, kontrol harcının basınç dayanımından daha yüksektir. Aynı zamanda denge katalizörünün daha fazla öğütülmesi, puzolanik aktiviteyi artırmıştır. Araújo vd. (2019) kırmızı renkteki seramik atıklarının puzolanik aktivitesini incelemişlerdir. %25 seramik atığı içeren harçların 28 günlük basınç dayanımları, %100 Portland çimentosu içeren harçların basınç dayanımlarından %11 daha yüksektir.

Yanardağların püskürttüğü kül, kum ve lav parçacıklarından oluşan, çoğunlukla açık renkli, hafif gözenekli bir tür çökelti taşı özelliği gösteren, tabakalaşan ve bazı durumlarda tabakalaşma karakteri göstermeyen kayaçlar jeoloji biliminde volkanik tüf olarak tanımlanır. Bunlar yanar dağ lavlarının (küllerinin) yine volkanik diğer kalıntılarla birlikte katılması ya da yığılıp sıkışmasıyla oluşan yeğni, gözenekli kayaç özellikleri gösteren yapılarıdır (Bayırlı & Pekin, 2013; Helvacı & Alaca, 1991). Tüfler kolay şekil verilebilme özellikleri ile yapı taşı olarak kullanılabilir özelliğine sahiptirler. Çok ince taneli ve pekleşmemiş toz halinde olması ve puzolanik aktivitelerinin yüksek olması nedeniyle katkılı çimento üretiminde kullanılabilirler (Kavas & Çelik, 2001; Kibici vd., 2012).

Atıl durumda olan Çayca tufunun Portland çimentosunda mineral katkı olarak kullanılması bu çalışmanın amacını oluşturmaktadır. Bu amaçla Çayca bölgesinde farklı alanlarda riyodasitik, dasitik ve andezitik

bileşimli, kirli beyaz, sarımsı, grimsi, pembemsi ve bej renkler gösteren Çayca tüfü 10, 30 ve 60 s olmak üzere 3 farklı sürede öğütülmüş ve toz haline getirilmiştir. Toz halindeki tüflerin özgül yüzey alanları sırasıyla 4476, 5017 ve 5175 g/cm<sup>2</sup>'dir. Bu tozların puzolanik aktivitelerini belirlemek için Portland çimentosuna ağırlıkça %25 oranında ikame edilerek 40×40×160 mm harç numuneleri hazırlanmıştır. Numunelere otojen kür (harç numuneleri test gününe kadar streç film ile sarılı bir şekilde laboratuvar ortamında bekletilmiştir) veya 23±1 °C suda kür uygulaması yapılmıştır. Bu numunelerin 2, 7, 28 ve 56 günlük ultrasonik ses hızı, basınç ve eğilme dayanımları belirlenmiş ve bu değerler arasındaki ilişki incelenmiştir.

## 2. Materyal ve metot

### 2. Material and method

### 2.1. Materyal

#### 2.1. Material

Harç numunelerinde Çimsa markalı CEM I 42.5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Puzolanik aktivitesinin belirlenmesi amacıyla, Kütahya il merkezine yaklaşık 18 km mesafede Çayca bölgesinde asidik karakterli, çökellerle geçişli, yer yer onlarla girik ve ardalı olan tüf, tüfit ile volkanoklastik çökeller Sabuncupınar formasyonu Çayca üyesi olarak tanımlanan Çayca tüfü, Kütahya'nın Çayca Köy'ü ve civarındaki litolojik birimlerden temin edilmiştir. Tüf mostralarından belli boyutlarda koparılarak temin edilen Çayca tüfü 3 farklı sürede öğütülerek toz haline getirilmiştir. 50 Hz hız değerine sahip olan halkalı değirmen kullanılarak Çayca tüfünün öğütme işlemi gerçekleştirilmiştir. 10, 30 ve 60 s öğütülen Çayca tüfünün özgül yüzey alanları sırasıyla 4476, 5017 ve 5175 cm<sup>2</sup>/g'dir. Taneler arası bağlar zayıf olduğu için çok kısa sürede ve çok az enerji ile öğütülebilmektedirler. Portland çimentosunun özgül yüzey alanı 3372 cm<sup>2</sup>/g'dir. Portland çimentosu ve Çayca tüfünün özgül ağırlıkları sırasıyla 3.05 ve 2.29 g/cm<sup>3</sup>'tür. Kirli beyaz, sarımsı, pembemsi renk gösteren tüf mostralarından derlenen numuneler, çeneli kırıcıda belli boyuta indirildikten sonra öğütülmüştür (Şekil 1). Kimyasal analizi yapılan Çayca tüfünün ve Portland çimentosunun kimyasal bileşimleri Tablo 1'de verilmiştir. ASTM C618-12a (2012)'da N sınıfındaki doğal puzolanların SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarının en az %70 ve SO<sub>3</sub> miktarının ise en az %4 olması gerektiği belirtilmektedir. Çayca tüfünün kimyasal kompozisyonundaki SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarı %85.34 ve SO<sub>3</sub> içeriği %0.03 olduğundan ASTM C618-12a (2012)'aya göre N sınıfındaki puzolan tanımına uymaktadır. Harç karışımlarında kum olarak Limak Batı Çimento markalı CEN standart kumu, karışımların bir kısmında ise karışım suyunu azaltıp aynı zamanda akışkanlığı arttıran Aragonit marka (UlfixAR 7002) süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

**Tablo 1.** Portland çimentosu ve Çayca tüfünün kimyasal bileşimi

**Table 1.** Chemical composition of Portland cement and Çayca tuff

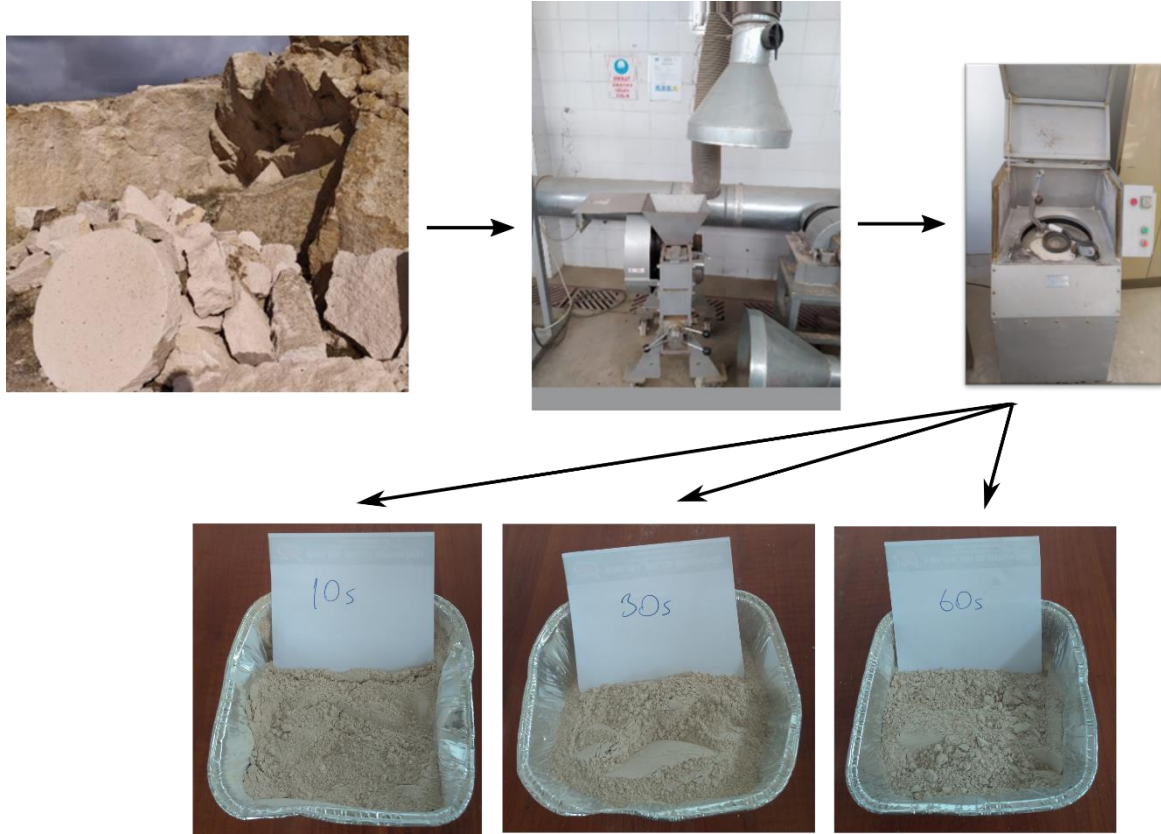
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	TiO <sub>2</sub>	Cl	SO <sub>3</sub>	Kızdırma kaybı
Portland çimentosu	19.4	5.59	0.2	0.64	3.09	62.5	1.74	-	-	0.009	3.29	3.15
Çayca tüfü	69.31	14.48	1.85	5.27	1.55	1.18	0.7	0.07	0.17	0.1	0.03	5.24

### 2.2. Metot

#### 2.2. Method

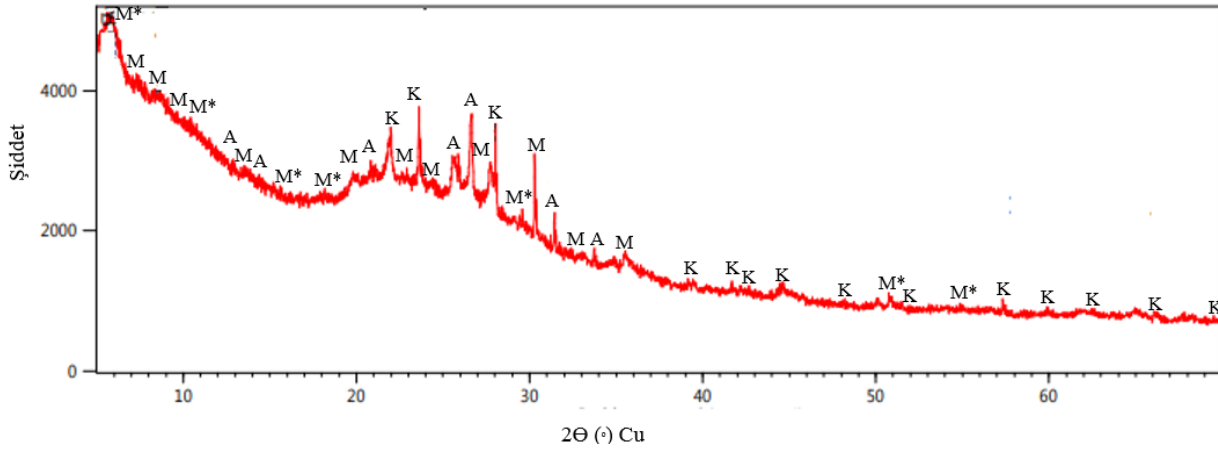
Harç numuneleri hazırlanırken TS EN 196-1 (2016) standardındaki prosedürler uygulanmıştır. 7 farklı harç karışımı belirlenmiş ve bu karışımlarda kullanılan malzeme miktarları Tablo 2'de verilmiştir. Bu karışımlara Portland çimentosu yerine ağırlıkça %25 oranında 3 farklı özgül yüzey alanına (4476, 5017 ve 5175 g/cm<sup>2</sup>) sahip Çayca tüfü ikame edilmiştir. Aynı zamanda karışımların bir kısmına bağlayıcı ağırlığının %1'i oranında süper akışkanlaştırıcı ilave edilmiştir. Harç mikserine ilk olarak bağlayıcı ile su konulup karıştırılmıştır. Ardından karışıma kum eklenip, karıştırma işlemine devam edilmiştir. Daha sonra harç karışımı 40×40×160 mm<sup>3</sup> boyutlarındaki prizmatik kalıplara yerleştirilmiştir. 24 saat kalıpta bekletilen numuneler, kalıptan çıkarıldıktan sonra su ve otojen kürü olmak üzere 2 farklı kür uygulamasına tabi tutulmuştur (Keçek, 2022). Harç numunelerinin hazırlanması ve yapılan deneylerin akış şeması Şekil 3'te verilmiştir.





**Şekil 1.** Çayca tuffünün mostra ve 10, 30, 60 saniye öğütülmüş görünümleri  
**Figure 1.** Mostra view of Çayca tuff and milled views of 10, 30, 60 seconds

Şekil 2’de X-ışınları difraktogramı verilen Çayca tuffünde esas mineral olarak kuvars ile birlikte alkali feldispat, montmorillonit, ve mordenit mineralleri görülmüştür.



**Şekil 2.** Çayca tuffü mineralojik bileşimine ait X-ışınları difraktogramı (K: kuvars, A: alkali feldispat, M\*: montmorillonit, M: mordenit)

**Figure 2.** X-ray diffractogram of the mineralogical composition of Çayca tuff (K: quartz, A: alkali feldspar, M\*: montmorillonite, M: mordenite)

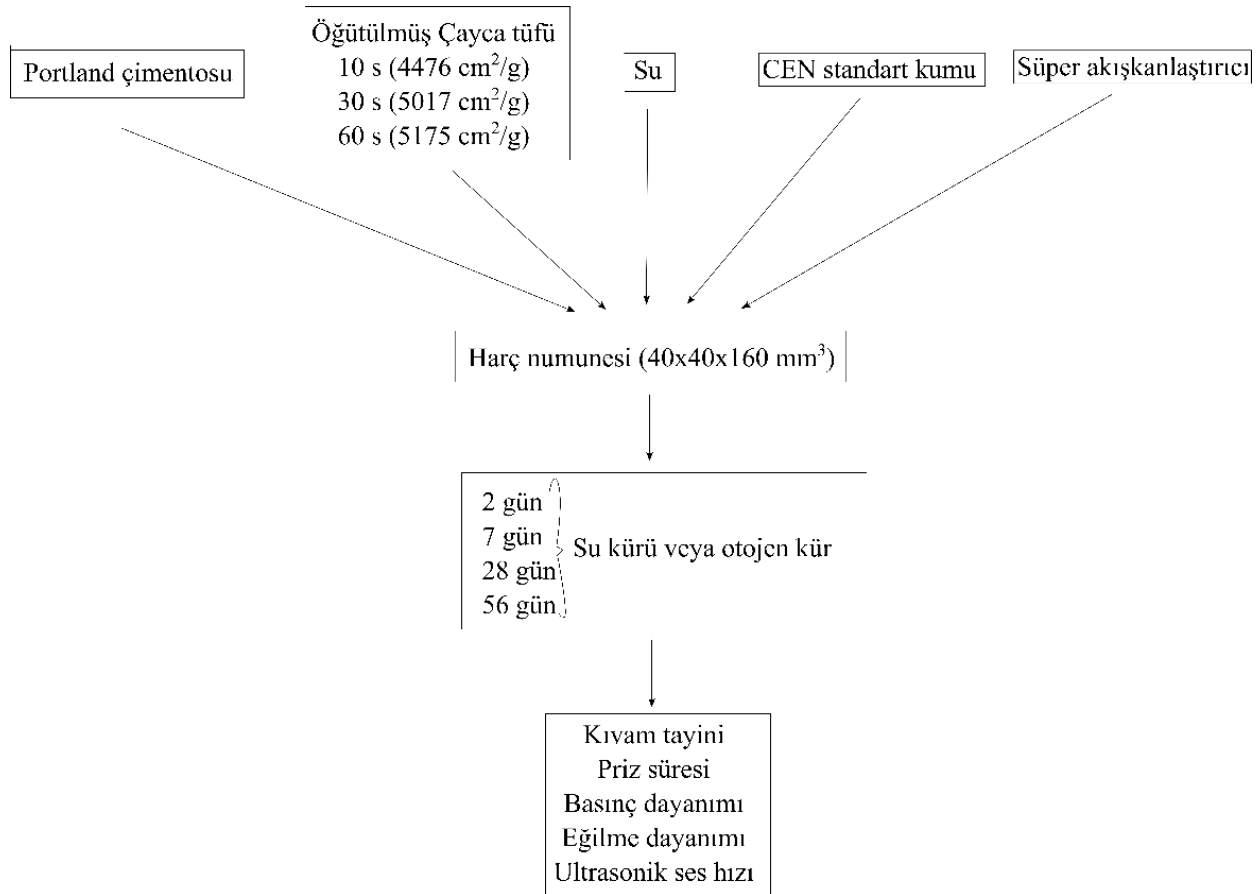
Çimento kıvamı ve priz süresi tayini deneylerinde TS EN 196-3 (2017) standardı kullanılmıştır. Vicat aleti kullanılarak standart kıvam için gerekli su miktarı belirlenmiştir. Priz süresinin tayininde Vicat iğnesi Vicat halkasındaki çimento hamuruna her 10 dakikada bir serbest düşüş ile batırılır. İğnenin batma derinliği  $4\pm 1$  mm oluncaya kadar işleme devam edilir. Bu mesafe sağlandığı an priz başlangıcı kabul edilir. Ardından 30 dakikalık süreler ile iğne hamur içine batırılmaya devam edilir ve priz sonu belirlenir. 2, 7, 28 ve 56 günlük numunelerin basınç dayanımları, eğilme dayanımları ve ultrasonik ses hızları incelenmiştir. Numunelerin

ultrasonik ses hızı değerlerinin belirlenmesinde ASTM C597 (2002) standardı kullanılmıştır. Numunelerin basınç ve eğilme dayanımlarının belirlenmesinde TS EN 196-1 (2016) standardı kullanılmıştır. 40×40×160 mm boyutlarındaki harç numuneleri eğilme deneyine tabi tutulduktan sonra, elde edilen iki kırık numuneye 40×40 mm boyutlarındaki bir başlık ile basınç deneyi uygulanmıştır. Numunelerin eğilme dayanımlarının belirlenmesinde her karışım grubu için 3 adet numune kullanılmış olup, bu sonuçların aritmetik ortalaması alınmıştır. Numunelerin eğilme ve basınç dayanımları belirlenirken Denklem 1 ve 2 kullanılmıştır. Harç numunelerinin dayanım aktivite indekslerinin belirlenmesinde Denklem 3 kullanılmıştır (Erdoğan, 2016).

**Tablo 2.** Harç numunelerinde kullanılan malzeme miktarları (g)  
**Table 2.** The amounts of the materials used in the mortar samples (g)

Karışım kodu	Portland çimentosu	Çayca tufü ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )			Standart kum	Su	Süper akışkanlaştırıcı	Kür metodu
		4476	5017	5175				
K	450				1350	225		Su kürü
K+SA	450				1350	225	4.5	Su kürü
K+SA+OK	450				1350	225	4.5	Otojen kür
T10+SA	337.5	112.5			1350	225	4.5	Su kürü
T30+SA	337.5		112.5		1350	225	4.5	Su kürü
T60+SA	337.5			112.5	1350	225	4.5	Su kürü
T60+SA+OK	337.5			112.5	1350	225	4.5	Otojen kür

Not: K kontrol numunesini, SA süper akışkanlaştırıcıyı, OK otojen kürü, T10 10 s öğütülen Çayca tufü içeren numuneyi, T30 30 s öğütülen Çayca tufü içeren numuneyi, T60 60 s öğütülen Çayca tufü içeren numuneyi temsil etmektedir.



**Şekil 3.** Harç numunelerinin hazırlanma prosesleri ve incelenen özelliklerinin akış şeması

**Figure 3.** Flowchart of the preparation processes of the mortar samples and their investigated properties

$$R_f = 1.5 \left( F_f \frac{l}{b^3} \right) \quad (1)$$

$R_f$ : Eğilmede çekme dayanımı, N/mm<sup>2</sup>  
 $b$ : Prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu, (40 mm)  
 $F_f$ : Prizmanın ortasına uygulanmış olan kuvvet, N  
 $l$ : Destek silindirlerin arasındaki uzaklık, (100 mm)

$$R_c = F_c / b^2 \quad (2)$$

$R_c$ : Basınç dayanımı, N/mm<sup>2</sup>  
 $F_c$ : Kırılmadaki en büyük kuvvet, N  
 $b$ : Basınç plakasının kenar uzunluğu, (40 mm)

$$\text{Dayanım aktivite indeksi} = (A/B) \times 100 \quad (3)$$

A: Puzolanlı harç numunelerinin ortalama basınç dayanımı, MPa  
 B: Kontrol harç numunelerinin ortalama basınç dayanımı, MPa

### 3. Bulgular ve tartışma

#### 3. Results and discussion

#### 3.1. Kıvam ve priz

##### 3.1. Consistency and setting

Hamur numunelerinin kıvamları için gerekli kıvam suyu yüzdesi ve priz süreleri Tablo 3'te verilmiştir. Kontrol numunesinin kıvamı için belirlenen su miktarı %30 iken, T10+SA, T30+SA ve T60+SA kodlu numunelerin kıvamları sırasıyla %31, %33 ve %34'tür. Kontrol numunesinin prizi daha kısa sürede gerçekleşirken, Çayca tütünün inceliği arttıkça çimento hamurunun priz süresi de artmıştır. Bu durum tuf kullanılan serilerde daha az çimento kullanılması ve tüflerin su tutma özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Kara (2022) çimentoya göre daha ince olan pilekinin hamur karışımlarındaki su ihtiyacını arttırdığını belirtmiştir.

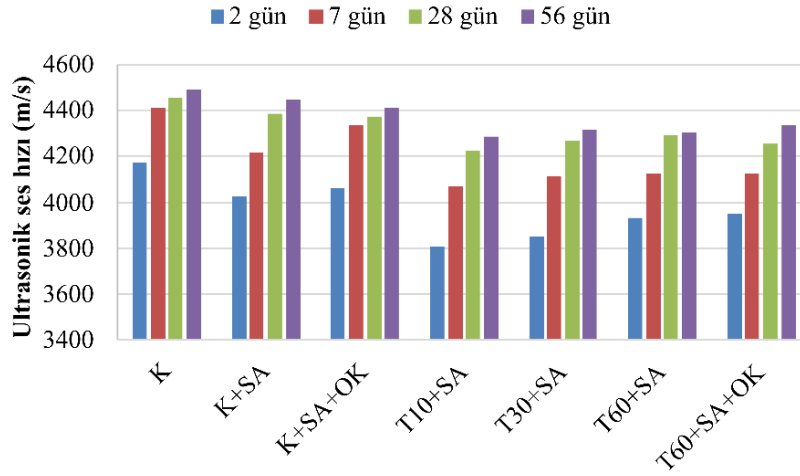
**Tablo 3.** Hamur numunelerinin kıvam ve priz süreleri  
**Table 3.** Consistency and setting times of paste samples

Karışım kodu	Kıvam suyu yüzdesi (%)	Priz başlangıç süresi (dk)	Priz bitiş süresi (dk)
K	30	125	260
T10+SA	31	160	305
T30+SA	33	185	320
T60+SA	34	190	330

#### 3.2. Ultrasonik ses hızı

##### 3.2. Ultrasound pulse velocity

Harç numunelerinin ultrasonik ses hızı değerleri Şekil 4'te verilmiştir. Numunelerin 28 günlük ultrasonik ses hızı değerleri incelendiğinde en yüksek değer 4457 m/s ile K kodlu numunede elde edilirken, en düşük değer 4224 m/s ile T10+SA kodlu numunede elde edilmiştir. Genel olarak Çayca tütünün tane boyu inceliği arttıkça, harç numunelerinin ultrasonik ses hızı değerleri de artmıştır.



Şekil 4. Harç numunelerinin ultrasonik ses hızı değerleri

Figure 4. Ultrasonic pulse velocity values of mortar samples

### 3.3. Basınç ve eğilme dayanımları

#### 3.3. Compressive and flexural strengths

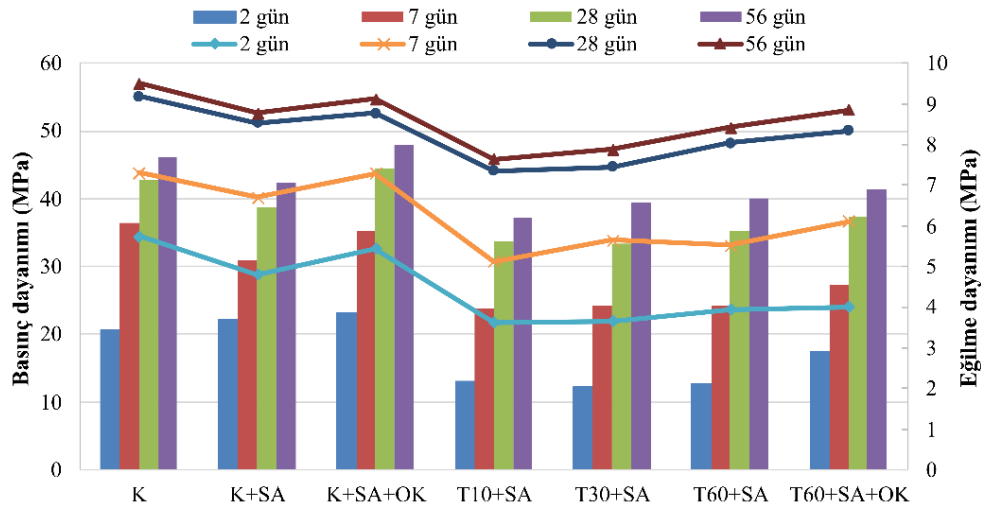
Harç numunelerinin basınç dayanımları Şekil 5'te verilmiştir. Numunelerin zamana bağlı olarak basınç ve eğilme dayanımı değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Süper akışkanlaştırıcı katkısız harçların 2 günlük basınç dayanımlarını artırmış, ancak ilerleyen kür sürelerinde basınç dayanımını olumsuz etkilemiştir. Otojen kür bütün kür süreleri için katkısız ve katkılı harçların basınç dayanımlarını olumlu etkilemiştir. Kontrol numunesine göre aynı yaştaki numunelerin basınç dayanımlarında meydana gelen değişim yüzdeleri Tablo 5'te verilmiştir. Genel olarak Çayca tufünün tane boyu inceliği arttıkça harç numunelerinin basınç dayanımlarında da artış olduğu tespit edilmiştir. Özellikle otojen kür uygulaması numunelerin basınç dayanımlarında artışa neden olmuştur. Çayca tufü içeren 28 ve 56 günlük numunelerin basınç dayanımlarında belirgin bir artışın gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Tablo 4. Harç numunelerinin zamana bağlı olarak basınç ve eğilme dayanımları

Table 4. Compressive and flexural strengths of mortar samples depending on time

Karışım Kodu	Basınç dayanımları (MPa)				Eğilme dayanımları (MPa)			
	2 gün	7 gün	28 gün	56 gün	2 gün	7 gün	28 gün	56 gün
K	20.74	36.51	42.69	46.18	5.74	7.31	9.19	9.51
K+SA	22.15	30.93	38.81	42.43	4.80	6.70	8.53	8.78
K+SA+OK	23.16	35.26	44.47	47.87	5.44	7.29	8.77	9.13
T10+SA	13.04	23.90	33.71	37.18	3.63	5.13	7.36	7.64
T30+SA	12.29	24.11	33.45	39.50	3.66	5.65	7.45	7.88
T60+SA	12.62	24.13	35.23	40.14	3.94	5.53	8.04	8.43
T60+SA+OK	17.50	27.21	37.45	41.43	4.01	6.12	8.34	8.85

Şekil 5'te verilen harç numunelerinin eğilme dayanımları grafiğinde, 28 günlük sonuçların değerlendirilmesinde, 9.19 MPa ile en yüksek eğilme dayanımı K kodlu kontrol numunesinde elde edilmiştir. Çayca tufünün tane boyu inceliği arttıkça numunelerin eğilme dayanımlarının da arttığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda otojen kür uygulanan numunelerin eğilme dayanımlarında da artış olmuştur. Çayca tufü ikamesi ile birlikte numunelerin eğilme dayanımlarında azalma meydana gelirken, çayca tufünün tane boyu inceliği arttıkça azalma yüzdesinde düşüş meydana gelmiştir. TS EN 197-1 (2012)'e göre CEM I 42.5 R kullanılan numunelerin 2 günlük basınç dayanımlarının 20 MPa'dan, 28 günlük basınç dayanımlarının ise 42.5 MPa'dan büyük olması gerekmektedir. Bu bağlamda Çayca tufü içeren numunelerin 2 ve 28 günlük basınç dayanımları TS EN 197-1 (2012) standardında belirtilen yeterli seviyeye ulaşamamıştır.



**Şekil 5.** Harç numunelerinin basınç ve eğilme dayanımları

**Figure 5.** Compressive and flexural strengths of mortar samples

Kara (2022) Portland çimentosuna %5, 10 ve 20 oranlarında doğal ve kalsine pileki ikame etmişlerdir. Çimento harçlarının 28 günlük basınç dayanımlarının pileki oranı arttıkça azaldığını belirtmişlerdir. Bu azalma oranları %20 doğal ve kalsine pileki içeren numuneler için sırasıyla %34.5 ve %23.9'dur. Sonuçlar incelendiğinde TS EN 197-1 (2012)'de belirtilen gerekli en az basınç dayanımları sadece %5 doğal ve kalsine pileki içeren harçlarda elde edilmiştir. Bu durum doğal pilekinin tane boyutunun çimentoya yakın olup boşlukları doldurması, kalsine pilekinin ise puzolanik etkisi ile ilişkilendirilmiştir. Yu vd. (2017) Portland çimentosuna ikame edilen %10, 20, 30, 40 ve 50 oranlarındaki volkanik tüfün harçların basınç ve eğilme dayanımlarına etkisini incelemişlerdir. Volkanik tüf oranı arttıkça, numunelerin basınç ve eğilme dayanımları azalmıştır. Basınç dayanımındaki kayıplar %4.8 ile %32.1 arasında değişirken, eğilme dayanımındaki kayıplar %3.4 ile %37.5 arasındadır. Basınç dayanımları incelendiğinde, sadece %10 tüf içeren karışım TS EN 197-1 (2012)'deki şartları sağlamıştır. Yukarıdaki çalışmalarda incelendiğinde genel olarak Portland çimentosuna ikame edilen puzolanik malzemelerin ikame oranları arttıkça, harçların dayanımları azalmıştır. İkame oranları %10'u aştığında TS EN 197-1 (2012)'deki limitleri sağlamamıştır.

Harç numunelerinin dayanım aktivite indeksleri Tablo 6'da verilmiştir. ASTM C618-12a (2012)'da puzolan içeren harç numunelerinin 7 ve 28 günlük dayanım aktivite indekslerinin en az %75 olması gerektiği belirtilmiştir. T10+SA, T30+SA ve T60+SA kodlu harç numunelerinin sadece 28 günlük dayanım aktivite indeksleri %75'ten fazla iken, T60+SA+OK kodlu harç numunesinin hem 7 hem de 28 günlük dayanım aktivite indeksleri %75'ten fazladır. Otoklav kürün harç numunesinde dayanım kazanımını hızlandırması ve dayanımda bir miktar artışa sebep olması nedeniyle T60+SA+OK kodlu numune hem 7 hem de 28 günlük dayanım aktivite indeksi açısından alt limit değerinin üzerinde olmuştur. Demir vd. (2016) volkanik tüflerin 7 ve 28 günlük dayanım aktivite indekslerini %85.60 ve %84.99, uçucu kül içeren harçların 7 ve 28 günlük dayanım aktivite indekslerini %62.49 ve %66.41 olarak belirlemişlerdir. Bu sonuçlar volkanik tüflerin dayanım aktivite indekslerinin uçucu küle oranla daha yüksek olduğunu göstermiştir.

**Tablo 5.** Numunelerin basınç ve eğilme dayanımlarındaki değişim yüzdeleri

**Table 5.** Percentage of change in compressive and flexural strengths of samples

Karışım Kodu	Basınç dayanımı değişimi (%)				Eğilme dayanımı değişimi (%)			
	2 gün	7 gün	28 gün	56 gün	2 gün	7 gün	28 gün	56 gün
K	-	-	-	-	-	-	-	-
K+SA	6.80	-15.28	-9.09	-8.12	-16.38	-8.34	-7.18	-7.68
K+SA+OK	11.67	-3.42	4.17	3.66	-5.23	-0.27	-4.57	-4.00
T10+SA	-37.13	-34.54	-21.04	-19.49	-36.76	-29.82	-19.91	-19.66
T30+SA	-40.74	-33.96	-21.64	-14.47	-36.24	-22.71	-18.93	-17.14
T60+SA	-39.15	-33.91	-17.47	-13.08	-31.36	-24.35	-12.51	-11.36
T60+SA+OK	-15.62	-25.49	-12.27	-10.29	-30.14	-16.28	-9.25	-6.94

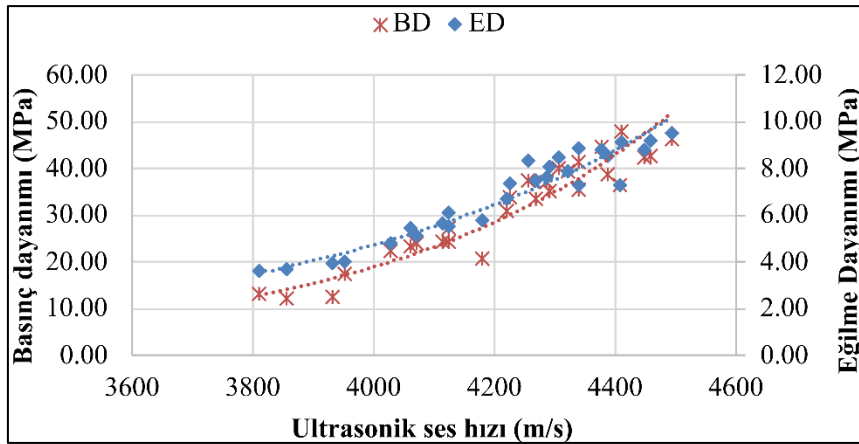
**Tablo 6.** Çayca tüfü içeren harçların dayanım aktivite indeksleri (%)  
**Table 6.** Strength activity indexes of mortars containing Çayca tuff (%)

Karışım Kodu	7 gün	28 gün
T10+SA	65	79
T30+SA	66	78
T60+SA	66	83
T60+SA+OK	75	88

### 3.4. Ultrasonik ses hızı, basınç ve eğilme dayanımları arasındaki ilişkiler

#### 3.4. Relationships between ultrasound pulse velocity, compressive and flexural strengths

Harç numunelerinin ultrasonik ses hızı değerleri ile basınç ve eğilme dayanımları arasındaki ilişki Şekil 6'da verilmiştir. Bu ilişkiler üstel olup, ultrasonik ses hızı değerleri ile basınç dayanımları ve eğilme dayanımları arasındaki ilişkinin korelasyon katsayıları sırasıyla %91 ve %92'dir. USH ultrasonik ses hızını, BD basınç dayanımını ve ED eğilme dayanımını temsil etmekte olup, bu ilişkilerin denklemleri Denklem 4 ve 5'te verilmiştir. Kara (2022) harç numunelerinin basınç dayanımları ile ultrasonik ses hızı değerleri arasındaki ilişkinin korelasyon katsayılarının 0.96 ve 0.97, eğilme dayanımları ile ultrasonik ses hızı değerleri arasındaki ilişkinin korelasyon katsayılarının 0.81 ve 0.91 olduğunu bildirmiştir. Çullu vd. (2016) harçların basınç dayanımları ile ultrasonik ses hızı değerleri arasındaki ilişkilerin korelasyon katsayılarının 0.85 ile 0.99 arasında değiştiğini bildirmişlerdir. Bu değerler mevcut çalışmadaki değerler ile tutarlı olup tahribatsız bir yöntem olan ultrasonik ses hızı testinin harçların dayanım özelliklerinin belirlenmesinde dikkate alınabilecek bir yöntem olduğunu göstermiştir.



