



# ADIYAMAN ÜNİVERSİTESİ

## Mühendislik Bilimleri Dergisi

Journal of Engineering Science  
of Adiyaman University

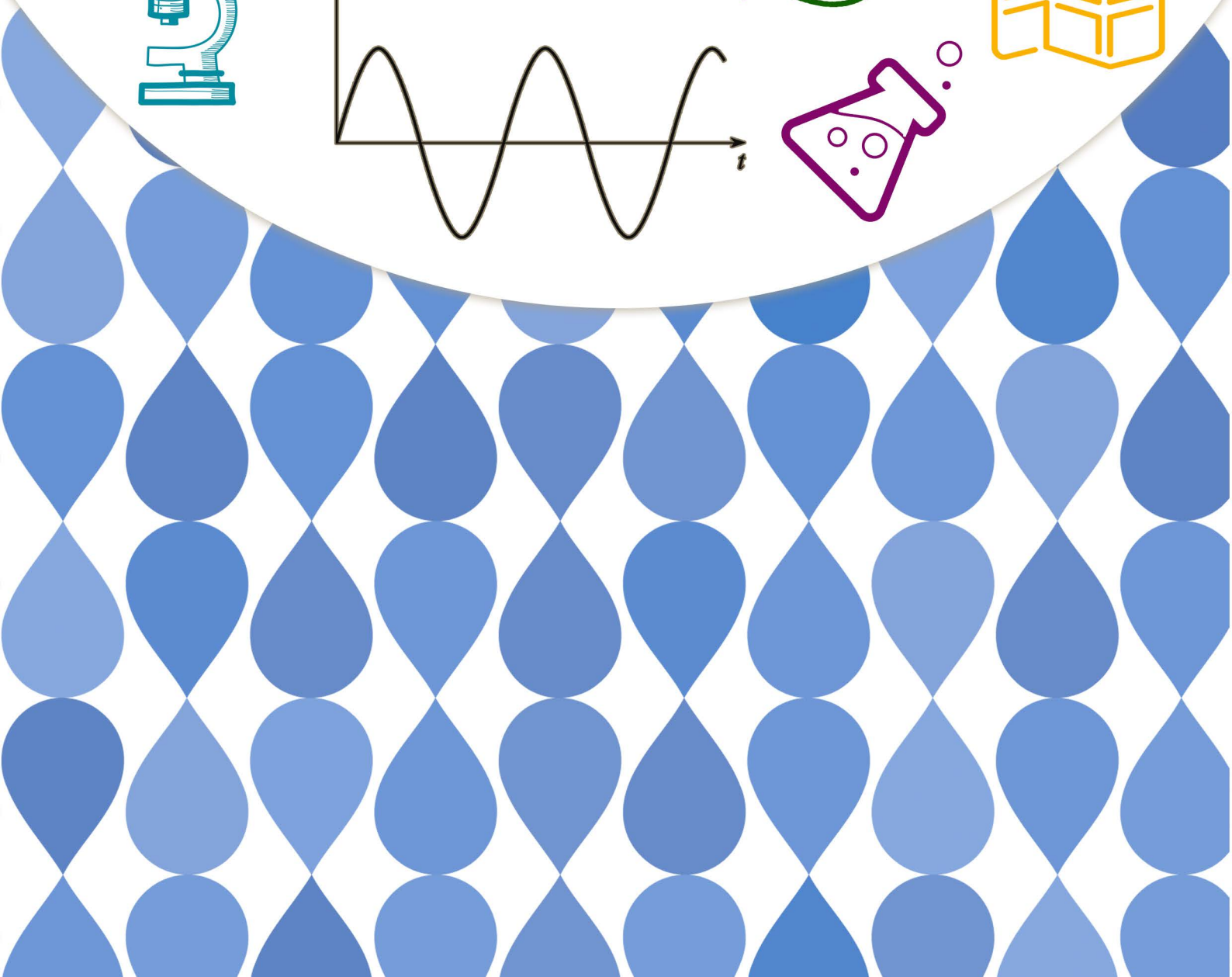
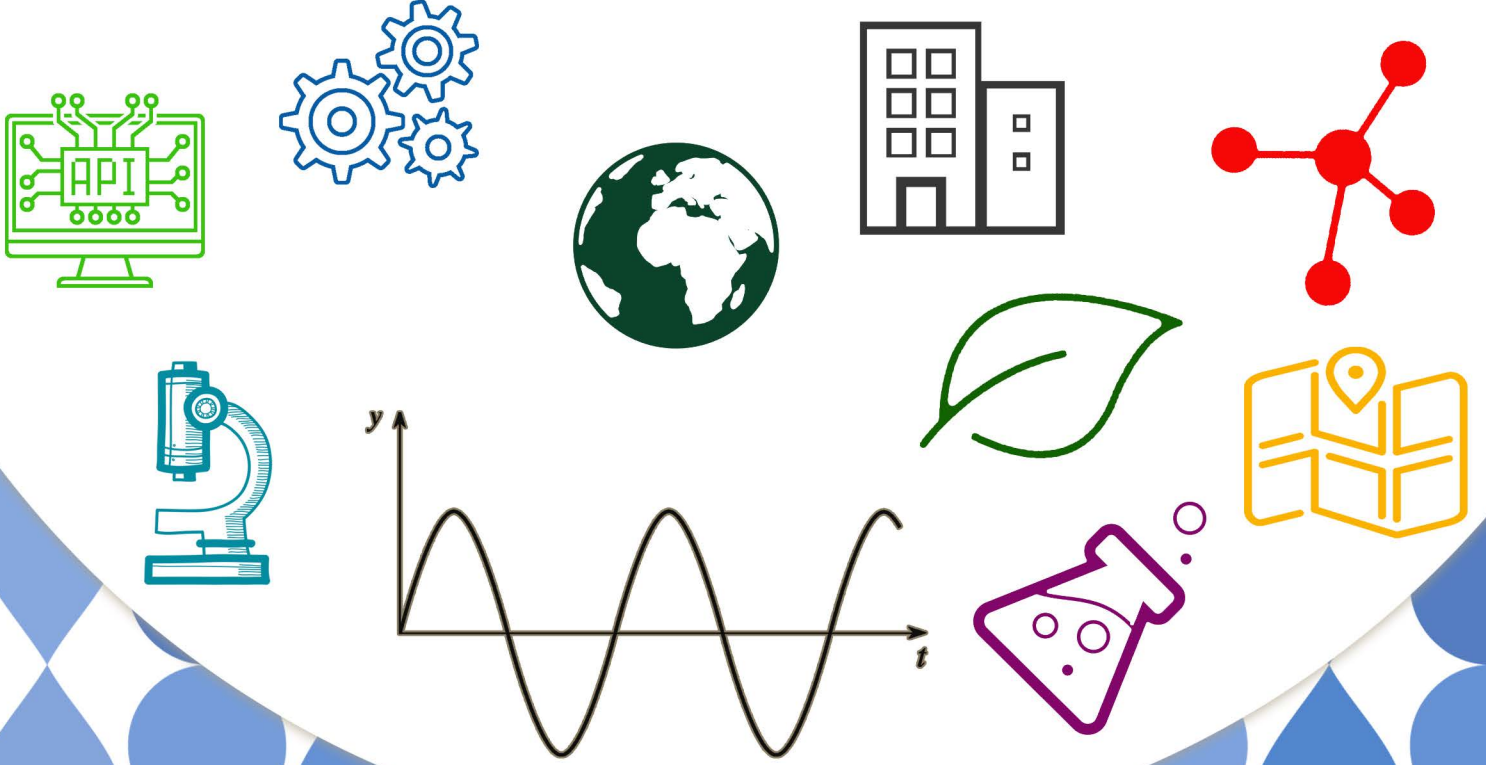
ISSN: 2149-0309

CİLT  
VOLUME **11**

SAYI  
ISSUE **23**

AĞUSTOS  
AUGUST

**2024**



# ADIYAMAN ÜNİVERSİTESİ

## Mühendislik Bilimleri Dergisi

### *Journal of Engineering Science of Adiyaman University*

ISSN: 2149-0309

#### **Dergi Yöneticisi**

Prof. Dr. Murat PALA

**Cilt:11 Sayı:23**

#### **Baş Editör**

Prof. Dr. Murat PALA / Baş Editör ve Alan Editörü

#### **Editörler**

Prof. Dr. Leon JOLOLIAN / Alan Editörü

Assist. Prof. Dr. Oksana KOPLAK / Alan Editörü

Prof. Dr. Tanju TEKER / Alan Editörü

Prof. Dr. Harun TÜRKMENLER / Alan Editörü

Doç. Dr. Şerif ÇİTİL / Alan Editörü

Doç. Dr. Miraç UÇKUN / Alan Editörü

Dr. Öğr. Üyesi Musa EŞİT / Alan Editörü

Arş. Gör. Abuzer DOĞAN / Alan, Mizanpaj ve Dil Editörü

#### **Yazışma Adresi / Correspondence**

Address - Adiyaman Üniversitesi

Mühendislik Fakültesi Dekanlığı

e-mail: mbd@adiyaman.edu.tr

Tel: 0 (416) 223 38 08

Fax: 0 (416) 223 38 09

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/adyumbd>

## YAYIN KURULU/ EDITORIAL BOARD

- 1-Prof.Dr. Şemsettin TEMİZ.....(İnönü Üniversitesi)
- 2-Prof.Dr. Murat DEMİR AYDIN ..... (Erzurum Teknik Üniversitesi)
- 3-Prof.Dr. İbrahim TÜRKMEN ..... (İnönü Üniversitesi)
- 4-Prof.Dr. Naci ÇAĞLAR.....(Sakarya Üniversitesi)
- 5-Prof.Dr. Abdulkadir ÇEVİK .....(Gaziantep Üniversitesi)
- 6-Prof.Dr. Seyhan FIRAT ..... (Gazi Üniversitesi)
- 7-Prof.Dr. Hasan OKUYUCU.....(Yıldırım Beyazıt Üniversitesi)
- 8-Prof.Dr. Eyüp DEBİK..... (Yıldız Teknik Üniversitesi)
- 9-Prof.Dr. Yusuf TUNÇTÜRK..... (Yüzüncü Yıl Üniversitesi)
- 10-Prof.Dr. Nevzat ARTIK ..... (Ankara Üniversitesi)
- 11-Prof.Dr. Hamit ADİN..... (Batman Üniversitesi)
- 12-Prof.Dr. Halef DİZLEK .....(Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi)
- 13-Doç. Dr. Yaşar AYZAZ ..... (İnönü Üniversitesi)
- 14-Prof. Dr. Aysun ŞENER .....(Adana Bilim Teknoloji Üniversitesi)

## DANIŞMA KURULU/ ADVISORY BOARD

- 1-Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ .....(İnönü Üniversitesi)
- 2-Prof. Dr. Ergün ERÇELEBİ.....(Gaziantep Üniversitesi)
- 3-Prof. Dr. İbrahim TÜRKMEN .....(İnönü Üniversitesi)
- 4-Prof. Dr. Naci ÇAĞLAR .....(Sakarya Üniversitesi)
- 5-Prof. Dr. Abdulkadir ÇEVİK.....(Gaziantep Üniversitesi)
- 6- Prof. Dr. Eyüp DEBİK.....(Yıldız Teknik Üniversitesi)
- 7- Prof. Dr. Sema Koç KAYHAN .....(Gaziantep Üniversitesi)

# ALAN EDİTÖRLERİ / SECTION EDITORS

|                                 |                              |   |                   |
|---------------------------------|------------------------------|---|-------------------|
| Prof. Dr. Murat Pala            | pala@adiyaman.edu.tr         | İnşaat Mühendisliği , Deprem, Betonarme   | 2021-Devam Ediyor |
| Prof. Dr. Atilla AKKOYUNLU      | akkoyun@boun.edu.tr          | Çevre Bilimleri ve Mühendisliği   | 2021-Devam Ediyor |
| Doç. Dr. Bayram YURT            | byurt@bingol.edu.tr          | Gıda Bilimleri ve Mühendisliği  | 2021-Devam Ediyor |
| Dr. Öğr. Üyesi Faruk KÜRKER     | fkurker@adiyaman.edu.tr      | Elektrik-Elektronik Mühendisliği,<br>Elektrik Enerjisi ve Güç Sistemleri,<br>Elektrik Tesisleri   | 2021-Devam Ediyor |
| Doç. Dr. Mehmet Fatih DİLEKOĞLU | dilekoglu@harran.edu.tr      | Çevre Bilimleri ve Mühendisliği,<br>Çevre Kimyası,<br>Su Kaynakları Yönetimi,<br>Su ve atıksu arıtma  | 2021-Devam Ediyor |
| Prof. Dr. Harun TÜRKMENLER      | hturkmenler@adiyaman.edu.tr  | Aritma Tesisi Tasarımı, Çevre Kimyası,<br>Su ve atıksu arıtma,<br>Toprak Kirliliği ve Kontrolü,<br>Yenilenebilir Enerji Kaynakları  | 2021-Devam Ediyor |
| Prof. Dr. İsmail BOZKURT        | ibozkurt@adiyaman.edu.tr     | Makine Mühendisliği, Enerji, Termodinamik,<br>Yenilenebilir Enerji Sistemleri   | 2021-Devam Ediyor |
| Prof. Dr. Kerim KÜÇÜK           | kerim.kucuk@deu.edu.tr       | Maden Mühendisliği,<br>Kaya Mekaniği ve Tahkimat,<br>Maden Tasarımı, İşletme ve Ekonomisi,<br>Madencilik Yöntemleri ve Maden Sistem Analizi,<br>Madenlerde İş Güvenliği ve İşçi Sağlığı | 2021-Devam Ediyor |
| Doç. Dr. Miraç UÇKUN            | m.uckun@adiyaman.edu.tr      | Gıda Bilimleri ve Mühendisliği  | 2021-Devam Ediyor |
| Dr. Öğr. Üyesi Musa EŞİT        | mesit@adiyaman.edu.tr        | Atmosfer Bilimleri, Hidroloji   | 2021-Devam Ediyor |
| Doç. Dr. Mustafa ASLAN          | maslan@harran.edu.tr         | Su ve atıksu arıtma,<br>Yenilenebilir Enerji Kaynakları   | 2021-Devam Ediyor |
| Doç. Dr. Senem TEKİN            | senemtekin@adiyaman.edu.tr   | Yer Bilimleri ve Mühendisliği,<br>Deprem, Uygulamalı Jeoloji  | 2021-Devam Ediyor |
| Doç. Dr. Şerif ÇİTİL            | scitil@adiyaman.edu.tr       | Makine Mühendisliği   | 2021-Devam Ediyor |
| Doç. Dr. Mihrimah ÖZMEN         | mihrimah@erciyes.edu.tr      | Endüstri Mühendisliği, Yöneylem Araştırması   | 2021-Devam Ediyor |
| Prof. Dr. Tanju TEKER           | tanjuteker@cumhuriyet.edu.tr | İmalat Mühendisliği, Malzeme Teknolojileri  | 2021-Devam Ediyor |
| Arş. Gör. Abuzer DOĞAN          | abuzerdogan@adiyaman.edu.tr  | Bilgisayar Mühendisliği   | 2021-Devam Ediyor |

# İÇİNDEKİLER- CONTENTS

- 1- *DERİN ÖĞRENME İLE ASFALT ÇATLAKLARININ TESPİTİNDE VERİ ARTIRIMI VE EVRİŞİMSEL BLOK SEÇİMİNİN ETKİSİ– “Araştırma Makalesi”*
- THE EFFECT OF DATA AUGMENTATION AND CONVOLUTIONAL BLOCK SELECTION ON THE DETECTION OF ASPHALT CRACKS WITH DEEP LEARNING– “Research Article”*
- Zahide TOPBAŞ, Özlem ERDAŞ ÇİÇEK, Şaban GÜLCÜ..... 172-189
- 2- *ANDROID MALWARE CLASSIFICATION USING BASIC MACHINE LEARNING METHODS – “Research Article”*
- TEMEL MAKİNE ÖĞRENİMİ YÖNTEMLERİNİ KULLANARAK ANDROID KÖTÜ AMAÇLI YAZILIM SINIFLANDIRMASI – “Araştırma Makalesi”*
- Tuğba PALABAŞ ..... 190-202
- 3- *GERÇEKTEN SANALA: 1 MWP GÜNEŞ SANTRALİNİN PVSYST SİMÜLASYON PROGRAMIYLA PERFORMANS ANALİZİ – “Araştırma Makalesi”*
- FROM REAL TO VIRTUAL: PERFORMANCE ANALYSIS OF A 1 MWP SOLAR POWER PLANT WITH PVSYST SIMULATION PROGRAM– “Research Article”*
- Zafer Ramazan ŞAHİN, Metin SALİHMUHSİN ..... 203-215
- 4- *MODELING CHANGES IN THE QUALITY ATTRIBUTES OF COUSCOUS COOKED WITH OHMIC HEATING – “Research Article”*
- OHMİK ISITMA İLE PİŞİRİLEN KUSKUSUN KALİTE ÖZELLİKLERİNDEKİ DEĞİŞİKLİKLERİN MODELLENMESİ – “Araştırma Makalesi”*
- Basri OMAC, Ali GOKSU, Erdem ISIK, Serdal SABANCI ..... 216-231
- 5- *ATMOSFERİK SALINIMLARIN İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ: HATAY İLİ ÖRNEĞİ – “Araştırma Makalesi”*
- ASSESSMENT OF THE EFFECTS OF ATMOSPHERIC OSCILLATIONS ON CLIMATE CHANGE: THE EXAMPLE OF HATAY PROVINCE – “Research Article”*
- Emir Cengiz DURGUN, Utku ZEYBEKOĞLU, Oğuz ŞİMŞEK ..... 232-247

6- TAŞKIN AFETLERİNİN ÖNCE DEN TAHMİN EDİLEBİLİRLİĞİ; GÜMÜŞHANE İLİNDE YAŞANAN AFETLERİNİN FARKLI YÖNTEMLERLE TAHMİN ÖRNEKLEMİ– “Araştırma Makalesi”

*PREDICTABILITY OF FLOOD DISASTERS; PREDICTION SAMPLE OF FLOODS IN GÜMÜŞHANE PROVINCE – “Research Article”*

Ufuk YÜKSELER, Ömerul Faruk DURSUN ..... 248-264

7- FARKLI EN/BOY ORANINA SAHİP DÖRTGENSEL KESİTLİ BİR KİRAL ÖKZETİK HÜCRESEL YAPININ TASARIM VE OPTİMİZASYONU – “Araştırma Makalesi”

*DESIGN AND OPTIMISATION OF A CHIRAL EUXETIC LATTICE STRUCTURE WITH RECTANGULAR CROSS-SECTION HAVING VARIOUS ASPECT RATIO– “Research Article”*

Cem YILMAZ, İlyas KACAR ..... 265-282

8- RSM-BASED MEASUREMENT OF CUTTING PERFORMANCE ON AL 7075 T6 AERO-STRUCTURAL ALLOY USING WEDM – “Research Article”

*AL 7075 T6 HAVACILIK ALAŞIMININ WEDM İLE KESME PERFORMANSININ RSM TABANLI ARAŞTIRILMASI – “Araştırma Makalesi”*

Levent UĞUR, Kutay AYDIN, Hakan KAZAN ..... 283-300

9- HİBRİT DERİN ÖĞRENME ALGORİTMALARI KULLANILARAK BİYOGAZ REFORM SÜREÇLERİNİN OPTİMİZASYONU: CNN-LSTM MODELİ İLE ÇIKTI PARAMETRELERİNİN TAHMİNİ – “Araştırma Makalesi”

*OPTIMIZATION OF BIOGAS REFORMING PROCESSES USING HYBRID DEEP LEARNING ALGORITHMS: PREDICTION OF OUTPUT PARAMETERS WITH CNN-LSTM MODEL – “Research Article”*

Saadin OYUCU, Münür Sacit HERDEM ..... 301-316

10- BAMBU LİFİNİN TAKIM ELBİSELİK KUMAŞLARDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN VE PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI– “Araştırma Makalesi”

*INVESTIGATION OF THE USABILITY AND PERFORMANCE OF BAMBOO FIBER IN SUIT FABRICS – “Research Article”*

Belkıs ZERVENT ÜNAL, Mert KUTGİ ..... 317-331

11- *EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF JET IMPINGING SOLAR AIR COLLECTOR WITH HEMISPHERICAL RIBS AND CIRCULAR TAPERED NOZZLE – “Research Article”*

*YARIM KÜRESEL PÜRÜZLÜ YUTUCU PLAKALI VE DAİRESEL KONİK NOZULLU JET ÇARPMALI HAVALI GÜNEŞ KOLLEKTÖRÜNÜN DENEYSEL VE SAYISAL ANALİZİ– “Araştırma Makalesi”*

İbrahim SANCAR, Hüsamettin BULUT, Refet KARADAĞ..... 332-351

12- *FARKLI ORANLARDA İZOOKTAN-DİZEL YAKITI İLE BESLENEN BİR RCCI MOTORUNUN MOTOR PERFORMANSI VE EMİSYONLARI ÜZERİNE DENEYSEL BİR ÇALIŞMA– “Araştırma Makalesi”*

*AN EXPERIMENTAL STUDY ON ENGINE PERFORMANCE AND EMISSIONS OF A RCCI ENGINE FUELLED WITH DIFFERENT RATIOS OF ISOCTANE-DIESEL FUEL– “Research Article”*

Tanju Müjdat FIRAT, Mutlu OKCU, Yasin VAROL ..... 352-362

13- *EFFICIENT BUSBAR SLIP DEFECTS DETECTION IN PHOTOVOLTAIC CELL ELECTROLUMINESCENCE IMAGES– “Research Article”*

*FOTOVOLTAİK HÜCRE ELEKTROLÜMİNESANS GÖRÜNTÜLERİNDE VERİMLİ BARA KAYMA KUSURLARININ TESPİTİ– “Araştırma Makalesi”*

Sahra ŞİMŞEK KAYA, Abdülkadir GÜMÜŞÇÜ, Nurettin BEŞLİ ..... 363-377

14- *VERMİKÜLİTİN ÇİMENTODA PUZOLANİK KATKI MADDESİ OLARAK KULLANILMASI – “Araştırma Makalesi”*

*USAGE OF VERMICULITE IN CEMENT AS A POZZOLANIC ADDITIVE – “Research Article”*

Sabit OYMAEL..... 378-386

# DERİN ÖĞRENME İLE ASFALT ÇATLAKLARININ TESPİTİNDE VERİ ARTIRIMI VE EVRİŞİMSEL BLOK SEÇİMİNİN ETKİSİ

Zahide TOPBAŞ<sup>1</sup>, Özlem ERDAŞ ÇİÇEK<sup>2\*</sup>, Şaban GÜLCÜ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, 42090, Türkiye

<sup>2</sup>Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Konya, 42140, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 17.03.2024 Kabul Tarihi/Accepted Date: 15.07.2024 DOI: 10.54365/adyumbd.1453460

## ÖZET

Petrolün rafine işlemi sonucu yan bir ürün olarak oluşan asfalt, yol çalışmalarında kullanılan en önemli malzemelerdendir. Asfalt yollarda trafik, iklim ve çevre, yapım ve tasarım hataları, malzeme hataları gibi etkenlerden dolayı deformasyonlar, ayrışmalar ve çatlaklar meydana gelmektedir. Bu bozulmalar asfalt yolun kalitesini düşürmekte ve kazalara sebep olmaktadır. Bu çalışma, onarım ve altyapı iyileştirmelerinin sağlanması için çatlaklar gibi asfalt hasarlarının tespitini iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında, Mendeley Data'nın "Asfalt Çatlak Veri Seti" üzerinde eğitilmiş bir derin öğrenme modelini kullanarak, çatlak görüntüleri %96'yı aşan bir doğruluk oranıyla sınıflandırılmıştır. Bu araştırma, derin sinir ağlarının endüstriyel uygulamalarda kullanımının ürün kalitesini iyileştirme potansiyelini ortaya koymaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Derin öğrenme, görüntü sınıflandırma, evrişimli sinir ağları, asfalt çatlağı tespiti, veri artırımı

## THE EFFECT OF DATA AUGMENTATION AND CONVOLUTIONAL BLOCK SELECTION ON THE DETECTION OF ASPHALT CRACKS WITH DEEP LEARNING

### ABSTRACT

Asphalt, formed as a byproduct through the refining process of oil, is one of the most crucial materials used in road construction. Deformations, separations, and cracks occur in asphalt roads due to factors such as traffic, climate and environment, construction and design errors, and material defects. These deteriorations reduce the quality of asphalt roads and lead to accidents. This study aims to improve the detection of asphalt damages such as cracks to enable repairs and infrastructure improvements. Within the scope of the study, crack images were classified with an accuracy rate exceeding 96% using a deep learning model trained on Mendeley Data's "Asphalt Crack Data Set". This research demonstrates the potential of using deep neural networks in industrial applications to improve product quality.