**Şekil 6.** Harç numunelerinin ultrasonik ses hızı ile basınç ve eğilme dayanımları arasındaki ilişkileri gösterir grafik

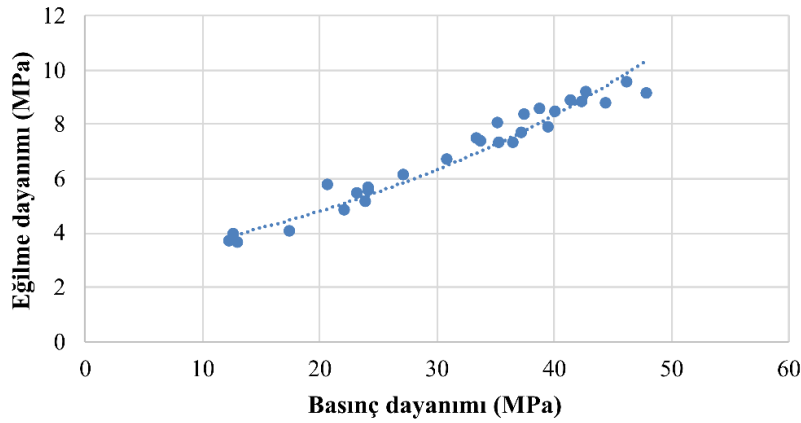
**Figure 6.** Graphic showing the relationship between ultrasonic pulse velocity with compressive and flexural strengths of mortar samples

$$USH=3709.4e^{0.004BD} \quad (4)$$

$$USH=3589.4e^{0.0232ED} \quad (5)$$

Harç numunelerinin basınç ve eğilme dayanımları arasında tespit edilen üstel bir ilişkiyi gösterir grafik Şekil 7'de verilmiştir. İlişkinin korelasyon katkısı %95 olup, bu ilişkinin denklemi Denklem 6'da verilmiştir. Bu eşitlikte ED eğilme dayanımını, BD basınç dayanımını temsil etmektedir.

$$ED = 2.7725e^{0.0276BD} \quad (6)$$



**Şekil 7.** Harç numunelerinin basınç ve eğilme dayanımları arasındaki ilişkinin gösterildiği grafik

**Figure 7.** Graphic showing the relationship between compressive and flexural strengths of mortar samples

#### 4. Sonuçlar

##### 4. Conclusions

Bu deneysel çalışmada Portland çimentosu yerine ağırlıkça %25 oranında üç farklı incelikteki Çayca tüfü ikame edilerek çimento harçları üretilmiştir. Üretilen bu harçların fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiş ve bu sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- I. Kirlili beyaz, sarımsı, pembemsi renk gösteren Çayca tufünün kısa sürede öğütülerek  $4400 \text{ cm}^2/\text{g}$ 'ın üzerinde özgül yüzey alanına sahip olması ve  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  toplam içeriğinin %85.34 olması sebebiyle, Portland çimentosuna ikame malzeme olarak kullanılabilceği görülmüştür.
- II. Kontrol numunesinin kıvamı için belirlenen su/bağlayıcı miktarı %30 olurken, Portland çimentosuna ikame edilen Çayca tufünün tane boyu inceliği artarken kıvamı için gereken su miktarı artmıştır. Aynı zamanda çayca tufünün tane boyu inceliği arttıkça hamur numunelerinin priz başlangıç ve bitiş süreleri de gecikmiştir.
- III. 28 günlük harç numunelerinde en yüksek ultrasonik ses hızı değeri  $4457 \text{ m/s}$  ile K kodlu numunede elde edilirken, Çayca tufünün tane boyu inceliği arttıkça numunelerin ultrasonik ses hızı değerleri de artmıştır. Numunelerin ultrasonik ses hızı değerleri ile basınç ve eğilme dayanımları arasında üstel ilişki olup, bu ilişkilerin korelasyon katsayıları sırasıyla %91 ve %92'dir.
- IV. K kodlu kontrol numunesinin 28 günlük basınç dayanımı  $42.69 \text{ MPa}$  olup süper akışkanlaştırıcı içeren kontrol numunenin dayanımı  $38.81 \text{ MPa}$ , otoklav kürü uygulanan kontrol numunenin dayanımı ise  $44.47 \text{ MPa}$ 'dır. Çayca tüfü içeren numunelerin basınç dayanımları ise  $33.45$  ile  $35.23 \text{ MPa}$  arasındadır.
- V. Harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde, T10+SA kodlu numune ile T30+SA ve T60+SA kodlu numunelerin basınç dayanımları karşılaştırıldığında, değişimler sırasıyla  $-0.77$  ve  $4.51$ , 56 günlük basınç dayanımlarında ise sırasıyla  $6.23$  ve  $7.96$ 'dır. Genel olarak Çayca tufünün tane boyu inceliği arttıkça harç numunelerinin basınç dayanımlarında da artış olduğu tespit edilmiştir.
- VI. Harç numunelerinin 28 günlük basınç ve eğilme dayanımları incelendiğinde otojen kürün basınç ve eğilme dayanımlarında artışa neden olduğu görülmüştür. Çayca tufünün tane boyu inceliği arttıkça harç numunelerinin basınç ve eğilme dayanımları da artmıştır. Numunelerin basınç ve eğilme dayanımları arasında üstel bir ilişki olduğu belirlenmiş ve bu ilişkinin korelasyon katsayısı %95'tir.

**Yazar katkısı***Author contribution*

İK deneysel çalışmayı gerçekleştirmiştir. AÖ ve MUT makalenin yazımını, sonuçların değerlendirmesini yapmışlardır. MD Çayca tufunun mineralojik ve jeolojik özelliklerini belirlemiş ve makaleye bu kısımlarda destek sağlamıştır.

**Etik beyanı***Declaration of ethical code*

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

**Çıkar çatışması beyanı***Conflicts of interest*

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

**Kaynaklar***References*

- Araújo, R. A., de Menezes, A. L. R., Cabral, K. C., Nóbrega, A. K. C., Martinelli, A. E., & Dantas, K. G. M. (2019). Evaluation of the pozzolanic activity of red ceramic waste using mechanical and physicochemical methods. *Cerâmica*, 65, 461-469. <https://doi.org/10.1590/0366-69132019653752649>
- ASTM C597 (2002). Standart test method for pulse velocity through concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA. <https://doi.org/10.1520/C0597-02>
- ASTM C618-12a (2012). Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA. <https://doi.org/10.1520/C0618-12A>
- Bayırlı, M., & Pekin, A. (2013). Volkanik tuf yüzeyi gözeneklerinin özelliklerinin birikinti geometrisi kullanarak incelenmesi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 15(2), 66-72.
- Cordeiro, G. C., Filho, R. D. T., Tavares, L. M., Fairbairn, E. M. R., & Hempel, S. (2011). Influence of particle size and specific surface area on the pozzolanic activity of residual rice husk ash. *Cement and Concrete Composites*, 33(5), 529-534. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.02.005>
- Çullu, M., Bolat, H., Vural, A., & Tuncer, E. (2016). Investigation of pozzolanic activity of volcanic rocks from the northeast of the Black Sea. *Science and Engineering of Composite Materials*, 23(3), 315-323. <https://doi.org/10.1515/secm-2014-0092>
- Demir, İ., Başpınar, M. S., Görhan, G., & Kahraman, E. (2016). Seyitömer Uçucu Külü ve Afyonkarahisar Yöresi Volkanik Tüflerinin puzolanik özelliklerinin belirlenmesi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4(1), 39-46.
- dos Santos, A. A. M., & Cordeiro, G. C. (2021). Investigation of particle characteristics and enhancing the pozzolanic activity of diatomite by grinding. *Materials Chemistry and Physics*, 270, 124799. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124799>
- Erdoğan, T. Y. (2016). *Beton*. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.
- Helvacı C., & Alaca O. (1991). Bigadiç borat yatakları ve çevresinin jeolojisi ve mineralojisi. *Bulletin of The Mineral Research and Exploration*, 113, 61-92.
- Kara, İ. B. (2022). Doğal ve kalsine pilekinin karakterizasyonu, puzolanik aktivitesi ve çimento harçlarının mekanik özelliklerine etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 37(1), 555-570. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.903255>
- Kavas, T., & Çelik, M. Y. (2001). Ayazını (Afyon) Tüflerinin çimento sanayiinde tras olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi. *Madencilik Dergisi*, 40(2-3-4), 39-46.



- Keçek, İ. (2022). *Kütahya Çayca tüfünün çimentoda mineral katkı olarak kullanımının araştırılması* [Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü].
- Kibici, Y., Dinç, D., & Uçar, A. (2012). Afyonkarahisar yöresi volkanik kayaların mineralojik ve petrografik özellikleri. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, 29, 53-70.
- Kubiliute, R., Kaminskas, R., & Kazlauskaitė, A. (2018). Mineral wool production waste as an additive for Portland cement. *Cement and Concrete Composites*, 88, 130-138. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.02.003>
- Nagročkienė, D., Girskas, G., & Skripkiūnas, G. (2017). Properties of concrete modified with mineral additives. *Construction and Building Materials*, 135, 37-42. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.215>
- Pereira-de-Oliveira, L. A., Castro-Gomes, J. P., & Santos, P. M. S (2012). The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components. *Construction and Building Materials*, 31, 197-203. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.110>
- Rodier, L. Bilba, K., Onésippe, C., & Arsène, M. A. (2016). Study of pozzolanic activity of bamboo stem ashes for use as partial replacement of cement. *Materials and Structures*, 50(87), 1-14. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0958-6>
- Shi, Y., Chen, H., Wang, J., & Feng, Q. (2015). Preliminary investigation on the pozzolanic activity of superfine steel slag. *Construction and Building Materials*, 82, 227-234. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.062>
- TS EN 196-1 (2016). *Çimento deney metotları- Bölüm 1: dayanım tayini*. T.S.E., Ankara.
- TS EN 196-3 (2017). *Çimento deney yöntemleri-Bölüm 3: priz süreleri ve genleşme tayini*. T.S.E., Ankara.
- TS EN 197-1 (2012). *Çimento- Bölüm 1: Genel çimentolar- Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri*. T.S.E., Ankara.
- Tseng, Y. S., Huang, C. L., & Hsu, K. C. (2005). The pozzolanic activity of a calcined waste FCC catalyst and its effect on the compressive strength of cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 782-787. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.026>
- Yu, L., Li, L., & Zhou, S. (2017). Evaluation of pozzolanic activity of volcanic tuffs from Tibet, China. *Advances in Cement Research*, 29 (4), 137-146. <https://doi.org/10.1680/jadcr.15.00075>
- Zhao, Y., Gao, J., Liu, C., Chen, X., & Xu, Z. (2020). The particle-size effect of waste clay brick powder on its pozzolanic activity and properties of blended cement. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118521. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118521>

## Mekanik, kimyasal ve hibrit yüzey aşındırma işlemlerinin AA7075 alüminyum alaşımının yüzey enerjisine etkisi

*Effect of Mechanical, Chemical and Hybrid Surface Etching on Surface Energy of AA7075 Aluminum Alloy*

Benek HAMAMCI\*, Burcu ÖZTÜRK

Kafkas Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 3600, Kars

• Geliş tarihi / Received: 18.04.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 20.03.2023

### Öz

Yapıştırma bağlantı dayanımı, malzeme yüzeylerinin birbirleri ile etkileşimlerine ve numunelerin yüzey morfolojilerine bağlı olarak değişiklik gösterdiği bilinmektedir. İyi bir yapışmanın elde edilmesi için yeterli yüzey koşulu gerekmektedir. Yüzey morfolojisi, pürüzlülük değerleri ve serbest yüzey enerji (SYE) değerleri bağlantı dayanımına nasıl etki ettiği ve bu değerlerin kendi arasındaki ilişkileri önem arz etmektedir. Bu çalışmanın amacı, kimyasal dağlama, kumlama ve hem kumlama hem de kimyasal dağlama ile hibrit aşındırılmış yüzeylerin, Yüzey morfolojisi, pürüzlülük değerleri, temas açısı ve SYE değerleri arasındaki ilişki araştırılmıştır. Farklı tekniklerle aşındırılan yüzeylerin farklı yüzey morfolojileri oluşmuştur. Farklı yüzey morfolojilerine sahip numunelerin yüzeyine farklı sıvılar kullanılarak temas açısı değerleri tespit edilmiştir. Ayrıca Aşındırılan AA7075 numunelerin yüzey morfolojisi taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve 3D profilometre ile analiz edilmiş, yüzey pürüzlülük değerleri belirlenmiştir. Farklı tekniklerle aşındırılan yüzeylerin farklı yüzey morfolojileri oluşmuştur. Yüzeylerin, SYE ve temas açısı değerleri ise yüzeyin ne kadar ıslatılabilir olduğu hakkında bize bilgi verir. Bu sebepten AA7075 yüzeylerinin yüzey pürüzlülük ve SYE değerleri kıyaslanmış ve yüzeylerin mekanik, termodinamik ilişkileri çalışmada ortaya konulmuştur. SYE hesaplamalarında OWRK ve Zisman metodu kullanılmış ve iki yöntemden elde edilen değerlerin birbiri ile tutarlı olduğu görülmüştür. En yüksek SYE değerleri kumlama+0,5M NaOH ve kumlama+1M NaOH olan hibrit aşındırılan yüzeylerde elde edilmiştir. Her bir yüzey işleminde yüzey pürüzlülük değerleri farklı değerler almıştır. Sonuç olarak yüzey pürüzlülük değerleri ve SYE arasında doğrudan bir ilişki olmadığı görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** OWRK, SYE, Temas açısı, Yüzey aşındırma, Zisman metodu

### Abstract

Adhesion it is known that the bond strength varies depending on the interaction of the material surfaces with each other and the surface morphology of the samples. Sufficient surface conditions are required to achieve good adhesion. It is important how the surface morphology, roughness values and free surface energy (SFE) values affect the bond strength and the relationships between these values. The aim of this study was to investigate the relationship between surface morphology, roughness values, contact angle and SFE values of hybrid etched surfaces with chemical etching, sandblasting and both sandblasting and chemical etching. Different surface morphologies were formed of the surfaces etched with different techniques. Contact angle values were determined by using different liquids on the surface of the samples with different surface morphologies. In addition, the surface morphology of the etched AA7075 samples was analyzed by scanning electron microscope (SEM) and 3D profilometer, and surface roughness values were determined. Different surface morphologies of the etched surfaces were formed by different techniques. The SFE values of the surfaces give us information about how wettable the surface is. For this reason, the surface roughness and SFE values of AA7075 surfaces were compared and the mechanical and thermodynamic relations of the surfaces were revealed in the study. OWRK and Zisman methods were used in the calculations of SFE and it was seen that the values obtained from the two methods were consistent with each other. The highest SFE values were obtained on hybrid etched surfaces with sandblasting+0.5M NaOH and sandblasting+1M NaOH. Surface roughness values took different values in each surface treatment. As a result, it is seen that there is no direct relationship between surface roughness values and SFE.

**Keywords:** OWRK, SYE, Contact angle, Surface etching, Zisman method

\* Benek HAMAMCI; benekhamamci@kafkas.edu.tr

## 1. Giriş

### 1. Introduction

AA7075 alaşım askeri ve uçak sanayinde, makine parçalarında, yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda, otomotiv sanayi ve nükleer uygulamalarda çok tercih edilen bir malzemedir (Akpinar & Akpinar, 2019; Aydin vd., 2015). Hafifliğin önemli olduğu alanlarda tercih edilen AA7075 alaşım, bağlantı gerektiren işlemlerde ürün hafifliğini daha da fazla sağlamak için yapıştırma bağlantıları tercih edilip kullanılabilir (Fu vd., 2010; Mansourian-Tabaei vd., 2014). Örneğin yapıştırma, kaplama veya baskı sırasında iyi ıslatılabilirlik ve buna bağlı olarak yüksek bir SFE gereklidir (Kim vd., 2003; Martínez-Landeros vd., 2019). Yapıştırma bağlantılarından önce malzeme yüzeylerine farklı yüzey modifikasyon uygulanır. Çünkü yapıştırma dayanımı etkileyen en önemli parametrelerden biri yapıştırılacak yüzeye uygulanan yüzey işlemleridir ve bu konuda birçok çalışma mevcuttur. Bu işlemlerin her biri yüzeyleri farklı şekilde etkiler ve yüzeyin farklı yüzey topografik yapısının oluşmasına sebep olur (Kwon & Lee, 2000). Başka bir deyişle muameleler, yüzeyin termodinamik değişikliklerine yol açar ve yüzey topografya değişikliğine sebep olur (Dikici, 2019; Fathi Azarbayjani vd., 2009; Narbon vd., 2019a). Bu sebepten aşındırılan yüzeyin, kristalografik yapısının da incelenmesi önemlidir. SYE, malzeme yüzeyindeki atomların denge durumu ile güçlü bir şekilde ilişkili malzeme karakteristiğidir (Han vd., 2019; Rudawska & Jacniacka, 2018). SYE katı bir yüzeyin farklı sıvılarla nasıl etkileşimde olduğu hakkında bize bilgi vermektedir. Sıvı ve katı arasındaki ilişki yüzeye damlatılan sıvının yüzeye oluşturduğu açı yani temas açısı ile belirlenebilir. Temas açısı katı yüzeyinin sıvı teması ile ne kadar ıslatılabilirliği hakkında bilgi de verebilmektedir. Temas açısı küçük ve büyük olması SYE'yi direkt etkilemektedir. Katı yüzey topografyasının farklılığı SYE'yi etkilediği bilinmektedir ve (Annamalai vd., 2016; What Is Surface Energy?, t.y.). Yüzey aşındırma işlemleri farklı şekillerde gerçekleştirilebilir. Örneğin kimyasal aşındırma işlemleri, asidik ve bazik çözeltiler ile metal alaşımlarının mekanik olarak zayıf yüzey sınır tabakalarının kaldırılması şeklindedir (Hu vd., 2019; Narbon vd., 2019a; Purabgola vd., 2020). Mekanik yüzey aşındırma işleminde, zımparalama, kumlama, lazer, plazma vb. uygulamalar kullanılarak yapılmaktadır (Fotakis vd., 2007; Sun vd., 2015; Wan vd., 2018; Zhu vd., 2019). Ayrıca yüzeye uygulanan hem mekanik hem de kimyasal aşındırma yapılan çalışmalarda mevcuttur (Dikici, 2019).

Yapıştırılacak parçaların yüzeylerine uygulanan aşındırma yöntemlerinin bağlantı mukavemetini arttırdığı bilinmektedir (Han vd., 2019; Hu vd., 2019; Narbon vd., 2019a). Fakat hangi aşındırma yönteminin yapıştırma dayanımını daha çok arttırdığı önemli bir konudur ve tercih edilme sebebidir. Aşındırma sonrası aynı yüzey pürüzlülük değerine sahip ya da benzer topografik oluşum gösteren yüzeyler oluşabilir. Bu sebepten yüzeylerin SYE değerlerini bilmek ve bu sayede yüzey ıslatılabilirlikleri hakkında bilgi edinmek ve bu sayede en doğru yüzey aşındırma yöntemlerinden birini seçmek daha doğru olacaktır.

Bu çalışmada, AA7075 alaşım yüzeylerine mekanik, kimyasal ve hibrit olmak üzere üç farklı aşındırma yapılmıştır. Malzemeler mekanik aşındırma olarak kumlama, kimyasal aşındırma olarak ise hem HCl ile hem de NaOH çözeltisi ile dağlanmıştır. Hibrit aşındırma olarak da önce kumlama yapılmış daha sonra numuneler kimyasal aşındırmaya tabi tutulmuştur. Farklı aşındırma işlemine tabi tutulan yüzeylerin temas açısı ve yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüş, OWRK ve Zisman metodu kullanılarak SYE değerleri hesaplanmıştır. Çalışmada amaç, yüzey pürüzlülük ve SYE arasında ilişkileri belirlenmek ve yüzeylerin ıslatılabilirlikleri hakkında bilgi edinmektir. Literatürde AA7075 numune yüzeylerine aşındırma işlemleri uygulanan farklı çalışmalar mevcuttur fakat asidik ve bazik çözelti ile dağlama, mekanik ve hibrit yöntem ve bunların kıyaslamalarının yapıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. AA7075'in aşındırılan yüzeylerinin SYE, temas açısı değerleri ve ıslatılabilirlik özellikleri incelenmiştir ve hangi yönteminin uygulamalar için tercih edilebilir olduğu ve bağlantı dayanımını arttırabileceği öngörüsünde bulunulmuştur. Bu açıdan literatüre katkı sağlayabileceği düşünülmektedir.

## 2. Materyal ve metot

### 2. Material and method

#### 2.1. Malzeme

##### 2.1.1. Material

Çalışmada kimyasal bileşimi Tablo 1' de verilen AA7075 alaşım plaka halinde Seykoç firmasından temin edilmiştir. AA7075 25x25mm ölçülerinde kesilmiştir.

**Tablo 1.** AA7075 kimyasal bileşimi (Alaşım - 7075 - Seykoç Alüminyum, t.y.)  
**Table 1.** Chemical composition of AA7075 (Alaşım - 7075 - Seykoç Alüminyum, t.y.)

Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Diğer	Al
0,5	0,4	1,2-2,0	0,3	2,1-2,9	5,1-6,1	0,18-0,28	0,2	0,15	Kalan

## 2.2. Yüzey hazırlama işlemleri

### 2.2. Surface preparation processes

Çalışmada AA7075 yüzeyleri mekanik, kimyasal ve hibrit yüzey aşındırma işlemlerine tabi tutulmuştur. Mekanik aşındırma olarak kumlama yapılmıştır. Kumlamada kullanılan alümina 5µm boyutundadır. Kimyasal aşındırma, farklı molaritelere sahip NaOH ve HCl çözeltileri ile yapılmıştır. Hibrit aşındırmada ise önce kumlama daha sonra kimyasal aşındırma işlemleri yapılarak yüzeyler elde edilmiştir. Kimyasal aşındırma işlemleri için numuneler ultrasonik banyoda %99,6 saflıktaki asetonunda 45 dakika boyunca bekletilerek üzerindeki yağ, kir ve tozlardan arındırılmıştır. Daha sonra numuneler, asetonun ayrıştırılması için deiyonize su ile yıkanmış ve yüzeyler kurutulmuştur. Kurutulmuş alüminyum alaşım numuneleri 0,5M ve 1M NaOH ile 0,5M ve 1M HCl çözeltilerinde ultrasonik banyoda 55°C de 10'ar dakika bekletilerek yüzeyinde aşındırma işlemi yapılmıştır. Numuneler aşındırma işleminden hemen sonra reaksiyonu durdurmak için deiyonize suya daldırılarak 10 dakika bekletilmiştir. Aşındırma işlemlerinden sonra numunelerin yüzeylerinde oluşan kir ve tozdan arındırmak için ultrasonik banyoda asetonunda 10'ar dakika bekletilmiştir. Numuneler asetonun ayrıştırılması için tekrar deiyonize su ile yıkanmış ve yumuşak bir fırça ile fırçalanmıştır. Asetondan tamamen ayrıştırılması için oda sıcaklığında bekletilmiştir. Kumlama işleminden sonra da yüzeyde oluşan kir ve yağdan arındırmak için yüzey saf aseton ile temizlenmiş ve daha sonra asetonun tamamen arındırılmak için ise yüzey deiyonize su ile yıkanmış ve oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. Hibrit işlem ise kumlama yapılan yüzeye kimyasal aşındırma yapılarak gerçekleştirilmiştir. Tekrar yüzeyleri temizlemek amacıyla asetonunda bekletilmiş daha sonra deiyonize su ile yıkanmıştır. AA7075 işlemsiz numune yüzeyi ve farklı aşındırılan 9 farklı numune yüzeyi üzerine yapılan muameleler Tablo 2' de verilmiştir.

**Tablo 2.** Yüzey işlemleri  
**Table 2.** Surface treatments

Yüzey Aşındırma Şekli	Aşındırma İşlemleri
İşlemsiz Yüzey	-
Kimyasal Aşındırma	0,5M NaOH
	1M NaOH
	0,5M HCl
Mekanik Aşındırma	1M HCl
	Kumlama
	Kumlama+0,5M NaOH
Kimyasal ve Mekanik Aşındırma	Kumlama+1M NaOH
	Kumlama+0,5M HCl
	Kumlama+1M HCl

## 2.3. Yüzey 3D profilometre ve SEM görüntüleri

### 2.3. Surface 3D profilometer and SEM images

Farklı yüzey topografisi elde edilmiş tüm numunelerin görüntüleri ve yüzey pürüzlülüğü Atatürk Üniversitesi DAYTAM Merkezi'nde bulunan Kla Tencor Stylus Profiler P7 cihazı ile nispeten geniş yüzey alanında analiz yapabilen ve yüzeyin üç boyutlu olarak hızlı ve temassız haritalanmasını sağlayan bir optik profilometre ile elde edilmiştir. Numunelerin yüzey görüntüleri ise Zeiss Sigma 300 olan SEM cihazı ile elde edilmiştir.

## 2.4. Temas açısı ölçümleri

### 2.4. Contact angle measurements

Katı yüzeye bir sıvı damlatıldığında açı oluşur. Bu açının büyüklüğü katı yüzey ile sıvı arasındaki kohezyon ve adezyon kuvvetlerinin büyüklüğüne bağlıdır. Oluşan bu açı temas açısıdır. Temas açısı, temas edilen katının cinsine ve yüzeye damlatılan sıvının cinsine bağlı olarak değişmektedir. Katı yüzey ve sıvı arasında elde edilen

temas açısı yüzeyin ıslatılabilirlik derecesini ifade eder (Boz & Kurt, 2007; Rudawska & Jacniacka, 2018). Farklı işlemlere tabi tutulan yüzeyler temas açılarına göre tanımlanan hidrofilik veya hidrofobik yüzey yapısına sahip olabilmektedir ve bunun sebebi de yüzey topolojilerinin farklılıklarındandır (Rudawska & Jacniacka, 2009).

Çalışmada yüzey aşındırma işlemleri sonunda elde edilen numune yüzeylerinin temas açısı ölçümü iki farklı polar sıvı olan deiyonize su ve gliserol, apolar sıvı olan benzen kullanılarak yapılmıştır. Temas açısı ölçümleri için kullanılan deiyonize su, gliserol ve benzenin yüzey gerilimi ve bileşenleri Tablo 3' te verilmektedir. Temas açısı, SYE değerleri hesaplanırken kullanılmıştır.

**Tablo 3.** Test sıvılarının özellikleri  
*Table 3. Properties of test liquids*

Sıvı	Kutup etkisi	Yüzey Enerjisi (mJ/m <sup>2</sup> )			Yoğunluk (g/m <sup>3</sup> )	Viskozite (mPa-s)
		$\gamma_1$	$\gamma_1^p$	$\gamma_1^d$		
Deiyonize su	polar	72,8	51,0	21,8	1	1
Gliserol	polar	63,4	37	26,4	1,26	1,412
Benzen	apolar	28,9	0	28,9	0,876	0,625

## 2.5. Serbest yüzey enerji

### 2.5. Free surface energy

SYE, malzemelerin yüzey katmanındaki atomların denge durumunu tanımlayan termodinamik büyüklüklerden biridir. İki ortamın faz sınırında bulunan moleküller arası etkileşimlerindeki spesifik dengesizlik durumunu yansıtır. SYE, geri dönüşümlü bir izotermal işlemde dengede iki fazı ayırırken yeni bir yüzey birimi oluşturmak için gerekli olan işittir. Temas açısı kullanılarak SYE' yi hesaplama yöntemlerinin temeli, Young eşitliğine dayanmaktadır. Katı, sıvı ve gaz olmak üzere üç fazın temas noktasındaki yüzey gerilimlerini temsil eden kuvvetlerin dengesi durumundan türetilmiştir (Rudawska & Jacniacka, 2009).

Sıvıların SYE' sini belirlemek için çok sayıda yöntem vardır. Fakat katıların sıvılar gibi SYE' sini belirlemek için doğrudan bir yöntem yoktur. Bu sebepten sıvı-katı SYE yöntemleri kullanılarak dolaylı katı SYE hesaplanabilmektedir. En çok kullanılan SYE hesaplama yöntemleri Fowkes, OWRK ve Wu yöntemleridir (Dikici, 2019; What Is Surface Energy?, t.y.). Ayrıca Zisman yöntemi, Neumann yöntemi ve giderek daha popüler hale gelen Van Oss-Chaudhury-Good yöntemleri ile de katı SYE hesaplanabilmektedir (Dikici, 2019).

Bu çalışmada, katı SYE değerleri OWRK ve Zisman yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. OWRK yönteminde, yüzey katmanlarında bulunan iki maddenin molekülleri arasındaki etkileşimlerinden yararlanılarak SYE hesaplanmaktadır. OWRK yöntemi her bir madde içindeki moleküller arası etkileşimlerin geometrik ortalamasına eşit olduğunu iddia eden Berthelot hipotezine dayanarak, dispersive ve polar SYE' lerin hesaplanmasıyla elde edilmektedir (Annamalai vd., 2016; Güleç vd., 2006).

Serbest yüzey enerjisi denklem 1 ve 2 ile hesaplanabilir. Denklem 1' de katı serbest yüzey enerjisi katı dispersive ve katı polar serbest yüzey enerjisinin toplanması ile bulunur.

$$\gamma_s = \gamma_s^d + \gamma_s^p \quad (1)$$

Burada  $\gamma_s^d$ ,  $\gamma_s^p$  katının dispersive serbest yüzey enerjisini,  $\gamma_s^p$ ,  $\gamma_s^d$  polar serbest yüzey enerjisini,  $\gamma_s$ , ise katının serbest yüzey enerjisini mJ/m<sup>2</sup> cinsinden ifade etmektedir.

Denklem 2, katı sıvı arası oluşan temas açısı kullanılarak katı SYE'yi hesaplayabilmek için denklem 1'den türetilmiştir. Burada, yüzeye damlatılan sıvı ile katı yüzey arasında ölçülen  $\theta$  temas açısını,  $\gamma_1$  sıvının serbest yüzey enerjisini,  $\gamma_1^d$  sıvının dispersive serbest yüzey enerjisini,  $\gamma_1^p$  sıvının polar serbest yüzey enerjisini mJ/m<sup>2</sup> cinsinden ifade etmektedir.

$$\gamma_1(1 + \cos\theta) = 2\sqrt{\gamma_s^d\gamma_1^d} + 2\sqrt{\gamma_s^p\gamma_1^p} \quad (2)$$

Katı SYE hesaplanırken iki farklı sıvı için temas açısı değerleri ile iki OWRK denklemi elde edilir ve bu şekilde iki bilinmeyenli denklem çözülebilir hale gelir ve katının  $\gamma_s$  serbest yüzey enerjisi bulunabilir.

Çalışmada SYE hesaplamada kullanılan bir diğer yöntem ise Zisman metodudur. Zisman metodunda temas açısının kosinüs değeri ile temas açısı ölçümünde kullanılan sıvıların yüzey serbest enerjisi karşılaştırılarak nokta elde edilir. Temas açısının sıfır yani  $\cos(0)$  değerinin 1 olduğu konum için yüzey serbest enerjisi ekstrapole edilir. Elde edilen noktalar kullanılarak doğru çizilir ve kosinüs değerinin 1 olduğu yüzey gerilimi değeri grafikten okunur ve katının yüzey serbest enerji olarak kabul edilmiştir. Bu değer kritik yüzey gerilimi olarak adlandırılır ve Zisman'a göre kritik yüzey gerilimi ile yüzey serbest enerjisi aynı değerdir (Fathi Azarbayjani vd., 2009).

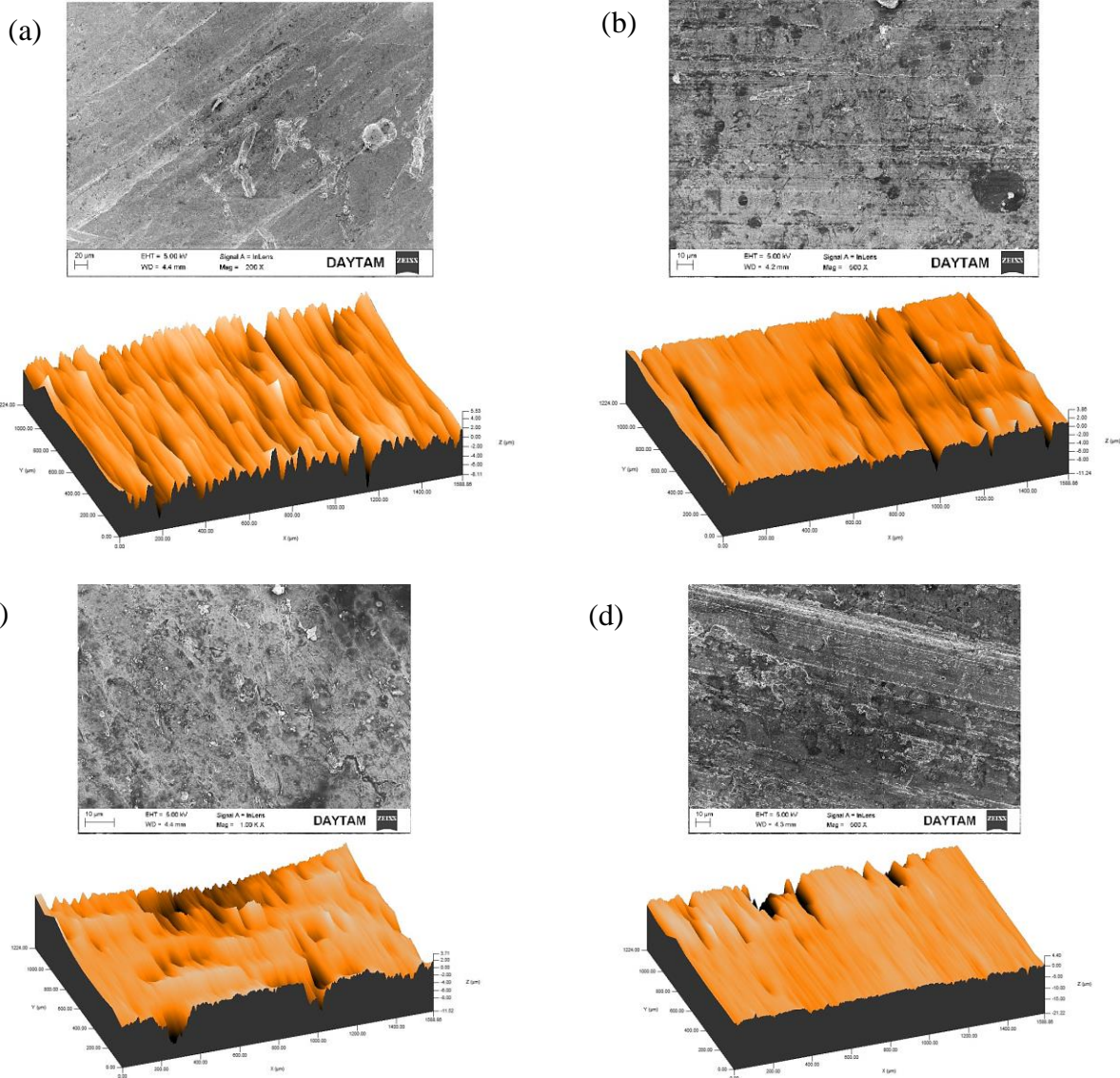
### 3.Bulgular

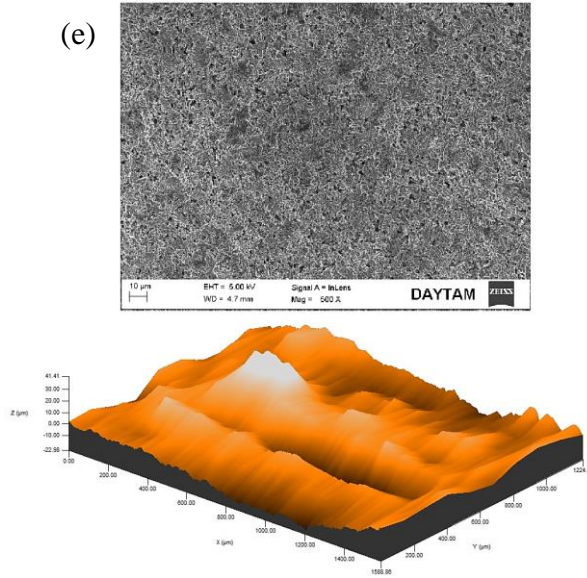
#### 3.Results

#### 3.1.Topografik analiz

##### 3.1.Topographic analysis

AA7075 alaşımının mekanik aşındırma, kimyasal dağlama ve hibrit aşındırma işlemleri ile hazırlanan yüzeylerinin yüzey morfolojilerine ait SEM ve 3D profilometre görüntüleri Şekil 1ve şekil 2 'de verilmiştir.





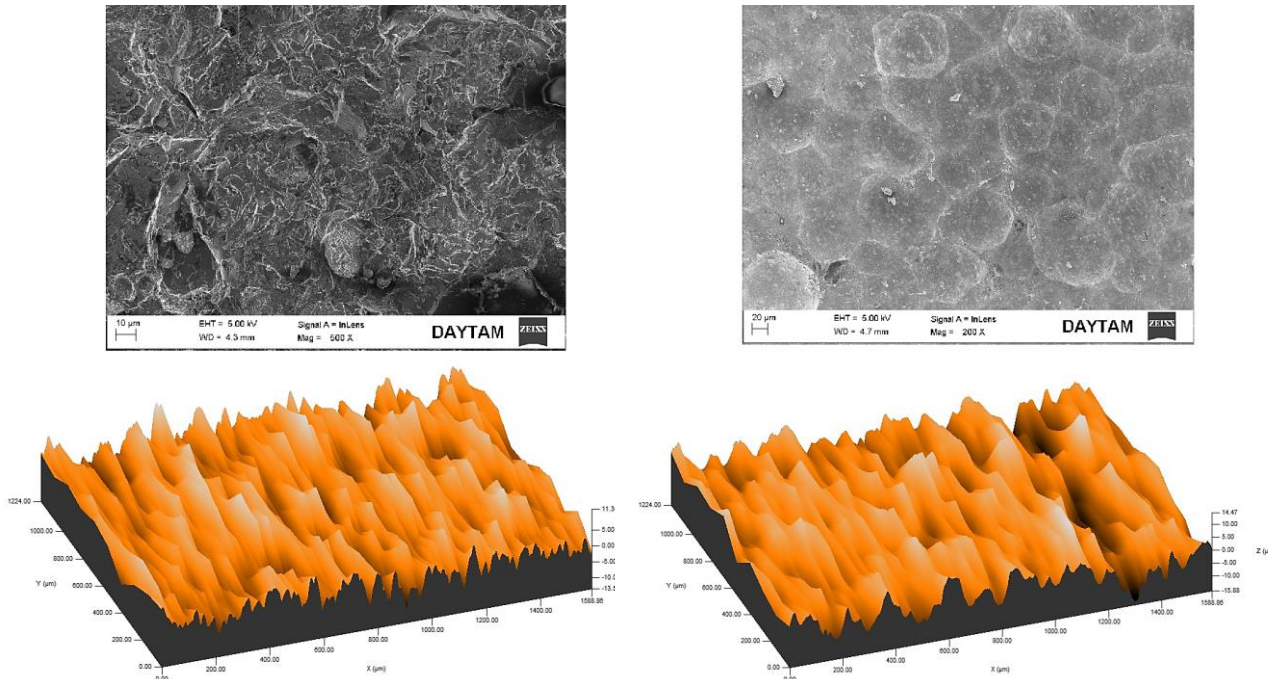
**Şekil 1.** İşlemsiz ve kimyasal aşındırılan numune yüzeylerinin SEM ve 3D profilometre görüntüleri (a)İşlemsiz, (b)0,5M NaOH, (c)1M NaOH, (d)0,5M HCl, (e)1M HCl

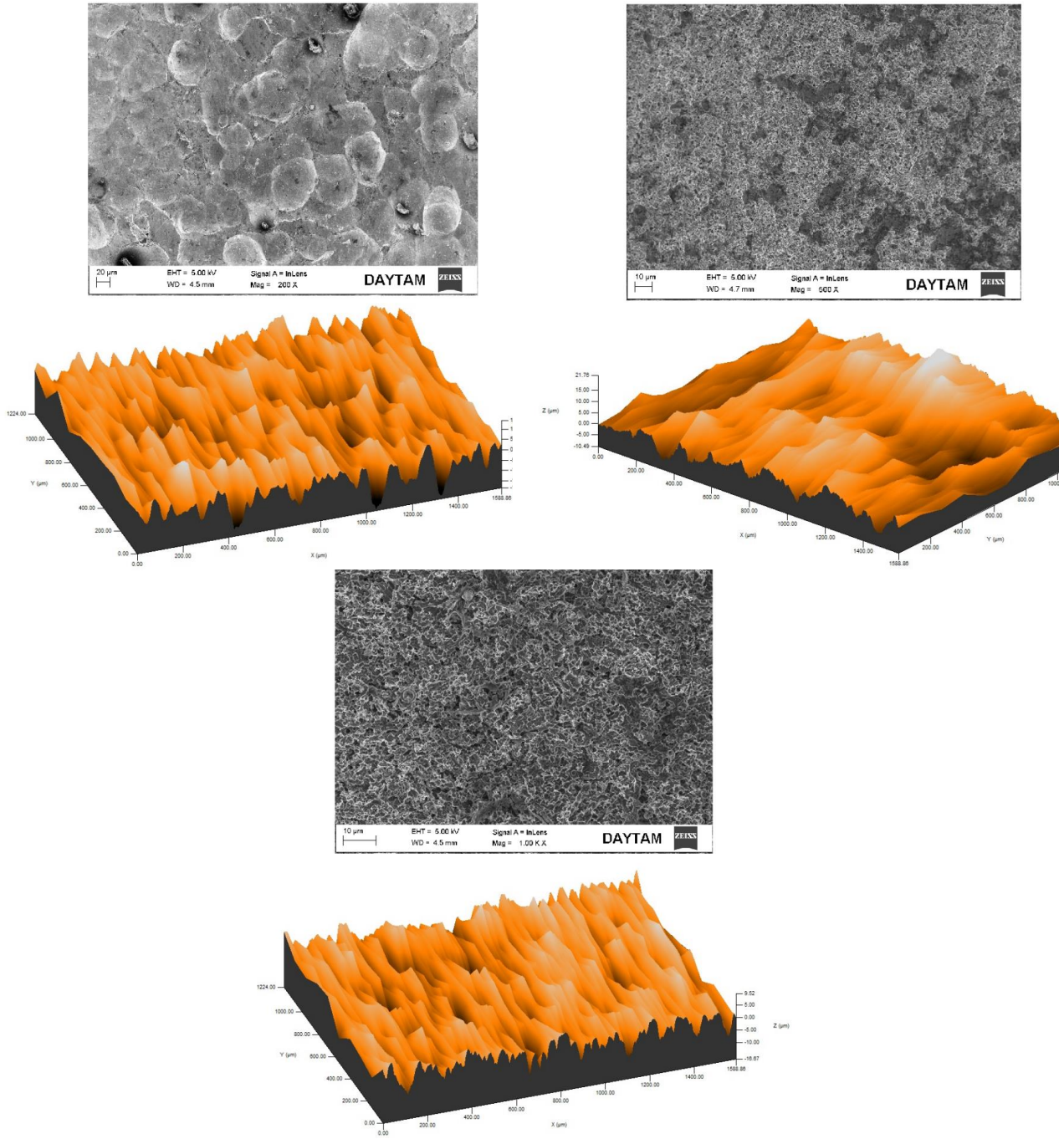
**Figure 1.** SEM and 3D profilometer images of untreated and chemically etched sample surfaces (a)Untreated, (b)0,5M NaOH, (c)1M NaOH, (d)0,5M HCl, (e)1M HCl

Şekil 1(a)'da aşındırılma işlemi yapılmamış AA7075 yüzey görüntüleri incelendiğinde yüzeyin paralel bir vadi yapısına sahip izler olduğu görülmektedir. Numunedeki yatay çiziklerin ve vadi yapısındaki izlerin, taşıma, depolama, nakliye ve sürtünmeden kaynaklı meydana geldiği düşünülmektedir.

Şekil 1(b)'de 0,5M NaOH çözeltisi ile aşındırılan alaşım yüzeyinde aşındırılmamış alaşım yüzeyindeki benzer paralel vadi yapısına sahip olduğu ve ek olarak düzensiz bir topografya sergilediği görülmektedir. NaOH konsantrasyonunun 1M'ye yükseltilmesi ve buna bağlı olarak reaksiyon hızını artmasına ve ince çatlaklı bir yüzey topografya oluşmasına neden olduğu düşünülmektedir (Şekil 1 (c)).

Şekil 1(d)' de 0,5M HCl çözelti ile elde edilen numune yüzeyi görülmektedir. Yüzeyde çukurcukların ve intermetalik parçacıkların yüzeylerde olduğu tespit edilmiştir. HCl çözelti konsantrasyonunun 1M'te ye artmasıyla numune yüzeylerinde daha yoğun ve derin çukurcuklar oluştuğu görülmektedir (Şekil 1(e)).





**Şekil 2.** Mekanik ve hibrit aşındırılan numune yüzelerinin SEM ve 3D profilometre görüntüleri (a)Kumlama, (b)Kumlama+0,5M NaOH, (c)Kumlama+1M NaOH, (d)Kumlama+0,5M HCl, (e)Kumlama+1M HCl

**Figure 2.** SEM and 3D profilometer images of mechanical and hybrid etched specimen surfaces (a)Sandblasting, (b)Sandblasting+0,5M NaOH, (c)Sandblasting+1M NaOH, (d)Sandblasting+0,5M HCl, (e) Sandblasting+1M HCl

Şekil 2(a)'da numune yüzeyine kumlama yapılmıştır. Yüzeyde mikro çukurların olduğu dalgali bir yapı oluşmuştur. Kumlamalı yüzelerde köşeli girinti ve porlar mevcuttur. Kumlamalı yüzeye yapılan NaOH dağlamalar ile köşeli girinti ve porlar kavisli yapılara dönüşmüş ve konsantrasyonun artmasıyla kavisli yapılar küçülmüş ve kavisli yapılarda artış olduğu Şekil 2(b-c) görülmüştür. Şekil 2(d-e)'de kumlama üzerine HCl asit ile dağlama işlemi yapılmış numune yüzelerinde mikro por çaplarının küçüldüğü ve köşeli por formlarının olduğu gözlemlenmiştir. HCl konsantrasyonun artmasıyla bu yapıların yoğunlaştığı ve belirginleştiği tespit edilmiştir. Tüm yüzey görüntülerine bakıldığında hibrit aşındırılan yüzeyler, kimyasal aşındırılan yüzeylere göre daha çukur, tepelere sahip, oyuklu bir yapıdadır. Ayrıca hibrit aşındırılan yüzeylerde

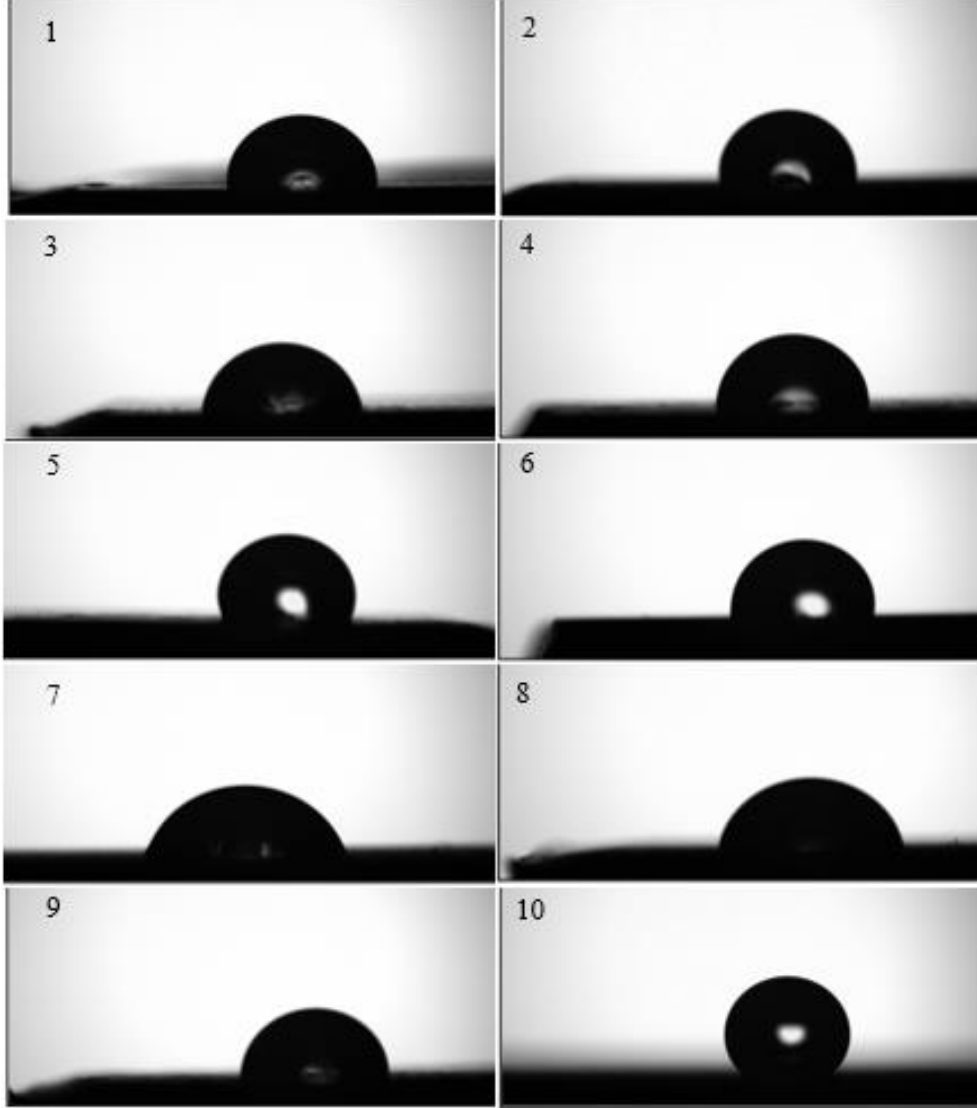


ise HCl asit kullanılarak elde edilen yüzeyler diğer tüm yüzeylere göre yüzey alanı artmış, daha fazla aşındırılmış olduğu görülmektedir (Şekil 2(d,e)).

### 3.2. Temas açısı

#### 3.2. Contact angle

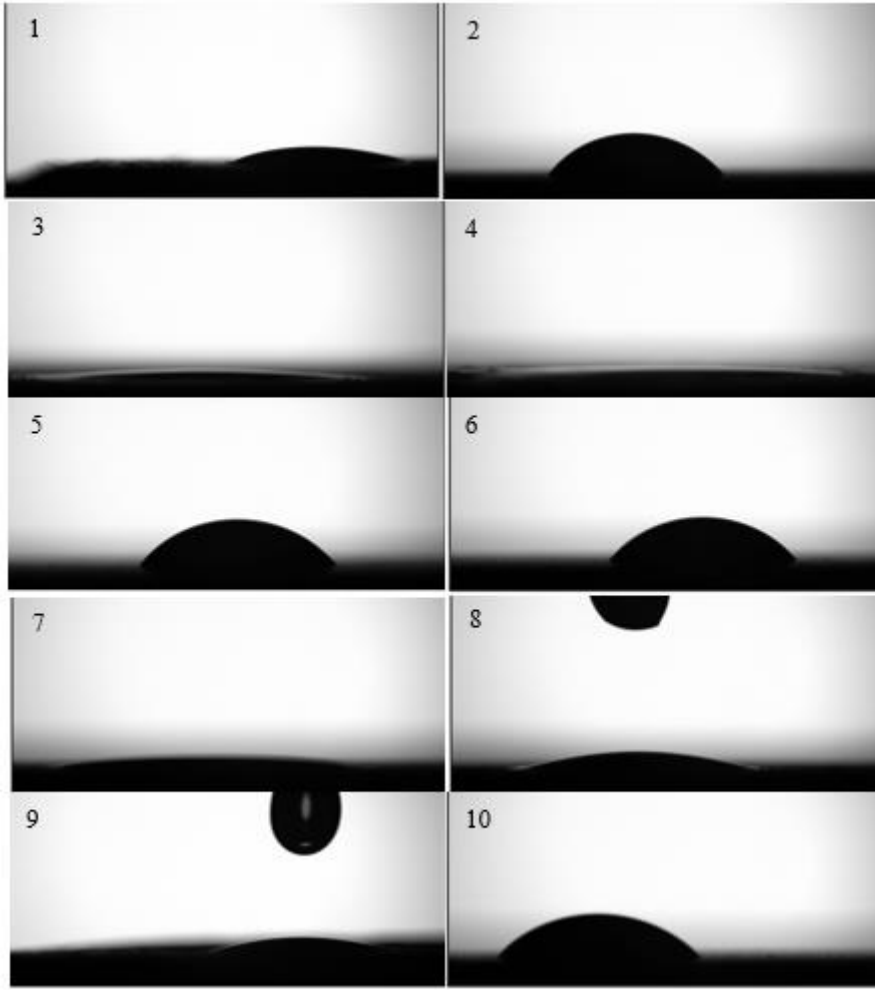
Kimyasal, mekanik ve hibrit aşındırılmış yüzeylerin temas açılarının şekil 3-5' de verilmiştir. Temas açısı ölçümleri polar sıvı olan deiyonize su, gliserol ile ve apolar sıvı olan benzen kullanılarak yapılmıştır. Temas açısı, üç tekrar yapılarak ve değerlerin aritmetik ortalaması alınarak elde edilmiştir.



**Şekil 3.** Temas açısı görüntüleri (deiyonize su) (1)İşlemsiz, (2)0,5M NaOH, (3)1M NaOH, (4)0,5M HCl, (5)1M HCl, (6)Kumlama, (7)Kumlama+0,5MNaOH, (8)Kumlama+1M NaOH, (9)Kumlama+0,5M HCl, (10)Kumlama+1M HCl

**Figure 3.** Contact angle images (deionized water) (1)Untreated, (2)0,5M NaOH, (3)1M NaOH, (4)0,5M HCl, (5)1M HCl, (6)Sandblast, (7)Sandblast+0,5MNaOH, (8)Sandblast+1M NaOH, (9)Sandblasting+0,5M HCl, (10)Sandblasting+1MHCl

Deiyonize su ile elde edilen temas açısı değerleri  $78^{\circ}$  ile  $125^{\circ}$  derece aralığındadır. En düşük dereceye sahip temas açısı değerleri hibrit aşındırma yöntemlerinden olan kumlama+0,5M NaOH ve kumlama+1M NaOH uygulanan yüzeylerde elde edilmiştir. Bu en yüksek ıslatılabilirliğe sahip yüzeyler demektir. Temas açısı değeri en yüksek olan yüzey kumlama+1M HCl ve kumlama ile aşındırılan yüzeydir. Bu iki yüzeyin ıslatılabilirliği çok düşüktür.



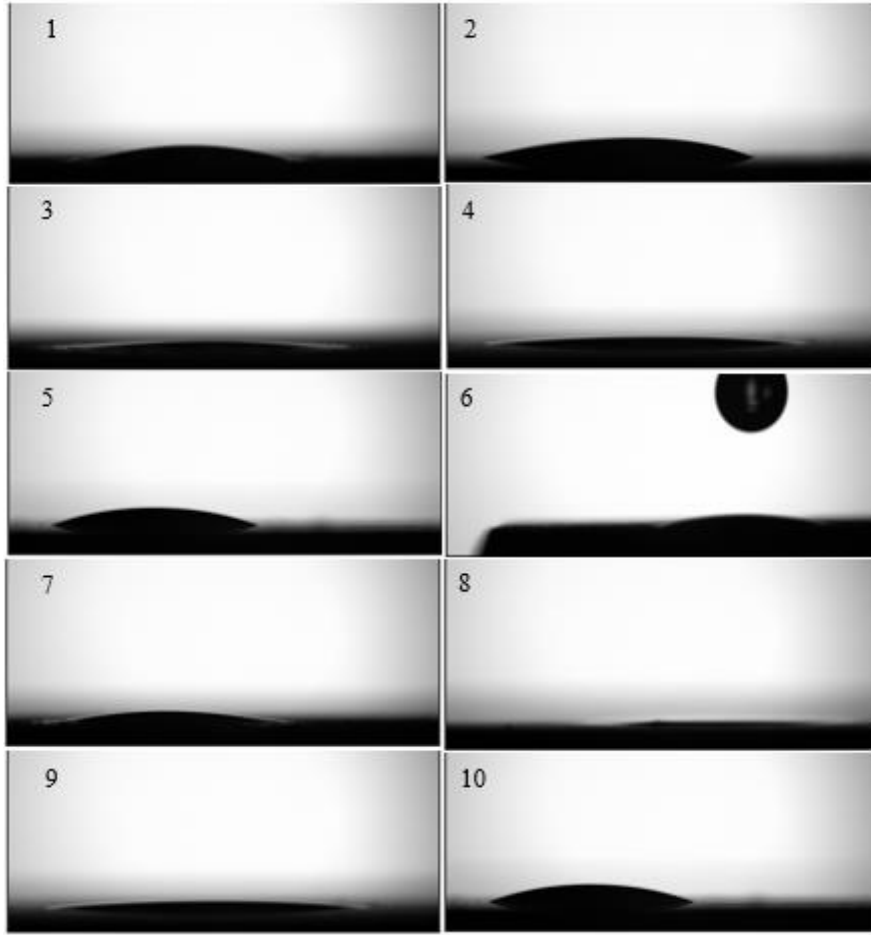
**Şekil 4.** Temas açısı görüntüleri (gliserol) (1)İşlemsiz, (2)0,5M NaOH, (3)1M NaOH, (4)0,5M HCl, (5)1M HCl, (6)Kumlama, (7)Kumlama+0,5MNaOH, (8)Kumlama+1M NaOH, (9)Kumlama+0,5M HCl, (10) Kumlama+1M HCl

**Figure 4.** Contact angle images (glycerol) (1)Untreated, (2)0,5M NaOH, (3)1M NaOH, (4)0,5M HCl, (5)1M HCl, (6)Sandblast, (7)Sandblast+0,5MNaOH, (8)Sandblast+ 1M NaOH, (9)Sandblast+0,5M HCl, (10)Sandblast+1M HCl

Gliserol kullanılarak elde edilen temas açısı değerleri  $11^{\circ}$  ile  $72^{\circ}$  aralığındadır. Yine deiyonize su ile yapılan ölçümlerdeki gibi temas açısı en düşük olan yüzeyler kumlama+0,5M NaOH ve kumlama+1M NaOH' ler de elde edilmiştir. Bu yüzeylerde sıvı yayılımı en yüksektir. En yüksek temas açısına sahip yüzey ise kumlama yapılmış yüzeyde elde edilmiştir. Kumlama ile elde edilen yüzey, temas açısının en büyük olan yani gliserolün yüzeye yayılımı en düşük olan yüzeydir.

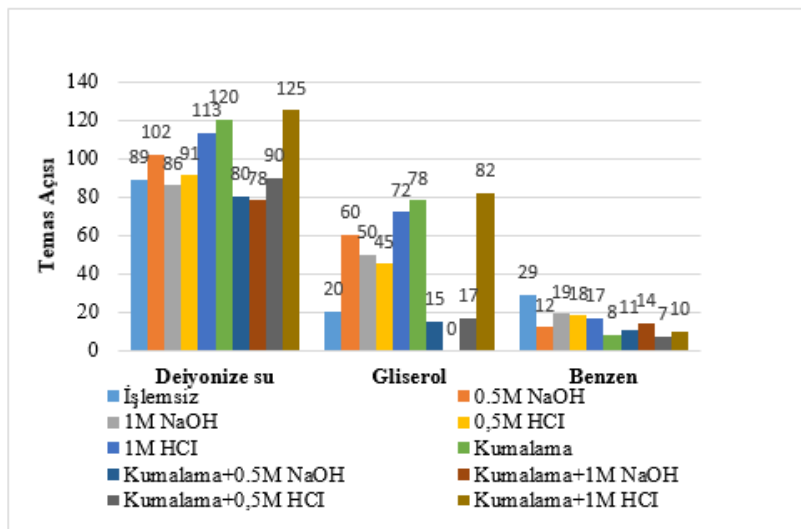
Benzen ile ölçülen temas açısı değerleri, diğer sıvılarla ölçülen değerlere göre daha düşüktür. Sıvıların yüzey enerjisine göre temas açısı değerleri değişmektedir. Benzenin Tablo 3'te de yüzey enerjisi diğer sıvılara göre daha düşüktür. Bu sebepten en düşük temas açısı değerleri benzende elde edilmiştir. Şekil 5(8)'den de görülmektedir ki kumlama+1M HCl ile dağlanan yüzeye benzen tamamen yayılmış, yüzeye sıvı tamamen nüfuz etmiştir. Kumlama+0,5M HCl aşındırma yapılmış yüzeyde de temas açısı değeri çok düşüktür. Bu yüzeyde sıvı nerde ise tamamen nüfuz etmiştir. 1M HCl ve kumlama+1M HCl aşındırma yapılan yüzeylerde temas açısı değeri diğer yüzeylere göre daha yüksek değer almıştır. Ayrıca aşınmanın az olduğu yüzeylerin (Şekil 3-5), temas açılarının daha büyük olduğu görülmektedir (Şekil 1, 2) (Narbon vd., 2019b).

Deiyonize su, gliserol ve benzen kullanılarak elde edilen AA7075 temas açısı değerleri toplu olarak Şekil 6'da vermiştir.



**Şekil 5.** Temas açısı görüntüleri (benzen) (1) İşlemsiz, (2) Kumlama, (3) 0,5M NaOH, (4) 1M NaOH, (5) 0,5M HCl, (6) 1M HCl, (7) Kumlama+0,5M NaOH, (8) Kumlama+1M NaOH, (9) Kumlama+0,5M HCl, (10) Kumlama+1M HCl

**Figure 5.** Contact angle images (benzene) (1) Untreated, (2) Sandblast, (3) 0,5M NaOH, (4) 1M NaOH, (5) 0,5M HCl, (6) 1M HCl, (7) Sandblast+0,5M NaOH, (8) Sandblast+1M NaOH, (9) Sandblast+0,5M HCl, (10) Sandblast+1M HCl



**Şekil 6.** Tüm yüzeylerin temas açısı değerleri (deiyonize su, gliserol, benzen)

**Figure 6.** Contact angle values of all surfaces (deionized water, glycerol, benzene)

Temas açısı değerlerinin, yüzey morfolojisinden direkt etkilenmiştir. Islatılabilirliği en yüksek yüzeyler, temas açısı değeri en düşük olan yüzeylerdir. Tam tersi ıslatılabilirliği en kötü olan yüzeyler ise temas açısı değeri en fazla olan yüzeylerdir. Islatılabilirliği en iyi olan yüzeyler, kumlama +0,5M HCl ve kumlama +1M HCl yüzey hibrit aşındırma uygulanan yüzeylerdir. Islatılabilirliği en kötü yüzeler ise kumlama, 1M HCl asit ile aşındırılmış yüzeylerdir.

### 3.3. Serbest yüzey enerjisi ve yüzey pürüzlülük değerleri

#### 3.3. Free surface energy and surface roughness values

Owens Wendt Rabel and Kaelble (OWRK) modeli temas açısı kullanılarak yüzey serbest enerjisi hesaplama yöntemlerinden en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Bu modelde, iki farklı sıvının temas açısı değerleri kullanılır.

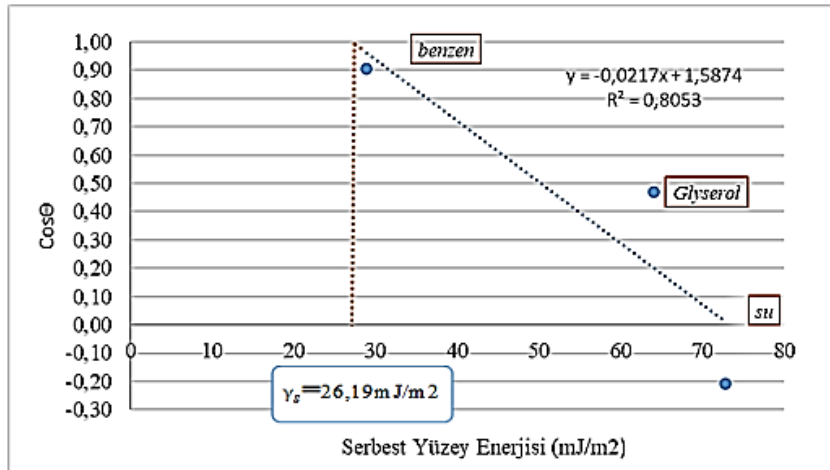
Denklem deiyonize su ve benzen için yazılacak olursa

$$\gamma_w(1 + \cos \theta_w) = 2\sqrt{\gamma_s^d \gamma_w^d} + 2\sqrt{\gamma_s^p \gamma_w^p} \quad (3)$$

$$\gamma_b(1 + \cos \theta_b) = 2\sqrt{\gamma_s^d \gamma_b^d} + 2\sqrt{\gamma_s^p \gamma_b^p} \quad (4)$$

Burada  $\gamma_w$  deiyonize su serbest yüzey enerjisi,  $\theta_w$  deiyonize su temas açısını,  $\gamma_w^d$  deiyonize su dispersive serbest yüzey enerjisini,  $\gamma_w^p$  deiyonize su polar serbest yüzey enerjisini,  $\gamma_b$  benzen serbest yüzey enerjisi,  $\theta_b$  benzen temas açısını,  $\gamma_b^d$  benzen polar serbest yüzey enerjisini,  $\gamma_b^p$  benzen polar serbest yüzey enerjisini ifade etmektedir.

Bu denklemlerde, sıvıların polar ve dispersive değerleri ile aşındırılan yüzeylerin temas açısı değerleri yerine konulur. Denklem 3 ve 4'ten elde edilen iki denklem yardımı ile  $\gamma_w^d$  sıvı polar serbest yüzey enerji,  $\gamma_s^p$  katı polar serbest yüzey enerjisi değerleri elde edilir ve bu değerler denklem 1'de yerine konularak katının serbest yüzey enerjisi  $\gamma_s$  bulunur. Zisman yönteminde ise şekil 6'da verilen yüzey temas açısı değerlerinin kosinüsleri alınarak sıvıların serbest yüzey enerjileri ile bir grafik çizilir. Noktaların eğim çizgileri çizilir. Ve bu eğim çizgisi temas açısı  $180^\circ$  olan yani  $\cos$ 'ü 0 olan noktadan çizilen düz çizgi ile çakıştırılır. Elde edilen noktanın y bileşeni bulunur. Bulunan bu değer katının serbest yüzey enerjisidir (Şekil 7).



Şekil 7. Zisman yöntemi  
Figure 7. Zisman method

Aşındırma öncesi ve sonrası tüm numune yüzeylerinin yüzey pürüzlülük değerleri 3D profilometre sonuçlarından elde edilmektedir. Yüzey pürüzlülük değerleri olan Ra ortalama pürüzlülük, Rq kök ortalama kare pürüzlülük ve Rp maksimum tepe yüksekliği, Rv maksimum çukur yüksekliğini ifade etmektedir. Tüm yüzeylerin pürüzlülük ve SYE değerleri tablo 4'te verilmektedir.

**Tablo 4.** Numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri  
**Table 4.** Surface roughness values of the samples

	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rq ( $\mu\text{m}$ )	Rp ( $\mu\text{m}$ )	Rv ( $\mu\text{m}$ )	OWRK $\gamma_s$ ( $\text{mJ}/\text{m}^2$ )	Zisman $\gamma_s$ ( $\text{mJ}/\text{m}^2$ )
İşlemsiz Yüzey	1,891	3,228	33,605	10,441	30,34	30,27
0,5M NaOH	0,788	1,257	3,86	11,241	26,73	27,07
1M NaOH	1,240	1,893	3,593	10,813	31,92	32,13
0,5M HCl	2,580	3,993	8,118	23,867	29,32	29,85
1M HCl	6,523	9,031	41,409	22,976	24,44	25,31
Kumlama	2,791	3,531	11,338	13,588	26,19	26,91
Kumlama+0,5M NaOH	3,456	4,456	14,470	15,879	34,79	33,84
Kumlama+1M NaOH	3,664	4,655	14,162	18,575	35,88	34,48
Kumlama+0,5M HCl	4,600	5,929	21,764	10,491	29,90	29,44
Kumlama+1M HCl	2,889	3,725	9,517	16,671	25,83	27,70

Tablo 4'ten de görüldüğü gibi Ra ortalama yüzey pürüzlülük değerleri en yüksek 1M HCl asit ile kimyasal aşındırma yapılmış yüzeyde görülmektedir. En az Ra ise 0,5M NaOH çözeltisinde yüzey dağlanan numunede görülmektedir. Hiç işlem görmemiş yüzeyin Ra değeri, NaOH ile kimyasal aşındırılan yüzeylerin Ra değerlerinden büyüktür. İşlemsiz yüzeyin, Rp değeri NaOH ile aşındırılan yüzeylerin Rp değerinden yüksektir. Buradan NaOH asidin yüksek tepeleri dağladığı bu sebepten pürüzlülük değerini küçülttüğü düşünülmektedir.

SYE değerleri hesaplamalarında yüzey temas açıları kullanıldığından temas açısı değeri değişimlerinden de etkilenirler. Temas açısı küçük olan yüzeylerin SYE' si büyük, temas açısı büyük olan yüzeyin SFE' si küçüktür. SYE değeri küçük olan yüzey ıslatılabilirliği düşük, büyük olanın ise ıslatılabilirliği yüksektir. Islatılabilirliği en yüksek olan yüzey kumlama+1M NaOH ile aşındırılan yüzeydir. Islatılabilirliği en düşük yüzey ise 1M HCl ile aşındırılan yüzeydir. OWRK ve Zisman metodu ile elde edilen SYE değerler çok yakındır. İki modelde, SYE değeri bulunmasında başarılıdır.

Yüzey pürüzlülük ve SYE değerleri birlikte incelenecek olursa, SYE değerleri birbiri ile yakın yaklaşık  $26\text{mJ}/\text{m}^2$  olan 0,5M NaOH ve kumlama ile aşındırılan yüzeylerin Ra değeri sırasıyla 0,788, 2,791 $\mu\text{m}$ 'dir. Ya da kumlama+0,5M NaOH aşındırılan yüzey ile kumlama+ 1M NaOH hibrit yöntem kullanılarak aşındırılan yüzeylerin yüzey pürüzlülük değerleri çok yakinken yaklaşık 3,5 $\mu\text{m}$  iken SYE değerleri birbirinden çok farklıdır. Sonuç olarak yüzey pürüzlülük değerleri ile SYE değerleri birbiri ile bir ilişkisi yoktur anlamına gelmektedir (Narbon vd., 2019a).

#### 4. Sonuç ve tartışma

##### 4. Conclusion and discussion

Bu çalışmanın sonuç kısmında AA7075 numunesinin yüzeylerine kimyasal, mekanik ve hibrit aşındırma işlemleri uygulanmış ve oluşan yüzeylerin yüzey pürüzlülükleri, yüzey topografyası, temas açısı, farklı metodlar ile hesaplanan SYE değerlerinin birbiri ile ilişkileri değerlendirilmiştir.

- Aşındırma öncesi ve sonrası ayrıca yöntemine göre de, yüzeylerin yüzey morfolojilerinde değişmektedir.
- HCl asit ve NaOH çözeltilerindeki konsantrasyon değerleri yüzeylerin temas açısı değerlerini etkilemektedir. Ayrıca kumlama ve kumlamaya ek olarak yapılan kimyasal aşındırmada da yüzey morfolojileri ile temas açısı değerlerini değiştirmiş ve yüzey morfolojisini de etkilemiştir.
- Kimyasal aşındırmada HCl, mekanik aşındırmada kumlama ve hibrit aşındırmada ise kumlama+HCl, yüzey pürüzlülüğünün değeri üzerinde de çok etkiye sahiptir.
- Kimyasal aşındırmada çözelti molaritesinin artması pürüzlülük değerlerini arttırmıştır. Hibrit aşındırmada ise çözelti molaritesinin artması ile yüzey pürüzlülük değerleri ya sabit kalmış ya da azalmıştır.
- İşlem görmemiş ve farklı işlemlere maruz bırakılmış toplam 10 adet numune yüzeylerine üç farklı sıvı kullanılarak katı sıvı temas açısı ölçülmüştür. Temas açısının yüksek olması SYE değerlerini düşürür. Buda SYE yüksek olan yüzeylerin yüzeye daha iyi nüfuz ettiği ve ıslatılabilirliği fazladır anlamına gelir. Ya da temas açısının büyük olması SYE değerlerinin düşmesine ve yüzeyin ıslatılabilirliğinin azalması anlamına gelir. Uygulamalarda ıslatılabilirliğin yüksek yani SYE' nin büyük olması yüzeye sıvının nüfuziyeti arttırdığı için dayanımını da arttıracığı anlamına gelir. Kumlama+1M NaOH aşındırılan yüzey en ıslatılabilir özelliğe sahip yüzeydir. 1M HCl ile aşındırılan yüzey ise en kötü ıslatılabilirliğe sahip yüzeydir.

- Kimyasal aşındırmada HCl ile hem de kumlama+HCl ile aşındırılan yüzeylerin molaritenin artması ile SYE değerleri düşmüştür. Fakat NaOH ile ve kumlama+NaOH ile aşındırılan yüzeylerde molaritenin artmasıyla SYE değerleri artış göstermiştir.
- Pürüzlülük değerleri ile yüzey enerjilerinin değerleri arasında doğrudan bir ilişki yoktur. Benzer pürüzlülük değerlerine sahip yüzeylerin yüzey enerjileri farklılık göstermektedir.
- Farklı morfolojiye sahip yüzeyler, uygulanan işleme bağlı olarak farklı temas açışı ve SYE değerleri almışlardır.
- OWRK ve Zisman ile elde edilen serbest yüzey enerjisi değerleri birbiri ile ilişkilidir.

### Yazar katkısı

*Author contribution*

Bütün yazarlar araştırmaya eşit oranda katkıda bulunmuşlardır.

### Etik beyanı

*Declaration of ethical code*

Bu çalışmada, “Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi” kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin “Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler” başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.”