**Keywords:** Deep learning, image classification, convolutional neural networks, asphalt crack detection, data augmentation

## 1. Giriş

Ulaşım çeşitleri kullanım açısından değerlendirildiğinde en yüksek pay karayolu ulaşımına aittir. Karayollarında güvenliğin sağlanması, gereken kontrollerin sağlanarak kazaların azaltılması için altyapı inceleme çalışmaları oldukça önemlidir. Söz konusu çalışmaların sonucunda, problemlerin kök nedenlerinin tespit edilmesi bakım ve onarımın etkin bir şekilde yapılmasına olanak sağlayacaktır.

e-posta<sup>1</sup> : [zahidetopbas@gmail.com](mailto:zahidetopbas@gmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9733-8213>

\* e-posta<sup>2</sup> : [ozlem.erdascicek@erbakan.edu.tr](mailto:ozlem.erdascicek@erbakan.edu.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4019-7744> (Sorumlu Yazar)

e-posta<sup>3</sup> : [sgulcu@erbakan.edu.tr](mailto:sgulcu@erbakan.edu.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7714-8861>



Endüstri 4.0, 4. Sanayi Devrimi; nesnelerin interneti, internetin hizmetleri ve siber-fiziksel sistemlerden oluşan değerler bütünüdür [1]. Ülkemizde 2021 yılı itibari ile toplam karayollarının 68633 km. olduğu düşünüldüğünde devrimin getirdiği her bir verinin toplanması ve iyi bir şekilde izlenip analiz edilmesi modeli, karayolları üzerindeki etkisi zaman, maliyet ve insan gücü konusunda kaynak tüketimini azaltacaktır [2].

Asfalt, yol çalışmalarında kullanılan en önemli malzemelerden olmakla birlikte aynı zamanda havalimanı, demiryolu, liman inşaatı gibi alanlarda da kullanılmaktadır. Trafik yükü (araç trafiği titreşimleri, fren yükleri vb.), çevre ve iklim etkisi, işçilik hatası gibi etkenler yol üst yapısını bozarak çatlaklara, çukurlara ve çökmelere sebep olmaktadır [3]. Bu bozukluklar zamanında tespit edilemediğinde veya onarımında hata yapıldığında yol alt katmanlarının da bozulmasına, maliyetin artmasına ve trafik güvenliğinin azalmasına sebep olmaktadır [4].

Bu noktada bozuklukları zamanında gören, algılayan, işleyen, değerlendiren ve sonuç çıkaran mekanizmalara ihtiyaç vardır. En üst çatıda yapay zekâ dediğimiz bu kavram, insana özgü nitelikler olan akıl yürütme, anlam çıkarma, genelleme yapma, geçmiş deneyimlerden ders çıkarma gibi yetilerin bir makine tarafından yapılabilmesidir.

Son yıllarda gerçekleşen donanımsal alandaki gelişmeler yapay zekâ biliminin alt bilimi olan makine öğrenmesi yöntemlerinin de gelişmesini sağlamıştır. Çalışmamızda kullandığımız derin öğrenme ise makine öğrenmesi modellerinden yapay sinir ağlarının çok katmanlı mimarisidir [5].

Görüntü yani cihazlardan elde edilen sayısallaştırılmış görüntüler piksel adı verilen satır ve sütun olmak üzere bir birimlik alanlardır. Pikseller RGB yoğunluklarına göre 0 ile 255 arası değer olarak görüntüyü oluştururlar. Görüntü işleme ise çeşitli teknikler kullanarak görüntülerin iyileştirilmesi, değiştirilmesi, analiz edilmesidir. Görüntü işleme yöntemleri derin öğrenme teknikleri ile birlikte kullanıldığında nesne tanıma ve görüntülerin sınıflandırılması konularında iyi sonuçlar elde edilmektedir. Özellikle derin öğrenme modellerinden olan Evrişimsel Sinir Ağı (CNN) ile görüntülerdeki her bir pikselin kullanılması yerine, eklenen filtreler sayesinde öz nitelikler çıkarılarak ayırt edici noktaların tespit edilmesi sağlanmıştır [5]. Bu gelişmeler ürünlerin sınıflandırılması, kalite kontrol, üretimdeki kusur ve hataların tespiti, bozuk ürünlerin ayrıştırılması, hasar tespiti gibi birçok endüstriyel alanda fayda sağlamaktadır. Örneğin, çatlak ve çukur sayıları çok yüksek seviyelere ulaşan Birleşik Krallıkta geliştirmeleri devam eden, 2021 yılı sonunda kullanılmaya başlanması planlanan otonom onarım robotları sayesinde görüntü işleme ve yapay zekâ teknikleri ile yol üzerindeki çatlak ve çukurlar tespit edilerek otomatik olarak onarımı sağlanmaktadır [6].

Literatürde asfalt bozukluklarının tespitinde görüntü işleme ve makine öğrenmesi yöntemlerini kullanan çeşitli çalışmalar mevcuttur. Baygın ve diğerleri [7], asfalt yollardan kamera aracılığı ile elde edilen 3912 adet görüntü ile veri seti oluşturmuşlardır. Görüntülerdeki deforme olan asfaltın görüntü işleme ile tespiti sağlanarak sağlam ve arızalı olarak sınıflandırılması amaçlanmıştır. Asfalt görüntüleri ortaklama yöntemi ile boyutları azaltıldıktan sonra Yönlendirilmiş Degradelerin Histogramı (HOG) algoritması ile özellik çıkarımı yapılmıştır. Ki-kare yöntemi ile her bir görüntü için ağırlıklı özellikler belirlenerek özellik matrisi elde edilmiştir. Elde edilen özellik matrisi Destek Vektör Makinesi (DVM) ile sınıflandırılarak %96,5 doğruluk yakalanmıştır. Schmidt ve diğerleri [8] yaptıkları çalışmada, görüntülerdeki çukurların sınıflandırılabilmesi için HOG ile özellik çıkarımı yaptıktan sonra Yapay Sinir Ağı (YSA) ve DVM olmak üzere 2 adet sınıflandırıcı kullanılmıştır. Farklı veri boyutları ile yaptıkları deneylerde en yüksek veri boyutu ile DVM eğiterek %93 doğruluk değerini elde etmişlerdir. Shatnawi [9] dronlar aracılığı ile elde edilen görüntülerden nesne tanıma yöntemi ile yol çatlakları tespiti gerçekleştirmiştir. Süreçte sırası ile görüntü ön işleme ve iyileştirme, özellik çıkarma, sinir ağının modellenmesi ve sürecin doğrulaması aşamaları gerçekleştirilmiştir. YSA modeli kullanılmış ve %82,5 doğruluk oranı yakalanmıştır. Bazı örneklerin yanlış olarak tespit edilmesinin sebebinin görüntülerde bulunan ağaç dalı, şerit gibi nesnelerin oluşturduğu gürültü olduğu değerlendirilmiştir.

Daha güncel çalışmalarda derin öğrenme yöntemlerinin de asfalt kusurlarının tespitinde kullanıldığı görülmüştür. Mandal ve diğerleri [10] yollardaki çatlakların anında tespit edilebilmesini sağlamak için derin öğrenme modellerinden YOLO v2 kullanmışlardır. YOLO'nun performansını

artırmak için Microsoft COCO veri kümesi ağırlıkları kullanılarak transfer öğrenme gerçekleştirilmiştir. Her bir çatlak tipinin tahmin edilmesi için F1 puanı 0,7394, çatlak varlığının tahmini 0,8780 olarak elde edilmiştir. Cheng ve diğerleri [11] derin evrişimli sinir ağı modellerinden olan U-Net kullanılarak piksel düzeyinde yol çatlakları tespit sistemi önermişlerdir. U-Net ile görüntü bölütleme gerçekleştirildiğinde çatlak görüntülerin olduğu pikseller siyah, çatlak olmayan pikseller beyaz renklidir. Çalışma neticesinde çatlak tespitinde %86,09 F1 puanı ile büyük oranda başarı sağlanmıştır. Deveci ve diğerlerinin yaptığı çalışmada [12] yol anomalisinin tespiti için derin öğrenme mimarilerinden VGG-16 kullanılmıştır. VGG-16 modeli, farklı blok sayılarında (1, 2, 3) uygulanarak sistem performansı ölçülmüştür. En yüksek başarı %95,93 ile 3 bloklü sistemde elde edilmiştir. Liu ve diğerleri [13] asfalt çatlaklarının tespitinde gündüz, gece ve şafak vakti elde edilen görüntülerdeki farklılığı gidermek için orijinal görüntülerin yanı sıra kızılötesi görüntüleri de kullanarak derin ağlar eğitmişlerdir. En başarılı sonuçları 0,809 F1 puanı ile orijinal görüntülerde Öznetelik Piramidi Ağı (FPN) kullanarak elde etmişlerdir. Yine FPN mimarisi kullandıkları kızılötesi görüntülerde 0,642 F1 puanına ulaşabilmişlerdir. Orijinal ve kızılötesi görüntüleri birleştirildikleri ve füzyon adını verdikleri veri modelinde ise FPN mimarisi 0,806 F1 puanına sahip olmuştur. Que ve diğerleri [14] kaldırım çatlaklarını sınıflandırmak için Üretken Rekabetçi Ağları (GAN) ve değiştirilmiş bir derin öğrenme ağını (VGG) birleştiren bir yöntem önermişlerdir. Veri artırma adımı, GAN tabanlı bir model ile eğitim veri kümesini genişletmek için ek çatlak görüntüleri oluşturulmuştur. Çeşitli özellik çıkarım ağları karşılaştırılarak geliştirilmiş bir VGG modeli tasarlanmış ve farklı derin öğrenme yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, GAN destekli verilerle eğitilen modelin, daha yüksek doğruluk ve daha düşük kayıpla geleneksel yöntemleri kullananlardan daha iyi performans gösterdiğini göstermiştir. Geliştirilmiş VGG modeli, orijinal VGG modeline kıyasla doğrulukta %5,9'luk bir artış (%96,30) ve F1 skorunda %5,78'lik bir artış (%96,23) elde etmiştir. Matarneh ve diğerleri [15] kaldırım çatlaklarının tespiti için çeşitli optimizasyon ve transfer öğrenme yöntemlerini kullanmışlardır. Çalıştıkları veri setinde enine, boyuna ve çapraz çatlak olmak üzere 3 sınıf bulunmaktadır. DenseNet201 ve gri kurt optimizasyon yöntemlerini bir arada kullanarak %94,12 doğrulukla en başarılı sonucu elde etmişlerdir. Yılmaz ve diğerleri [16] deprem sonrası oluşan asfalt çatlaklarının tespiti için bir veri seti oluşturmuşlardır. Relieff optimizasyon yöntemini kullanarak eğittikleri derin öğrenme yöntemleri arasından en başarılı sonucu veren %80,32 doğruluk oranı ile VGG-16 olmuştur.

Sunulan bu çalışmada, Balaji ve diğerlerinin oluşturduğu "Asfalt Çatlak Veri Seti" [17] kullanılmıştır. Aynı veri setini kullanan Balaji ve diğerleri [18] asfalt çatlaklarını tahmin etmede en iyi performans gösteren makine öğrenimi modelini tespit ederek hesaplama gücü düşük cihazlarda kullanılabilir bir uygulama geliştirmeyi amaçlamışlardır. İlk olarak 448×448 piksel çözünürlüğünde olan orijinal veri seti ile eğitim sağlanmıştır. Ardından 224×224, 112×112 şeklinde çözünürlük azaltılarak veri setleri oluşturulmuştur. DVM ile Özellik Çantası (BoF), DVM ile HOG, MobileNets ve Inception-V3 transfer öğrenme tekniklerinin kullanıldığı derin öğrenme modelleri oluşturulan veri setleri ile eğitilerek 12 test gerçekleştirilmiştir. 448×448 çözünürlüklü görüntülerin kullanıldığı MobileNets tabanlı model %99,17 doğruluk oranı ile en iyi performansı göstermiştir. 112×112 çözünürlüklü görüntülerin kullanıldığı HOG+DVM modeli %66,69 doğruluk ile kötü performans göstermiştir. Modelleri eğitirken verinin bölünmesi ile ilgili bilgi verilmediği için verilen performans değerlerinin eğitim kümesine ait olduğu veya tüm verinin eğitim için kullanıldığı düşünülmektedir. Ji [19] tarafından gerçekleştirilen asfalt kaplamalardaki çatlakların tespitini sağlayan çalışmada veri setinin %20'si test, eğitim veri setinde %80'i eğitim, %20'si geçişim olmak üzere bölünme sağlanmıştır. MobileNet mimarisi transfer öğrenmenin tercih edildiği bu modelde aynı veri setine ait test kümesinde %93 doğruluk elde edilmiştir. Kumar ve diğerleri [20] asfalt ve köprü üzerindeki çatlakların tespiti için deneyler yapmış ve aynı veri setini kullanmışlardır. Geliştirilmiş LeNet5 ağı kullanarak "Asfalt Çatlak Veri Seti" üzerinde %82 doğruluk oranına ulaşmışlardır. Bu çalışmada derin öğrenme modellerinden Evrişimsel Sinir Ağları (Convolutional Neural Networks - CNN) kullanılmıştır. Özelliklerin çıkarılmasında transfer öğrenme tekniği kullanılmış ve VGG16 mimarisi ImageNet ağırlıkları ile eğitilmiştir. Özellikle 2018 yılından sonra yapılan çalışmalarda [10-20] derin öğrenme mimarilerini değiştirmeden veya katman ekleyip çıkararak kullanıldığı, özellik seçim ve optimizasyon algoritmalarının katkısıyla farklı modellerin oluşturulduğu gözlemlenmiştir. Söz

konusu çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada VGG16 mimarisinin bazı katmanları eğitilmiş, diğer katmanları orijinal ImageNet ağırlıkları ile kullanılmış ve evrimsel blok seçiminin performansa etkisi incelenmiştir [21-22]. Aynı zamanda veri artırımı uygulanarak başarımın yükseltilmesi hedeflenmiştir. Gerçekleştirilen testlerde %96 ve üzerinde test doğruluğu elde edilmiştir. Modelin geliştirilmesinde Python programlama dili ile Tensorflow ve Keras kütüphaneleri kullanılmıştır. Donanım kısıtlarından dolayı çalışmalar Google Colaboratory ortamında yapılmıştır.

## Materyal ve Metot

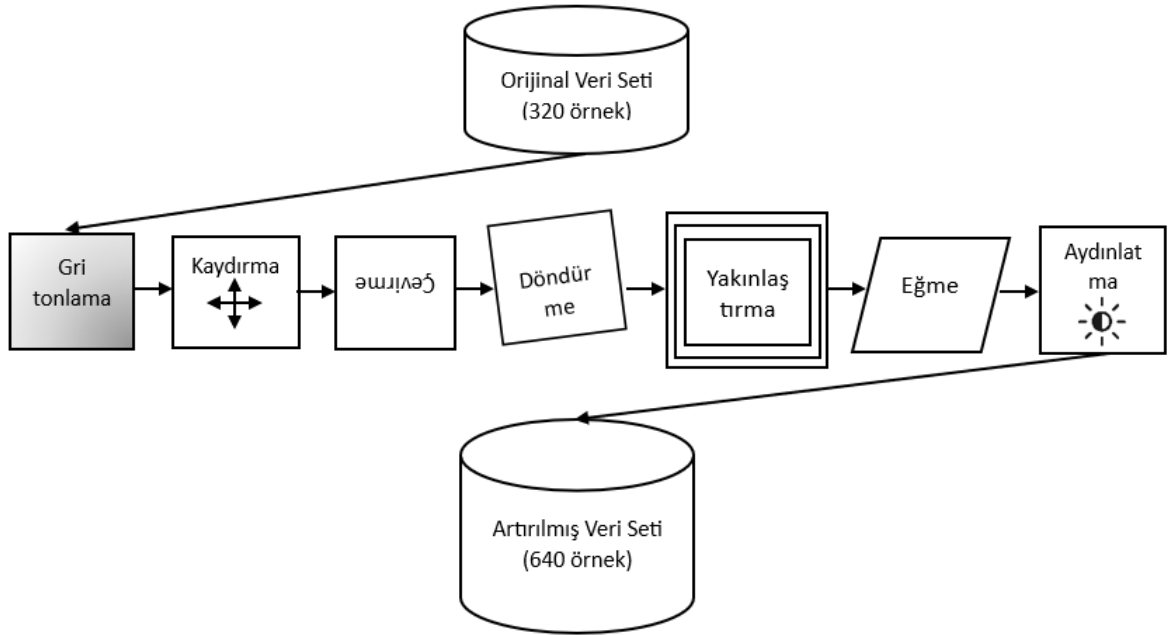
### 1.1. Veri Toplama

Veri seti, toplam 400 adet düzenli olarak dağıtılmış görsel verilerden oluşmaktadır [17-18]. Asfalt çatlaklarının bulunup bulunmamasına göre “Crack” ve “NonCrack” olmak üzere 2 sınıftan oluşmaktadır. Eğitim veri seti için 320 resim, geçerleme veri seti için 40 resim, test veri seti için 40 resim kullanılmıştır. Aynı zamanda mevcut eğitim veri setine veri artırımı ile elde edilen veri seti eklenerek eğitim veri seti için 320 “Crack”, 320 “Noncrack” olmak üzere 640 resim elde edilmiştir. Veri setindeki örnek sayısı az bulunduğu için eğitim-geçerleme-test verisi ayrımının yanı sıra 5-katlı çapraz geçerleme uygulanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. 5-katlı çapraz geçerlemede veri kümesi 5 eşit parçaya bölünür. Her deneyde bir parça test için diğer 4 parça ise eğitim için kullanılır ve deney 5 parça için tekrarlanır [23].

### 1.2. Ön İşleme ve Veri Artırımı

Görüntü verisinin artırılması, görüntülerin değiştirilmiş hallerini kullanarak veri kümesinin özellikle eğitim veri setinin yapay olarak boyutunun büyütülmesidir. Derin öğrenme sinir ağında veri sayısının artırılması modelin performansını ve genelleştirme yeteneğini artırır [24]. Çalışmada, modelin doğruluğunun artırılması ve küçük veri setlerinde oluşan aşırı öğrenmenin önüne geçilebilmesi amacıyla “Image Data Generator” kütüphanesine ait aşağıda belirtilen teknikler (Şekil 1) eğitim kümesine uygulanmıştır.

- Görüntüye ait 0-255 arasında bulunan pikseller 0-1 arasında boyutlandırılmıştır. Bu sayede hem çatlak yapılarının daha belirginleşmesi sağlanmış, hem de derin öğrenme mimarisinin çalışma hızı artırılmıştır.
- Görüntü boyutları sabit tutulurken, pikseller enine veya boyuna kaydırılmıştır.
- Piksel satır ve sütunlarının yerleri değiştirilerek görüntü çevrilmiştir.
- Görüntüler 20° açı ile döndürülmüştür.
- Görüntü piksel sayısı artırılarak ya da azaltılarak rasgele yaklaştırılmıştır ya da uzaklaştırılmıştır. İşlem gerçekleşirken interpolasyon yani değeri bilinmeyen piksellerin tahmin edilmesi yöntemi kullanılır. Yakınlaştırma aralığı 0,2 olarak belirlenmiş, dolayısıyla %80 yakınlaştırma, %120 uzaklaştırma arasında değişim sağlanmıştır.
- Rasgele parlaklık değiştirme tekniği ile görüntülerin farklı parlaklık seviyeleri artırılmıştır. 1,0'dan büyük değerler görüntüyü aydınlatırken, 1,0'den küçük değerler görüntüyü karartmaktadır.
- Görüntü 0,2 oranında eğimlendirilmiştir.
- Görseller kaydırılırken ve eğimlenirken oluşan bulanık bölgeler en yakın piksellerin değerine göre otomatik olarak doldurulmuştur.



Şekil 1. Veri artırım adımları

### 1.3. Derin Öğrenme ve Evrişimli Sinir Ağları (ESA-CNN)

Yapay zekâ, en genel anlamı ile insana ait düşünme, öğrenme, tanıma, karar verme, geçmişten ders çıkarma gibi yetilerin makinelerle kazandırılmasını amaçlayan bilimdir. Bu bilimin alt kümesi olan makine öğrenmesi, makinelerin matematiksel modeller sayesinde veri analizleri gerçekleştirerek öğrenmesini sağlayan bir teknolojidir. Çalışmamızda kullandığımız derin öğrenme yöntemi ise makine öğrenmesinin alt kümesidir ve insandaki sinir sisteminden ilham alan yapay sinir ağları algoritmasının çok seviyeli, derin yaklaşımıdır.

Evrişimli sinir ağları, çok katmanlı yapay sinir ağlarının bir türüdür. Derin öğrenme bilimine ait temel mimari olarak kabul edilir. ESA’nda giriş verileri alındıktan sonra katman erişimli eğitim gerçekleştirilir. Üretilen sonuç ile istenen sonuç arasındaki fark yani hata değeri geri yayılım algoritması (backpropagation) ile bütün ağırlıklar üzerinde dağıtılır. Her iterasyonda (epoch) ağırlıklar güncellenerek hata giderilmeye çalışılır [25-26].

Evrişim (convolution) katmanında resim üzerindeki düşük ve yüksek seviyeli özelliklerin çıkarılabilmesi için çok boyutlu filtreler uygulanarak özellik haritası (feature map) çıkarılır. Evrişim işleminin ardından ReLU aktivasyon fonksiyonu uygulanarak görüntü matrisi üzerindeki negatif değerler sıfırlanır. Burada farklı bir aktivasyon fonksiyonu da tercih edilebilir fakat performans olarak ReLU daha iyi sonuç verdiği için bu yöntem tercih edilmektedir. Ortaklama (pooling) katmanı evrişim katmanları arasına çoğunluk olarak eklenen bir katmandır. Bu katman sinir ağının doğru olarak karar verebilmesi için boyutları azaltarak önemli bilginin edinilmesini sağlar. Filtre kayma işleminde kapsadığı alan içindeki en büyük sayıyı aldığı anda maksimum ortaklama (max pooling), ortalamasını aldığı anda ortalama ortaklama işlemi gerçekleştirilir [27].

Özelliklerin çıkarılması işleminden sonra sınıflandırma işleminin gerçekleştirilmesi için evrişim ve ortaklama katmanından gelen matrisler düzleştirme (flattening) katmanına gelir ve tek boyutlu dizi haline dönüştürülür.

Tam bağlı (fully-connected) katmanı öğrenmenin gerçekleştiği katmandır. Çok katmanlı sinir ağı yapısına benzerdir. Çıktılar sınıflandırmanın sağlanması için aktivasyon fonksiyonuna verilir. Nesnelerin sınıflandırılması sağlanır [5, 27].