### Çıkar çatışması beyanı

*Conflicts of interest*

Bu çalışmadaki yazarların herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

### Kaynaklar

*References*

- Akpınar, S. & Akpınar, I. A. (2019). Effect of nanostructured reinforcement of adhesive on thermal cycling performance of a single-lap joint with composite adherends. *Composites Part B: Engineering*, 175, 107106. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107106>
- Annamalai, M., Gopinadhan, K., Han, S. A., Saha, S., Park, H. J., Cho, E. B., Kumar, B., Patra, A., Kim, S.-W. & Venkatesan, T. (2016). Surface energy and wettability of van der waals structures. *Nanoscale*, 8(10), 5764-5770. <https://doi.org/10.1039/C5NR06705G>
- Aydın, M. D., Akpınar, S., Özel, A. & Erdoğan, S. (2015). Kayma yüküne maruz yapıştırma bağlantılarından yapısal yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi. *Mühendis ve Makina*, 56(668), 48-55. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/muhendismakina/issue/54338/736175>
- Dikici, T. (2019). Asidik dağlama prosesinde farklı HCl/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> oranının titanyumun yüzey morfolojisi ve pürüzlülüğüne etkisi. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 10(3), 999-1007. <https://doi.org/10.24012/dumf.450560>
- Fathi Azarbayjani, A., Jouyban, A. & Chan, S. Y. (2009). Impact of surface tension in pharmaceutical sciences. *Journal of Pharmacy & Pharmaceutical Sciences*, 12(2), 218. <https://doi.org/10.18433/J32P40>
- Fotakis, C., Zorba, V., Stratakis, E., Athanassiou, A., Tzanetakakis, P., Zergioti, I., Papagoglou, D. G., Sambani, K., Filippidis, G., Farsari, M., Pouli, V., Bounos, G. & Georgiou, S. (2007). Novel aspects of materials processing by ultrafast lasers: from electronic to biological and cultural heritage applications. *Journal of Physics: Conference Series*, 59, 266-272. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/59/1/056>
- Fu, J., Shi, L., Zhang, D., Zhong, Q. & Chen, Y. (2010). Effect of nanoparticles on the performance of thermally conductive epoxy adhesives. *Polymer Engineering & Science*, 50(9), 1809-1819. <https://doi.org/10.1002/pen.21705>
- Güleç, H. A., Sariog˘lu, K. & Mutlu, M. (2006). Modification of food contacting surfaces by plasma polymerisation technique. Part I: Determination of hydrophilicity, hydrophobicity and surface free energy by contact angle method. *Journal of Food Engineering*, 75(2), 187-195. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.04.007>

- Han, B., Liang, S., Wang, B., Zheng, J., Xie, X., Xiao, K., Wang, X. & Huang, X. (2019). Simultaneous determination of surface energy and roughness of dense membranes by a modified contact angle method. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 562, 370-376. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.11.059>
- Hu, Y., Yuan, B., Cheng, F. & Hu, X. (2019). NaOH etching and resin pre-coating treatments for stronger adhesive bonding between CFRP and aluminium alloy. *Composites Part B: Engineering*, 178, 107478. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107478>
- Kim, J. K., Kim, H. S. & Lee, D. G. (2003). Investigation of optimal surface treatments for carbon/epoxy composite adhesive joints. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 17(3), 329-352. <https://doi.org/10.1163/156856103762864651>
- Kwon, J. W. & Lee, D. G. (2000). The effects of surface roughness and bond thickness on the fatigue life of adhesively bonded tubular single lap joints. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 14(8), 1085-1102. <https://doi.org/10.1163/156856100743095>
- Mansourian-Tabaei, M., Jafari, S. H. & Khonakdar, H. A. (2014). Lap shear strength and thermal stability of diglycidyl ether of bisphenol a/epoxy novolac adhesives with nanoreinforcing fillers. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(6). <https://doi.org/10.1002/app.40017>
- Martínez-Landeros, V. H., Vargas-Islas, S. Y., Cruz-González, C. E., Barrera, S., Mourtazov, K. & Ramírez-Bon, R. (2019). Studies on the influence of surface treatment type, in the effectiveness of structural adhesive bonding, for carbon fiber reinforced composites. *Journal of Manufacturing Processes*, 39, 160-166. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.02.014>
- Narbon, J. J., Moreno-Díaz, C. & Arenas, J. M. (2019a). Influence of surface treatment on the surface energy of an aluminium substrate. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 560, 323-329. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.09.010>
- Narbon, J. J., Moreno-Díaz, C. & Arenas, J. M. (2019b). Influence of surface treatment on the surface energy of an aluminium substrate. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 560, 323-329. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.09.010>
- Purabgola, A., Rastogi, S., Sharma, G. & Kandasubramanian, B. (2020). Surface preparation for structural adhesive joints. İçinde *Structural Adhesive Joints* (ss. 1-34). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119737322.ch1>
- Rudawska, A. & Jacniacka, E. (2009). Analysis for determining surface free energy uncertainty by the Owen–Wendt method. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29(4), 451-457. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2008.09.008>
- Rudawska, A. & Jacniacka, E. (2018). Evaluating uncertainty of surface free energy measurement by the van Oss-Chaudhury-Good method. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 82, 139-145. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2018.01.006>
- Sun, Z., Shi, S., Hu, X., Guo, X., Chen, J., Chen, H. (2015). Short-aramid-fiber toughening of epoxy adhesive joint between carbon fiber composites and metal substrates with different surface morphology. *Composites Part B: Engineering*, 77, 38-45. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.010>
- Wan, H., Lin, J. & Min, J. (2018). Effect of laser ablation treatment on corrosion resistance of adhesive-bonded Al alloy joints. *Surface and Coatings Technology*, 345, 13-21. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.03.087>
- What is Surface Energy? Calculation Models and More Explained.* (t.y.). Ossila. Geliş tarihi 02 Mart 2022, gönderen <https://www.ossila.com/pages/a-guide-to-surface-energy>
- Zhu, C., Wan, H., Min, J., Mei, Y., Lin, J., Carlson, B. E. & Maddela, S. (2019). Application of pulsed yb: fiber laser to surface treatment of Al alloys for improved adhesive bonded performance. *Optics and Lasers in Engineering*, 119, 65-76. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2019.03.017>

## Estimation of Contact Lengths Using Deep Learning Neural Network

### *Derin Öğrenme Yöntemi ile Temas Uzunlukları Tahmini*

Alper POLAT\*, 

Munzur University, Construction Technology Department, Tunceli, Turkey

• Received: 27.05.2022

• Accepted: 24.03.2023

#### Abstract

One of the most common problems in engineering is contact problems. In recent years, researchers have turned to alternative methods that can offer effective solutions in a shorter time, instead of solutions containing complex and long mathematical expressions. This study focuses on the estimation of the contact lengths in a homogeneous elastic layer suppressed by two elastic punches with two solution methods. Firstly, a new model was designed for estimation using Deep Learning Neural Network (DNN), one of the deep learning structures. Estimation of contact lengths was provided with the output of the DNN model, which was fed with the homogeneous elastic layer, the ratio of shear modules of the punches and the input parameters of punch radii. The finite element method was used as the second solution method. The problem was modelled in the ANSYS programme, and the solution was made with the same parameters used in DNN modelled. The results obtained from both solutions were compared with the solutions obtained by the theory of elasticity and classical NN in the literature. It had been seen that the results obtained with DNN and ANSYS were compatible with the results obtained with analytical and classical NN and the margin of error was smaller.

**Keywords:** Contact problem; Deep learning neural network; Finite element method; Machine learning

#### Öz

Mühendislikte yaygın olarak karşılaşılan problemlerden biri de temas problemleridir. Son yıllarda araştırmacılar karmaşık ve uzun matematiksel ifadeler içeren çözümler yerine daha kısa sürede etkili çözümler sunabilen alternatif yöntemlere yönelmişlerdir. Bu çalışmada, elastik iki dairesel punch ile bastırılan homojen elastik tabakada meydana gelen temas uzunluklarının tahmini yapılmıştır. Bu amaçla makine öğrenmesi alanında son zamanların popüler konusu olan derin öğrenme tekniği kullanılmıştır. Derin öğrenme yapılarından Derin Öğrenme Sinir Ağı (DNN) kullanılarak tahmin için yeni bir model tasarlanmıştır. Homojen elastik tabaka ile punchların kayma modülleri oranı ve punch yarıçaplarından oluşan giriş parametreleri ile beslenen DNN modelinin çıkışında temas uzunluklarının tahmini sağlanmıştır. Modelin eğitimi için analitik çözüm ile elde edilen veriler kullanılmıştır. Ayrıca, sonlu elemanlar yöntemi ile çözümden elde edilen sonuçlar sunulmuş ve DNN sonuçları desteklenmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar, literatürdeki elastisite teorisi ve klasik Neural Network ile yapılan çözümlerden elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır. Sonuç olarak klasik Neural Network ile yapılan çözüme kıyasla DNN modeli çok daha kısa sürede ve daha az hatayla sonuçlar elde etmiştir. Sunulan bu modelin temas uzunluğu tahmininde kullanılabilecek etkili bir yaklaşım olduğu söylenebilir.

**Anahtar kelimeler:** Temas roblemi; derin öğrenme; sonlu elemanlar yöntemi; makine öğrenmesi

\* Alper POLAT; alperpolat@munzur.edu.tr



## 1. Introduction

Contact problems are a common field of study for researchers in mechanical engineering. In engineering structures, many systems need to be in contact with each other to work. It is crucial for engineers to know the stresses, strains and displacements that result from the contact interaction of these systems. Data such as stress, strain and contact lengths of the systems provide great convenience during the design and sizing phase in contact problems. Starting with (Hertz, 1985) this phenomenon has led to interesting studies in a wide variety of materials and geometries. Some of these studies have been on split contact problems (Kahya et al. 2007), (Rhimi et al. 2011), (El Borgi et al. 2017).

Studies on layer weights focus on the problems of continuous contact and discontinuous contact. If the load on the layer is below a certain limit, no separation occurs and this is called continuous contact. Researchers have conducted different studies by ignoring, as well as not ignoring, the friction effect (Chidlow et al. 2013), (Yan & Me, 2017), (Liu et al. 2018), (Polat et al. 2018). Contribution to the problems of contact problems has also been made with alternative solution methods. The finite element method has been one of the most preferred methods in these studies (Abhilash&Murthy, 2014), (Polat et al. 2019), Yaylacı (2017), (Alinia et al. 2018).

When the studies are examined, it can be seen that the theory of elasticity and computer-based numerical methods are preferred for the solution of contact problems. Some researchers have found the learning ability of machines beneficial. Through artificial neural networks (ANN), one of these methods, solutions have been developed for contact problems. (Özşahin et al. 2004) gathered ANN with the problem of contact in the homogeneous layer suppressed by two rigid blocks. An ANN model was applied by (Rapetto et al. 2009) for the determination of the relationship between unevenness parameters and real contact area. Khaleghian et al. made estimations on the friction values between tire and road using ANN (Khaleghian et al. 2016). (Çakıroğlu et al. 2011) made the estimation of the contact distances in the elastic layer which is situated on two elastic quarter planes and pressed with a circular rigid punch by using ANN. In the study, they used a network structure with a three-layered backpropagation training algorithm.

Deep learning neural networks, which have recently been widely used in machine learning, are multi-layered structures of traditional ANN (Lecun et al. 2015). Advances in hardware and improvements in software approaches such as activation functions and optimizer have enabled the use of multi-layered networks. Common networks such as Convolutional Neural Networks (CNN), Stacked Autoencoders (SAE), Long Short-Term Memory (LSTM) provide very successful results in deep learning. CNNs are particularly popular in image processing (Krizhevsky et al. 2015), (Çelik et al. 2020). It can perform classification with an end-to-end architecture without the need for any manual feature extraction on image data (Goodfellow et al. 2016). Besides the two-dimensional input data, notable results were obtained within the 1D input data. These structures are frequently used especially in the biomedical signal processing field (Murat et al. 2020), (Yıldırım et al. 2018). On account of multi-layer structures, high performance has been achieved in areas such as image processing, sound processing and signal processing, with features abstracted in deep layers. On the other hand, DNNs are multi-layered structures of classical neural network architecture. These networks offer successful applications in classification and regression problems.

In this study, the estimation of contact lengths in a homogeneous and isotropic layer suppressed by two elastic circular punches was obtained through Deep Learning Neural Network (DNN). It was aimed to automatically estimate contact lengths at the output using the input parameters of the DNN networks. For this purpose, the design of the network that would provide the best result was done by determining the optimum DNN layer parameters. Reducing the use of hardware resources and obtaining the best results were taken into consideration while creating the DNN. The finite element method was used as a second solution. The problem was modeled with ANSYS Mechanical Launcher to obtain contact lengths. The results from both solutions were compared with those obtained by (Özşahin et al. 2004) using the theory of elasticity and ANN.

## 2. Definition of the problem

### 2.1. Geometry of the problem and boundary conditions

The geometry of the homogeneous and isotropic layer in the range  $(-\infty, +\infty)$  suppressed by two elastic circular punch was presented in Figure 1. The material properties of the elastic layer were given as  $(\mu_1, \nu_1)$ . The material properties for circular punches were defined as  $(\mu_2, \nu_2)$  and  $(\mu_3, \nu_3)$ , respectively. Here,  $\mu$  represents the shear modulus. In the problem, friction effects were neglected and the punches were accepted to transfer compressive stresses only.

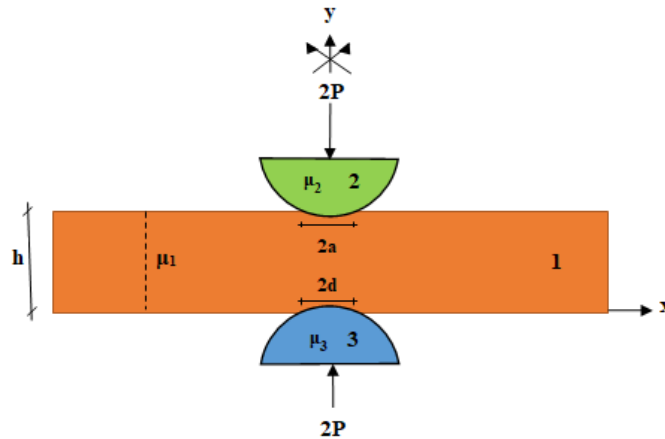


Figure 1. Geometry of the problem

The general equations belonging to stresses and displacements in case of neglect of body forces in the FG layer were obtained using the theory of Elasticity and Fourier integral transformation technique. Expressions for the linear elastic stress-displacement situation are as follows:

The boundary conditions for the problem are as follows.

$$\tau_{xy_1}(x, 0) = 0 \quad 0 \leq x < \infty \quad (1)$$

$$\tau_{xy_2}(x, 0) = 0 \quad 0 \leq x < \infty \quad (2)$$

$$\tau_{xy_1}(x, h) = 0 \quad 0 \leq x < \infty \quad (3)$$

$$\tau_{xy_3}(x, h) = 0 \quad 0 \leq x < \infty \quad (4)$$

$$\sigma_{y_1}(x, h) = -\omega_1(x) \quad 0 \leq x < a \quad (5)$$

$$\sigma_{y_1}(x, 0) = -\omega_2(x) \quad 0 \leq x < d \quad (6)$$

$$\sigma_{y_1}(x, 0) = \sigma_{y_2}(x, 0) \quad 0 \leq x < \infty \quad (7)$$

$$\sigma_{y_1}(x, h) = \sigma_{y_3}(x, h) \quad 0 \leq x < \infty \quad (8)$$

$$\frac{\partial [v_1(x, h) - v_3(x, h)]}{\partial x} = \zeta_1(x) \quad 0 \leq x < a \quad (9)$$

$$\frac{\partial [v_1(x, h) - v_2(x, h)]}{\partial x} = \zeta_2(x) \quad 0 \leq x < d \quad (10)$$

Since the geometry was symmetrical,  $a$  and  $d$  were taken as half contact lengths.  $\zeta_1(x)$  and  $\zeta_2(x)$  were unknown contact stresses. This function was taken as follows:

$$\zeta_1(x) = x(\Gamma_1^2 - x^2)^{-\frac{1}{2}} \quad (11)$$

$$\zeta_2(x) = -x(\Gamma_2^2 - x^2)^{-\frac{1}{2}} \quad (12)$$

$\Gamma_1$  ve  $\Gamma_2$  in these functions were the radii of the elastic circular punches.

## 2.2. Contact dataset

As the dataset in the study, 400 contact length data obtained from the theory of elasticity solution by (Özşahin et al. 2004) based on the theory of elasticity with various materials and loading conditions were used as input parameters. Parameters and value ranges in the dataset were given in Table 1. The values of  $\mu_2/\mu_1$  and  $\mu_3/\mu_1$  in this table represent the lower punch shear modulus-homogeneous layer shear modulus ratio and the upper punch shear modulus-homogeneous layer shear modulus ratio, respectively. These values were obtained in-between 0.52, 1.65, 2.8 and 5 in various variations.

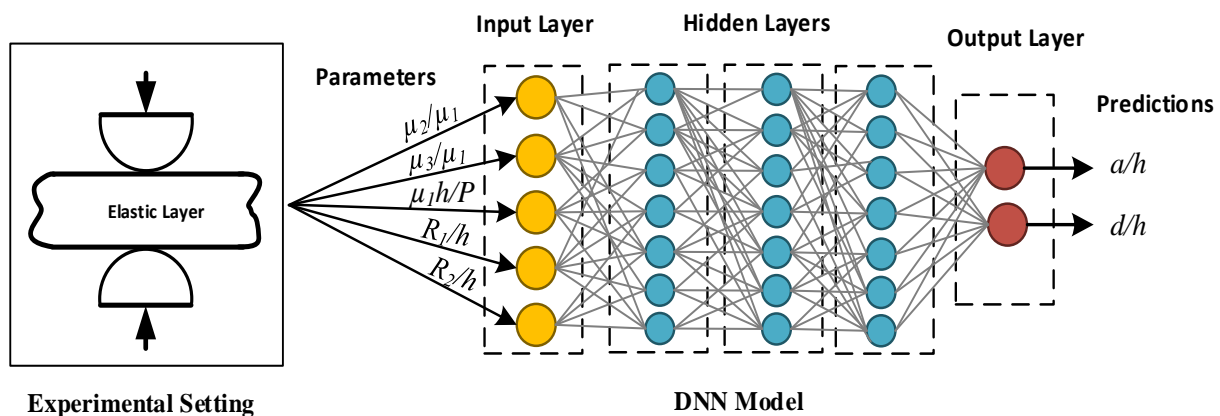
**Table 1.** Material properties and loading status used in the dataset

Parameters	Representation	Value interval
Ratio of shear modulus of lower elastic punch to elastic layer	$\mu_2/\mu_1$	0.52-5
Ratio of shear modulus of upper elastic punch to elastic layer	$\mu_3/\mu_1$	0.52-5
Ratio of radius of upper elastic layer height	$\Gamma_1/h$	10, 100, 1000
Ratio of radius of lower elastic layer height	$\Gamma_2/h$	10, 100, 1000
Load factor	$\mu_1 h/P$	100-1500

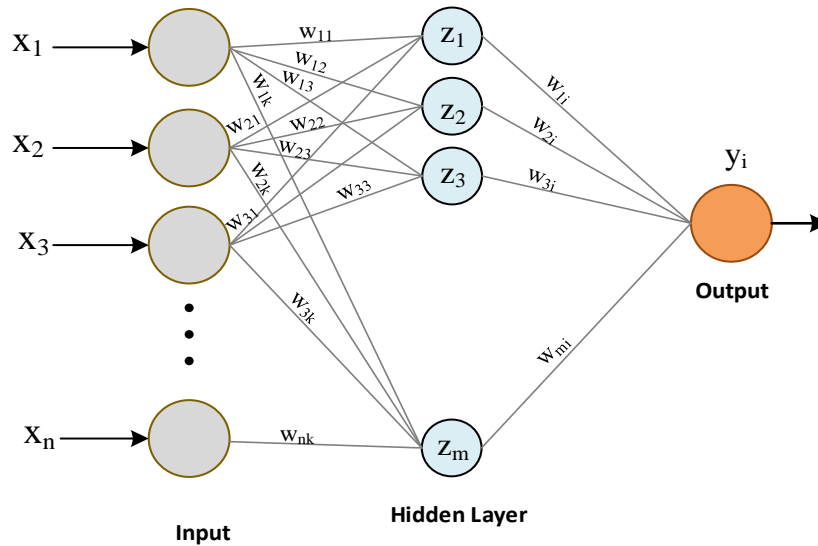
## 2.3. Deep Learning Neural Networks

Information about the materials and methods used in the study was given in this section. The contact length data obtained in the study and the characteristics of the data were mentioned. Detailed information about the DNN model used for predictions was presented. A general representation of the method used in the study was given in Figure 2.

The deep learning approach can simply be considered as multi-layered structures of classical NN architectures. Deep multi-layered structures have many nonlinear levels and they can represent a highly nonlinear and diverse range of functions compactly with these structures (Bengio et al. 2007). Hence, they can be more efficient learning structures in terms of representation. In 2006, the birth of deep learning techniques happened with a new training method introduced by Hinton et al. (Hinton et al. 2006). With the success on ImageNet (Krizhevsky et al. 2015) image data, deep learning became the most popular subject of machine learning. An illustration representing the functioning of a neuron in a classic NN structure was given in Figure 3 to show how DNN structures work.



**Figure 2.** A general representation of DNN method for this study



**Figure 3.** Structures of the classic neural network

The output value calculation for each hidden layer neuron with weights as  $w$  and  $x$  input was shown in Eq.(13).

$$z_j = f(\sum_{i=1}^N w_{ij}x_i + b_j) \tag{13}$$

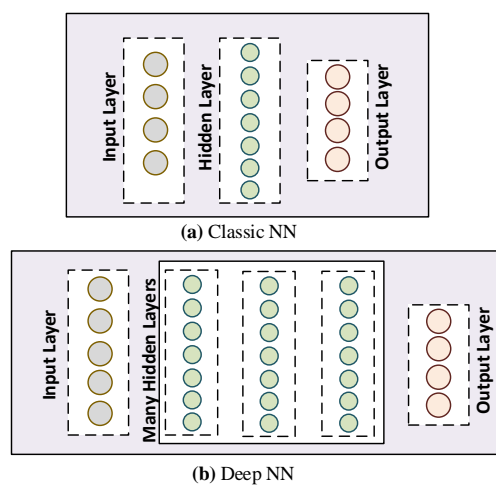
Each hidden layer output was similarly multiplied by its weight values and passed through an activation function to obtain the neuron output in Eq.(14).

$$y_i = \sigma(\sum_{j=1}^M w_{ji}z_j + b_i) \tag{14}$$

A conversion operation that would the input data to the output data was performed utilizing the  $\sigma$  activation function. It also played an active role in solving complex problems with its nonlinear characteristic. Calculation of the Rectified Linear Unit (ReLU) activation function commonly used in DNNs was given in Eq. (15).

$$f(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x < 0 \\ x, & \text{if } x \geq 0 \end{cases} \tag{15}$$

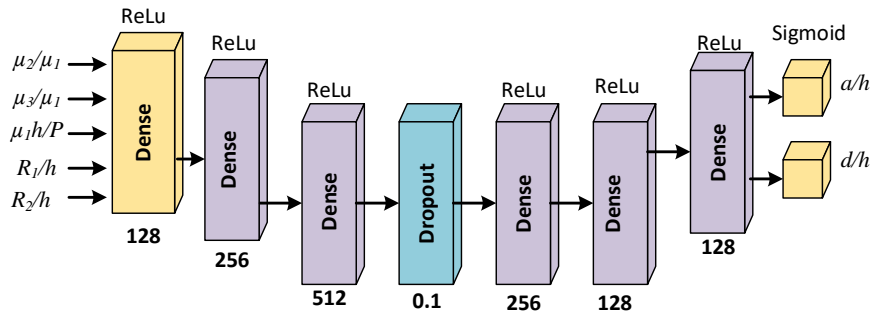
A block representation representing the difference between classic NN networks and DNN networks was given in Figure 4.



**Figure 4.** Structures of the classic NN (a) and deep NN (b)

### 2.3.1. The Proposed DNN Model

This study's purpose was to automatically estimate contact lengths ( $a/h$  and  $d/h$ ) at the output using the input parameters of the DNN networks. For this purpose, the design of the network that would provide the best result was done by determining the optimum DNN layer parameters. Reducing the use of hardware resources and obtaining the best results were taken into consideration while creating the DNN. Layer parameters and layer numbers were adjusted by trial and error approach while creating DNN layers. The block representation of the 8-layer DNN structure designed in the study was given in Figure 5.



**Figure 5.** Block diagram representation of the DNN model used

The input of the DNN network consists of the following parameters.

$\mu_2/\mu_1$ : Ratio of shear modulus of lower elastic punch to elastic Layer

$\mu_3/\mu_1$ : Ratio of shear modulus of lower elastic punch to elastic Layer

$\mu_1 h/P$ : Load factor

$\Gamma_1/h$ : Ratio of radius of upper elastic layer height

$\Gamma_2/h$ : Ratio of radius of lower elastic layer height

There were hidden layers with 128, 256 and 512 units and a layer with 0.1 dropout ratio in the DNN network. The activation function of hidden layers was chosen as the Rectified Linear Unit (ReLU), which is widely used in the deep learning field. The last layer of the DNN network was the output layer, and it contains two neurons. Sigmoid was chosen as the activation function. As a result of the training of the deep network, dimensionless contact lengths ( $a/h$  ve  $d/h$ ) were estimated at the output using the input parameters. Some hyperparameter adjustments used during the training of the model were shown in Table 2.

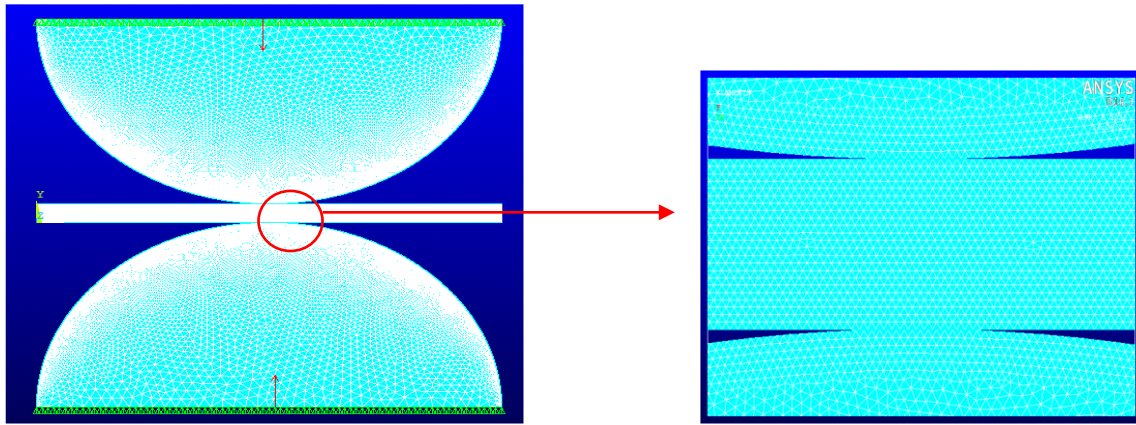
**Table 2.** Some hyperparameters and values of the proposed model

Hyper parameters	Value
Optimizer	Adam
Learning rate	0.001
Decay	0.001
Batch Size	32
Number of epochs	200
Loss function	Mean Squared Logarithmic Error (MSLE)

### 2.4. FEM process

The finite element method (FEM) is a widely used method in engineering, especially in the analysis and sizing phase. The main feature of this method is to find a solution to a complex problem by replacing it with a simpler method. It addresses the solution region that consists of many smaller and interconnected sub-regions called finite elements. In each piece or element, a suitable approximate solution is assumed and general equilibrium conditions are created. This method has been used successfully in the solution of various engineering problems such as heat conduction, fluid dynamics, leakage flow and electromagnetic fields, as well as being widely used structural mechanics field. Researchers have recently preferred fast and effective computer programs based on the FEM solution principle. One of them is the ANSYS Mechanical APDL Product Launcher program, which

is also used in this study. Because the study is a static and 2D plane problem, 8-node PLANE183 is used as the element type. This element does not have complete rotation freedom but has a degree of freedom in both the x and y directions. Geometry was divided into finite networks with free triangular mesh. CONTA172 and TARGE169 surface elements were chosen as contact pairs. ANSYS model of the problem was presented in Figure 6.

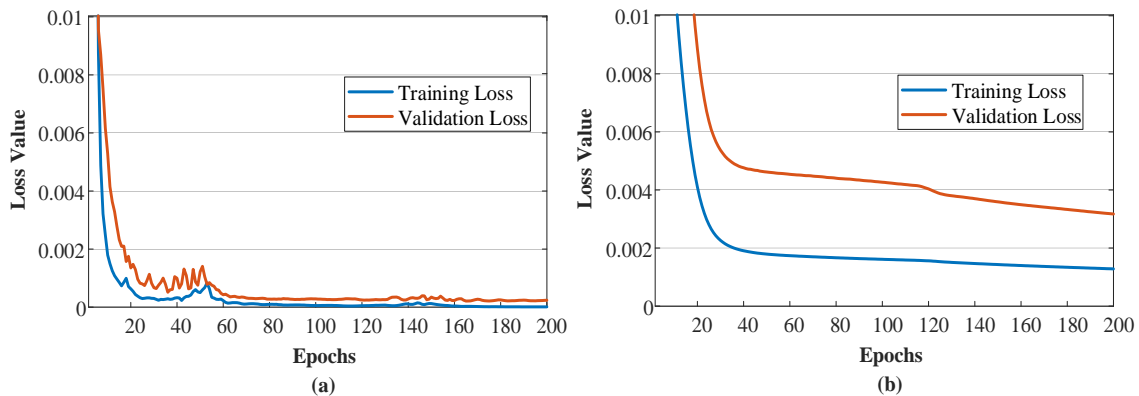


**Figure 6.** ANSYS model of the problem

### 3. Results and discussions

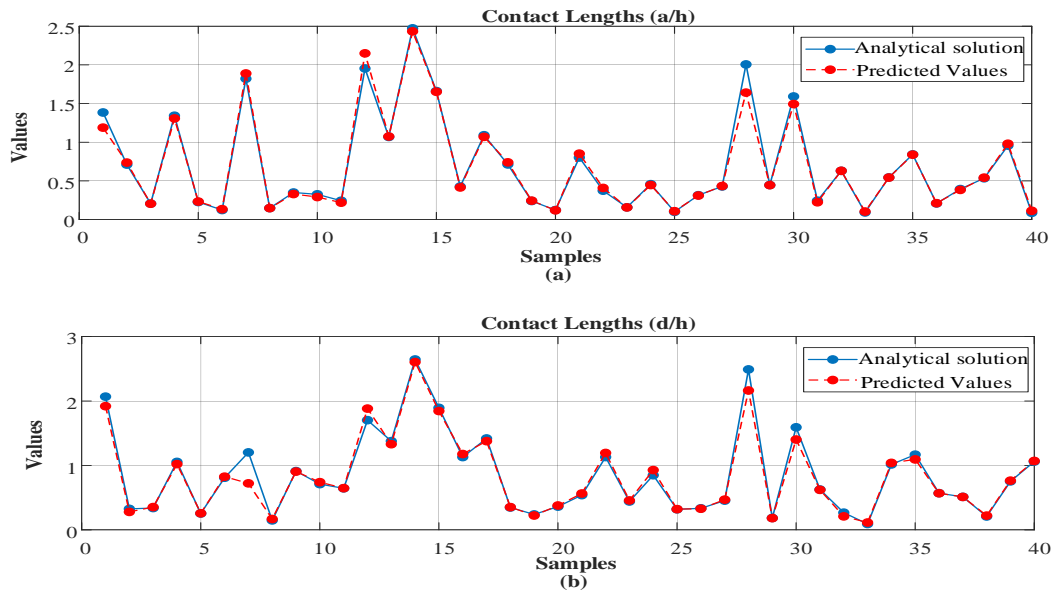
#### 3.1. DNN results

In the experimental studies of the model, 400 contact length data obtained with different parameters were used making use of the theory of elasticity. The data were divided as 80%, 20% and 10%, as training, validation and testing, respectively. The test data were those that the model does not see during the training phase, after which it produces estimates. All parameters were normalized to 0-1 range as pre-processing on the input data. The loss graphs in the training stage of DNN and NN models with a single hidden layer were given in Figure 7.



**Figure 7.** Loss plots of models over 500 epoch a) DNN model b) NN model with a single hidden layer

Figure 7(a) demonstrated that the DNN model has reached a loss value of 0.0003 in approximately 20 epochs. Meanwhile, this value could decrease to 0.003 levels if a traditional neural network with a hidden layer of 128 units was used instead of the deep model, which was shown in Figure 7(b). These results showed the effect of deepening the layers on training. Also, there was a significant difference between these values in the NN network while the training loss (blue lines) and validation loss (orange lines) in the DNN network were very close to each other. This was an important parameter that showed that the training phase of the network was validated on the validation datasets. The graphical representation of the contact length estimates made by the DNN model on the test data after its training was shown in Figure 8.



**Figure 8.** The comparison of the contact lengths estimates made by the DNN model for the test data. a) Output parameter (a / h), b) Output parameter (d / h)

These results showed that the model estimates matched the actual values rather well. 40 test input data and the numerical values of the estimates obtained by the DNN model for these data were given in Table 3. Besides, a comparison between the input parameters and the actual parameter values that were obtained was made. These comparisons were DNN and FEM solutions given in this study with analytical and NN results by (Özşahin et al. 2004).

**Table 3.** DNN Model Predicted Results

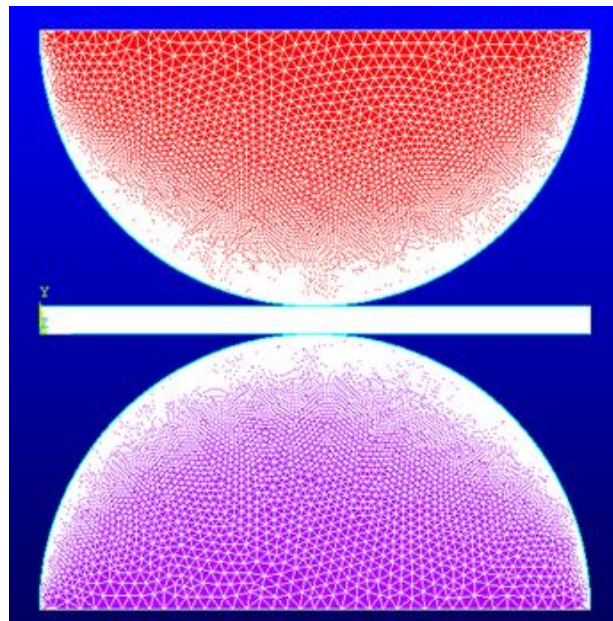
Input parameters					Analytical outputs		Predicted outputs	
$\mu_2/\mu_1$	$\mu_3/\mu_1$	$\Gamma_1/h$	$\Gamma_2/h$	$\mu_1h/P$	a/h	d/h	a/h	d/h
0.52	5	100	1000	100	1.3846	2.0675	1.1886	1.9200
5	5	1000	100	1000	0.7109	0.3266	0.7366	0.2796
0.52	5	10	10	250	0.2071	0.3397	0.2048	0.3545
12.8	5	1000	100	100	1.3425	1.0550	1.3078	1.0209
1.65	5	10	10	250	0.2267	0.2554	0.2329	0.2580
1.65	1.65	10	1000	1000	0.1238	0.8094	0.1353	0.8265
0.52	0.52	1000	100	250	1.8215	1.2027	1.8891	0.7224
5	5	10	10	500	0.1480	0.1480	0.1480	0.1696
0.52	0.52	10	100	250	0.3497	0.9127	0.3303	0.9047
5	5	100	1000	1000	0.3267	0.7109	0.2916	0.7410
1.65	2.8	10	100	250	0.2438	0.6451	0.2185	0.6479
0.52	1.65	1000	100	100	1.9540	1.7031	2.1491	1.8826
0.52	5	1000	1000	1000	1.0684	1.3774	1.0745	1.3303
0.52	2.8	1000	1000	250	2.4724	2.6442	2.4329	2.6036
0.52	2.8	1000	1000	500	1.6609	1.8937	1.6520	1.8447
0.52	1.65	100	1000	1000	0.4272	1.1302	0.4152	1.1773
2.8	2.8	100	1000	100	1.0907	1.4190	1.0697	1.3771
2.8	5	100	10	100	0.7129	0.3478	0.7395	0.3540
1.65	1.65	10	10	250	0.2399	0.2399	0.2446	0.2236
1.65	1.65	10	100	1000	0.123	0.3616	0.1197	0.3790
0.52	2.8	100	10	100	0.8025	0.5399	0.8523	0.5653
1.65	5	10	1000	100	0.3735	1.1307	0.4095	1.1940

**Table 3.** DNN Model Predicted Results (Continue)

2.8	2.8	10	100	500	0.1585	0.4414	0.1570	0.4575
5	5	100	1000	500	0.4576	0.8487	0.4464	0.9286
1.65	2.8	10	100	1500	0.1007	0.3204	0.1082	0.3224
2.8	5	100	100	1000	0.3151	0.3350	0.3110	0.3291
2.8	5	100	100	500	0.4287	0.4551	0.4341	0.4696
0.52	0.52	100	1000	100	2.0058	2.4900	1.6413	2.1627
1.65	5	100	10	500	0.4462	0.1851	0.4449	0.1825
0.52	0.52	100	100	100	1.5917	1.5917	1.4938	1.4020
1.65	1.65	10	100	250	0.244	0.6264	0.2239	0.6213
5	5	1000	100	1500	0.6298	0.2682	0.6305	0.2098
2.8	2.8	10	10	1500	0.092	0.0920	0.1040	0.1149
1.65	1.65	100	1000	500	0.5448	1.0160	0.5427	1.0402
0.52	5	1000	1000	1500	0.8424	1.1678	0.8392	1.0942
2.8	5	10	100	250	0.2093	0.5698	0.2118	0.5692
0.52	1.65	10	10	100	0.3946	0.5130	0.3836	0.5120
5	5	100	10	250	0.5341	0.2089	0.5426	0.2223
0.52	5	1000	100	500	0.956	0.7531	0.9808	0.7647
0.52	5	10	1000	1500	0.0871	1.0599	0.1135	1.0699

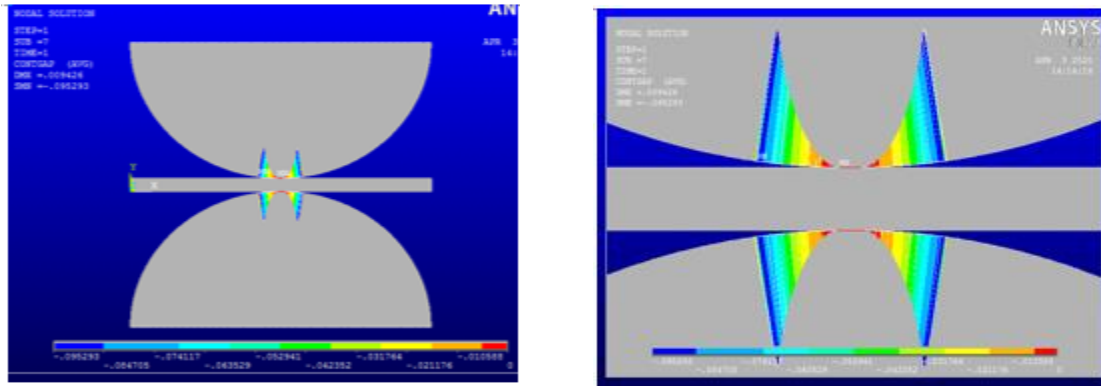
### 3.2. FEM results

The ANSYS model of a homogeneous elastic layer pressed with two rigid punches is given in Figure 9. The contact stress analysis of the materials according to the shear modules and loading conditions and the contact lengths between the punches and the sheet were examined. The contact distance after the analysis was visually presented in Figure 10. The effect of different shear modules on the contact stress with punches pressed under equal loads was investigated. The dimensionless  $d/h$  distance graph was presented in Figure 11 after the ANSYS analysis of the problem, about which the loading and material properties were given. It can be seen that the values found also matched the table values.

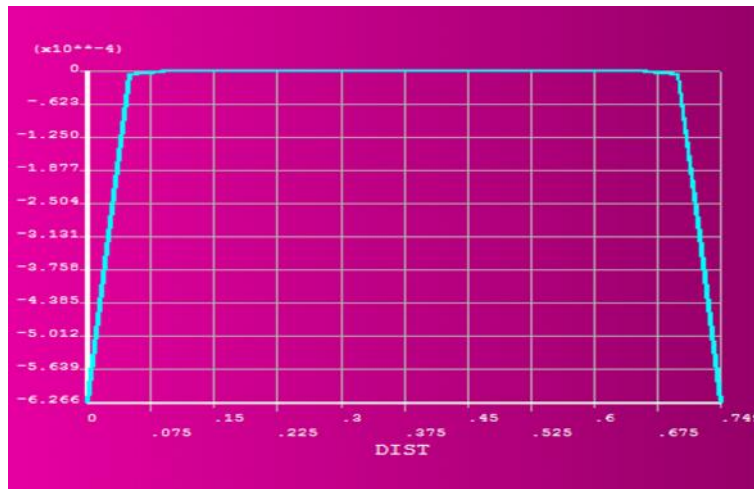


**Figure 9.** ANSYS model of homogeneous layer loaded by two elastic punch





**Figure 10.** Contact Gap Distance ( $\mu_2/\mu_1=1.65$ ,  $\mu_3/\mu_1=2.8$ ,  $\Gamma_1/h=10$ ,  $\Gamma_2/h=10$ ,  $\mu_1h/P=250$ ). a) Contact Gap Distance, b) Zoom Model



**Figure 11.** Contact length of second punch ( $d/h=0.61$ ) ( $\mu_2/\mu_1=1.65$ ,  $\mu_3/\mu_1=5$ ,  $\Gamma_1/h=100$ ,  $\Gamma_2/h=100$ ,  $\mu_1h/P=350$ )

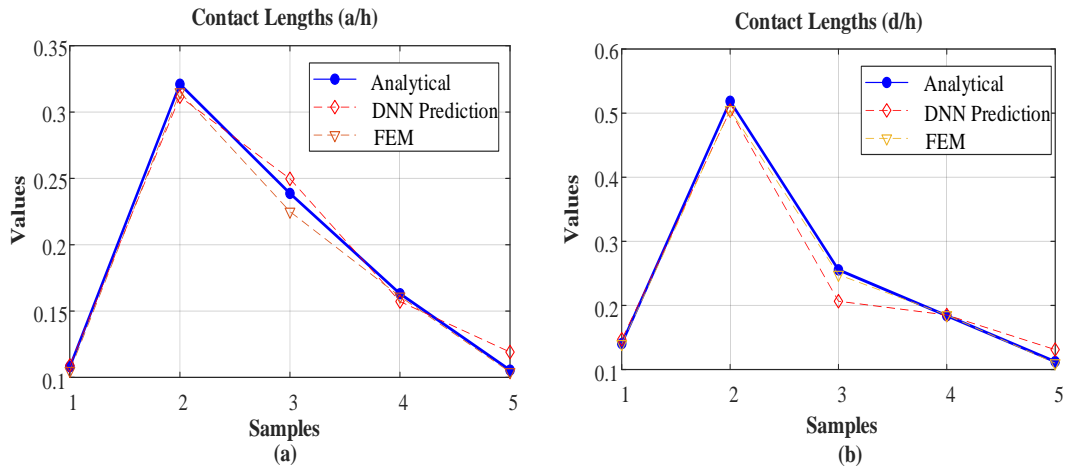
### 3.3. Comparison of the results

In this section, DNN and FEM results obtained in the study were presented comparatively with tables and figures. Contact lengths obtained according to different material properties for elastic punches with the same radii were given in Table 4. It was seen that the results of DNN and FEM were compatible with the results of the study conducted in the previous studies based on the theory of elasticity. Figure 12 graphically supported these results.

**Table 4.** Comparison of contact lengths according to different material parameters ( $\Gamma_1/h=10$ ,  $\Gamma_2/h=10$ )

<i>Material Properties</i>			<i>Analytical Solution</i>		<i>DNN</i>		<i>FEM</i>	
$\mu_2/\mu_1$	$\mu_3/\mu_1$	$\mu_1h/P$	$a/h$	$d/h$	$a/h$	$d/h$	$a/h$	$d/h$
0.52	1.65	1500	0.1081	0.1405	0.1091	0.1471	0.105	0.140
0.52	5	100	0.3210	0.5186	0.3116	0.5041	0.315	0.505
1.65	2.8	250	0.2387	0.2556	0.2497	0.2066	0.225	0.248
1.65	5	500	0.1631	0.1840	0.1572	0.1851	0.161	0.185
2.8	5	1000	0.1055	0.1124	0.1191	0.1311	0.104	0.110

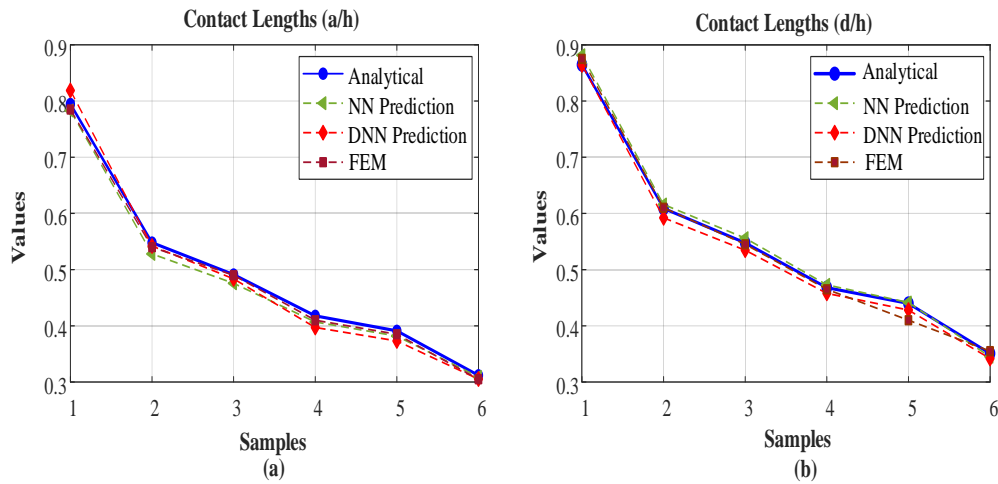
The comparative data of the results obtained with DNN and FEM, with the theory of elasticity and the solution with the classical NN method were shown in Table 5 and Figure 13. Contact lengths found in the analysis using the load factor values between 150-1250 were found to be compatible with acceptable error rates.



**Figure 12.** Comparative graph of contact lengths obtained with different solution methods

**Table 5.** Comparison of contact lengths obtained according to all solution methods ( $\mu_2/\mu_1=1.6$ ,  $\mu_3/\mu_1=5$ ,  $\Gamma_1/h=100$ ,  $\Gamma_2/h=100$ )

$\mu_1 h/P$	<i>a/h</i>				<i>d/h</i>			
	Özşahin et al. [19]		Proposed study		Özşahin et al. [19]		Proposed study	
	Analytical	NN	DNN	FEM	Analytical	NN	DNN	FEM
150	0.7947	0.7831	0.8188	0.785	0.8646	0.8815	0.8643	0.875
350	0.5481	0.5280	0.5421	0.540	0.6089	0.6159	0.5922	0.610
450	0.4912	0.4757	0.4836	0.490	0.5476	0.5560	0.5346	0.545
650	0.4178	0.4069	0.3971	0.410	0.4680	0.4729	0.4578	0.465
750	0.3911	0.3818	0.3731	0.385	0.4399	0.4415	0.4281	0.410
1250	0.3119	0.3091	0.3053	0.305	0.3509	0.3451	0.3418	0.355



**Figure 13.** Comparative graph of contact lengths obtained with all solution methods

#### 4. Conclusions

In this study, a new DNN model was proposed for estimation on the contact length problem. DNN model trained on the data obtained by analytical solutions was used to estimate the contact lengths with the input parameters. In the study, a comprehensive comparison between analytical solution, finite element solution, NN prediction and DNN was made for the contact problem. In the estimation study with NN networks, the results obtained with high epochs such as 50000 were obtained in only such a short time as 200 epochs with the DNN network. In addition, the estimation results of the DNN network had less error ratio than the classical NN compared to the solution made based on the theory of elasticity. The obtained results were supported by the solution made with the finite element method. The results obtained from this study showed that the analysis of

contact problems with deep learning can be done easily and quickly. In the future, contact problems with functional graded or piezoelectric layers instead of elastic layers can also be solved.

### Acknowledgments

I would like to say many thanks to Dr. Özal Yıldırım for contributing to my study.

### Author contribution

Research design, finite elements calculations, data analysis, article writing and final approval.

### Declaration of ethical code

The author of this article declares that the materials and methods used in this study do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

### Conflicts of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

### References

- Abhilash, M.N., & Murthy, H. (2014). Finite element analysis of 2-D elastic contacts involving FGMs, *International Journal of Computer Methods Engineering Science Mechanics*, 15(3), 253–7. <https://doi.org/10.1080/15502287.2014.882445>
- Alinia Y., Aisae, A. & Hosseini-Nasab, M. (2019). Stress analysis in rolling contact problem of a finite thickness FGM layer, *Meccanica*, 54, 183–203. <https://doi.org/10.1007/s11012-018-00925-w>
- ANSYS. (2016). *Swanson Analysis Systems Inc.*, Houston PA, USA.
- Bengio Y., Lamblin P., Popovici D. & Larochelle H. (2006). Greedy layer-wise training of deep networks, *In Advances in Neural Information Processing Systems*, 19, 153-160.
- Chidlow S.J., Chong W.W.F. & Teodorescu M. (2013). On the two-dimensional solution of both adhesive and non-adhesive contact problems involving functionally graded materials, *European Journal of Mechanics A/Solids*. 39, 86–103. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2012.10.008>
- Çakiroğlu E., Çömez I. & Erdöl R. (2011). İki elastik çeyrek düzleme oturan ve dairesel rijit bir punch ile bastırılan elastik tabaka probleminde temas mesafelerinin yapay sinir ağı ile hesabı, *VII. Ulusal Mekanik Kongresi* (pp. 192-201), Elazığ.
- Çelik Y., Talo, M., Yıldırım Ö., Karabatak M. & Acharya U.R. (2020). Automated invasive ductal carcinoma detection based using deep transfer learning with whole-slide images, *Pattern Recognition Letters*, 133, 232-239. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2020.03.011>
- El-Borgi S. & Çömez I. (2017). A receding frictional contact problem between a graded layer and a homogeneous substrate pressed by a rigid punch, *Mechanics of Materials*, 114, 201-214. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2017.08.003>
- Goodfellow I., Bengio Y. & Courville A. (2016). *Deep learning*, T. Dietterich, Ed. London, England: The MIT Press.
- Hinton G. E., Osindero S. & Teh Y. W. (2006). A fast learning algorithm for deep belief nets, *Neural Computation*. 18(7), 1527-1554.
- Johnson K.L. (1985). *Contact mechanics*, First Edition, Cambridge University Press, Cambridge.
- Kahya V., Özşahin T.Ş., Birinci A. & Erdöl R. (2007). A receding contact problem for an anisotropic elastic medium consisting of a layer and a half plane, *International Journal of Solids and Structures*. 44, 5695-5710.

- Khaleghian S., Ghasemalizadeh O. & Taheri S. (2016). Estimation of the tire contact patch length and normal load using intelligent tires and its application in small ground robot to estimate the tire-road friction, *Tire Science and Technology*, 44(4), 248-261. <https://doi.org/10.2346/tire.16.440402>
- Krizhevsky A., Sutskever I. & Hinton G.E. (2015). Imagenet classification with deep convolutional neural networks, *In Advances in Neural Information Processing Systems*, 25, 1097-1105.
- Lecun Y., Bengio Y. & Hinton G. (2015). Deep learning, *Nature*, 521(7553), 436-444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>
- Liu Z., Yan J. & Mi C. (2018). On the receding contact between a two-layer inhomogeneous laminate and a half-plane, *Structural Engineering and Mechanics*, 66(3), 329-341. <https://doi.org/10.12989/sem.2018.66.3.329>
- Murat F., Yildirim Ö., Talo M., Baloglu U.B., Demir Y. & Acharya U.R. (2020). Application of deep learning techniques for heartbeats detection using ECG signals-Analysis and Review, *Computers in Biology and Medicine*, 120, 103726. <https://doi.org/10.1016/j.compbimed.2020.103726>
- Özşahin T.Ş., Birinci A. & Çakıroğlu A.O. (2004). Prediction of contact lengths between an elastic layer and two elastic punches with neural networks, *Structural Engineering and Mechanics*, 18(4), 441-459.
- Polat A., Kaya Y. & Özşahin T.Ş. (2018). Analytical solution to continuous contact problem for a functionally graded layer loaded through two dissimilar rigid punches, *Meccanica*, 53(14), 3565-3577. <https://doi.org/10.1007/s11012-018-0902-7>
- Polat, A. Kaya, Y. Kouider B. & Özşahin T.Ş. (2019). Frictionless contact problem for a functionally graded layer loaded through two rigid punches using finite element method, *Journal of Mechanics*, 35(5), 591-600. <https://doi.org/10.1017/jmech.2018.55>
- Rapetto M.P., Almqvist A., Larsson R. & Lugta P.M. (2006). On the influence of surface roughness on real area of contact in normal, dry, friction free, rough contact by using a neural network, *Wear*, 266(5-6) 592-595.
- Rhimi M., El-Borgi S. & Lajnef N. (2011). A double receding contact axisymmetric problem between a functionally graded layer and a homogeneous substrate, *Mechanics of Materials*, 43, 787-798. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2011.08.013>
- Yaylacı M. (2017). Comparison between numerical and analytical solutions for the receding contact problem, *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 2, 333-346.
- Yan J. & Mi C. (2017). Double contact analysis of multilayered elastic structures involving functionally graded materials, *Archives of Mechanics*, 69(3), 199-221.
- Yıldırım Ö., Pławiak P., Tan R.S. & Acharya U.R. (2018). Arrhythmia detection using deep convolutional neural network with long duration ECG signals, *Computers in Biology and Medicine*, 102, 411-420. <https://doi.org/10.1016/j.compbimed.2018.09.009>

## Ultrasonik İşlemin Linyit Süspansiyonunun Yağ Aglomerasyonu Üzerine Etkisi

### *The Effect of Ultrasonic Treatment on Oil Agglomeration of Lignite Suspension*

Kiraz EŞMELİ\* 

Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 42000, Konya

• Geliş tarihi / Received: 03.01.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 24.03.2023

#### Öz

Ultrasonik işlemin kullanımı çoğunlukla ince kömürlerin flotasyon işlemi için araştırılmıştır, ancak yağlarla aglomerasyona uygulanması son derece sınırlıdır. Bu nedenle, bu çalışmanın amacı, gazyağı kullanılarak ultrasonik işleminin yağ aglomerasyon süreci üzerindeki etkisini araştırmaktır. Ultrasonik, ön işlem aşamasında ve aglomerasyon aşamasında olmak üzere iki farklı şekilde kullanılmış ve farklı sonuçlar bulunmuştur. Ön işlem aşamasında ultrasonik kullanımı linyit süspansiyonunun kül içeriğini azalttı ve yanabilir kömür verimini artırdı. Öte yandan, aglomerasyon aşamasında ultrasonik kullanımı kömürün yağ aglomerasyonunu olumsuz yönde etkilemiştir. Yağ aglomerasyon başarısını etkileyen diğer faktörler ultrasonik sistemin güç ve tedavi süresiydi ve düşük güç değeri ve kısa süreli ultrasonik işlem ile aglomerasyon başarısının arttığı sonucuna varıldı. Sonuç olarak, %26.02 kül içeriğine sahip kömür, optimum koşullar altında ultrasonik ön işleme %10.03 kül içeriği ve %79.06 yanabilir verim ile zenginleştirildi.

**Anahtar kelimeler:** Geometrik süreç, Hata ayıklama maliyeti, Moment fonksiyonları, Test etme maliyeti.

#### Abstract

The use of ultrasonic process has mostly been investigated for the flotation process in coal fines, but its application to agglomeration with oils is extremely limited. Therefore, the purpose of present study is to investigate the influence of ultrasound treatment on the oil agglomeration of lignite using kerosene. Ultrasonic process was used in two different ways, at the pretreatment stage and at the agglomeration stage, and different results were found. The use of ultrasonic at the pretreatment stage reduced the ash content of the lignite suspension and increased the combustible recovery. On the other hand, the use of ultrasonic at the agglomeration stage adversely affected the agglomeration of lignite. Other factors affecting the oil agglomeration were the power of ultrasonic and the duration of process, and it was concluded that the agglomeration success was increased by the low power value and the short-term ultrasonic process. As a result, coal with an ash content of 26.02% was cleaned with an ash content of 10.03% and a combustible recovery of 79.06% by ultrasonic pretreatment under optimal conditions.

**Keywords:** Lignite, Ultrasound treatment, Oil agglomeration

\* Kiraz Eşmeli; kesmeli@ktun.edu.tr

## 1. Giriş

### 1.1. Introduction

Ülkelerin ekonomik kalkınması büyük ölçüde enerji kaynaklarına bağlıdır. Kömür, modern sanayileşmenin temelini oluşturan ve enerji üretimi, çimento üretimi, çelik üretimi gibi çeşitli endüstriyel uygulamalar için hammadde görevi gören kaynaklardan biridir. Fakat gerek mekanize madencilik sistemleri gerekse boyut küçültme yöntemleri üretilen kömür içerisinde ince boyutlu kömürün (-100 mikron) miktarını artırmaktadır (Barma vd., 2018). Bu ince boyutlarında elde edilen kömür üretimi sonunda kömür kayıpları artmakta, susuzlandırma problemleri ile birlikte artık miktarı artmaktadır. Bu da artık bertaraf maliyetlerini yükseltmektedir. Bu nedenle kömür zenginleştirme işlemleri önem kazanmaktadır. İnce kömür zenginleştirilmesinde genellikle köpük flotasyonu, flokülasyon ve yağ aglomerasyonu gibi ayırma teknikleri kullanılmaktadır (Gurses vd., 1996). Yağ aglomerasyonunun avantajı, uygun seçiciliğe bağlı olarak, yüksek kül içeriğine sahip düşük dereceli kömür veya ayrılması zor ince kömür zenginleştirilmesinde bile etkili olmasıdır (Ozer vd., 2017).

Yağ aglomerasyon işlemi esas olarak yüzey özelliğine dayanmaktadır. Yağ aglomerasyonu karıştırma altındaki kömür-su bulamacına bağlayıcı yağın eklenmesi sonucunda kömür-yağ aglomereleri oluşması işlemidir (Capes, 1980; Capes & Jonasson, 1989). Literatürde bu tekniğin kömürün niteliği, kömür partikül büyüklüğü, yağ tipi, yağ dozajı, ajitasyon hızı, aglomerasyon süresi, pH ve ön arıtma işlemleri gibi birçok faktörden etkilendiği belirtilmiştir (Allen & Wheelock, 1993; Unal & Aktas 2001; Gence, 2006; Aslan & Unal 2011; Chary & Dastidar, 2010, 2012, 2013; Aslan, 2013; Sahinoglu & Uslu 2013, 2014). Ayrıca, mazot, gazyağı ve atık yağlar gibi çok çeşitli yağlar kullanılmış ve viskozitelerine bağlı olarak yanabilir kömür verimini iyileştirebilecekleri belirtilmiştir (Petela vd., 1995; Cebeci & Eroglu 1998; Unal & Aktas 2001; Alonso vd., 2002; Cebeci, 2003).

Ultrasonik ses dalgaları, nadir ve sıkıştırma döngüleri olarak ardışık bir şekilde yayılırken, nadir döngüde oluşan mikro kabarcıklar, sıkıştırma döngüsünde anlık bir çökmeye neden olarak lokalize bir enerji patlaması oluşturur. Buna kavitasyon denir ve ultrasonik işlemin en belirgin özelliğidir (Celik, 1989; Ozkan & Kuyumcu 2006, 2007). Kavitasyon işlemi, sıvının içindeki katı yüzeyler üzerinde önemli bir etki yaratmaktadır. Son yıllarda, ultrasonik prosesin kömür flotasyonu üzerine etkisini araştıran birçok çalışma mevcuttur (Ozkan ve Kuyumcu 2006, 2007; Altun vd., 2009; Ozkan, 2012; Xu vd., 2017; Mao vd., 2019a, 2019b, 2020). Bu çalışmalarda ultrasonik işlemin kavitasyon etkisi ile birçok nano kabarcıklar oluştuğu ve bu kabarcıkların yüzdürme başarısını artırdığı belirtilmiştir (Yasuda vd., 2019; Mao vd., 2019a, 2019b, 2020; Wang vd., 2020; Jin vd., 2021). Ayrıca bu çalışmalarda ultrasonik işlemin reaktiflerin sıvı içinde daha iyi dağılmasını sağlayarak aktivitesini arttırdığı ve böylece flotasyon verimliliğini iyileştirdiği belirtilmiştir. Bunlara ek olarak, akustik kavitasyonun partikül yüzeylerini temizlediği ve reaktiflerin etkisini kolaylaştırmak için şlam kaplamaları en aza indirdiği ve böylece reaktif tüketimini azalttığı da kaydedilmiştir. Öte yandan ultrasonik işlemin minerallerin sedimantasyonu üzerindeki etkisini araştıran çok az çalışma vardır ve bu çalışmalarda ultrasonik işlemin faydalı etkisine dikkat çekilmiştir (Onal vd., 2003; Burat vd., 2014). Mekanizması aglomerasyona benzer olan ultrasonik titreşiminin flotasyon üzerindeki olumlu etkisini gösteren birçok çalışma olmasına rağmen, kömürün yağ aglomerasyonu üzerine sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu nedenle, bu çalışma ultrasonik muamelenin kömürün aglomerasyonu üzerindeki etkisini araştırmayı amaçlamıştır.

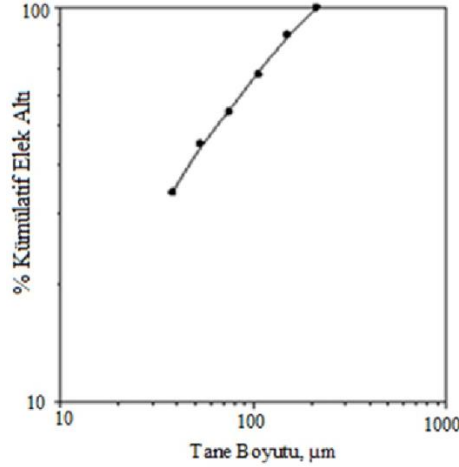
## 2. Materyal ve metot

### 2.1. Material and method

Deneysel Konya'nın Ilgın ilçesinden temin edilen linyit örneği kullanılmıştır. Linyit numunesinin özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Partikül boyut analizi bir lazer kırınım ölçer (Malvern Mastersizer 2000, UK) kullanılarak yapıldı. Linyit numunesi çubuk değirmen kullanılarak kuru öğütülmüş ve öğütülmüş numunenin partikül boyut dağılımı Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekil 1'de görüldüğü gibi, tamamı 38 mikron boyutu altına öğütülen numunenin % 80'i 140 µm'de geçmektedir. Köprüleme sıvısı olarak kullanılan gazyağı, yerel petrol bürosundan tedarik edildi ve gazyağının yoğunluğu 0,8 g/cm<sup>3</sup> olarak bulundu. Bu çalışmada Bandelin (Sonopuls HD 3200) marka ultrasonik cihaz kullanılmış ve cihaz 20Khz frekansa sahiptir (Şekil 2).

**Table.1.** Linyit örneğinin kuru bazda özellikleri*Table 1. Characteristics of the lignite sample on a dry basis.*

Kül (%)	Nem (%)	Sabit Karbon (%)	Kalori Değeri (kcal/kg)
26.02	24.5	16.9	3367.7

**Şekil 1.** Öğütülmüş numunenin tane boyut dağılımı*Figure 1. Particle size distribution of the ground sample*

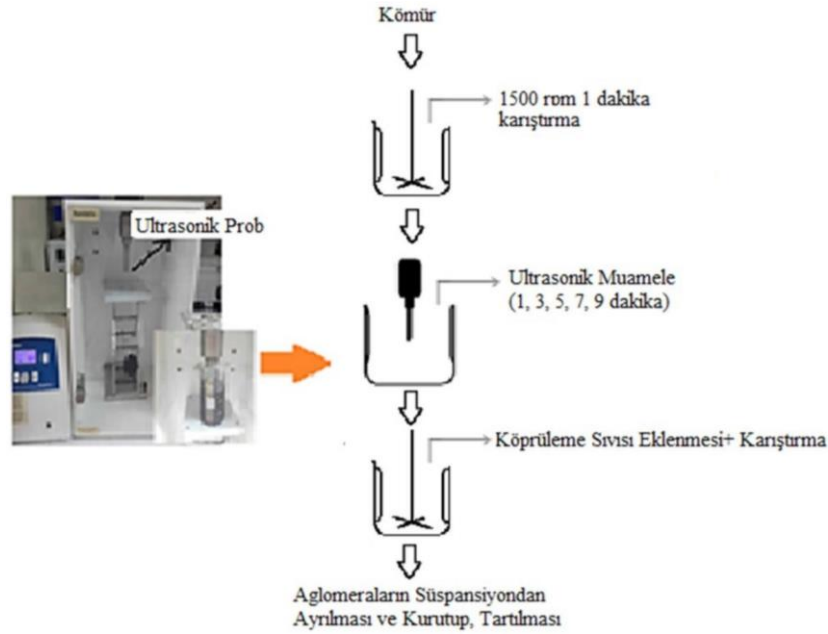
## 2.1. Aglomerasyon deneyleri ve ultrasonik aglomerasyon işlemi

### 2.1. Agglomeration experiments and ultrasound process

Yağ aglomerasyon deneyleri, 5 g kömür numunesi ve 300 cm<sup>3</sup> su karıştırılarak cam silindirik bir beherde gerçekleştirildi. Çarpışma olasılığının artırılması için beherin iç yüzeylerine birbirine eşit mesafede olacak şekilde 4 adet cam bariyer yapıştırılmıştır. Hazırlanan süspansiyon homojen dağılması için önce manyetik karıştırıcı ile 1500 rpm karıştırma hızında karıştırıldı. Daha sonra gazyağı eklenmeden önce süspansiyon belirlenen sürelerde ultrasonik işlem ile karıştırıldı. Ultrasonik işlemden sonra süspansiyona belirlenen dozajda gazyağı ilave edildi ve süspansiyon istenen aglomerasyon periyodu için manyetik karıştırıcı ile 750 rpm karıştırma hızında yeniden karıştırıldı. Son olarak sistem durduruldu ve elekten alınan aglomereler vakumla filtrelendi ve ardından aseton (1 g kömür için 25 ml aseton) ile yıkanarak yağdan arındırıldı. Deneysel akım şeması Şekil 2 'de sunulmuştur. Aglomereler kurutulduktan ve tartıldıktan sonra yanabilir kömür verimi Denklem (1) kullanılarak hesaplandı.

$$\text{Yanabilir kömür verimi (YKV, \%)} = 100 \times \frac{A(100 - A_{\text{kül}})}{B(100 - B_{\text{kül}})} \quad (1)$$

Burada, A= Temiz kömür yüzdesi,  $A_{\text{kül}}$  = temiz kömür kül içeriği, B= besleme yüzdesi, ve  $B_{\text{kül}}$  = besleme kül içeriği



**Şekil 2.** Ultrasonik titreşim cihazı ve deneysel prosedürün şematik gösterimi

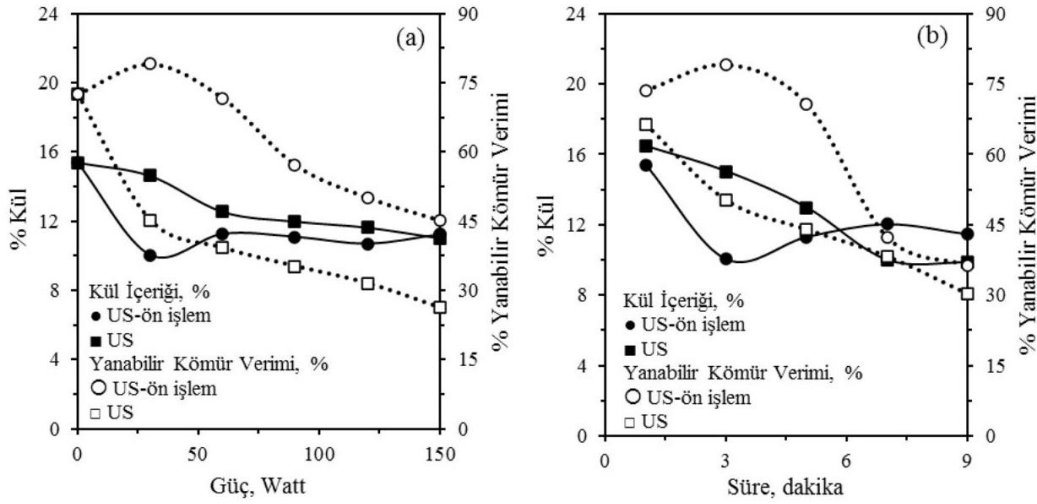
**Figure 2.** Ultrasonic vibration device and schematic representation of the experimental procedure

### 3. Bulgular ve tartışma

#### 3. Results and discussion

Ultrasonik ön işleme veya aglomerasyon aşamasında ultrasonik işleme tabi tutulan kömür süspansiyonunun ultrasonik sistem gücü ve tedavi süresinin bir fonksiyonu olarak kül ve yanabilir kömür verimi üzerindeki etkisi Şekil 3'te verilmiştir. Ultrasonik güç değerlerinin linyit süspansiyonunun yağ aglomerasyonu üzerindeki etkisi Şekil 3 (a)'da gösterilmiştir. Ultrasonik ön işlem kullanan deneylerde kül içeriği değerleri belirli bir ultrasonik sistem gücüne (30 W) kadar azalmış ve daha sonra güç değerlerine bağlı olarak artmaya başlamıştır. Kömür yanma verimi ultrasonik sistemin 30 watt güç değerine kadar yükselmiş ve daha sonra güç değerlerinin artmasıyla azalmıştır. Öte yandan, aglomerasyon aşamasında ultrasonik titreşim kullanımı, ultrasonik güç değerlerine bağlı olarak aglomerat olarak elde edilen linyitin kül içeriğini azaltırken, kömür yanma veriminde azalmaya yol açmıştır. Şahinoğlu ve Uslu (2013b), yağ aglomerasyon işleminde ultrasonik emülsifikasyonun etkisini araştırdılar ve benzer sonuçlar kaydetmişlerdir. Bu çalışmada, ultrasonik sistemin güç seviyelerinin yanabilir kömür verimi üzerindeki olumsuz etkisini kavitasyon sonucu oluşan küçük boyutlu yağ damlacıklarının aglomeratların sınırlı büyümesine yol açmasına bağlamışlardır. Ultrasonik muamele süresinin linyit süspansiyonunun yağ aglomerasyonu üzerindeki etkisi Şekil 3 (b)'de gösterilmiştir. Belirli bir uygulama süresi boyunca (3 dakika) ultrasonik uygulanması, aglomerat olarak elde edilen linyitin kül içeriğini azalttı ve yanabilir kömür verimini arttırdı. Bununla birlikte, muamele süresinin daha da uzaması sadece kül içeriğini arttırmakla kalmadı, aynı zamanda yanabilir kömür veriminde de bir azalmaya yol açtı. Şahinoğlu ve Uslu (2013a), ultrasonik işlem süresinin 28.5 Watt güç değerine kadar kül uzaklaştırma oranı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını, ancak yüksek güç değerlerinde kül uzaklaştırma oranını olumsuz etkilediğini belirtti. Flotasyon üzerine yapılan çalışmalarda ultrasonik güç değerinin ve uygulama süresinin süreçlerin başarısını önemli ölçüde etkilediği kaydedilmiştir (Altun vd., 2009; Gungoren vd., 2019; Chen vd., 2020; Hassanzadeh vd., 2020). Öte yandan, aglomerasyon aşamasında ultrasonik kullanımı, ultrasonik uygulama süresine bağlı olarak linyit süspansiyonunun kül içeriğini azaltırken, yanabilir kömür veriminde de azalmaya yol açmıştır.





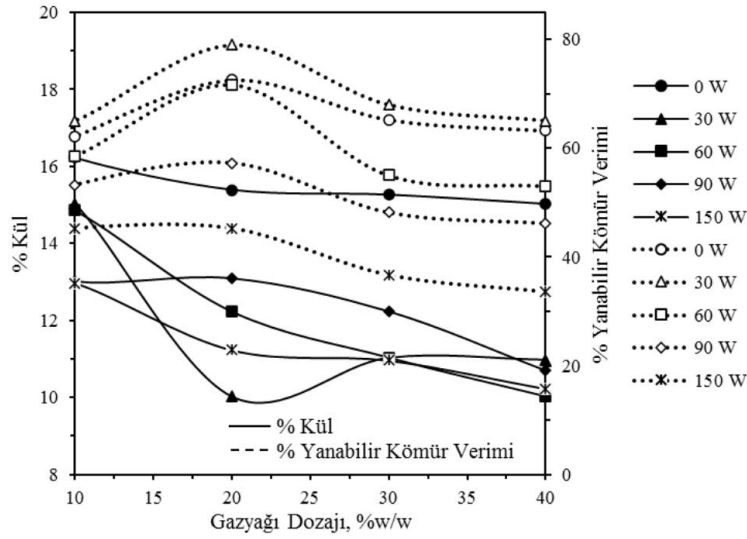
**Şekil 3.** Ultrasonik sistem farklı güç değerlerinin ve işlem sürelerinin linyit süspansiyonunun yağ aglomerasyonu üzerine etkisi.