Yapmış olduğumuz çalışmada sinir ağı oluşturulurken özelliklerin çıkarılması sürecinde transfer öğrenme tekniği kullanılmıştır. Ardından ESA mimarisine uygun olarak sınıflandırmanın sağlanabilmesi için katmanlar sıralı olarak eklenmiştir. Sinir ağı modelimize ImageNet verileri ile ağırlıklandırılmış VGG16 mimarisi block5\_conv2, block2\_conv2 ve block1\_conv1 katmanından itibaren eğitilmiştir. Belirtilen katmanlardan önce gelen katmanlara ait parametrelere eğitim sırasında müdahale edilmemiştir. Modele düzleştirme katmanı uygulanmıştır. Ardından tahmin için tam bağlı katmanlar eklenerek model oluşturulmuştur.

VGG16 katmanlarından sonra modelimiz 128 ve 64 nörondan oluşan LeakyReLU ile aktive edilmiş 2 katmandan oluşmaktadır. Ardından 2 nörondan oluşan softmax ile aktive edilmiş çıkış katmanı gelmektedir. Bu aşamada kullanılan derin öğrenme mimarisi Şekil 2'de gösterilmektedir.

```
model.summary()
Model: "sequential"

```

| Layer (type)              | Output Shape      | Param #  |
|---------------------------|-------------------|----------|
| vgg16 (Functional)        | (None, 7, 7, 512) | 14714688 |
| flatten (Flatten)         | (None, 25088)     | 0        |
| dense (Dense)             | (None, 128)       | 3211392  |
| leaky_re_lu (LeakyReLU)   | (None, 128)       | 0        |
| dense_1 (Dense)           | (None, 64)        | 8256     |
| leaky_re_lu_1 (LeakyReLU) | (None, 64)        | 0        |
| dense_2 (Dense)           | (None, 2)         | 130      |

```

=====
Total params: 17,934,466
Trainable params: 17,934,466
Non-trainable params: 0

```

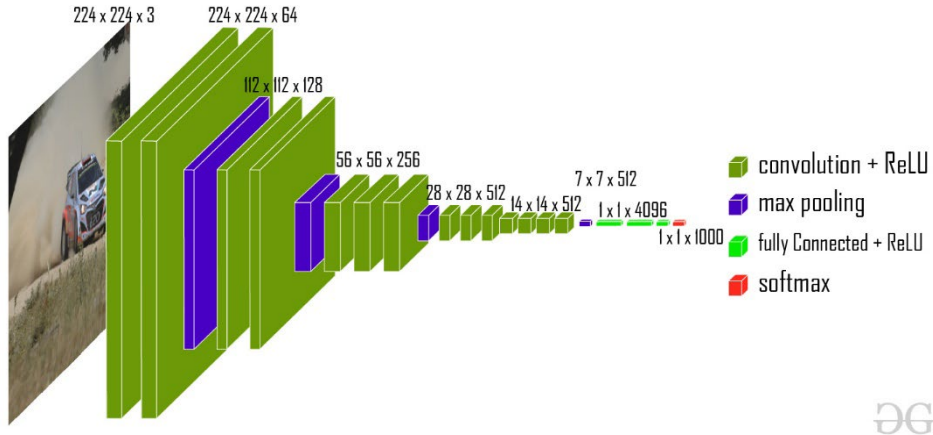
Şekil 2. Eğitim için hazırlanan model katmanları

#### 1.4. Transfer Öğrenme

Transfer öğrenme yaklaşımı, insanın öğrenme modelini örnek alır. Nasıl ki insan daha önce karşılaşmamış olduğu problemlerin çözümü sürecinde geçmiş deneyimlerinden faydalanır, derin ağlarda da rastgele ağırlıklarla eğitilmiş bir ağı ağırlıkları kullanılarak öğrenme gerçekleştirilir.

VGG-16 mimarisi 2014 yılında 1000 sınıfa ait 14 milyonun üzerindeki görüntünün sınıflandırılmasını içeren ImageNet adlı yarışmada %92,7 performans göstererek dikkatleri üzerine çekmiştir [28].

Yapmış olduğumuz çalışmada asfalt çatlak görüntülerinin yer aldığı veri kümesine transfer öğrenme tekniği uygulanmış ve ImageNet verisi ağırlıkları ile önceden eğitilmiş VGG-16 mimarisi (Şekil 3) kullanılmıştır. Görüntülerin giriş boyutları (224, 224, 3) olarak belirlenmiştir (Şekil 4).



Şekil 3. VGG-16 mimarisi (geeksforgeeks.com'dan alınmıştır)

▶ OZELLIK\_CIKARAN\_MODEL.summary()

📄 Model: "vgg16"

| Layer (type)               | Output Shape          | Param # |
|----------------------------|-----------------------|---------|
| input_1 (InputLayer)       | [(None, 224, 224, 3)] | 0       |
| block1_conv1 (Conv2D)      | (None, 224, 224, 64)  | 1792    |
| block1_conv2 (Conv2D)      | (None, 224, 224, 64)  | 36928   |
| block1_pool (MaxPooling2D) | (None, 112, 112, 64)  | 0       |
| block2_conv1 (Conv2D)      | (None, 112, 112, 128) | 73856   |
| block2_conv2 (Conv2D)      | (None, 112, 112, 128) | 147584  |
| block2_pool (MaxPooling2D) | (None, 56, 56, 128)   | 0       |
| block3_conv1 (Conv2D)      | (None, 56, 56, 256)   | 295168  |
| block3_conv2 (Conv2D)      | (None, 56, 56, 256)   | 590080  |
| block3_conv3 (Conv2D)      | (None, 56, 56, 256)   | 590080  |
| block3_pool (MaxPooling2D) | (None, 28, 28, 256)   | 0       |
| block4_conv1 (Conv2D)      | (None, 28, 28, 512)   | 1180160 |
| block4_conv2 (Conv2D)      | (None, 28, 28, 512)   | 2359808 |
| block4_conv3 (Conv2D)      | (None, 28, 28, 512)   | 2359808 |
| block4_pool (MaxPooling2D) | (None, 14, 14, 512)   | 0       |
| block5_conv1 (Conv2D)      | (None, 14, 14, 512)   | 2359808 |
| block5_conv2 (Conv2D)      | (None, 14, 14, 512)   | 2359808 |
| block5_conv3 (Conv2D)      | (None, 14, 14, 512)   | 2359808 |
| block5_pool (MaxPooling2D) | (None, 7, 7, 512)     | 0       |
| -----                      |                       |         |
| Total params:              | 14,714,688            |         |
| Trainable params:          | 14,714,688            |         |
| Non-trainable params:      | 0                     |         |

Şekil 4. ImageNet verisi ağırlıkları ile eğitilen VGG16 modeli

### 1.5. Aktivasyon Fonksiyonları

Bir sinir ağında nöronların giriş değerleri ile ağırlıklar çarpılır ve bias eklenerek çıktı elde edilir. Aktivasyon fonksiyonları üretilen çıktılar doğrusal yapıdan uzaklaştırılarak ve gerçeğe yakın olarak nasıl standardize edilebileceğini, nasıl bir değişimden geçmesi gerektiğini belirler. Modelimizde LeakyReLU ve softmax aktivasyon fonksiyonları kullanılmıştır.

Kullanılacak aktivasyon fonksiyonunun belirlenmesinde doğrusal olması, türevlenebilir olması, alt ve üst sınırlarının olması, monoton olarak artan ve azalan olması nitelikleri olumlu olarak etkilidir. Kullanacağımız fonksiyonları belirlerken bu kriterlere dikkat ederek seçim yaptık.

Fonksiyon türevi “0” olduğunda, geri yayılım esnasında parametreler güncellenmediği için öğrenme gerçekleşmez. Bu problem ölen ReLU olarak adlandırılır. Bu sorunla karşılaşmamak için fonksiyonlar incelenmiş ve tam bağlı katmanda Leaky ReLU fonksiyonu (Denklem 1) uygulanmıştır [29]. Burada  $k$ , sıfıra yakın küçük bir sayıdır. Öğrenmenin tüm değerler için gerçekleşmesi amaçlanmıştır.

$$Leaky\ RELU(x) = \max(x, kx) = \begin{cases} x, & \text{eğer } x > 0 \text{ ise} \\ kx, & \text{eğer } x \leq 0 \text{ ise} \end{cases} \quad (1)$$

Derin öğrenme modelimizde çıkış fonksiyonu olarak “softmax” kullandık. Bu aktivasyon fonksiyonu sayesinde “0” ile “1” aralığında olasılıksal olarak kayıp değeri üretilerek girdilerin hangi sınıfa ait olduğu belirlenir. Softmax kayıp değerini çapraz entropi (cross entropy) kullanarak hesaplar [30].

Bilginin kalitesinin ve doğruluğunun ölçülmesi için kullanılan yöntemlerden biri entropidir [31]. Entropi belirsizliğin ölçüsüdür ve düzensizlik anlamına gelir. Bilgi teorisinde entropi, bir olasılık dağılımından rasgele bir olayın olma olasılığının hesaplanabilmesi için bilgi ölçümüdür. Entropi denkleminde (Denklem 2)  $n$  olay sayısını ifade ederken  $p_i$  de  $i$ . olayın gerçekleşme olasılığını gösterir.

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \log(p_i) \quad (2)$$

Bir olayın olma olasılığı yüksek ise daha az şaşırtıcıdır ve düşük bilgiye sahiptir, olay her şeyin eşit olarak dağılımı gibi düşük olasılıklı bir olay ise çok şaşırtıcıdır ve yüksek bilgiye sahiptir. Sonuç olarak gerçekleşmesi beklenmeyen nadir olaylar daha bilgilendiricidir ve rasgele bir  $x$  değeri için bilginin hesaplanması,  $x$  değişkenine ait olayların olasılık dağılımını hesaplamak ile aynı şeydir. Çapraz entropi ise entropi temeline dayanan belirli bir rasgele değişken ya da olay kümesi için iki olasılık dağılımı arasındaki farkın ölçülmesini sağlayan yöntemlerden biridir.

### 1.6. Sinir Ağı Modelinin Bileşenleri ve Hiperparametreler

Modelin eğitim sürecini oluşturmamız için tanımlamamız gereken parametreler mevcuttur. Bu parametreler kayıp fonksiyonunun belirlenmesi, optimizasyon algoritmasının belirlenmesi, metrik değeri, yığın boyutu ve iterasyon sayısıdır.

#### 1.6.1. Kayıp Fonksiyonları

Sinir ağındaki son katmanda kayıp fonksiyonu tanımlanır. Kayıp fonksiyonları, sinir ağı modelini bir bütün olarak değerlendirerek her iterasyonda sonuç olarak bir kayıp değeri sunar. Kayıp değerinin büyüklüğüne göre eğitim sonucu elde edilen ağırlık ve bias parametrelerinin modelimiz için ne kadar uygun olduğu hakkında bilgi sahibi oluruz ve çalışmalarımıza yön veririz. Kayıp fonksiyonu problem tipine göre belirlenir.

Sınıflandırma problemleri için “kategorik çapraz entropi (categorical\_cross entropy)” veya “ikili çapraz entropi (binary\_crossentropy)” fonksiyonları seçilebilir. Çalışmada kullanılan veri “crack” ve “noncrack” olmak üzere 2 sınıf içerdiği için “ikili çapraz entropi” fonksiyonu seçilmiştir [30].

### 1.6.2. Optimizasyon Algoritmaları

Sinir ağı modelimizi oluştururken amacımız tahmin işleminin doğru olarak gerçekleştirilerek kayıp değerinin en düşük olduğu noktanın bulunmasıdır. Sinir ağında bu işlem geri yayılım algoritması (backpropagation) ile ağırlık değerlerinin önceki katmanlara yayılımı ile gerçekleştirilir. Her iterasyonda hatanın giderilmesi için yapılan bu işlemde ağırlıklar optimizasyon fonksiyonları ile değiştirilir. Optimize edici, öğrenme oranı (learning rate) parametresi ile öğrenme oranını belirler.

Yapmış olduğumuz çalışmada daha az salınımlı, daha hızlı ve tutarlı bir optimizasyon algoritması kullanılması tercih edildiği için Rmsprop (root mean square error propability) optimizasyon tekniği  $1e-5$  öğrenme sabiti ile birlikte kullanılmıştır [32-33].

### 1.6.3. Metrikler

Modelimizin eğitim sırasında nasıl bir performans gösterdiğini anlayabilmek ve her bir iterasyonda doğruluk ve kayıp değerlerini görebilmek için ‘accuracy’ parametresini seçtik. Doğruluk metriği, doğru tahmin edilen örnek sayısının toplam örnek sayısına oranı şeklinde tanımlanmıştır. Bu metrik model eğitilirken kullanılacaktır. Model performansının değerlendirilmesi sırasında kullanılacak ek metrikler “1.7. Model performansının değerlendirilmesi” alt bölümünde anlatılmıştır.

### 1.6.4. Yığın Boyutu (batch\_size)

Sinir ağı modelinin aynı anda ne kadar veriyi işleyebileceğinin belirlendiği hiperparametredir. Hata oranının düşürülmesi için her iterasyonda geriye dönük olarak gradyan (gradient descent) hesabı ile ağırlıklar güncellenmektedir. Veri sayısına göre hesaplama süresi değişim göstermektedir. batch\_size parametresini en küçük 1 olarak girdiğimizde modelimizin gürültüyü de öğrenmesine sebep oluruz. Bu şekilde “stochastic gradient descent” optimizasyon işlemini gerçekleştirmiş oluruz. Ters olarak boyutumuz büyük olduğunda ise aşırı öğrenme durumu oluşur. Yığın boyutu her bir iterasyondaki adım sayısı ile belirlenir. Adım sayısı 10 olarak belirlendiğinde 320 veri örneği için yığın boyutu 32 olarak belirlenmelidir. “2. Bulgular” bölümünde farklı deney kurulumları için kullanılan yığın boyutları belirtilmiştir.

### 1.6.5. Eğitim İterasyon Sayısı (epoch)

Öğrenme işleminin gerçekleşebilmesi için eğitimin tekrarlanarak hata değerinin düşürülmesi gerekmektedir. Tüm eğitim verisinin işlendiği bu tekrarlara epoch denilmektedir. Doğruluğun en yüksek olduğu yerde eğitim tamamlanacak şekilde epoch hiper parametre değeri ayarlanır.

## 1.7. Model performansının değerlendirilmesi

Asfalt çatlaklarının tahmin edilmesi için oluşturmuş olduğumuz modelin performansının değerlendirilmesi amacıyla doğruluk, kesinlik (precision), duyarlılık (recall), f-skor, ROC-AUC ve karışıklık matrisi (confusion matrix) metrik değerlerini elde ettik.

### 1.7.1. Karmaşıklık/Hata Matrisi



Karmaşıklık matrisi gerçek ve tahmin edilen sonuçların karşılaştırılabilmesi için kullanılır. Karşılaştırabilmek için TP (True-Positive), TN (True-Negative), FP (False-Positive), FN (False-Negative) değerlerini kullanır. Çalışmamız üzerinden tanımlayacak olursak “0” çatlak içeren görüntüleri, “1” çatlak olmayan görüntüleri göstermektedir [34].

Çatlak içermeyen bir görüntü hakkında çatlak olmadığı hakkında bir değerlendirme yapılıyorsa TP, gerçekte görüntü çatlak içermekte ancak tahmin yanlışsa FP olmaktadır. Gerçekte görüntü çatlak içermiyor ve tahmin doğru ise TN, gerçekte görüntü çatlak içermiyor ve tahmin yanlış ise FN şeklinde tanımlanır. Çizelge 1’i karmaşıklık matrisi üzerinden tanımlarsak, karmaşıklık matrisi üzerindeki değerler kullanılarak diğer metrik değerleri hesaplanır.

**Çizelge 1.** Karmaşıklık matrisi gösterimi

| <i>Tahmin / Gerçek</i> | <i>Noncrack</i> | <i>Crack</i> |
|------------------------|-----------------|--------------|
| <i>Noncrack</i>        | TP              | FN           |
| <i>Crack</i>           | FP              | TN           |

#### 1.7.2. Doğruluk

Doğru tahmin edilen örneklerin sayısının tüm örneklerin sayısına oranıdır.

$$\text{Doğruluk} = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN} \quad (3)$$

#### 1.7.3. Duyarlılık

Doğru tahmin edilen pozitif örneklerin sayısının gerçekteki pozitif örneklerin sayısına oranıdır.

$$\text{Duyarlılık} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (4)$$

#### 1.7.4. Kesinlik

Doğru olarak tahmin edilen pozitif örneklerin sayısının tüm pozitif olarak tahmin edilen örneklerin sayısına oranıdır.

$$\text{Kesinlik} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (5)$$

#### 1.7.5. F-Skor

Duyarlılık ve kesinlik değerlerinin harmonik ortalamasıdır. Modelin kesinlik ve duyarlılığının ölçüsüdür ve en az 0, en fazla 1 değerlerini alabilir.

$$F - \text{Skor} = \frac{2 \times \text{Duyarlılık} \times \text{Kesinlik}}{\text{Duyarlılık} + \text{Kesinlik}} \quad (6)$$

#### 1.7.6. Eğri Altındaki Alan (ROC-AUC):

ROC eğrisi altındaki alanı göstermektedir. AUC değerinin yüksek olması modelin pozitif ve negatif değerleri ne kadar doğru sınıflandırdığının ölçüsüdür [35].

## 2. Bulgular

Gerçekleştirilen deneylerde eğitilen katman sayısının model başarısına olan etkisinin gözlemlenebilmesi için özellik çıkarma aşamasında VGG16 mimarisinden faydalanılarak block5\_conv2 (Şekil 5), block2\_conv2 (Şekil 6) ve tüm katmanlar (Şekil 7) olmak üzere modeller belirlenmiştir. Şekil 3'te verilen modele göre block5\_conv2 katmanından başlayarak model oluşturduğumuzda eğitilen 2 evrişim, 1 ortaklama katmanı olmak üzere en az eğitilmiş model; block2\_conv2 katmanından başlayarak model oluşturduğumuzda eğitilen 10 evrişim, 4 ortaklama katmanına sahip model; block1\_conv1 katmanından başlamak üzere tüm katmanları kullandığımızda ise eğitilen 13 evrişim katmanı, 5 ortaklama katmanından oluşan en eğitilmiş model oluşturulmuştur. Eğitilen katman sayısı arttıkça eğitilebilir parametre sayısının da arttığı görülmüştür.

```
model.summary()
Model: "sequential"
-----
Layer (type)                Output Shape                Param #
-----
vgg16 (Functional)          (None, 7, 7, 512)          14714688
flatten (Flatten)           (None, 25088)               0
dense (Dense)                (None, 128)                 3211392
dense_1 (Dense)              (None, 64)                  8256
dense_2 (Dense)              (None, 2)                   130
-----
Total params: 17,934,466
Trainable params: 7,939,394
Non-trainable params: 9,995,072
-----
```

**Şekil 5.** VGG16 block5\_conv2 katmanı eğitilebilir parametre bilgisi

```
model.summary()
Model: "sequential"
-----
Layer (type)                Output Shape                Param #
-----
vgg16 (Functional)          (None, 7, 7, 512)          14714688
flatten (Flatten)           (None, 25088)               0
dense (Dense)                (None, 128)                 3211392
dense_1 (Dense)              (None, 64)                  8256
dense_2 (Dense)              (None, 2)                   130
-----
Total params: 17,934,466
Trainable params: 17,821,890
Non-trainable params: 112,576
-----
```

**Şekil 6.** VGG16 block2\_conv2 katmanı eğitilebilir parametre bilgisi

```

model.summary()

Model: "sequential"
-----
Layer (type)                Output Shape                Param #
-----
vgg16 (Functional)          (None, 7, 7, 512)          14714688
flatten (Flatten)           (None, 25088)              0
dense (Dense)                (None, 128)                3211392
dense_1 (Dense)             (None, 64)                 8256
dense_2 (Dense)             (None, 2)                  130
-----
Total params: 17,934,466
Trainable params: 17,934,466
Non-trainable params: 0
-----

```

**Şekil 7.** VGG16 tüm katmanlar eğitilebilir parametre bilgisi

Gerçek veri ve artırılmış veri ile eğitilen modelleri kullanan 6 farklı deney kümesi Çizelge 2’de verilmiştir.

**Çizelge 2.** Deney kümeleri

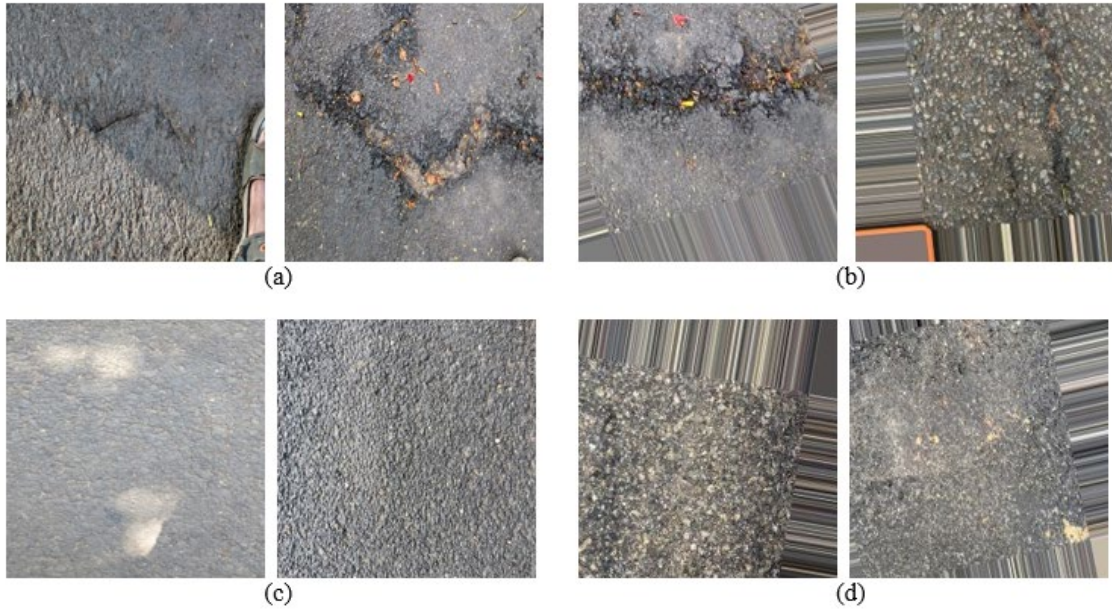
| No   | Özelliklerin çıkarılması (VGG16) | Veri kümesi       | Açıklama  |
|------|----------------------------------|-------------------|---|
| I.   | block5_conv2                     | Gerçek            | block5_conv2’den itibaren katmanlar eğitilmiştir. |
| II.  | block2_conv2                     | Gerçek            | block2_conv2’den itibaren katmanlar eğitilmiştir. |
| III. | block1_conv1                     | Gerçek            | Tüm katmanlar eğitilmiştir.                       |
| IV.  | block5_conv2                     | Gerçek+Artırılmış | block5_conv2’den itibaren katmanlar eğitilmiştir. |
| V.   | block2_conv2                     | Gerçek+Artırılmış | block2_conv2’den itibaren katmanlar eğitilmiştir. |
| VI.  | block1_conv1                     | Gerçek+Artırılmış | Tüm katmanlar eğitilmiştir.                       |

Eğitim verisi belirlenen modellere verilirken iterasyon (epoch) sayısı 3, eğitim için yığın boyutu gerçek veride 32 ve artırılmış veride 64, iterasyon başına adım sayısı (steps\_per\_epoch) 10, geçerleme için yığın boyutu 10, geçerleme adımları 3 olarak tanımlandığında eğitim verisi doğruluk oranı I için 0,8675, II için 0,8995 ve tüm katmanlar (III) için 0,9656 şeklinde sonuçlanmıştır. Eğitilebilir parametre sayısı arttığı müddetçe eğitimde doğruluk oranının arttığı gözlemlenmiştir (Çizelge 3). Buna karşın, tüm katmanlar kullanıldığında eğitim doğruluğu artarken test ve geçerleme verilerinin doğruluğunda azalma gözlenmiştir.