**Figure 3.** The effect of different power values and processing times of ultrasonic system on the oil agglomeration of lignite suspension

Yağ dozajına bağlı olarak farklı ultrasonik güç değerleri için kömür süspansiyonunun yağ aglomerasyonu Şekil 4'te gösterilmiştir. 30 Watt'lık bir ultrason güç değerinde, % 20'lik bir gazyağı dozajına kadar, kül içeriği değerleri azaldı ve yanabilir kömür verimi arttı, ancak yağ dozajının daha fazla artması yanabilir kömür verimi ve kül içeriği değerlerini olumsuz yönde etkilemiştir. Fakat, ultrasonik işleminin diğer güç değerlerinde, gazyağı dozajına bağlı olarak kül içeriği değerleri azalmıştır. Şahinoğlu ve Uslu (2013a) 9.5-72.8 Watt / cm<sup>2</sup> ultrasonik güç değerlerinde ultrason güç değerindeki artışa bağlı olarak kömürden kül uzaklaştırma oranlarını arttırdığını belirtmişlerdir. Ayrıca bu çalışmada ultrasonik işlem uygulanan numunenin morfolojik analizini inceleyerek kaviteasyon sonucu kömür yüzeyinin lokal bölgelerinde çatlak ve kırıklar olduğunu, ultrasonik işlemden sonra kömür yüzeyinden bazı kil ve diğer ilgili mineral maddelerin uzaklaştırıldığını kaydetmişlerdir. Bu nedenle, ultrasonik işlemi ile kül içeriğindeki azalma, diğer bazı gang minerallerinin oksitlenmiş tabaka ile birlikte kömür yüzeyinden uzaklaştırılmasına bağlanabilir. Kömür flotasyonu ile yapılan birçok çalışmada, flotasyon verimliliğindeki artış, ultrasonik işleminin kaviteasyon etkisine bağlı olarak kömür yüzeyindeki oksitlenmiş tabakayı azaltması ve daha temiz kömür yüzeyleri ve boşlukları üretmesi ile ilişkilendirilmiştir (Ozkan & Kuyumcu, 2006; Kang vd., 2008, 2009; Ozkan, 2017). Ultrasonik kullanımının olumlu etkisinin bir başka nedeni, ultrasonik kaviteasyonun bir sonucu olarak su ve yağ arasındaki arayüzey geriliminin azalması ve daha büyük yağ damlacıklarının küçük kararlı damlacıklara bölünmesi, böylece aglomerasyon sürecini iyileştirmesi olabilir (De Castro & Priego-Capote, 2007; Gaikwad & Pandit, 2007; Kentish vd., 2008; Sahinoglu & Uslu, 2013b). Öte yandan, ultrasonik işlemin tüm güç değerleri için yanabilir kömür verim değerleri belirli bir yağ dozajına kadar yükselmiş ve daha sonra yağ dozajına bağlı olarak azalmaya başlamıştır. Benzer sonuçlar Şahinoğlu ve Uslu (2013a) tarafından da bulundu ve ultrasonik ön işlemin yağ aglomerasyonunda yanabilir kömür verimini azalttığını belirttiler. Bu durum ultrasonik işlemin kömür parçacıklarının ultrasonik işlemle parçalanması sonucu kömürün tane boyutunu azaltmasına bağlanabilir. Bu bulgu ile tutarlı olarak, ultrasonik işlemin kömür yapısı hakkında benzer etkileri farklı yazarlar tarafından rapor edilmiştir (Kang vd., 2007; Yazıcı vd., 2007; Ambedkar vd., 2011a; b; Royaei vd., 2012; Ozkan, 2017). Birçok çalışmada da kömür tane boyutunun değişiminin aglomerasyonu etkilediği belirtilmiştir (Unal & Ersan, 2005; Sahinoglu & Uslu, 2008; Zhang vd., 2012).

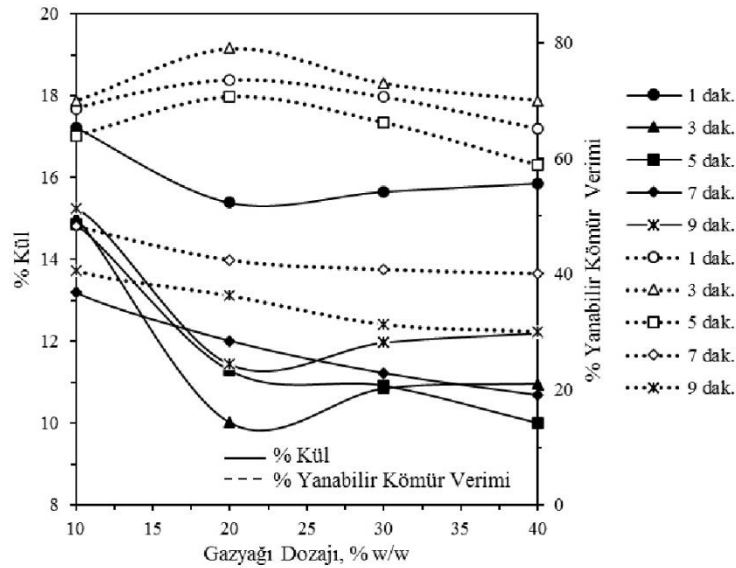
Ultrasonik işlem sürelerinin, gazyağı dozajına bağlı olarak linyit süspansiyonunun kül içeriği ve yanabilir kömür verimi üzerindeki etkisi Şekil 5'te sunulmuştur. Kömürün kül içeriği 5 ve 7 dakika periyotlarda ultrasonik ön işlemin uygulanması ile gazyağı dozajına bağlı olarak azalmıştır. Bununla birlikte, ultrasonik işlem muamelesinin diğer uygulanma sürelerinde, kül içeriği % 20'lik bir yağ dozajına kadar azaldı ve daha sonra artmaya başladı. Belirli bir süre ultrasonik işlem uygulanmasıyla kül içeriğinin azalması, ancak daha uzun işlem sürelerinin uygulanmasıyla artması, ultrasonun kömür yüzeyi üzerindeki güçlü kaviteasyon etkisinden kaynaklanıyor olabilir. Xu vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada, oksitlenmiş kömür yüzeyinin ultrasona maruz kalma süresine bağlı olarak daha pürüzsüz hale geldiği ve işlem süresinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığını kaydetmişlerdir. Öte yandan, yanabilir kömür verimi, 1 ve 5 dakika aralığında % 20

yağ dozajına kadar artmış ve daha sonra yağ dozajının artmasıyla azalmaya başlamıştır. Fakat daha yüksek işlem süreleri yanabilir kömür verimini olumsuz yönde etkilemiştir. Sonuç olarak, kül içeriği ve yanabilir kömür verimi için optimal değerler 3 dakika ultrasonik ön işlem uygulanmasıyla elde edildi.



**Şekil 4.** Gazyağı dozajına bağlı olarak ultrasonun farklı güç değerlerinin linyitin kül içeriğine ve yanabilir kömür verimine etkisi (İşlem süresi: 3 dk)

**Figure 4.** The influence of different power values of ultrasound as a function of the kerosene dosage on the ash content and combustible matter recovery of lignite (Processing time: 3 min)

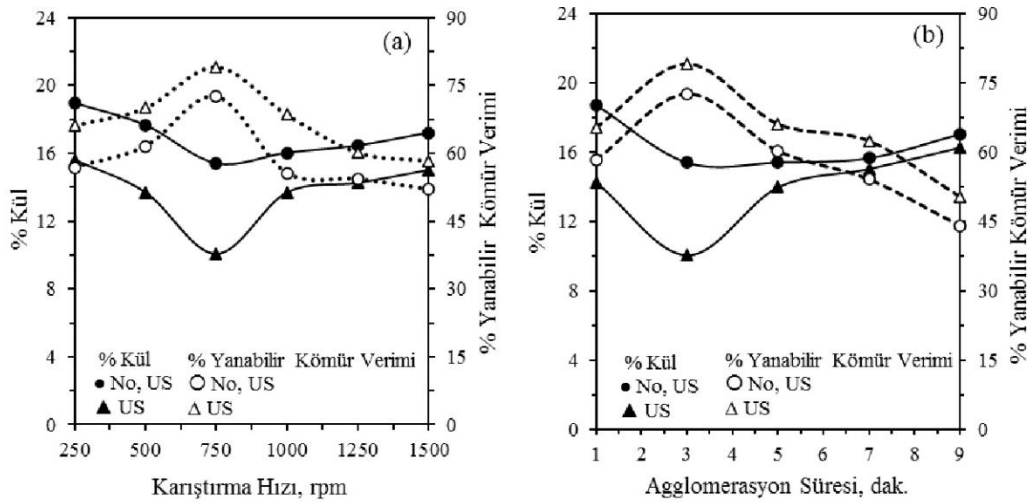


**Şekil 5.** Yağ dozajına bağlı olarak farklı ultrasonik muamele sürelerinin linyit süspansiyonunun kül içeriği ve yanabilir kömür verimi üzerindeki etkisi (Ultrasonik sistem güç değeri: 30 watt).

**Figure 5.** The influence of different treatment time of ultrasound as a function of the kerosene dosage on the ash content and combustible matter recovery of lignite (Ultrasonic power: 30 watt)

Karıştırma hızının kömürün yağ aglomerasyonu üzerindeki etkisi Şekil 6 (a)' da gösterilmiştir. Ultrasonik işlem kullanılmadan yapılan deneylerde, karıştırma hızı 250 rpm'den 750 rpm'ye yükseldiğinde kül içeriği değerleri azalmış ve daha yüksek karıştırma hızlarında artmaya başlamıştır. Literatürden, yüksek karıştırma hızlarının aglomereleri kırarak daha küçük parçalara ayrılmasına neden olduğu bilinmektedir (Cebeci & Sonmez, 2006; Gence 2006; Sahinoglu & Uslu, 2008; Duzyol vd., 2014; Duzyol 2015). Yanabilir kömür

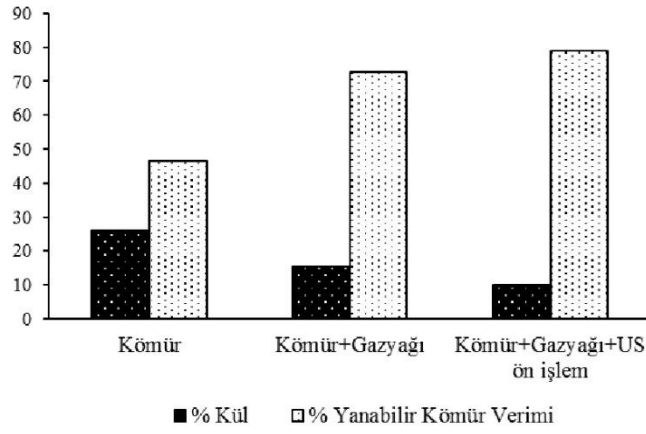
verim değerleri 750 rpm karıştırma hızı değerine kadar yükselmiş ve daha sonra karıştırma hızı değerlerinin artmasıyla azalmıştır. Yanabilir kömür veriminin 750 rpm'lik bir karıştırma hızında artması, hidrofobik kömür parçacıkları ile yağ damlacıkları arasındaki temasın arttığını göstermektedir. Bununla birlikte, 750-1500 rpm karıştırma hızı aralığındaki yanabilir kömür verimliliğindeki azalma, kömür–yağ aglomereleri birbiriyle çarpıştığında ortaya çıkan ve aglomerelerin parçalanmasına neden olabilen daha yüksek dispersif kuvvetlere bağlanabilir. Literatürde karıştırma hızının kömür yağ aglomerasyonu üzerindeki etkisini araştıran birçok çalışmada da benzer sonuçlar kaydedilmiştir (Sahinoglu & Uslu, 2008; Cebeci & Sonmez, 2002, 2006). Öte yandan, ultrasonik ön işleme tabi tutulan deneylerde kül içeriği ve verim eğrileri karıştırma hızına bağlı olarak benzer şekilde değişmekle birlikte ultrasonik kullanılmadan gerçekleştirilen deneylere kıyasla daha başarılı bir aglomerasyon işlemi elde edilmiştir. Şekil 6 (b), farklı aglomerasyon süreleri için kömürün kül içeriğini ve yanabilir kömür verim değerlerini göstermektedir. Ultrasonik ön işleme kullanılmadan yapılan deneylerde, kömür süspansiyonunun kül içeriği 1-3 dakika aglomerasyon süresi aralığında azalmış, ancak aglomerasyon sürelerinin uzamasıyla artmaya başlamıştır. Yanabilir kömür verim değerleri 3 dakika aglomerasyon süresine kadar artmış ve daha sonra aglomerasyon süreleri arttıkça azalmıştır. Aglomerasyon periyodu uzun tutulduğunda yanabilir kömür verimindeki azalma, hücre duvarı ile aglomere çarpışmalarının, birbirleriyle daha uzun temas dönemlerinde aglomere kopmalarını arttırmasından kaynaklanmış olabilir. Cebeci ve Sonmez, (2002) ve Chary ve Dastidar (2010), aglomerasyon süresinin kömür süspansiyonunun yağ aglomerasyonu üzerindeki etkisini araştıran çalışmalarında da benzer bulgular kaydetmişlerdir. Ultrasonik ön işlem olarak kullanıldığı deneylerde, kül içeriği ve yanabilir kömür verim değerleri, aglomerasyon süresine bağlı olarak benzerlik göstermiştir, ancak daha yüksek yanabilir kömür verim değerleri ve daha düşük kül değerleri elde edilmiştir.



**Şekil 6.** Karıştırma hızı ve aglomerasyon süresinin kömür süspansiyonunun yağ aglomerasyonu üzerindeki etkisi (Gazyağı dozağı: % 20; Ultrasonik sistem güç değeri: 30 Watt)

**Figure 6.** The effect of stirring speed and agglomeration time on oil agglomeration of coal suspension (Kerosene dosage: 20 %; Ultrasonic power: 30 watt)

Şekil 7, ultrasonik ön işleminin kömür yağ aglomerasyonu üzerindeki etkisini özetlemektedir. Ultrasonik ön işleme kömür süspansiyonunun yağ aglomerasyonunu arttırmıştır. Şekil 7'de gösterildiği gibi, %15.39 olan kül içeriği değeri, ultrasonik ön işleme ile %10.03 değerine düşmüştür. Ayrıca, ultrasonik ön işleminin uygulanması yanabilir kömür verim değerlerini arttırmıştır. Sonuç olarak, ultrasonik ön işleme ile linyit süspansiyonunun daha başarılı bir aglomerasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 7.** Ultrasonik ön işleminin kömür süspansiyonunun yağ aglomerasyonu üzerindeki etkisi (Gazyağı dozajı: %20, Ultrasonik sistem güç değeri: 30 watt, Karıştırma hızı: 750 rpm, Aglomerasyon süresi: 3 dakika)

**Figure 7.** The effect of ultrasonic pretreatment on the oil agglomeration of coal suspension (Kerosene dosage: 20%, Ultrasound power value: 30 watt, Stirring speed: 750 rpm, Agglomeration time: 3 min)

#### 4. Sonuçlar

##### 4. Conclusion

Kömürün yağ aglomerasyon sürecini belirleyen en önemli faktörün ultrasonik sistemin kullanıldığı aşama (ön işlem veya aglomerasyon aşaması) olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca ultrasonik güç değerleri ve işlem süreleri aglomerasyonun başarısını etkileyen diğer önemli faktörler olarak bulunmuştur. Düşük güç değeri aglomerasyon başarısını artırırken, güç değerlerinin daha yüksek seviyelere çıkması süreci olumsuz etkilemiştir. Öte yandan ultrasonik işlem süresinin uzaması da aglomerasyon başarısını olumsuz yönde etkilemektedir. Sonuç olarak, % 26.02 kül içerikli kömür, ultrasonik ön işlem ile %10.03 kül içeriği ve % 79.06 yanabilir kömür verim ile zenginleştirilmiştir.

#### Yazar katkısı

##### Author contribution

Birinci yazar makaleyi tasarladı, literatür taraması yaptı, deneysel çalışmalar ve analizler yaptı, sonuçları tartıştı ve makaleyi yazdı.

#### Etik beyanı

##### Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

#### Çıkar çatışması beyanı

##### Conflicts of interest

Yazar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

#### Kaynaklar

##### References

- Alonso, M. I., Valdés, A. F., Martínez-Tarazona, R. M., & Garcia, A. B. (2002). Coal recovery from fines cleaning wastes by agglomeration with colza oil: a contribution to the environment and energy preservation. *Fuel Processing Technology*, 75, 85–95. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(01\)00233-8](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(01)00233-8)
- Allen, R. W., & Wheelock, T. D. (1993). Effects of pH and ionic strength on kinetics of oil agglomeration of oil agglomeration of fine coal. *Mineral Engineering*, 6(1), 87–97.

- Altun, N. E., Hwang, J. Y., & Hicyilmaz, C. (2009). Enhancement of flotation performance of oil shale cleaning by ultrasonic treatment. *International Journal Mineral Processing*, 91(1-2), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2008.10.003>.
- Ambedkar, B., Chintala, T. N., Nagarajan, R., & Jayanti, S. (2011a). Feasibility of using ultrasound assisted process for sulfur and ash removal from coal. *Chemical Engineering and Processing*, 50(3), 236–246. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2011.02.008>
- Ambedkar, B., Nagarajan, R., & Jayanti, S. (2011b). Investigation of high-frequency, high-intensity ultrasonics for size reduction and washing of coal in aqueous medium. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 50(23), 13210–13219. <https://doi.org/10.1021/ie200222w>.
- Aslan, N. (2013). Use of grey analysis to determine optimal oil agglomeration with multiple performance characteristics, *Fuel*, 109,373–8. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.02.069>
- Aslan, N., & Unal, I. (2011). Multi-response optimization of oil agglomeration with multiple performance characteristics. *Fuel Processing Technology*, 92(6), 1157–63. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.05.029>
- Barma, S. D., Baskey, P. K., & Biswal, S.K. (2018). Chemical beneficiation of high-ash Indian noncoking coal by alkali leaching under low-frequency ultrasonication, *Energy Fuels*, 32(2), 1309–1319. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b03291>
- Burat, F., Sirkeci, A. A., & Onal, G. (2014). Improved fine coal dewatering by ultrasonic pretreatment and dewatering aids, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 36(2), 129-135. <https://doi.org/10.1080/08827508.2014.898637>
- Capes, C.(1980). Principles and applications of size enlargement in liquid systems. *Fine Particles Processing*, 2, 1442-1462, 1980.
- Capes, C., & Jonasson, K. (1989). Application of oil–water wetting of coals in beneficiation. *Interfacial Phenomena in Coal Technology*, Surfactant science series, (1nd ed.), p. 115–155.
- Cebeci, Y., & Eroglu, N. (1998). Determination of bridging liquid type in oil agglomeration of lignite. *Fuel*, 77, 419–424 [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(98\)80032-X](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(98)80032-X)
- Cebeci, Y. (2003). Investigation of kinetics of agglomerate growth in oil agglomeration process. *Fuel*, 82, 1645–1651. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(03\)00095-4](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00095-4)
- Cebeci, Y., & Sonmez, I. (2002). The investigation of coal-pyrite/lignite concentration and their separation in the artificial mixture by oil agglomeration. *Fuel*, 81, 1139–46. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(02\)00028-5](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(02)00028-5)
- Cebeci, Y., & Sonmez, I. (2006). Application of the Box-Wilson experimental design method for the spherical oil agglomeration of coal. *Fuel*, 85, 289–97. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.07.017>.
- Celik, M. S. (1989). Effect of ultrasonic treatment on the floatability of coal and galena. *Separation Science and Technology*, 24(14),1159–66.
- Chary, G. H. V. C., & Dastidar, M. G. (2010). Optimization of experimental conditions for recovery of coking coal fines by oil agglomeration technique. *Fuel*, 89(9), 2317–22. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.12.016>
- Chary, G. H. V. C., & Dastidar, M. G. (2012). Investigation of optimum conditions in coal–oil agglomeration using Taguchi experimental design. *Fuel*, 98, 259–64. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.03.027>
- Chary, G. H. V. C., & Dastidar, M. G. (2013). Comprehensive study of process parameters affecting oil agglomeration using vegetable oils. *Fuel*, 106, 285–92. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.12.002>
- Chen, Y., Truong, V. N. T., Bu, X., & Xie, G. (2020). A review of effects and applications of ultrasound in mineral flotation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 60, 104739. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104739>
- De Castro, M. L., & Priego-Capote, F. (2007). Ultrasound-assisted crystallization (sonocrystallization). *Ultrasonics Sonochemistry*, 14, 717–724. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2006.12.004>

- Duzyol, S., Aksu, A. Ö., Erişir, H. S., Aspir, K., & Sensogut, C. (2014). Tunçbilek linyit kömürünün yağ aglomerasyonu ile zenginleştirilmesi. *Türkiye 19. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı*, (pp. 237-244), Zonguldak
- Duzyol, S. (2015). Investigation of oil agglomeration behavior of Tuncbilek clean coal and separation of artificial mixture of coal-clay by oil agglomeration. *Powder Technology*, 274, 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.01.011>
- Gaikwad, S. G., & Pandit, A. B. (2008). Ultrasound emulsification: Effect of ultrasonic and physicochemical properties on dispersed phase volume and droplet size. *Ultrasonics Sonochemistry* 15(4), 554–563 <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2007.06.011>
- Gence, N. (2006). Coal recovery from bituminous coal by agglomeration with petroleum oils. *Fuel*, 85, 1138–42. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.11.001>
- Gungoren, C., Ozdemir, O., Wang, X., & Ozkan, S. (2019). Miller J. Effect of ultrasound on bubble-particle interaction in quartz-amine flotation system. *Ultrasonics Sonochemistry*, 52, 446–454. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.12.023>
- Gurses, A., Doymus, K., & Bayrakceken, S. (1996). Selective oil agglomeration of brown coal: a systematic investigation of the design and process variables in the conditioning step. *Fuel*, 75(10), 1175–80, [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(96\)00077-4](https://doi.org/10.1016/0016-2361(96)00077-4)
- Hassanzadeh, A., Sajjadi, S. A., Gholami, H., Amini, S., & Ozkan, S. G. (2020). An Improvement on selective separation by applying ultrasound to rougher and re-cleaner stages of copper flotation. *Minerals*, 10(7), 619. <https://doi.org/10.3390/min10070619>
- Jin, L., Wang, W., Tu, Y., Zhang, K., & Lv, Z. (2021). Effect of ultrasonic standing waves on flotation bubbles. *Ultrasonics Sonochemistry*, 73, 105459. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105459>
- Kang, W., Xun, H., & Chen, J. (2007). Study of enhanced fine coal de-sulphurization and de-ashing by ultrasonic flotation. *Journal of China University of Mining and Technology*, 17(3), 358–362. [https://doi.org/10.1016/S1006-1266\(07\)60105-9](https://doi.org/10.1016/S1006-1266(07)60105-9)
- Kang, W., Xun, H., & Hu, J. (2008). Study of the effect of ultrasonic treatment on the surface composition and the flotation performance of high-sulfur coal. *Fuel Processing Technology*, 89(12), 1337–1344. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.06.003>
- Kang, W., Xun, H., Kong, X., & Li, M. (2009). Effects from changes in pulp nature after ultrasonic conditioning on high-sulfur coal flotation. *Mining Science and Technology*, 19(4), 498–502, 507. [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60093-4](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60093-4)
- Kentish, S., Wooster, T., Ashokkumar, M., Balachandran, S., Mawson, R., & Simons, L. (2008). The use of ultrasonics for nano emulsion preparation. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 9, 170–175. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2007.07.005>
- Mao, Y., Xia, W., Peng, Y., & Xie, G. (2019a). Ultrasonic-assisted flotation of fine coal: A review. *Fuel Processing Technology*, 195, 106150. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106150>
- Mao, Y., Chen, Y., Bu, X., & Xie, G. (2019b). Effects of 20 kHz ultrasound on coal flotation: The roles of cavitation and acoustic radiation force. *Fuel*, 256, 115938. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115938>
- Mao, Y., Bu, X., Peng, Y., Tian, F., & Xie, G. (2020). Effects of simultaneous ultrasonic treatment on the separation selectivity and flotation kinetics of high-ash lignite. *Fuel*, 259(1), 116270. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116270>
- Onal, G., Ozer, M., & Arslan, F. (2003). Sedimentation of clay in ultrasonic medium. *Mining and Engineering*, 16 (2), 129–34. doi:10.1016/S0892-6875(02)00309-6.
- Ozer, M., Basha, O. M., & Morsi, B. (2017). Coal-agglomeration processes: a review. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 37(3), 31–167. <https://doi.org/10.1080/19392699.2016.1142443>
- Ozkan, S. G., & Kuyumcu, H. Z. (2006). Investigation of mechanism of ultrasound on coal flotation. *International Journal Mineral Processing*, 81(3), 201–203. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2006.07.011>

- Ozkan, S. G., & Kuyumcu, H. Z. (2007). Design of a flotation cell equipped with ultrasound transducers to enhance coal flotation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 14(5), 639–645. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2006.10.001>
- Ozkan, S. G. (2012). Effects of simultaneous ultrasonic treatment on flotation of hard coal slimes. *Fuel*, 93, 576–580. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.10.032>
- Ozkan, S. G. (2017). Further investigations on simultaneous ultrasonic coal flotation. *Minerals*, 7(10), 177, <https://doi.org/10.3390/min7100177>
- Petela, R., Ignasiak, B., & Pawlak, W. (1995). Selective agglomeration of coal: analysis of laboratory batch test results. *Fuel*, 74, 1200–1210 [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(95\)00047-9](https://doi.org/10.1016/0016-2361(95)00047-9)
- Royaei, M. M., Jorjani, E., & Chelgani, S.C. (2012). Combination of microwave and ultrasonic irradiations as a pretreatment method to produce ultraclean coal. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 32, 143–155. <https://doi.org/10.1080/19392699.2012.663024>
- Sahinoglu, E., & Uslu, T. (2008). Amenability of Muzret bituminous coal to oil agglomeration. *Energy Convers Manage*, 49, 3684–90. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.06.026>
- Sahinoglu, E., & Uslu, T. (2013a). Increasing coal quality by oil agglomeration after ultrasonic treatment. *Fuel Processing Technology*, 116, 332–8. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.07.016>
- Sahinoglu, E., & Uslu, T. (2013b). Use of ultrasonic emulsification in oil agglomeration for coal cleaning. *Fuel*, 113, 719–725. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.06.046>
- Sahinoglu, E., & Uslu, T. (2014). Effect of particle size on cleaning of high-sulphur fine coal by oil agglomeration. *Fuel Processing Technology*, 128, 211–9. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.07.015>
- Unal, I., & Aktas, Z. (2001). Effect of various bridging liquids on coal fines agglomeration performance. *Fuel Processing Technology*, 69, 141–55. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(00\)00137-5](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(00)00137-5)
- Unal, I., & Ersan, M. G. (2005). Oil agglomeration of a lignite treated with microwave energy: effect of particle size and bridging oil. *Fuel Processing Technology*, 87, 71–76. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2005.08.001>
- Wang, H., Yang, W., Yan, X., Wang, L., Wang, Y., & Zhang, H. (2020). Regulation of bubble size in flotation: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104070. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104070>
- Xu, M., Xing, Y., Gui, X., Cao, Y., Wang, D., & Wang, L. (2017). Effect of ultrasonic pretreatment on oxidized coal flotation. *Energy Fuels*, 31, 14367–14373. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b02115>
- Yasuda, K., Matsushima, H., & Asakura, Y. (2019). Generation and reduction of bulk nanobubbles by ultrasonic irradiation. *Chemical Engineering Science*, 195, 455–461. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.09.044>
- Yazıcı, E. Y., Deveci, H., Alp, I., & Uslu, T. (2007). Generation of hydrogen peroxide and removal of cyanide from solutions using ultrasonic waves. *Desalination*, 216(1-3), 209–221. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.12.018>
- Zhang, H. X., Bai, H. J., Dong, X. S., & Wang, Z. Z. (2012). Enhanced desulfurizing flotation of different size fractions of high sulfur coal using sonoelectrochemical method. *Fuel Processing Technology*, 97, 9–14. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.01.005>

## Grafen katkı polilaktik asit membranıyla vakum membran distilasyon ile bor giderimi

*Boron removal by vacuum membrane distillation with graphene doped polylactic acid membrane*

Filiz UĞUR NİGİZ\*, Betül KARAKOCA

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 17000, Çanakkale

• Geliş tarihi / Received: 01.11.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 28.03.2023

### Öz

Desalinasyon ve bor giderimi için membran teknolojilerine son yıllarda ilgi duyulmaktadır. Günümüzde membran bazlı ayırma prosesleri, çevre dostu olmaları ve enerji/maliyet tüketimindeki verimlilikleri nedeniyle tercih edilmektedirler. Bu yeni teknolojilerden biri de membran distilasyondur. Henüz akademik seviyede olan araştırmalar sonucunda membran distilasyon gibi ileri teknoloji ile %99,99 üzeri saflaştırma ve giderim yapmak mümkündür. Bu çalışmada, biyobozunur polimerlerden olan saf ve grafen katkı polilaktik asit (PLA) membranlar üretilerek membran distilasyon tekniği ile sulardan bor giderimi yapılmıştır. Sıcaklığın, bor konsantrasyonunun, grafen oranının bor reddi ve su akışı değerlerine etkisi belirlenmiştir. Sonuç olarak tüm sıcaklıklarda ve tüm grafen katkı PLA membranlarla %99 üzeri bor retleri elde edilmiştir. Özellikle grafen katkısıyla akı değerleri 13 kg/m<sup>2</sup>.h olarak elde edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Bor giderimi, grafen, polilaktik asit (PLA) membran

### Abstract

Membrane technologies for desalination and boron removal have attracted interest in recent years. Today, membrane-based separation processes are preferred due to their environmental friendliness and efficiency in energy/cost consumption. One of these new technologies is membrane distillation. As a result of researches that are still at academic level, it is possible to purify and remove over 99.99% with advanced technology such as membrane distillation. In this study, pure and graphene-doped polylactic acid (PLA) membranes, which are biodegradable polymers, were produced and boron was removed from water by membrane distillation technique. The effects of temperature, boron concentration, graphene ratio on boron rejection and water flux values were determined. As a result, boron rejections above 99% were obtained at all temperatures and with all graphene-doped PLA membranes. The flux values were obtained as 13 kg/m<sup>2</sup>.h, especially with the graphene additive.

**Keywords:** Boron removal, graphene, polylactic acid (PLA) membrane

\* Filiz UĞUR NİGİZ; filiz.ugur@comu.edu.tr



## 1. Giriş

### 1. Introduction

Bor, birçok farklı kimyasal yapıda, kaynak suları, deniz suları, toprak gibi doğal kaynaklarda bulunan hem önemli bir mineral hem de önemli bir kirleticidir. Genellikle yerkürede düşük konsantrasyonlarda bulunan bor elementinin yüksek konsantrasyonlarda bulunduğu bor yatakları da mevcuttur. Yapılan çalışmalarda, doğrudan insani amaçlarla kullanılabilen tatlı sularda bor mineralinin 0.01-1.5 ppm, deniz sularında 4.5 ppm, yeraltı sularında ise 0.3-100 ppm olduğu belirtilmiştir (Tang vd. 2017).

Bor önemli bir bileşen olduğu için geri kazanılması oldukça önemlidir. Aynı zamanda önemli bir kirletici olan bor bileşen ve elementlerinin hem geri kazanılması hem de insani amaçlı kullanım sularından giderilmesi için kullanılan geleneksel ve yenilikçi yöntemler bulunmaktadır (Başkan vd. 2014). Bu yöntemlerden biri membran distilasyondur (MD). Yenilikçi bir yöntem olarak tanımlanan MD teknolojisi, ilk olarak Weyl tarafından 1967 yılında tuzlu suları saflaştırmak amacıyla kullanılmıştır ve 1.0 L/m<sup>2</sup>.saat gibi çok düşük akılar elde edilmiştir. Bu değer ters ozmos gibi tekniklerle karşılaştırıldığında oldukça düşüktür. 20 yıl sonra, direk temaslı membran distilasyon (DCMD) ile tuzlu su ve farklı konsantrasyonlarda sulu şeker çözeltileri polipropilen (PP) ve poliviniliden florür (PVDF) membranları kullanılarak ayrıştırılmış, 2.5 L/m<sup>2</sup>.saat'ten daha düşük akı değerleri ve %99'a yakın bir tuzsuzlaştırma verimi sağlanmıştır (Aslan vd. 2016). Termal bir yöntem olan MD prosesinde itici güç buhar basıncıdır. Membran distilasyon yöntemi ile düşük sıcaklıklarda, yüksek iyon içeriğine sahip sular ayrılabilir. Hem termal hem de membran ayırma yöntemini birleştiren hibrid bir ayırma tekniği olması birçok avantaj sağlamaktadır. Termal temelli distilasyon gibi yöntemlerle kıyaslandığında daha düşük enerji tüketmesi oldukça büyük bir avantaj sağlamaktadır. Bu durumda hem işletme maliyeti düşmekte hem de tesis alanı daralmaktadır. Ters ozmos, mikro-ultrafiltrasyon teknikleri gibi membran yöntemleri ile kıyaslandığında ise membran kirliliği oluşumunun olmaması, yöntemi ön plana çıkarmıştır. Basınç farkıyla işletilen filtrasyon temelli membran proseslerinde yüksek işletim basıncı gerekirken, MD işleminde basınç ancak belli tekniklerinde vakum basıncı olarak kullanılmaktadır. Hem düşük işletme sıcaklığı, hem optimal proses koşulları, hem de membran kirliliklerinin olması yöntemi gelecek için umut verici hale getirmiştir (Khayet, 2011). MD sisteminin en önemli bileşeni membranın kendisidir. Literatürde ise PVDF temelli (Feng vd. 2022; Pan vd. 2022), politetrafloroetilen (PTFE) temelli (Adnan vd. 2012; Eryildiz vd. 2021), polipropilen (PP) temelli (Eryildiz vd. 2021) membranlar yapılmıştır. Membran distilasyonda kullanılan membranın hidrofobik ve gözenekli olması, gözenek içi ıslanma problemlerinin olmaması önemlidir. Bu membranlar faz inversiyon veya elektro eğirme tekniği ile üretilebilmektedirler. Benzer şekilde düzlemsel, spiral veya içi boş lif modülleri ile üretilen modüller de bulunmaktadır. Burada önemli olan besleme çözeltilerindeki suyun buharlaşarak membran gözeneklerinden geçmesi ve daha düşük sıcaklıkta işletilen alt akımda elde edilmesidir.

Membran distilasyon tekniğinin farklı kombinasyonları mevcuttur. Bunlardan biri de vakumlu membran distilasyondur. Vakumlu membran distilasyon sisteminde saflaştırılacak su membran ile temas halindedir ve alt akımda uygulanan vakum basıncı sayesinde diğer yöntemlere göre daha düşük sıcaklıkta göreceli olarak daha yüksek akılar elde edilebilmektedir. Özellikle uçucu olmayan, su içinde çözünen maddeler için (deniz suyundaki tuzlar gibi) daha fazla tuz reddi elde etmek mümkündür (Abu-Zeid vd. 2015).

Bu çalışmada, gözenekli polilaktik asit (PLA) membran hazırlanarak vakum membran distilasyon tekniği ile bor giderimi yapılmıştır. PLA hem doğal hem de petrokimyasal temelli üretilebilen oldukça popüler bir polimer malzemesidir. Son yıllarda, ambalaj, yara örtüsü, membran, makine parçası gibi birbirinden oldukça farklı alanlarda kullanılabilirliğini de kanıtlamıştır. Ayrıca 3D yazıcı teknolojisinin gelişmesi ile birlikte de kullanım alanını genişletmiştir. PLA membran malzemesi olarak, organik-organik ayırimda, organik-su ayırimında kullanılmaktadır. Ancak daha önce membran distilasyonda kullanıldığı çalışmalara çok fazla rastlanmamıştır. Çalışma kapsamında PLA membrana grafen nano-tabaka eklenerek, engebeli yolların, ayırım performansının, bor seçiciliğinin artırılması amaçlanmıştır.