**Çizelge 3.** Gerçek veri ile eğitilen modellerin doğruluk değeri

| No   | Özelliklerin çıkarılması (VGG16) | Eğitim | Test | Geçerleme |
|------|----------------------------------|--------|------|-----------|
| I.   | block5_conv2                     | 0,8675 | 1,0  | 1,0       |
| II.  | block2_conv2                     | 0,8995 | 1,0  | 1,0       |
| III. | block1_conv1                     | 0,9656 | 0,98 | 0,969     |

Çalışmanın bu kısmında veri seti büyüklüğünün model başarımına olan etkisinin gözlemlenebilmesi için “Ön İşleme ve Veri Artırımı” başlığı altındaki işlemler gerçekleştirilmiştir. 320 eğitim verisinden oluşan veri seti artırılarak 640 “noncrack” ve “crack” etiketli eğitim verisi oluşturulmuştur. Yeni eğitim veri seti artırılan veri seti ve gerçek veri setinden oluşmaktadır. Test ve geçerlemede gerçek veri örnekleri kullanılmıştır. Şekil 8’de yeni veri setinden örnekler yer almaktadır. Artırılan eğitim verisi belirlenen modellere verilirken epoch değeri 3, eğitim için batch\_size 64, steps\_per\_epoch değeri 10, geçerleme için batch\_size 10, geçerleme adımları 3 olarak tanımlanmıştır. Veri sayısı artırıldıktan sonra elde edilen sonuçlar Çizelge 4’te sunulmuştur.

**Şekil 8.** Gerçek veri setinden çatlak örnekleri (a), artırılmış veri setinden çatlak örnekleri (b), gerçek veri setinden çatlak olmayan örnekler (c), artırılmış veri setinden çatlak olmayan örnekler (d)**Çizelge 4.** Artırılmış veri ile eğitilen modellerin doğruluk değeri

| No  | Özelliklerin çıkarılması (VGG16) | Eğitim | Test | Geçerleme |
|-----|----------------------------------|--------|------|-----------|
| IV. | block5_conv2                     | 0,8797 | 1,0  | 1,0       |
| V.  | block2_conv2                     | 0,9601 | 0,98 | 0,969     |
| VI. | block1_conv1                     | 0,9562 | 0,98 | 0,969     |

Çizelge 3 ve Çizelge 4'teki sonuçlar incelendiğinde veri sayısındaki artışın eğitim doğruluk değerini olumlu yönde etkilemesi beklenirken V numaralı deneyde olumlu yönde etkilediği VI numaralı deneyde ise etkisinin olmadığı görülmüştür. Hem eğitim hem de test verisine ait doğruluk değerleri incelendiğinde test doğruluğu değerinin eğitim doğruluğu değerinden büyük olduğu, dolayısıyla modelin ezberlemediği ve aşırı öğrenme denilen durumun olmadığı değerlendirilmiştir.

Çalışmanın devamında I, II ve III numaralı deneyler için model performansı "Model performansının değerlendirilmesi" başlığı altında açıklanan metrik parametreleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Çizelge 5 ve Çizelge 6'da eğitime tüm katmanlar dahil edildiğinde ve artırılmış veri modele verildiğinde modelin sınıflandırma başarısının (ROC-AUC) artması ya da değişmemesi beklenirken III ve VI numaralı modelde düştüğü gözlemlenmiştir.

**Çizelge 5.** Veri sayısı artırılmadan önce model performansı. P: Precision, R: Recall, F: F1-Score, RA: ROC-AUC, CM: Confusion Matrix şeklinde kısaltılmıştır.

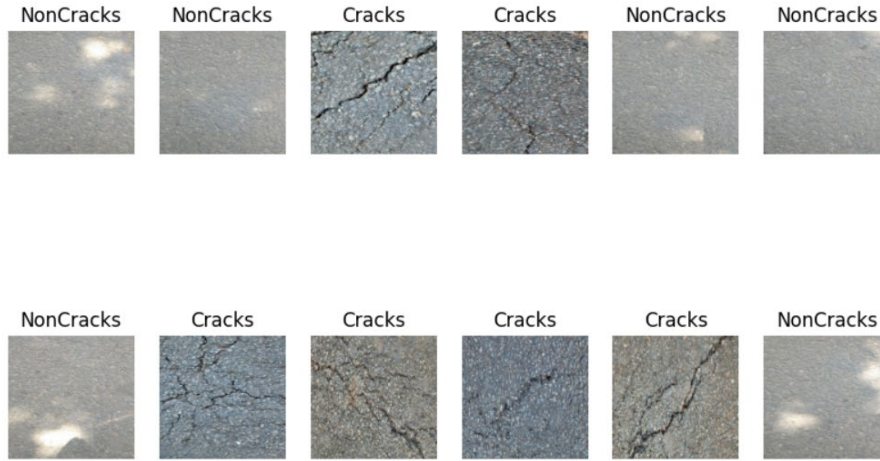
| No   | P   | R    | F    | RA    | CM                 |
|------|-----|------|------|-------|--------------------|
| I.   | 1.0 | 1.0  | 1.0  | 1.0   | [[20 0]<br>[0 20]] |
| II.  | 1.0 | 1.0  | 1.0  | 1.0   | [[20 0]<br>[0 20]] |
| III. | 1,0 | 0,95 | 0,97 | 0,975 | [[20 0]<br>[1 19]] |

**Çizelge 6.** Veri sayısı artırıldıktan sonra model performansı. P: Precision, R: Recall, F: F1-Score, RA: ROC-AUC, CM: Confusion Matrix şeklinde kısaltılmıştır.

| No  | P    | R   | F    | RA   | CM                 |
|-----|------|-----|------|------|--------------------|
| IV. | 1.0  | 1.0 | 1.0  | 1.0  | [[20 0]<br>[0 20]] |
| V.  | 0.95 | 1,0 | 0,97 | 0,95 | [[19 1]<br>[0 20]] |
| VI. | 0.95 | 1.0 | 0,97 | 0,95 | [[19 1]<br>[0 20]] |

Test veri kümesi üzerinde model çalıştırıldığında çatlak ve çatlak olmayan yolların doğru olarak tespit edildiği gözlemlenmiştir. Modelin tahmin performansının başarılı örnekleri Şekil 9'da verilmektedir.

Çalışmanın son aşamasında, veri seti derin öğrenme modelini eğitmek için yetersiz sayıda görülebileceği için 5 katlı çapraz geçişleme uygulanmıştır. Gerçek veri her biri 80 örnek ve gerçek ile artırılmış verilerin toplandığı diğer küme her biri 128 parça içerecek şekilde rasgele 5 parçaya ayrılmıştır. Artırılmış veri seti parçalara bölünürken gerçek ve artırılmış verilerin dengeli bir şekilde (eşit sayıda çatlak içeren ve çatlak içermeyen görüntü) dağıldığı gözlemlenmiştir. Çizelge 2'de belirtilen 6 farklı deney 5 katlı çapraz geçişleme kullanılarak uygulanmıştır. Çizelge 6'da sunulan sonuçlar incelendiğinde en iyi doğruluk derecesinin 0,9688 test doğruluğu ile II. model tarafından elde edildiği görülmektedir. Tüm katmanların eğitildiği III. model de 0,9594 test doğruluğu ile yakın bir sonuca ulaşmıştır. Ortalama eğitim sürelerine bakıldığında eğitilen parametre sayısı 2 katına çıktığında eğitim süresinin neredeyse 3 katına çıktığı görülmüştür.



Şekil 9. Asfalt çatlaklarının tahmini

Çizelge 6. Veri sayısı artırılmadan önce 5 katlı çapraz geçerleme performansı ve ortalama eğitim süresi

| No   | Özelliklerin çıkarılması (VGG16) | Eğitim | Test   | Ortalama eğitim süresi (sn) |
|------|----------------------------------|--------|--------|-----------------------------|
| I.   | block5_conv2                     | 0,9275 | 0,9156 | 616,2                       |
| II.  | block2_conv2                     | 0,9575 | 0,9688 | 1750,6                      |
| III. | block1_conv1                     | 0,9719 | 0,9594 | 1768                        |

Çizelge 7 incelendiğinde en iyi performansın 0,9656 test doğruluğu ile tüm katmanların eğitime katıldığı VI. model tarafından elde edildiği görülmektedir. Daha az katman ve parametre ile eğitilen IV ve V. modellerin sırasıyla 0,85 ve 0,932 test doğruluğu ile VI. modele kıyasla daha kötü performans elde ettiği gözlemlenmiştir. Şekil 8'e tekrar dönüldüğünde artırılmış verinin gerçek verinin değiştirilmiş hali olduğu görülmektedir. Kaydırma-döndürme-eğme işlemlerinden sonra boş kalan pikseller komşu piksellere benzetilerek doldurulmaktadır. İki veri grubu arasındaki farklılıkların ESA'nın görüntüden kaba özellikleri çıkaran ilk katman tarafından tespit edildiği, bu yüzden ilk katmanı eğitime dahil etmeyen IV ve V. modelin artırılmış veri ile yüksek başarı gösteremediği düşünülmektedir. Veri sayısı arttığı için eğitim süreleri de artmıştır.

Çizelge 7. Veri sayısı artırıldıktan sonra 5 katlı çapraz geçerleme performansı ve ortalama eğitim süresi

| No  | Özelliklerin çıkarılması (VGG16) | Eğitim | Test   | Ortalama eğitim süresi |
|-----|----------------------------------|--------|--------|------------------------|
| IV. | block5_conv2                     | 0,884  | 0,85   | 998,2                  |
| V.  | block2_conv2                     | 0,93   | 0,932  | 2393,2                 |
| VI. | block1_conv1                     | 0,968  | 0,9656 | 3050,2                 |

### 3. Sonuç ve Tartışma

Ulaşım ağlarında en sık rastlanan sorunlardan biri asfalt çatlaklarıdır. Trafik yükü, malzeme özellikleri, çevresel etkenler, işçilik hatası gibi etkenlerden dolayı meydana gelen çatlaklar fark edilemediğinde zarar ilk başta küçük boyutlarda iken zamanla büyük boyutlara ulaşır. Büyük boyutlara ulaşan bu kusurlar, kazalara sebep olur, ayrıca sorun büyüdüğü için telafisi için daha fazla bakım maliyeti oluşturur. Kusurların fark edilmesini insan yetisine bırakmak ise yetersiz kalır. Bu nedenle yapmış olduğumuz bu çalışmada asfalt yol görüntüleri üzerindeki çatlakların derin öğrenme ile sınıflandırılması sağlanarak bilgisayarla görü alanındaki çalışmalara örnek sunulması amaçlanmıştır.

Oluşturmuş olduğumuz modelde iterasyon sayısı artırıldığında öğrenme süresinin uzadığı ancak başarımının arttığı gözlenmiştir. Oluşturulan derin öğrenme modelinde eğitilen katman sayısı artırıldığında modelin eğitim başarısı artarken tüm katmanların kullanıldığı modelde test başarısının düştüğü gözlemlenmiştir. Veri seti büyüklüğünün model başarımına etkisinin nasıl olduğu sorgulandığında ise çeşitli tekniklerle artırılan veri sayısının başarıma beklenildiği gibi olumlu bir katkıda bulunmadığı görülmüştür. Yapılan çalışmalarda test veri kümesinde %96 ve üzerinde doğruluk oranları yakalanmıştır.