## 2. Materyal ve metot

### 2. Material and method

Polilaktik asit (PLA), Nature Works'ün (2003D) Türkiye distribütöründen, N, N-dimetilformamid asit (>%99 saflıkta DMF), kloroform ve metanol (>%99 saflıkta) Merck Türkiye firmasından satın alınmıştır. Grafen nanotabaka 750 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahiptir ve Merck Türkiye firmasından temin edilmiştir.

## 2.1. PLA-grafen membranlarının hazırlanması

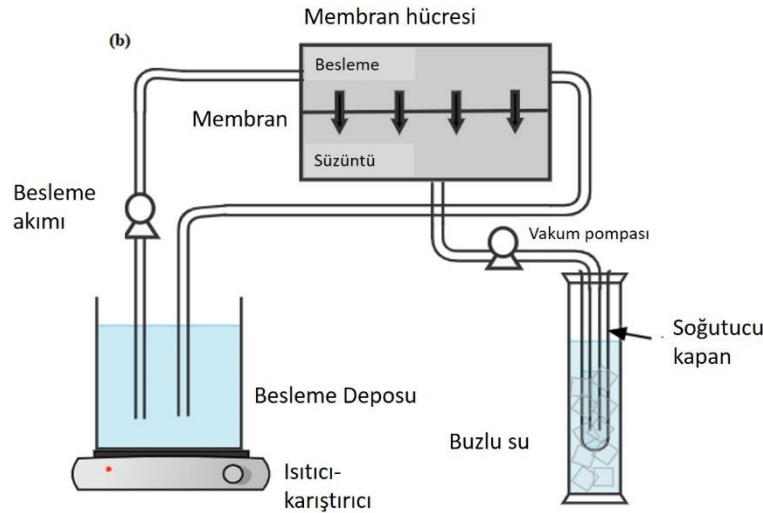
### 2.1. Preperation of PLA-graphene membranes

PLA-grafen membranlar faz değişimi tekniği ile hazırlanmıştır. Öncelikle kütlece %10 PLA içeren, hacimce de %90 kloroform %10 DMF içeren polimer çözeltisi 50 °C sıcaklıkta tamamen çözününceye kadar karıştırılmıştır. Aynı bir yerde polimer kütlece göre %1-5 oranındaki grafen, 5 ml DMF'de çözünmüş ve homojenizatör ile 10 dk karıştırılarak dağılımı sağlanmıştır. Ardından kütlece %10 PLA içeren PLA-DMF-kloroform çözeltisine eklenerek 2 saat oda sıcaklığında karıştırılmış, karışım cam yüzeye dökülmüş ve 1 saat oda koşullarında bekletilmiştir. Bu aşamada membranların gözenekli bir şekilde elde edilmesi için (faz değişiminin temeli), kendi çözücüsü olmayan bir çözücü içine daldırılarak, içindeki çözücünün bu çözücü ile yer değişimi gerçekleşmesi gerekmektedir. Çalışma kapsamında, DMF-kloroform ile hazırlanan ve oda koşullarında 1 saat bekletilen membranların oda koşullarında bir su banyosuna daldırılarak gözenek oluşumu sağlanmıştır. Su banyosunda iki dakika bekletilen membranlar alınarak, cam yüzeyden kolayca sıyrılmıştır. Bu işlem aynı zamanda bir yıkama işlemidir. Hazırlanan gözenekli membranlar oda sıcaklığında kurutulmuş ve testler yapılabilecek kadar filtre kağıdı içinde muhafaza edilerek bekletilmiştir.

## 2.2. Membran distilasyon testi

### 2.2. Membran distillation

Membranın üst bölümüne farklı konsantrasyonlarda bor-su karışımı pompa ile beslenmiştir. Membranın vakum bölgesinin basıncı ise 30 mbar olarak sabitlenmiştir. Soğuk kaplarda bulunan buzlu su ile buharlaşan su alt akımdan saf su olarak elde edilmiştir. Sirkülasyon ile geri döngülü çalışan sistemde besleme akış hızı 100 mL/dk sabit hız olarak belirlenmiştir. Vakumlu membran distilasyon sistemi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Vakum membran distilasyon sistemi  
Figure 1. Vacuum membrane distillation test unit

Elde edilen suyun hem kütlesi tartılarak akı değeri hesaplanmış hem de Carmine metoduna göre bor konsantrasyonu ölçülerek bor reddi hesaplanmıştır. Carmine metodu için 75 mL sülfürik asit ve bir paket boron reaktif kiti (BoroVer, Hach Türkiye) bir balon içinde çözünene kadar karıştırılmış ve ikiye bölünmüştür. İlk balona kör numune için 2 mL saf su, diğer balona da analiz edilecek numune eklenerek karıştırılmış ve 605 nm dalga boyunda Shimadzu 1280 spektrofotometre cihazı kullanılarak absorbans değerleri ölçülmüştür. Ardından, Lambert Beer yasasına göre konsantrasyonlar hesaplanmıştır.

Akı (J)(kg/m<sup>2</sup>.h) değeri membrandan birim zamanda (t, h) geçen sıvı miktarını (M, kg) göstermekte ve Denklem 1'deki gibi hesaplanmaktadır. Buradaki A (m<sup>2</sup>) membranın alanını temsil etmektedir.

$$J = \frac{M}{A.t} \quad (1)$$

Süzüntü bölümündeki ( $C_p$ ) ve besleme bölümündeki ( $C_f$ ) bor konsantrasyonundan bor reddi ( $R$ ) hesaplanmıştır (Denklem 2).

$$R = \frac{C_f - C_p}{C_f} * 100 \quad (2)$$

Membranların kesit morfolojileri, taramalı elektron mikroskobu (QUANTA 400F Alan Emisyonu) kullanılarak incelenmiştir. Deney çeşitli büyütmelerde 30 kV'da Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

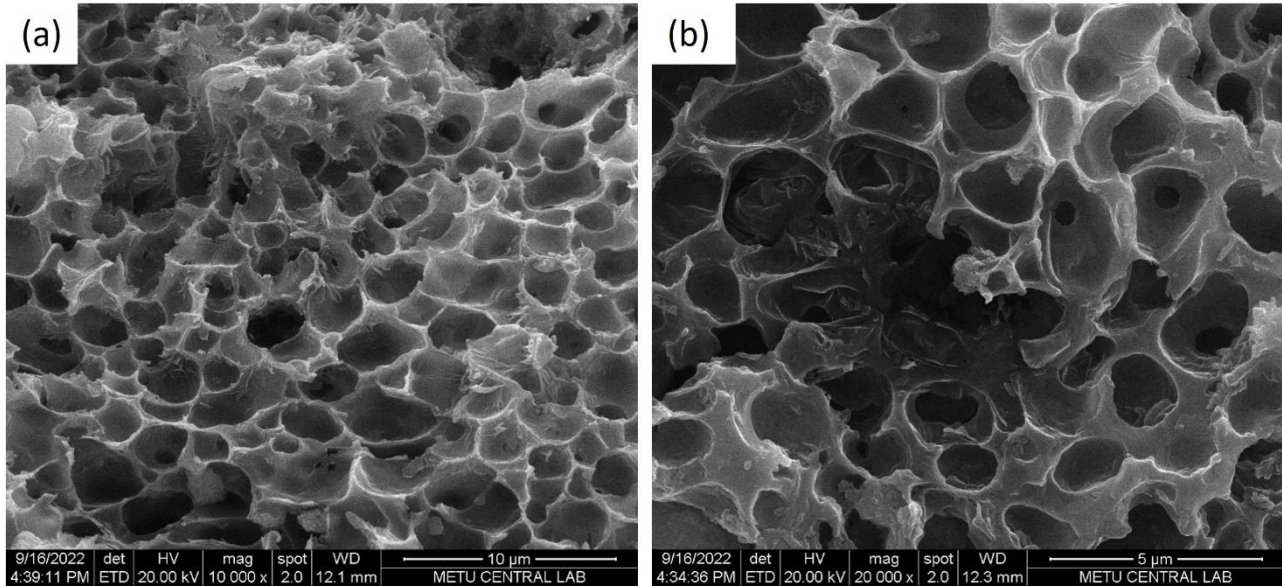
### 3. Bulgular ve tartışma

#### 3. Results and discussion

#### 3.1. Membran karakterizasyonu

##### 3.1 Membrane characterization

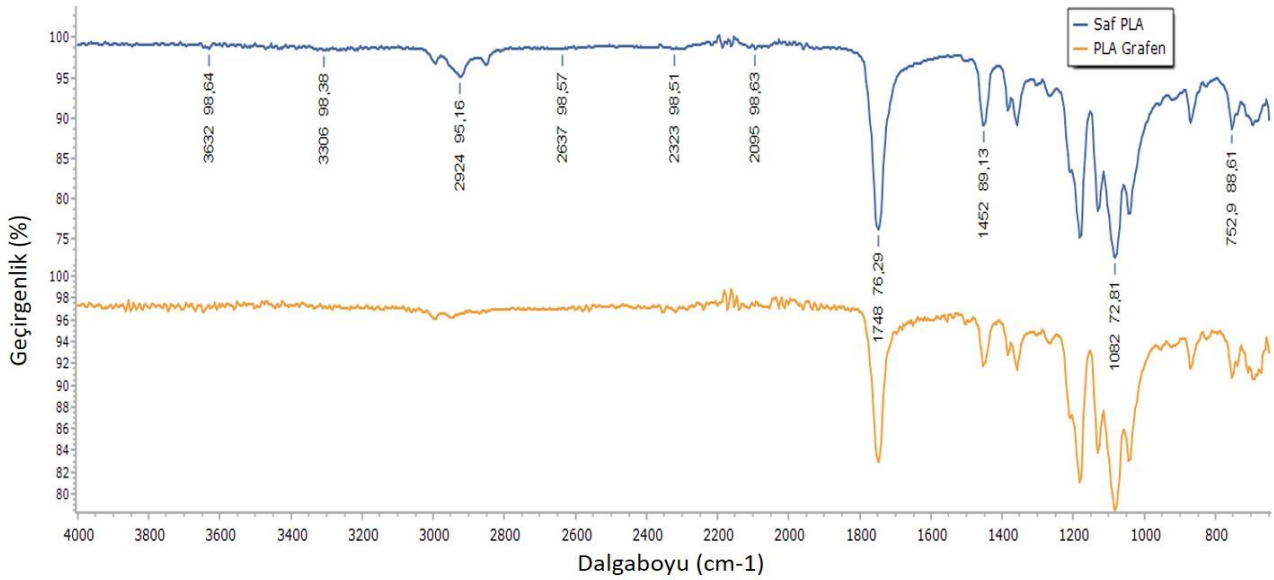
Şekil 2'de %3 grafen katkılı membranın SEM analizleri görülmektedir. Grafen yapıları nano boyutta ve çok iyi dağıldığı için gözlemek mümkün olmasa da gözeneklerin homojen dağılımı ve boyutlarını görmek mümkündür.



Şekil 2. Kompozit membranların SEM görüntüsü x10000(a) ve x20000 (b)

Figure 2. SEM micrographs of composite membranes x10000(a) and x20000 (b)

Şekil 3'de grafen katkılı ve katkısız membranların fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) analizi sonuçları yer almaktadır. Membranlarda  $\text{CH}_3$  bağındaki simetrik ve asimetrik titreşimler  $2924 \text{ cm}^{-1}$  ve  $2880 \text{ cm}^{-1}$  bölgesinde görülmektedir. Bunlar PLA polimerinin karakteristik pikleridir ancak %4 oranında eklenen grafen katkısıyla bunların titreşim yoğunluğunda bir miktar azalma görülmüştür.  $1750 \text{ cm}^{-1}$  bölgesinde görülen titreşim ise yine PLA membranda karakteristik bağ olan  $\text{C}=\text{O}$  titreşimine bağlıdır ve katkı malzemeleri çoğunlukla bu bölgeler ile etkileşime girmektedir. Grafen katkısı ile bu bölgedeki pikte belirgin bir azalma vardır.  $\text{CH}$  gruplarının gerilme titreşim pikleri ise  $1450 \text{ cm}^{-1}$  ve  $1385 \text{ cm}^{-1}$  olarak gözlenmiştir.

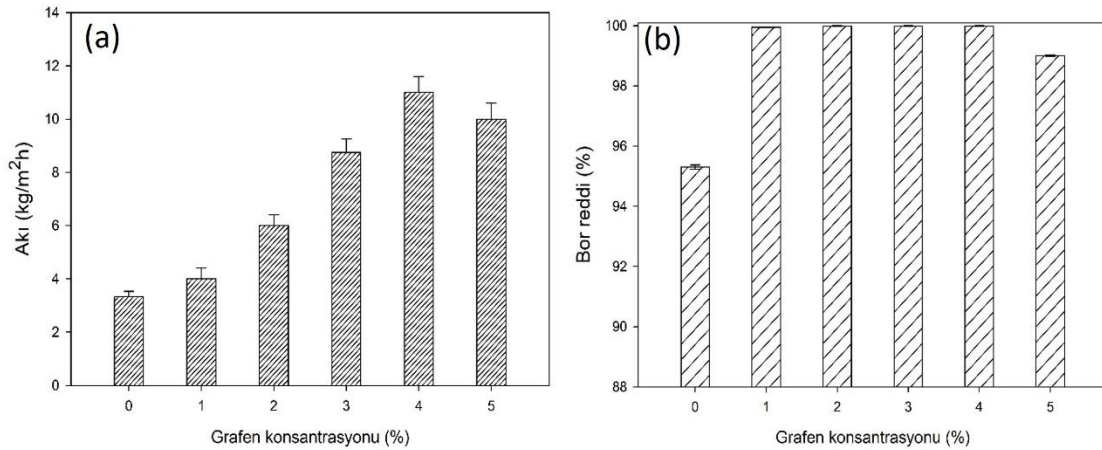


**Şekil 3.** Grafen katkılı ve katkısız PLA membranların FTIR analizi  
**Figure 3.** FTIR analysis of graphene filled and unfilled membranes

### 3.2. Bor giderim sonuçları

#### 3.2 Boron removal results

İlk olarak hazırlanan katkısız ve grafen katkılı PLA membranlar ile aynı koşullarda (50°C sıcaklık ve 10 ppm bor konsantrasyonu ile) membran distilasyonu yapılmıştır. MD’de kullanılan PLA membrandaki grafen oranının akıya etkisi Şekil 4a’da verilmiştir. En düşük akı sonuçları katkısız PLA membranda hesaplanmıştır. Membrandaki grafen oranına bağlı olarak akı değerlerinde artış görülmüştür. Membranlar arasında en yüksek akı değeri %4 grafen katkılı PLA membranda hesaplanmıştır. Literatürde de benzer sonuçlar elde edilmiştir (Woo vd. 2016; Grasso vd. 2020; Seraj vd. 2022). Eklenen grafen, membranın hidrofobitesini artırır ve bu membranın ıslanma problemini yok ederek buharın süzüntüye daha verimli geçmesini sağlar. Membran yapılarında bulunan grafenin difüzyon seçiciliğini arttırdığı görülmüştür (Sun vd. 2022). Fakat %5 grafen katkılı PLA membranlarda akıda bir miktar azalma görülmüştür. Literatürde de benzer durumlar görülmüştür (Leaper vd. 2018; Ozbey-Unal vd. 2020). Bunun nedeni, aglomerasyon dolayısıyla yapının difüzyon seçiciliğini azaltması olarak açıklanmaktadır. %4 grafen katkılı PLA membran ile akı yaklaşık 11.2 kg/m<sup>2</sup>h olarak hesaplanmıştır.

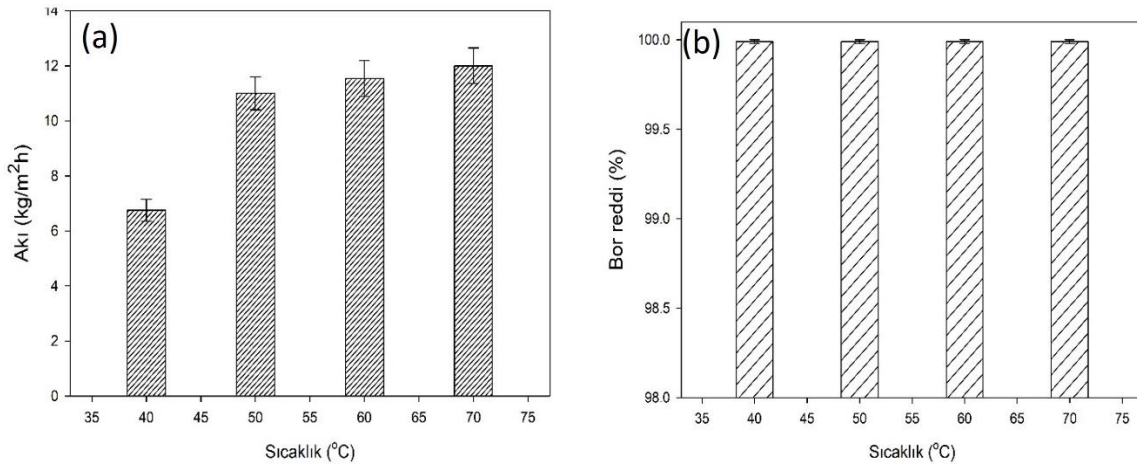


**Şekil 4.** Grafen miktarının akı (a) ve bor reddine (b) etkisi  
**Figure 4.** Effect of graphene concentration on flux (a) and boron removal(b)

Şekil 4b’de ise grafen katkısının bor reddi sonuçlarına etkisi görülmektedir. Buna göre %1 katkıda bile %99.99 bor reddi elde edilmiştir ki saf PLA da bu değer %95.7’dir. Yalnızca %5 grafen katkısında bu oranın düştüğü

görülmüştür. Her ne kadar değer saf PLA'dan yüksek olsa da, grafenlerin aglomerasyonu, birbirlerinin etkilerini azaltmaları nedeniyle polimer-grafen arası nano boşlukların oluştuğu ve burada borun da sürüklendiği düşünülebilir.

Şekil 5a'da %4 grafen katkılı PLA membranların kullanıldığı membran distilasyon ile sıcaklığa bağlı akı değerleri verilmiştir. En yüksek akı sonuçlarını 70°C sıcaklıkta hesaplanmıştır. Sıcaklık arttıkça taraflar arası itici güç arttığı için akının artması beklenen bir sonuçtur. Sıcaklık arttıkça akının artmasının nedenlerinden biri de Antoine denkleminde göre artan buhar basıncı ile açıklanmıştır (Ünügül & Nigiz, 2022). Besleme kısmında sıcaklık arttıkça buhar basıncı da artmıştır ve çıkış kısmındaki basınç sabit olduğu için membranın iki tarafında basınç farkı oluşmuştur (Liang vd. 2015). Buna bağlı olarak da su akışı artmıştır. Literatürde membran distilasyon ile bor giderimi hakkında birçok çalışma vardır. Bu çalışmalarda membran distilasyon ile bor giderimde sıcaklık arttıkça akının da arttığı görülmüştür (Alkudhiri vd. 2020; Hou vd. 2013; Ozbey-Unal vd. 2018).

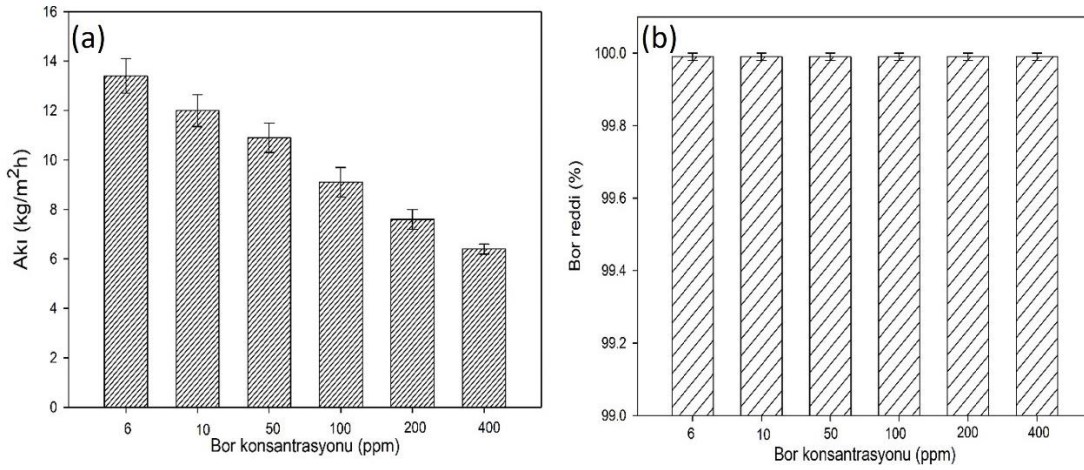


**Şekil 5.** Sıcaklığın akı (a) ve bor reddine (b) etkisi

**Figure 5.** Effect of temperature on flux (a) and boron removal (b)

Akı artışının bir diğer nedeni ise polimerin yapısal hareketliliğinin sıcaklıkla artmasıdır. Polimerlerin zincir hareketlerinin camı geçiş sıcaklığı üzerindeki sıcaklıklarda arttığı bilinmektedir. PLA'nın camı geçiş sıcaklığı ise 59 °C civarındadır. Dolayısıyla bu sıcaklık üzerinde, zincir hareketliliğinin arttığı, polimerlerin serbest hacimlerinin arttığı, dolayısıyla bu serbest hacimlerden geçen madde miktarının artarak akı değerinin arttığı kabul edilebilir. Polimerdeki yapısal hareketliliğe bağlı bu akı artışı çoğunlukla seçimsiz olan bor gibi maddelerin geçişine de olanak tanıyarak bor redlerini düşürür. Bu durum diğer filtrasyon işlemlerine göre MD'de daha az görülür çünkü bu teknikte membran içinden sıvı değil buhar geçmektedir. Bor buharlaşmadığı için süzüntü kısmına geçmesi beklenmez. Ancak bazı durumlarda, özellikle camı geçiş sıcaklığının üstünde membranın serbest hacmi çok büyükse veya gözenekleri çok büyükse, buharla sürüklenen az miktarda bor süzüntü kısmına geçebilir. Ancak grafen katkısı Şekil 5b'de görüldüğü gibi bor reddini azaltmamış, değerler %99.99'da sabit kalmıştır. Bu sonuçlara bağlı olarak aynı membranlarda sıcaklık artsa da bor reddi sonuçlarında bir değişiklik görülmemektedir. Membran distilasyonda kullanılan membranlar gözenekli yapıda olsa da bor reddi sonuçlarını etkilememiştir. Bunun muhtemel nedeni, grafenin membran içindeki engebeli yolları artırarak difüzyon seçiciliğini arttırmasıdır. Bu sonuca göre grafen katkısı, akı ve bor reddi arasındaki artış-azalış ilişkisini düzeltmiş, akıyı arttırırken bor reddinin azalmasına neden olmamıştır.

Şekil 5a ve 5b'de membran distilasyon ile %4 grafen katkılı PLA membranlar kullanılarak yapılan deneylerde en yüksek bor reddi ve akı değerlerini veren sıcaklığın 70°C'de olduğu görülmüştür. Buna bağlı olarak %4 grafen katkılı PLA membranlar ile belirlenen sıcaklıkta (70°C'de), bor konsantrasyon değiştirilerek en yüksek akı ve bor reddi sonuçlarına bakılmıştır. Şekil 6'da bor konsantrasyonlarına göre akı değerleri verilmiştir.



**Şekil 6.** Bor konsantrasyonunun akı (a) ve bor reddine (b) etkisi  
**Figure 6.** Effect of boron content on flux (a) and boron removal (b)

Grafikte en yüksek akı değerlerinin düşük bor konsantrasyonda hesaplandığı görülmektedir. Besleme çözeltisi içinde bor oranı arttıkça su akışı azalmıştır. Akının azalışı birkaç nedenden kaynaklı olabilir. Bunlardan biri, su içerisinde artan bor miktarının buhar basıncını ve suyun aktivitesini düşürmesidir (Wang vd. 2016). Böylece membranın iki yüzü arasındaki basınç farkı azaldığı için akı azalmıştır. İkinci olarak bu durum Fick yasası ile açıklanabilir. Buna göre, akı değeri, difüzyon katsayısının konsantrasyon gradyanıyla çarpımına eşittir. Yani konsantrasyon gradyanı ile doğru orantılıdır. Sıcaklığın ve difüzyon hızının da sabit kabul edildiği sabit kalınlıkta membran kullanıldığı bir sistemde akı değeri konsantrasyon farkına bağlıdır (Basile vd. 2015). Membranın besleme kısmında bor konsantrasyonunun artması, su için itici gücü azaltır, dolayısıyla akı azalmış olur.

Membran distilasyon proseslerinde bor reddi sonuçlarının hepsi %99,99 olarak hesaplanmıştır. Bu grafikte besleme çözeltisinde bor konsantrasyonu artsa da bor reddini etkilemediği görülmüştür. Alkudhiri vd. (2020) membran distilasyon için farklı bor konsantrasyonlarında bor reddi sonuçlarına bakılmıştır ve bor konsantrasyonu değişse de bor reddi sonuçlarında %99,4'ün üstünde değerler elde edilmiştir.

#### 4. Sonuçlar

##### 4. Conclusions

Bu çalışmada, saf ve grafen katkılı polilaktik asit (PLA) membranlar üretilerek membran distilasyon tekniği ile sulardan bor giderimi yapılmıştır. Sıcaklığın, bor konsantrasyonunun, grafen oranının bor reddi ve su akışı değerlerine etkisi belirlenmiştir. Sonuç olarak tüm sıcaklıklarda ve tüm grafen katkılı PLA membranlarla %99 üzeri bor retleri elde edilmiştir. Özellikle grafen katkısıyla akı değerleri 13 kg/m<sup>2</sup>.h olarak elde edilmiştir. Grafen katkısız membranda bor reddi değeri %95.7 iken %1 grafen katıldığı durumda bile giderim %99.99 olarak elde edilmiştir. 50 °C sıcaklık 10 ppm bor konsantrasyonunda en yüksek akı değeri %4 grafen katkılı PLA membran ile 11.2 kg/m<sup>2</sup>.h olarak elde edilmiştir. Sıcaklık arttıkça akı değerleri bir miktar artmış ancak bor redleri %99 üzerinde sabit kalmıştır. Beslemede bor konsantrasyonu arttıkça akı değerleri düşmüş ancak bor redleri çok fazla değişmemiştir.

#### Teşekkür

##### Acknowledgement

Bu çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi tarafından FHD-2022-3900 numaralı projeler ile maddi olarak desteklenmiştir. Makalenin inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları katkılardan dolayı editör ve hakemlere teşekkür ederim.

#### Yazar katkısı

##### Author contribution

Filiz Uğur Nigiz: Makale yazılması, sonuç yorumlama, deneysel planlama  
 Betül Karakoca: Deneylerin yapılması, veri alınması, makale yazılması

**Etik beyanı***Declaration of ethical code*

“Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir

**Çıkar çatışması beyanı***Conflicts of interest*

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder

**Kaynaklar***References*

- Abu-Zeid, M. A. E. R., Zhang, Y., Dong, H., Zhang, L., Chen, H. L., & Hou, L. (2015). A comprehensive review of vacuum membrane distillation technique. *Desalination*, 356, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.10.033>.
- Adnan, S., Hoang, M., Wang, H., & Xie, Z. (2012). Commercial PTFE membranes for membrane distillation application: Effect of microstructure and support material. *Desalination*, 284, 297-308. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.09.015>.
- Alkhudhiri, A., Bin Darwish, N., Hakami, M. W., Abdullah, A., Alsadun, A., & Abu Homod, H. (2020). Boron removal by membrane distillation: A comparison study. *Membranes*, 10(10), 263. <https://doi.org/10.3390/membranes10100263>.
- Aslan M. (2016). *Membran teknolojileri* (1.Baskı), Türkiye Çevre Koruma Vakfı.
- Basile, A., Figoli, A., & Khayet, M. (2015). *Pervaporation, vapour permeation and membrane distillation: principles and applications* (1. Ed.), Elsevier.
- Başkan, M. B., & Atalay, N. (2014). İçme ve sulama sularında bor kirliliği ve bor giderme yöntemleri. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(3), 78-84. <https://doi.org/10.5505/pajes.2014.47955>.
- Eryildiz, B., Ozbey-Unal, B., Gezmis-Yavuz, E., Koseoglu-Imer, D. Y., Keskinler, B., & Koyuncu, I. (2021). Flux-enhanced reduced graphene oxide (rGO)/PVDF nanofibrous membrane distillation membranes for the removal of boron from geothermal water. *Separation and Purification Technology*, 274, 119058. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119058>.
- Feng, H., Li, H., Li, M., & Zhang, X. (2022). Construction of omniphobic PVDF membranes for membrane distillation: Investigating the role of dimension, morphology, and coating technology of silica nanoparticles. *Desalination*, 525, 115498. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115498>.
- Grasso, G., Galiano, F., Yoo, M. J., Mancuso, R., Park, H. B., Gabriele, B., Figoli, A. & Drioli, E. (2020). Development of graphene-PVDF composite membranes for membrane distillation. *Journal of Membrane Science*, 604, 118017. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118017>.
- Hou, D., Dai, G., Wang, J., Fan, H., Luan, Z., & Fu, C. (2013). Boron removal and desalination from seawater by PVDF flat-sheet membrane through direct contact membrane distillation. *Desalination*, 326, 115-124. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.07.023>.
- Khayet, M. (2011). Membranes and theoretical modeling of membrane distillation: a review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 164(1-2), 56-88. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2010.09.005>.
- Leaper, S., Abdel-Karim, A., Faki, B., Luque-Alled, J. M., Alberto, M., Vijayaraghavan, A., Holmes, S.M., Szekely, G., Badawy, M.I., Shokri, N., & Gorgojo, P. (2018). Flux-enhanced PVDF mixed matrix membranes incorporating APTS-functionalized graphene oxide for membrane distillation. *Journal of Membrane Science*, 554, 309-323. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.03.013>.
- Liang, B., Zhan, W., Qi, G., Lin, S., Nan, Q., Liu, Y., Cao, B., & Pan, K. (2015). High performance graphene oxide/polyacrylonitrile composite pervaporation membranes for desalination applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(9), 5140-5147. <https://doi.org/10.1039/C4TA06573E>.

- Ozbey-Unal, B., Gezmiş-Yavuz, E., Eryıldız, B., Koseoglu-Imer, D. Y., Keskinler, B., & Koyuncu, I. (2020). Boron removal from geothermal water by nanofiber-based membrane distillation membranes with significantly improved surface hydrophobicity. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104113. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104113>.
- Ozbey-Unal, B., Imer, D. Y., Keskinler, B., & Koyuncu, I. (2018). Boron removal from geothermal water by air gap membrane distillation. *Desalination*, 433, 141-150. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.01.033>.
- Pan, J., Zhang, F., Wang, Z., Sun, S. P., Cui, Z., Jin, W., Bamaga, O., Abulhair, H., Albeirutty, M., & Drioli, E. (2022). Enhanced anti-wetting and anti-fouling properties of composite PFPE/PVDF membrane in vacuum membrane distillation. *Separation and Purification Technology*, 282, 120084. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.120084>.
- Seraj, S., Mohammadi, T., & Tofighy, M. A. (2022). Graphene-based membranes for membrane distillation applications: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10, 107974. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107974>.
- Sun, N., Li, J., Ren, J., Xu, Z., Sun, H., Du, Z., Zhao, H., Ettelatie, R., & Cheng, F. (2022). Insights into the enhanced flux of graphene oxide composite membrane in direct contact membrane distillation: The different role at evaporation and condensation interfaces. *Water Research*, 212, 118091. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118091>.
- Tang, Y. P., Luo, L., Thong, Z., & Chung, T. S. (2017). Recent advances in membrane materials and technologies for boron removal. *Journal of Membrane Science*, 541, 434-446. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.07.015>.
- Ünügül, T., & Nigiz, F. U. (2022). Evaluation of halloysite nanotube-loaded chitosan-based nanocomposite membranes for water desalination by pervaporation. *Water, Air, & Soil Pollution*, 233(2), 34. <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05505-z>.
- Wang, Q., Li, N., Bolto, B., Hoang, M., & Xie, Z. (2016). Desalination by pervaporation: A review. *Desalination*, 387, 46-60. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.02.036>.
- Woo, Y. C., Tijing, L. D., Shim, W. G., Choi, J. S., Kim, S. H., He, T., Drioli, E., & Shon, H. K. (2016). Water desalination using graphene-enhanced electrospun nanofiber membrane via air gap membrane distillation. *Journal of Membrane Science*, 520, 99-110. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.07.049>.



## Karışık boyalı atıksuların paslanmaz çelik ve grafit elektrotlar kullanarak peroksi-koagülasyon yöntemiyle arıtılması

*Treatment of mixed dye wastewater by peroxy-coagulation using stainless steel and graphite electrodes*

Dilek GÜMÜŞ\*, 

Sinop Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 57000, SİNOP

• Geliş tarihi / Received: 14.12.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 04.07.2023

### Öz

Boyalı atıksuların çoğu canlılar için toksik ve kanserojendir. Karmaşık yapılarından dolayı geleneksel arıtma yöntemleriyle arıtılmaları oldukça güçtür. Boyalı atıksuları arıtmak için çeşitli elektrokimyasal yöntemler geliştirilmiştir. Bu çalışmada karışık boyaların oluşturduğu sentetik atıksudan renk ve KOİ giderimi peroksi-koagülasyon yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Anot ve katot olarak sırasıyla paslanmaz çelik ve grafit elektrotlar kullanılmıştır. Başlangıç pH, akım yoğunluğu ve elektroliz süresi gibi temel işletme parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Parametrelerin elektrokimyasal sistem üzerindeki etkilerini incelemek için Taguchi deneysel tasarım yöntemi (L9) orthogonal array (OA) uygulandı. Sistemin performansı, Sinyal/gürültü (S/N) oranı (ne kadar büyükse o kadar iyidir) ve varyans analizi (ANOVA), faktörlerin yanıt değeri üzerindeki etkisinin göreceli olarak büyüklüğünü karşılaştırmak için değerlendirildi. Optimum çalışma koşulları başlangıç pH'ı 3, akım 100 mA ve reaksiyon süresi 60 dakika olarak bulundu. Bu koşullarda %99'un üzerinde renk giderimi ve %95 KOİ giderimi elde edilmiş ve toplam enerji tüketimi yaklaşık 25 kWh/kgKOİ olarak hesaplanmıştır.

**Anahtar kelimeler** Boyalı atıksu, Paslanmaz çelik anot, Peroksi koagülasyon

### Abstract

In this study, the geometric process (GP) model is considered in order to calculate the debugging and testing costs of a software product. Under the assumption of the GP model, the debugging and testing costs of the software product are obtained depending on the first and second moment functions of the GP. It is observed that the values of the first and second moment functions of the process must be known in order to calculate the debugging and testing costs. At the same time, the calculation of moment functions also depends on both the distribution of the first interarrival time of the GP and the estimates of the model and distribution parameters. In this study, the proposed debugging and testing costs are calculated for the data set containing 136 failure times of a real-time command and control system. For this dataset, it has been shown in previous studies that the GP with gamma distribution can be proposed as a model. Under gamma distribution assumption, the maximum likelihood estimates of the model parameters are obtained. Using the estimates of the model parameters, the first and second moment functions of the GP are calculated with the help of the numerical methods proposed for these functions. Finally, the debugging and testing costs are obtained for the data set.

**Keywords:** Dyed wastewater, Stainless steel anode, Peroxy coagulation

\* Dilek GÜMÜŞ, dilek.gumus@gmail.com

## 1. Giriş

### 1.1. Introduction

Çeşitli endüstrilerden kaynaklanan su kirliliği küresel bir çevre sorunudur. Tekstil endüstrisi en çok su kullanan ve dolayısıyla en çok atıksu üreten endüstrilerin başında gelmektedir. Boyar madde ve pigment üretimi, dünya genelinde yıllık olarak 700.000 tonun üzerindedir (Nidheesh vd., 2018). Boyalar başta tekstil olmak üzere, gıda, kozmetik, deri, kağıt, plastik ve ilaç gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Tüm bu sektörlerde üretim esnasında oluşan atıksuların etkin ve ekonomik bir şekilde arıtılması ve konsantre bir şekilde ortaya çıkan boya kirliliğinin giderilmesi şarttır. Aksi takdirde boyalı atıksular alıcı ortamdaki ışık geçirgenliğini azaltır ve bu durumda fotosentetik aktivite olumsuz etkilenir. Bununla birlikte boyar maddeler sucul ortamlardaki canlılar ve insanlar için toksik ve kanserojendir (Pekey, 2016). Yaygın olarak bilindiği üzere, özellikle biyolojik prosesler gibi geleneksel arıtma işlemlerinin kullanıldığı prosesler düşük bozunma verimliliği göstermiştir (Rodríguez-Narváez vd., 2021). Bu nedenle çeşitli etkin arıtma yöntemleri geliştirmek için halen çalışmalar devam etmektedir. Bunlar arasında en çok ilgi çeken yöntemlerden biri kirlenici giderimindeki etkinliği, düşük maliyeti, çok yönlülüğü ve kompakt uygulama kolaylığı ile elektrokimyasal arıtım yöntemleridir.

Elektrokimyasal arıtım yöntemlerinde, kirlenicilerin giderimi doğrudan ya da dolaylı oksidasyon yöntemi ile gerçekleşir. Doğrudan anodik oksidasyon prosesinde, anot yüzeyine adsorbe edilen kirleniciler anodik elektron transferi ile okside edilirler. Dolaylı oksidasyon prosesinde, elektrokimyasal olarak üretilen ozon, hidrojen peroksit, hipoklorit/klor gibi güçlü oksitleyiciler sayesinde kirlenici degradasyonu olur (Rajkumar & Palanivelu, 2004).

Fenton prosesi, klasik Fenton reaksiyonu yoluyla güçlü bir oksidasyon potansiyeline sahip hidroksil radikalinin (OH<sup>•</sup>) üretilmesine dayanır (Reaksiyon 1). Fenton reaktiflerinden H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ya da Fe<sup>+2</sup> elektrokimyasal olarak üretildiğinde sırasıyla, Elektro-Fenton (EF) ya da Anodik-Fenton (AF) olarak adlandırılır. Her iki reaktifin de elektrokimyasal olarak üretildiği sistemler Peroksi-koagülasyon (PC) işlemi olarak adlandırılır. PC, Fenton reaksiyonu için sürekli olarak demir (II) sağlayabilen demir veya paslanmaz çelikten yapılmış bir anot kullanan elektro Fenton prosesine dayalı bir arıtma prosesidir. PC kirlenicileri hem oksidasyon gücüyle hem de adsorpsiyon ve çökeltme yoluyla giderebilen birleşik bir prostestir (Ren vd., 2018).



Karbonlu malzemelerin katot yüzeyinde basit havalandırma ile elektrolitik hidrojen peroksit oluşumunda etkili oldukları bulunmuştur (Kumar vd., 2018). Hidrojen peroksit, asidik çözeltilerde genellikle karbon bir katot yüzeyinde oksijenin iki elektronla indirgenmesiyle elektrojenleştirilir (Reaksiyon 2) veya oksijen alkali bir çözeltide aşağıdaki reaksiyonu verir (Reaksiyon3) (Zarei vd., 2010).



Sonrasında, çözeltideki demir iyonlarını yeniden oluşturmak için ferrik iyonlar (Fe<sup>+3</sup>) katotta Fe<sup>+2</sup>'ye indirgenir (Reaksiyon 4). Fazla Fe<sup>+3</sup> iyonları ise Fe(OH)<sub>3</sub> olarak çökeltmek kirlenici giderimine katkıda bulunur (Nayebi vd., 2021).



Genellikle, peroksi-koagülasyon işleminde üretilen H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> miktarı, anottaki demir iyonu oluşumundan daha düşüktür. Bu durum, kirlenicilerin pıhtılaştırılarak uzaklaştırılmasına dayanan elektrokoagülasyon işleminde olduğu gibi ortam pH'ında bir artışa neden olur. Bu nedenle, peroksi-koagülasyon sürecinde, kirlenicilerin uzaklaştırılmasından hem pıhtılaşma hem de bozunma birlikte etkindir (Kumar vd., 2018). Bu prosteste azo boyalar (do Vale-Júnior vd., 2018) tekstil atıksuları (Ghanbari & Moradi, 2015) ve çeşitli endüstriyel atıksularla ilgili çalışmalar yapılmış olmakla beraber diğer elektrokimyasal proseslere göre peroksi-koagülasyon yönteminin literatürdeki çalışmaları oldukça kısıtlıdır (Zhou vd., 2020).

Bu çalışmada, peroksi-koagülasyon prosesi ile dört farklı boya karışımını içeren sentetik atıksudan renk ve KOİ giderimi incelenmiştir. Elektrot malzemesi olarak paslanmaz çelik anot ve grafit katot kullanılmıştır. KOİ ve renk giderimini etkileyen temel işletme parametrelerinden olan uygulanan akım, çözelti pH'ı ve reaksiyon süresi gibi en temel faktörler değerlendirilmiş ve elektrokimyasal prosesin verimlilik ve enerji tüketimi hesaplanmıştır. Deneysel parametrelerin optimizasyonunda Taguchi deneysel tasarım metodu kullanılmıştır. Düşük maliyetli ve kaliteli tasarım çözümleri öneren Taguchi yönteminin atıksu arıtımında kullanımı oldukça yaygındır (Davila vd., 2011). Deneysel veriler analiz edilerek sistemin verimliliği değerlendirilmiştir. ANOVA parametrelerin önceliğini ve proses üzerindeki etkinliğini kontrol etmek için kullanılır.

## 2. Materyal ve metod

### 2. Material and method

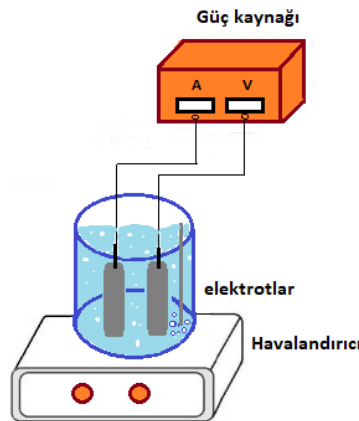
Bu çalışmada kullanılan boyalı atıksu Anilin Mavisini, Fast Green, Kristal Viyole ve Malaşit Yeşili olmak üzere her biri 10 mg/L konsantrasyonunda dört farklı boya karışımından elde edildi. Analiz için kullanılan tüm kimyasallar Merck'ten satın alınmıştır. Grafit elektrot ticari olarak satın alındı. Paslanmaz çelik elektrot sanayiden bir endüstriden temin edildi. Elektrokimyasal oksidasyon deneyleri, 200 mL atıksu kapasitesi olan silindirik bir cam reaktörde gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Peroksi-koagülasyon işleminde anot elektrot malzemesi olarak 62 mm x 10mm x 0.5mm boyutlarında paslanmaz çelik levha elektrot kullanıldı. Kullanılan elektrotun etkin yüzey alanı yaklaşık 12,5 cm<sup>2</sup> olarak hesaplandı. Anot ve katot elektrotlar paralel olarak yerleştirildi ve birbirinden yaklaşık 2.5 cm uzaklıktaydı. Çalışmalar dijital bir güç kaynağı (Gw instek GPS-3303. 0–30 V. 0-3 A aralığında) kullanılarak gerçekleştirildi. Yapılan deneylerde çözeltinin pH değeri 0.1 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> kullanılarak istenilen değere ayarlandı. Sentetik atıksuyun iletkenlik değeri 0.05 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> kullanılarak 3000 µs/cm olarak ayarlandı. Elektrokimyasal reaktöre boyalı atıksu eklendikten ve başlangıç koşulları oluşturulduktan sonra güç kaynağı başlatıldı. Katotta hidrojen peroksit üretimini desteklemek ve sisteme gerekli oksijeni sağlamak için piyasadan temin edilen bir hava pompası kullanıldı. Belirlenen süre tamamlandığında düşük pH'ta çalışılan deneylerin numunelerde analizlerde herhangi bir girişimi önlemek için 1 M Ca(OH)<sub>2</sub> kullanılarak numunelerin pH'ı 8'in üstüne yükseltildi ve ortamdaki demirin çöktürülmesi sağlandı. Daha sonra numuneler süzülerek renk ve KOİ ölçümleri yapıldı.

Örneklerin KOİ ve renk parametreleri için % giderim verimliliği aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\%giderim = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \quad (6)$$

C<sub>0</sub> ve C<sub>t</sub>, sırasıyla elektrokimyasal arıtmadan önce ve sonra atıksudaki KOİ ve renk konsantrasyonlarını gösterir.

Karışık boyalı atıksuyun dalga boyu taramasında en yüksek absorbans değeri 620 nm dalga boyunda elde edildi. Numunelerin KOİ ve rengi, HACH LANGE DR3900 UV-vis spektrofotometre kullanılarak analiz edildi. Çözeltilerin pH'sı, bir HANNA HI 8424 pH metre kullanılarak ölçüldü. İletkenlik değeri, bir iletkenlik ölçer HANNA Instruments HI8819 kullanılarak ölçülmüştür. 15 mg/L ile 150 mg/L O<sub>2</sub> aralığında KOİ tayini için küvet testi (Hach Lange GmbH. Berlin. Almanya) LCK 314 kullanılarak yapılan spektrofotometrik yöntem kullanıldı.



Şekil 1. Elektrokimyasal düzenek  
Figure 1. Electrochemical apparatus

## 2.1. Enerji tüketimi

### 2.1. Energy consumption

Sistemin enerji tüketimi aşağıdaki formüllerle hesaplanmıştır (7) and (8).

$$kWh/kgKOİ = \frac{I \cdot voltaj \cdot t}{\Delta KOİ \cdot V} \quad (7)$$

$$kWh/m^3 = \frac{I \cdot voltaj \cdot t}{V} \quad (8)$$

I; akım (A), V; çözelti hacmi, t; süre ve  $\Delta KOİ$  çözültideki KOİ degradasyonu.

## 2.2. Taguchi deneysel tasarım yöntemi

### 2.2. Taguchi experimental design method

Taguchi yöntemi ile ortogonal dizilere dayalı deney tasarımı planlanmıştır. Deneysel tasarımı hazırlamak için MINITAB yazılım programı kullanıldı. pH (A), akım yoğunluğu (B) ve reaksiyon süresi (C) olmak üzere üç değişken, Tablo 1' de gösterilen üç farklı seviyede seçilir. Kullanılan üç seviye ve işletim parametreleri literatüre ve ön deneylere dayalı olarak seçilmiştir. Tasarımda önerilen 9 deney ( $L_9$ ) (OA), her sütun çiftinin olası tüm seviye kombinasyonlarına sahip olduğu ortogonal bir dizi içerir. Deneysel olarak %KOİ ve %renk giderimi gözlemlendi ancak çıktı yanıtı olarak %KOİ giderimi kullanıldı. Uygun bir ortogonal dizi tasarım tablosu (Tablo 2) tasarlanmış ve değişken sayısına ve düzey sayısına göre seçim Tablo 1'de gösterilmiştir. Deneyin optimum koşulunu belirlemek için Taguchi yöntemi, S/N oranı kullanılmıştır. S/N oranı özellikleri üç seçenek sunar: ne kadar küçükse o kadar iyidir, nominal en iyisidir ve ne kadar büyükse o kadar iyidir (Mythilishri vd., 2021). Bu çalışmada “ne kadar büyükse o kadar iyidir” seçeneği kullanılmıştır.

**Tablo 1.** Deney tasarımının seçilen faktörleri ve seviyeleri  
*Table 1. Selected factors and levels of experimental design*

Faktör	Birim	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>
Çözelti pH		3	5	8
Akım	mA	50	100	150
Reaksiyon süresi	dakika	15	60	120

**Tablo 2.** Taguchi deneysel dizaynı ( $L_9$ ) (OD)  
*Table 2. Taguchi experimental design ( $L_9$ ) (OD)*

Deney no	pH	Akım (mA)	Reaksiyon süresi (dk)
1	3	50	15
2	3	100	60
3	3	150	120
4	5	50	60
5	5	100	120
6	5	150	15
7	8	50	120
8	8	100	15
9	8	150	60

### 3. Bulgular ve tartışma

#### 3. Results and discussion

#### 3.1. Taguchi deney tasarımı yöntemi ile elektrokimyasal sistemin optimizasyonu ve proses parametrelerinin etkileri

##### 3.1. Optimization of electrochemical system and effects of process parameters with Taguchi experimental design method

Paslanmaz çelik ve grafit elektrotlar yardımıyla karışık boyalı atıksuyun elektro koagülasyon prosesi ile arıtılmasında % KOİ giderim verimliliği yanıt değerleri olarak kullanılmıştır. Sistemin renk giderim performansı ilk 15 dakikadan itibaren tüm deneyler için %90'ın üzerindedir. Bu nedenle sistem verimliliği KOİ giderim performansı üzerinden değerlendirilmiştir. Daha sonra tüm deneyler için enerji tüketim miktarları hesaplanmıştır. KOİ ve renk giderimi yüzdeleri ve Sinyal/gürültü (S/N) oranları Tablo 3'te verilmiştir. Peroksi-koagülasyon prosesi optimizasyonunda parametrelerin etkileri Şekil 2' de sunulmuştur. Çalışılan parametrelerin süreçteki katkısı varyans analizi ile değerlendirilmiştir. S/N oranı arttıkça KOİ giderim yüzdesi artar ve bunun tersi söz konusu iken KOİ giderim verimi azalır. Bu durumda, en yüksek S/N oranına sahip seviye, optimum sistem parametreleri seviyesini belirtir. Tablo 3'te görüldüğü gibi, maksimum KOİ giderim verimleri, ilk pH seviyesinde (3), akım ikinci seviyesinde (100 mA) ve reaksiyon süresi de ikinci seviyesinde (60 dakika) elde edildi.

**Tablo 3.** Elektrokimyasal proseste Taguchi L<sub>9</sub> OD deneysel tasarımında boyalı atıksuda KOİ ve renk giderim yüzdeleri ve S/N oranları

**Table 3.** COD and color removal percentages and S/N ratios in dyed wastewater in Taguchi L<sub>9</sub> OD experimental design in electrochemical process

No	pH	Akım (V)	Süre (dk)	% Giderim renk	% Giderim KOİ	S/N
1	3	50	15	97,80	76,74	37,70
2	3	100	60	99,28	94,26	39,49
3	3	150	120	98,09	90,70	39,15
4	5	50	60	93,15	73,08	37,28
5	5	100	120	93,53	79,77	38,04
6	5	150	15	90,04	72,56	37,21
7	8	50	120	98,71	80,23	38,09
8	8	100	15	94,48	75,99	37,61
9	8	150	60	99,02	84,77	38,56



**Şekil 2.** Peroksi-koagülasyon prosesi optimizasyonunda parametrelerin etkileri

**Figure 2.** Effects of parameters on peroxy-coagulation process optimization

Genellikle, peroksi-koagülasyon süreci üzerindeki muhtemel etki ve mekanizmaların oluşumunda çözeltilinin pH'ı önemli bir rol oynar. Deneylerde 3,0, 5,0 ve 8,0 olmak üzere 3 farklı pH değeri üzerinden planlama

yapıldı. Bulgular, peroksi-koagülasyon prosesinde en iyi giderim veriminin pH 3,0'te olduğunu gösterdi. Elektrokoagülasyon ve elektrooksidasyon proseslerinin beklenen birleşik etkisi bu pH değerinde elde edildi. Bu durum, çalışılan proseste asidik koşullarda pıhtılaşmadan daha baskın kirletici giderme mekanizmasının bozunma olduğunu belirtmiştir. Literatürde benzer bulgulardan bahsedilmektedir. [Venu ve arkadaşları \(2016\)](#) tarafından yapılan son araştırma, peroksi-koagülasyon prosesinde kirleticilerin bozunması için optimum çözelti pH'ı 3 olarak bildirilmiştir. Asidik pH değerindeki daha yüksek giderim yüksek oksidasyon ürünleri ve OH radikalleri üretimi ile ilişkilendirilmektedir ([Salari vd., 2009](#)).

Uygulanan akımın proses üzerindeki etkisini belirlemek için 50, 100 ve 150 mA olmak üzere 3 farklı akım denemesi yapıldı. Optimum akım yoğunluğunun belirlenmesi elektrokimyasal arıtma sisteminde hem kirletici giderimi açısından hem de ekonomik etkinlik açısından önemli bir parametredir. Akımın artması ile üretilen H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve Fe<sup>+2</sup> miktarının artması ve böylelikle boyalı çözültide renk ve KOİ giderim verimlerinin artması beklenir. Akım optimum değerden yüksek olduğunda, KOİ giderimi kayda değer bir oranda iyileşmez. Bu, daha yüksek akım değerlerinde sistemdeki Fe<sup>+2</sup> konsantrasyonunun artması ve fazla Fe<sup>+2</sup>'nin ise hidroksil radikalleri ile reaksiyona girerek Fe<sup>+3</sup> üretmesi ile açıklanabilir. Daha sonra fazla Fe<sup>+3</sup>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ile reaksiyona girerek OH radikallerinden daha zayıf bir oksitleyici tür olan hidroperoksil radikalini (HO<sub>2</sub>) üretir. Ayrıca daha yüksek akımlarda O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> üretimi ile rekabet eden H<sub>2</sub>O'ya indirgenecektir ([Ren vd., 2018](#)). Uygulanan akımın artması anottan demir salınımını arttırdığı için elektroliz süresi ile çözelti pH'ında hızlı bir artışa neden olur. Bu durumda pıhtılaşma, Fenton reaksiyonundan daha baskın kirletici giderme mekanizması haline gelir. Bu durum, reaksiyonları uygulanan daha düşük akımda yürüterek çözülebilir. Düşük akım, anottan demir salınımını düzenler ve pH artış hızını geciktirir. Böylece kirleticilerin çoğu degradasyon yöntemi ile giderilmektedir ([Nidheesh, 2018](#)). Akım yükseldikçe enerji maliyetleri de aynı oranda artacaktır. Deneysel sistemde optimum akım olarak 100 mA belirlenmiştir.



Elektrokimyasal proseslerde elektroliz süresi arıtma sisteminin performansını etkileyen önemli bir parametredir. En yüksek S/N oranının 60 dakikada elde edildiği görülmektedir. Bu nedenle, 60 dakikalık reaksiyon süresi KOİ'nin gideriminde iyi bir sonuç verdiği için optimum süre olarak kabul edilmiştir.

ANOVA sonuçları Tablo 4'te sunulmuştur. R<sup>2</sup> değeri %97,9 hesaplanmıştır. Görüldüğü gibi ANOVA ile hesaplanan p değerleri doğrultusunda başlangıç pH değeri (p: 0,043 <0,05 olduğu için) çalışılan elektrokimyasal sistemde istatistiksel olarak anlamlı ve etkili bir parametre olduğu anlamını taşımaktadır ([Bhagawative & Shivayogimath, 2021](#)).

Analiz sonucunda peroksi-koagülasyon prosesinde 60 dk elektroliz süresinde, başlangıç pH değeri 3, Akım 100 mA değerinde %92,81 KOİ giderimi ve 39,35 (S/N) oranı belirlenmiştir. Belirlenen koşullar için doğrulama deneyi gerçekleştirilmiş ve %95 KOİ giderimi elde edilmiştir. Elde edilen giderim oranının tahmin edilenle tutarlı olması model parametrelerinin etkisini tanımlamakta son derece başarılı olduğunun göstergesidir.

**Tablo 4.** Peroksi-koagülasyon prosesinde karışık boya gideriminin ANOVA çalışması

**Table 4.** ANOVA study of mixed dye removal in the peroxy-coagulation process

Kaynak	df	Adj SS	Adj MS	F	P
pH	2	221,037	110,518	22,43	0,043
Akım(A)	2	80,566	40,283	43,313	0,109
Süre(dk)	2	151,868	75,934	15,41	0,061
Hata	2	9,854	4,927		-
Toplam	8	463,325	-	-	-

### 3.2. Enerji tüketimi

#### 3.2. Energy consumption

Tüm deneylerdeki enerji tüketimi zamana, voltaja ve akıma bağlı olarak kWh/m<sup>3</sup> ve kWh/kgKOİ şeklinde hesaplanarak Tablo 5'te sunulmuştur. Bununla birlikte optimum koşullar için gereken enerji tüketimi de tabloda sunulmuştur. Optimum koşullarda tüketilen enerji miktarı 4,10 kWh/m<sup>3</sup> ve 25,09kWh/kgKOİ olarak hesaplanmıştır.

**Tablo 5.** Deneylerdeki enerji tüketimleri  
*Table 5. Energy consumption in experiments*

No	I (A)	Voltaj	t (h)	E(Wh)	Enerji tüketimi (kWh/m <sup>3</sup> )	ΔCOD	kWh/kgKOİ
1	0,05	2,40	0,25	0,03	0,15	132,0	1,14
2	0,1	8,20	1,00	0,82	4,10	162,1	25,29
3	0,15	9,00	2,00	2,7	13,50	156,0	86,54
4	0,05	4,20	1,00	0,21	1,05	125,7	8,35
5	0,1	11,1	2,00	2,22	11,10	137,2	80,90
6	0,15	13,3	0,25	0,50	2,49	124,8	19,98
7	0,05	4	2,00	0,40	2,00	138,0	14,49
8	0,1	9,2	0,25	0,23	1,15	130,7	8,80
9	0,15	12,9	1,00	1,93	9,68	145,8	66,36
Deney	0,1	8,2	1,00	0,82	4,10	163,4	25,09

### 4. Sonuçlar

#### 4. Conclusions

Yapılan çalışmada, peroksi-koagülasyon prosesinde maksimum KOİ ve renk giderimini bulabilmek için sistemi etkileyen faktörleri optimize etmek amacıyla L9 (OA) ile Taguchi deneysel tasarımı kullanılmıştır. Tasarım parametrelerinin optimum koşulları başlangıç pH'ı (pH 3), akım (100mA) ve reaksiyon süresi (60 dakika) olarak belirlenmiştir. Deneysel %KOİ giderim verimliliği %95 ve tahmin edilen %KOİ giderim verimliliği %92,81 olarak bulunmuştur. Optimum koşullar için tahmin ve deneysel veriler birbiriyle son derece uyumluydu. Laboratuvar ölçekli peroksi-koagülasyon prosesinin enerji tüketimi optimum koşullarda 25,09kWh/kgKOİ olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada Taguchi deneysel tasarım tekniğinin, az sayıda deneysel çalışma ile kısa sürede etkili olduğu söylenebilir. Elde edilen sonuçlar paslanmaz çelik ve grafit elektrotlar kullanarak uygulanan peroksi-koagülasyon prosesinin karışık boyalı atıksulardan renk ve KOİ gideriminde etkin olduğunu doğrulamaktadır.

oksi-koagülasyon prosesinin karışık boyalı atıksulardan renk ve KOİ gideriminde etkin olduğunu doğrulamaktadır.

#### Teşekkür

#### Acknowledgement

Bu çalışma için laboratuvar altyapısını kullanmama izin veren Sinop Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Biyoloji Bölüm Başkanlığına teşekkür ederim, Makalemin inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları katkılardan dolayı editör ve hakemlere teşekkür ederim.

#### Etik beyanı

#### Declaration of ethical code

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

**Çıkar çatışması beyanı***Conflicts of interest*

Yazar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

**Kaynaklar***References*

- Bhagawati, P. B., & Shivayogimath, C. B. (2021). Electrochemical technique for paper mill effluent degradation using concentric aluminum tube electrodes (CATE). *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 19(1), 553-564. <https://doi.org/10.1007/s40201-021-00627-8>
- Davila, J. A., Machuca, F., & Marrianga, N. (2011). Treatment of vinasses by electrocoagulation–electroflotation using the Taguchi method. *Electrochimica Acta*, 56(22), 7433-7436. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2011.07.015>
- do Vale-Júnior. E., da Silva. D. R., Fajardo. A. S., & Martínez-Huitle. C. A. (2018). Treatment of an azo dye effluent by peroxi-coagulation and its comparison to traditional electrochemical advanced processes. *Chemosphere*, 204, 548-555. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.007>
- Nidheesh, P. V. (2018). Removal of organic pollutants by peroxicoagulation. *Environmental Chemistry Letters*, 16(4), 1283-1292. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0752-5>
- Ghanbari. F., & Moradi. M. (2015). A comparative study of electrocoagulation, electrochemical Fenton, electro-Fenton and peroxi-coagulation for decolorization of real textile wastewater: electrical energy consumption and biodegradability improvement. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(1), 499-506. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.12.018>
- Kumar. A., Nidheesh. P. V., & Kumar. M. S. (2018). Composite wastewater treatment by aerated electrocoagulation and modified peroxi-coagulation processes. *Chemosphere*, 205, 587-593. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.141>
- Mythilishri. R., Kamalakannan. V. P., Saravanathamizhan. R., & Balasubramanian. N. (2021). Kinetic and residence time distribution modeling of tubular electrochemical reactor: analysis of results using Taguchi method. *Water Practice and Technology*, 16(1), 108-116. <https://doi.org/10.2166/wpt.2020.101>
- Nayebi. B., Ghalebizade. M., & Niavol. K. P. (2021). Removal of Acid Red 131 by Peroxi-Coagulation Using Stainless Steel and Aluminum Electrodes: a Comparative Study. *Water Conservation Science and Engineering*, 6(4), 201-211. <https://doi.org/10.1007/s41101-021-00114-z>
- Nidheesh. P. V., Zhou. M., & Oturan. M. A. (2018). An overview on the removal of synthetic dyes from water by electrochemical advanced oxidation processes. *Chemosphere*, 197, 210-227. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.12.195>
- Salari, D., Niaei, A., Khataee, A., & Zarei, M. (2009). Electrochemical treatment of dye solution containing CI Basic Yellow 2 by the peroxi-coagulation method and modeling of experimental results by artificial neural networks. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 629(1-2), 117-125. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2009.02.002>
- Pekey. H. (2016). Evaluation of electrochemical peroxidation (ECP) process variables for removal of co-complex dye using a central composite design. *Desalination and Water Treatment*, 57(21), 9845-9858. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1033466>
- Rajkumar. D., & Palanivelu. K. (2004). Electrochemical treatment of industrial wastewater. *Journal of hazardous materials*, 113(1-3), 123-129. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.05.039>
- Ren, G., Zhou, M., Su, P., Liang, L., Yang, W., & Mousset, E. (2018). Highly energy-efficient removal of acrylonitrile by peroxi-coagulation with modified graphite felt cathode: influence factors, possible mechanism. *Chemical Engineering Journal*, 343, 467-476. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.02.115>
- Ren. G., Zhou. M., Zhang. Q., Xu. X., Li. Y., Su. P., ... & Bouzek. K. (2019). Cost-efficient improvement of coking wastewater biodegradability by multi-stages flow through peroxi-coagulation under low current load. *Water research*, 154, 336-348. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.02.013>



- Rodríguez-Narváez, O. M., Picos, A. R., Bravo-Yumi, N., Pacheco-Alvarez, M., Martínez-Huitile, C. A., & Peralta-Hernández, J. M. (2021). Electrochemical oxidation technology to treat textile wastewaters. *Current Opinion in Electrochemistry*, 29, 100806.
- Venu. D., Gandhimathi. R., Nidheesh. P. V., & Ramesh. S. T. (2016). Effect of solution pH on leachate treatment mechanism of peroxicoagulation process. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 20(3), 06016001.
- Zarei. M., Niaei. A., Salari. D., & Khataee. A. R. (2010). Removal of four dyes from aqueous medium by the peroxi-coagulation method using carbon nanotube–PTFE cathode and neural network modeling. *Journal of electroanalytical chemistry*, 639(1-2), 167-174. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2009.12.005>
- Zhou. X., Hou. Z., Lv. L., Song. J., & Yin. Z. (2020). Electro-Fenton with peroxi-coagulation as a feasible pre-treatment for high-strength refractory coke plant wastewater: Parameters optimization, removal behavior and kinetics analysis. *Chemosphere*, 238, 124649. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2009.12.005>

## YAZAR REHBERİ

### 1. KAPSAM ve GENEL BİLGİ

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi (GUFBD), Gümüşhane Üniversitesi'nin yayın organıdır. Dergi kapsamında bütün Fen, Teknoloji, Mühendislik, Tarım ve Mimarlık Alanlarında daha önce başka yerlerde yayınlanmamış, özgün, araştırma makaleleri, derlemeler ve editöre mektuplar yayınlanır (Anket çalışmaları dergimizin konu kapsamına uygun değildir).

Dergi bilimsel ve hakemli bir dergi olup, Ocak, Nisan, Temmuz ve Ekim aylarında olmak üzere yılda dört kez çevrimiçi ortamda yayımlanır.

Derginin amacı araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin bilimsel yayına dönüştürülmesi, ulusal ve uluslararası indekslere girerek evrensel bilime katkı sağlamaktır.

### 2. YAYIN DİLİ ve ANLATIM

Dergide yayınlanacak tüm yazılar için yayın dili Türkçe ve İngilizce'dir. Anahtar kelimeler alfabetik sıralamaya uygun olarak verilir. İngilizce anahtar kelimeler (Keywords) ise yine bu sıralama dikkate alınarak yazılır.

Makale içerisinde yazar tarafından gerçekleştirilen çalışmalara yönelik (Deneysel çalışmalar, analizler vb) anlatımlarda üçüncü şahıs kullanılmaya özen gösterilmelidir.

### 3. ELEKTRONİK ORTAMDA BAŞVURU

Dergi ile ilgili tüm yazışmalarda DergiPark tarafından sağlanan arayüz kullanılmalıdır. Dergi yazım kurallarına uygun olarak hazırlanmış makaleler, basılı kopyaya gerek olmaksızın, Ulakbim Dergipark üzerinden <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gumusfenbil/> adresi kullanılarak gönderilmelidir. Dergiye makale göndermek isteyen yazarların yazım kuralları ile birlikte "Gönderi Kontrol Listesi"ndeki her maddeyi de kontrol etmeleri gerekmektedir. Makaledeki bilgilerin doğruluğunun sorumluluğu yazar(lar)a aittir.

Yayınlanacak makalelerde, araştırma ve yayın etiğine uygunluk esastır. "Makale Gönderimi ve Telif Hakkı Devir Formu" doldurulup bütün yazarlar tarafından imzalanmalıdır. Yayın ile ilgili işlemler bu formun tesliminden sonra başlar. Bu formun farklı kopyaları başka şehirlerde yaşayan yazar(lar) tarafından ayrı ayrı imzalanıp gönderilebilir. Dergi ana sayfasında yer alan "Etik İlkeler ve Yayın Politikası" yazarlar tarafından önemle dikkate alınmalıdır.

Hayvanların veya zararlı maddelerin kullanıldığı araştırmalarda "Etik Kurul İzin Belgesi"nin makaleye eklenmesi gerekir. İnsanların denek olarak kullanıldığı araştırma sonuçlarını içeren makalelerde yazar(lar), "insan denemeleri üzerinde yetkili kurul" etik standartlarına ve gözden geçirilmiş Helsinki bildirgesi 1983'e uygunluğunu belgelemeleri gerekir.

#### 4. DEĞERLENDİRME SÜRECİ

Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi'ne iletilen yazılar öncelikle dergi baş editörünün yönlendireceği alan editörü tarafından konu başlığı ve anahtar kelimelere dayanılarak biçimsel açıdan değerlendirilir. Ön kontrol aşamasında öncelikle intihal tespit yazılımları kullanılarak benzerlik raporları oluşturulur. Aday yayının benzerlik raporu toplamda %20 den az olmalı ve tek bir kaynaktan ise %4 oranından fazla olmamalıdır. Daha sonra incelenecek yayının dergi formatına uygun olup olmadığına karar verilir. "Makale Gönderimi ve Telif Hakkı Devir Formu" olmayan veya eksik olan aday yayınlar ile benzerlik oranı sınırlarını aşan aday yayınlar ön incelemeye alınmaz. Ön inceleme aşamasını geçen yazılar dergi baş editörü tarafından inceleme sürecinin gerçekleştirilmesi için ilgili alan editörüne yönlendirilir.

Alan editörü bilimsel içerik bakımından değerlendirilmek üzere aday yayını, konusuna uygun olarak en az üç hakeme yönlendirir. Hakem seçiminde öncelikle konu ile ilgili dergi yayın danışma kurulu üyelerinden ya da alanında uzman başka bir bilim insanından yararlanılır. Hakemler değerlendirmeleri sonucunda, uygun, düzeltilerek yayınlanabilir, düzeltildikten sonra tekrar görmek isterim, istediğim düzeltmelerin kontrolünü derginin uzman bilimsel ekibi tarafından yapılması uygundur veya yayınlanamaz şeklinde kararları verebilirler.

Düzeltilme istenen yazılarla ilgili olarak yazar gerekli düzeltmeleri yapar. Ayrıca katılmadığı hususlarla ilgili olarak gerekçeli yazısını dergiye gönderir.

Hakem kurulu tarafından farklı türde değerlendirilen yazılar için alan editörü kendi görüşünü de ekleyerek değerlendirmenin sonuçlandırılması için baş editöre iletir. Değerlendirmede son karar baş editöre aittir. Baş editör gerekli görürse yeni bir hakem tayin eder veya yazı ile ilgili kararını sonuçlandırır.

Tüm değerlendirmeler sonucunda kabul ya da red kararı gerekçeleri ile birlikte DergiPark üzerinden yazışmadan sorumlu yazara iletir.

Değerlendirme sonucu kabul kararı verilecek makaleler yazım ve dil editörüne yönlendirilerek ilgili makalenin yazım ve dil yönünden incelemesi ile dergi yazım kuralları açısından uygunluğu sağlanır. Kabul edilen makaleler dergi sekreteryası tarafından esasa bağlı kalınarak yayına uygun formata dönüştürülür.

Dergide yayımlanan makaleler başka hiç bir yerde yayımlanamaz veya bildiri olarak sunulamaz. Kısmen veya tamamen yayımlanan makaleler kaynak gösterilmeden hiçbir yerde kullanılamaz. Dergiye gönderilen makalelerin içerikleri özgün, daha önce herhangi bir yerde yayımlanmamış veya yayımlanmak üzere gönderilmemiş olmalıdır. Değerlendirmeye sunulacak çalışmaların bir başka dergiye gönderilmediği veya basılmadığı ön yazı ile belirtilmelidir.

Makale basım için kabul edilmezse “Makale Gönderimi ve Telif Hakkı Devir Formu” nun yasal bir önemi kalmaz ve hükümsüz olarak kabul edilir. Bu formun imzalanması ile yazarlar, makalenin “Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi” dergisi ve web sayfasında yayınlamasına ilaveten makalenin tamamı veya bir kısmının yasal olarak çoğaltılması ve dağıtılması hakkını Gümüşhane Üniversitesi’ne devrederek, kendi haklarından feragat etmektedirler.

## **5. MAKALE TÜRLERİ**

Dergide yayınlanan farklı yayın formatları ile ilgili bilgiler ve yazı türlerine göre yazarların dikkat etmeleri gereken hususlar şu şekildedir:

**5.1 Araştırma Makaleleri:** Türkçe Başlık, İngilizce Başlık, Yazarlar, Adresler, Türkçe Öz, Türkçe Anahtar Kelimeler, İngilizce Öz, İngilizce Anahtar Kelimeler, Giriş, Amaç, Gereç ve Yöntem, Bulgular, Tartışma ve Sonuçlar, gerekli ise Etik konular, Katkı Belirtme ve Teşekkür, Kaynaklar, Şekil ve Tablolarla ilgili açıklamalar içermelidir. Makale konunun uzmanları tarafından tekrarlanabilecek şekilde yeterli bilgiyi içermelidir. Bu tür makalelerde ana metin 3500-4000 kelime arası olmalı, kaynak sayısı 40’ı aşmamalıdır.

**5.2 Derlemeler:** Yazar(lar)ın uzmanlık alanında yapılmış eski araştırmaların derlenip eleştirel bir şekilde yorumlanıp ortaya yeni bir görüş ileri süren çalışmaları kapsmalıdır. Bu tür makale öneren yazar(lar)ın en az 10 SCI-Expanded makalesi bulunmalı ve bunların en az 5 tanesi derleme yaptığı alanda olmalıdır. Derlemeler, Türkçe Başlık, İngilizce Başlık, Yazarlar, Adresler, Türkçe Öz, Türkçe Anahtar Kelimeler, İngilizce Öz, İngilizce Anahtar Kelimeler, Giriş, Ana Bölümler, Alt Bölümler, Sonuç, Katkı Belirtme ve Teşekkür, Kaynaklar, Şekil ve Tablolarla ilgili açıklamalar içermelidir. Ana metin en fazla 5000 kelime olup kaynak sayısında bir kısıtlama yoktur. Bu tür çalışmalar literatürle ilgili geniş bir tartışma ortaya koymalı ve kaynak sayısı en az 40 olmalıdır.

**5.3 Editöre Mektup:** Dergide yayınlanmış makaleler hakkında veya ilgili diğer konularda soru sormak, görüş bildirmek isteyenlerin yazıları bu türde değerlendirilir. Bu tür yazılarda kapsam ve etik kavramlar göz önünde bulundurulur. Ana metin en fazla 1000 kelime olup kaynak sayısı 10’u geçmemelidir.

## **6. MAKALENİN HAZIRLANMASI**

Dergiye değerlendirilmek üzere yayın gönderecek yazarların GUFBD makale şablonu dosyasını dikkate alarak yayınlarını hazırlamaları ve gerekli olan diğer belgelerle birlikte sisteme yüklemeleri gerekmektedir.