Literatürde yer alan çalışmalar ve kendi çalışmamız değerlendirildiğinde görüntülerin tanınması ve sınıflandırılması konusunda derin öğrenme algoritmalarının [10-20] klasik makine öğrenmesi yöntemlerine [7-9] kıyasla oldukça başarılı olduğu görülmüştür. Makine öğrenmesi yöntemlerinden en başarılısı 0,965 ile DVM [7] önerdiğimiz modele en yakın doğruluk değerini elde etmiştir. Ancak verilerin ön işleme ve en iyi özelliklerin çıkarılması için çeşitli yöntemler uygulayarak bu başarıyı elde etmişlerdir. Derin öğrenme yöntemlerinin kullanıldığı çalışmalara baktığımızda 0,963 doğruluk ile veri artırımında GAN ve özellik çıkarımında geliştirilmiş VGG-16 kullanan modelin [14] en iyi performansı elde ettiğini görüyoruz. Bahse konu çalışmalarda farklı veri setleri kullanıldığı için sonuçlarını bu çalışma ile karşılaştırmak uygun bulunmamıştır. Aynı veri setini kullanan çalışmalar [18-20] incelendiğinde, en başarılı sonucu 0,997 doğruluk ile Balaji ve diğerlerinin [18] 448x448 çözünürlüklü görüntüler üzerine uyguladığı MobileNet modelinin elde ettiği görülmüştür. Aynı çalışmada, 224x224 çözünürlüklü görüntüler üzerinde 0,9525 doğruluk ile en iyi performansı ise Inception-v3 modeli elde etmiştir. Bu çalışmada ise VGG-16 ağı 224x224 boyutlu girdiler kabul ettiği için orta çözünürlüklü görüntüler kullanılmış ve daha yüksek başarımlar elde edilmiştir. Ayrıca, sonuçlar hem 5 katlı çapraz geçişleme hem de eğitim-geçerleme-test kümesi bölümlenmesi kullanılarak doğrulanmıştır.

Sonuç olarak, yol kusurlarının tespiti konusu ile birlikte birçok sektörde uzman kişilerin görüşü alınarak ihtiyaçların doğru bir şekilde belirlenmesi, gerçek verilerle çalışılması; ayrıca görüntü işleme teknikleri ile çeşitliliğinin artırılması ve bu etkenlere göre derin öğrenme algoritmaları hiper parametre ince ayarlarının yapılması ile oldukça faydalı sonuçlar elde edileceği değerlendirilmiştir.

#### Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir kurum, kuruluş, kişi ile kişisel ve finansal çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedirler.

#### Kaynaklar

- [1] B. Kesayak, "Endüstri Tarihine Kısa Bir Yolculuk," <https://www.endustri40.com/endustri-tarihine-kisa-bir-yolculuk/>.
- [2] "Yol Ağı Bilgileri," <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Kurumsal/YolAgi>.
- [3] "Asfalt Yollarda Meydana Gelen Kusur ve Hasar Çeşitleri," <https://insapedia.com/asfalt-yollarda-meydana-gelen-kusur-ve-hasar-cesitleri>.
- [4] A. Erbaş and D. İlek, "Son dakika haberi... Karadeniz Sahil Yolu'nda 'çatlak' tehlikesi," <https://www.hurriyet.com.tr/gundem/yolda-catlak-tehlikesi-ekipler-hemen-harekete-gecti-41715204>, Rize, 2021.

- [5] A. Şeker, B. Diri, and H. H. Balık, “Derin Öğrenme Yöntemleri ve Uygulamaları Hakkında Bir İnceleme,” *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 3, no. 3, pp. 47–64, 2017.
- [6] J. Chadwick, “Autonomous pothole-repairing robots will hit Britain’s streets by 2021,” <https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-8883627/Autonomous-pothole-repairing-robots-hit-Britains-streets-2021.html>, 2020.
- [7] M. Baygın, O. Yaman, and T. Tuncer, “Akıllı Şehirler için Özellik Çıkarımı ve Makine Öğrenmesi Tabanlı Asfalt Durum İzleme Yaklaşımı,” *European Journal of Science and Technology*, Jan. 2021, doi: 10.31590/ejosat.844592.
- [8] L. de A. Schmidt, M. Pasin, and S. M. Peres, “Feasibility Study for an Automatic Architecture for Pothole Detection in Asphalt Images: a Trade-off between Performance and Quality,” in *2020 IEEE 16th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP)*, IEEE, Sep. 2020, pp. 307–314. doi: 10.1109/ICCP51029.2020.9266229.
- [9] N. Shatnawi, “Automatic Pavement Cracks Detection using Image Processing Techniques and Neural Network,” *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 9, no. 9, 2018, doi: 10.14569/IJACSA.2018.090950.
- [10] V. Mandal, L. Uong, and Y. Adu-Gyamfi, “Automated Road Crack Detection Using Deep Convolutional Neural Networks,” in *2018 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, IEEE, Dec. 2018, pp. 5212–5215. doi: 10.1109/BigData.2018.8622327.
- [11] J. Cheng, W. Xiong, W. Chen, Y. Gu, and Y. Li, “Pixel-level Crack Detection using U-Net,” in *TENCON 2018 - 2018 IEEE Region 10 Conference*, IEEE, Oct. 2018, pp. 0462–0466. doi: 10.1109/TENCON.2018.8650059.
- [12] E. Deveci and B. Ergen, “Yol Yüzey Anormalisinin Tespiti ve Analizi,” *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 10, no. 3, pp. 1187–1194, Sep. 2021, doi: 10.17798/bitlisfen.942386.
- [13] F. Liu, J. Liu, and L. Wang, “Asphalt Pavement Crack Detection Based on Convolutional Neural Network and Infrared Thermography,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 11, pp. 22145–22155, Nov. 2022, doi: 10.1109/TITS.2022.3142393.
- [14] Y. Que *et al.*, “Automatic classification of asphalt pavement cracks using a novel integrated generative adversarial networks and improved VGG model,” *Eng Struct*, vol. 277, p. 115406, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.engstruct.2022.115406.
- [15] S. Matarneh, F. Elghaish, F. Pour Rahimian, E. Abdellatef, and S. Abrishami, “Evaluation and optimisation of pre-trained CNN models for asphalt pavement crack detection and classification,” *Autom Constr*, vol. 160, p. 105297, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.autcon.2024.105297.
- [16] M. Yılmaz *et al.*, “Improving the Classification Performance of Asphalt Cracks After Earthquake With a New Feature Selection Algorithm,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 6604–6614, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3343619.
- [17] A. Jayanth Balaji, G. Thiru Balaji, M. S. Dinesh, N. Binoy, and D. S. Harish Ram, “Asphalt Crack Dataset,” Available: <https://data.mendeley.com/datasets/xnzjh3x8v4/2>, vol. 2. 2019.
- [18] A. J. Balaji, G. Thiru Balaji, M. S. Dinesh, B. B. Nair, and D. S. Harish Ram, “A Machine Learning Based Approach to Crack Detection in Asphalt Pavements,” in *2018 15th IEEE India Council International Conference (INDICON)*, IEEE, Dec. 2018, pp. 1–4. doi: 10.1109/INDICON45594.2018.8987039.
- [19] B. Ji, “A Study on Crack Detection in Asphalt Road Pavement Using Small Deep Learning,” *Journal of the Korean GEO-environmental Society*, vol. 22, no. 10, pp. 13–19, 2021.
- [20] A. Kumar, A. Kumar, A. K. Jha, and A. Trivedi, “Crack Detection of Structures using Deep Learning Framework,” in *2020 3rd International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS)*, IEEE, Dec. 2020, pp. 526–533. doi: 10.1109/ICISS49785.2020.9315949.
- [21] “ImageNet,” <https://www.image-net.org/about.php>.
- [22] “VGG16 and VGG19,” <https://keras.io/api/applications/vgg/>.
- [23] T. Fushiki, “Estimation of prediction error by using K-fold cross-validation,” *Stat Comput*, vol. 21, no. 2, pp. 137–146, Apr. 2011, doi: 10.1007/s11222-009-9153-8.



- [24] C. Shorten and T. M. Khoshgoftaar, “A survey on Image Data Augmentation for Deep Learning,” *J Big Data*, vol. 6, no. 1, p. 60, Dec. 2019, doi: 10.1186/s40537-019-0197-0.
- [25] M. Toğaçar, K. A. Eşidir, and B. Ergen, “Yapay Zekâ Tabanlı Doğal Dil İşleme Yaklaşımını Kullanarak İnternet Ortamında Yayınlanmış Sahte Haberlerin Tespiti,” *Journal of Intelligent Systems: Theory and Applications*, vol. 5, no. 1, pp. 1–8, Oct. 2021, doi: 10.38016/jista.950713.
- [26] Ö. İnik and E. Ülker, “Derin Öğrenme ve Görüntü Analizinde Kullanılan Derin Öğrenme Modelleri ,” *GAZİOSMANPAŞA BİLİMSEL ARAŞTIRMA DERGİSİ (GBAD)*, vol. 6, no. 3, pp. 85–104, 2017.
- [27] A. Krizhevsky, I. Sutskever, and G. E. Hinton, “ImageNet classification with deep convolutional neural networks,” *Commun ACM*, vol. 60, no. 6, pp. 84–90, May 2017, doi: 10.1145/3065386.
- [28] K. Fırıldak and M. F. Talu, “Evrşimsel Sinir Ağlarında Kullanılan Transfer Öğrenme Yaklaşımlarının İncelenmesi,” *Computer Science*, vol. 4, no. 2, pp. 88–95, 2019.
- [29] J. Xu, Z. Li, B. Du, M. Zhang, and J. Liu, “Reluplex made more practical: Leaky ReLU,” in *2020 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, IEEE, Jul. 2020, pp. 1–7. doi: 10.1109/ISCC50000.2020.9219587.
- [30] U. Ruby, P. Theerthagiri, I. J. Jacob, and Y. Vamsidhar, “Binary cross entropy with deep learning technique for Image classification,” *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, vol. 9, no. 4, pp. 5393–5397, Aug. 2020, doi: 10.30534/ijatcse/2020/175942020.
- [31] M. A. Koşan, A. Coşkun, and H. Karacan, “Yapay Zekâ Yöntemlerinde Entropi,” *Journal of Information Systems and Management Research*, vol. 1, no. 1, pp. 15–22, 2019.
- [32] G. Ser and C. T. Bati, “Derin Sinir Ağları ile En İyi Modelin Belirlenmesi: Mantar Verileri Üzerine Keras Uygulaması,” *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, vol. 29, no. 3, pp. 406–417, Sep. 2019, doi: 10.29133/yyutbd.505086.
- [33] R. V. Kumar Reddy, B. Srinivasa Rao, and K. P. Raju, “Handwritten Hindi Digits Recognition Using Convolutional Neural Network with RMSprop Optimization,” in *2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*, IEEE, Jun. 2018, pp. 45–51. doi: 10.1109/ICCONS.2018.8662969.
- [34] H. M and S. M.N, “A Review on Evaluation Metrics for Data Classification Evaluations,” *International Journal of Data Mining & Knowledge Management Process*, vol. 5, no. 2, pp. 01–11, Mar. 2015, doi: 10.5121/ijdkp.2015.5201.
- [35] E. ERGÜN and K. KILIÇ, “Derin Öğrenme ile Artırılmış Görüntü Seti üzerinden Cilt Kanseri Tespiti,” *Black Sea Journal of Engineering and Science*, vol. 4, no. 4, pp. 192–200, Oct. 2021, doi: 10.34248/bsengineering.938520.

## ANDROID MALWARE CLASSIFICATION USING BASIC MACHINE LEARNING METHODS

**Tuğba PALABAŞ<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup> Zonguldak Bulent Ecevit University, Faculty of Engineering, Biomedical Engineering Department, Zonguldak, 67100, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 01.04.2024 Kabul Tarihi/Accepted Date: 17.07.2024 DOI: 10.54365/adyumbd.1462488

### ABSTRACT

Both the complexity and volume of Android malware attacks increases day by day. Thus, Android users remain vulnerable to cyber-attacks. Researchers have developed many machine learning techniques to detect, block or mitigate these attacks. However, technological developments and the increase in Android mobile devices and the applications used on these devices have also increased problems in terms of user privacy due to malware. In this study, a comprehensive study is presented on the detection and classification of malicious applications using an up-to-date dataset containing 241 features. First, incorrect, and missing data are detected, and the relevant lines are removed, and then normalization-based scaling is performed. After this preprocessing step, the dataset is randomly split into 70% training and 30% testing data using cross-validation. Finally, the classification process is carried out using 6 different machine learning methods which are Bernoulli Naive Bayes (BNB), Multi-Layer Perceptron (MLP), Logistic Regression (LOGR), K-Nearest Neighbor (KNN), Decision Tree Classifier (DTC), Random Forest (RF). Comparison of modeling results show that the RF machine learning technique can achieve the best performance with a 97% accuracy level and various other metrics for malware detection on real-world Android application.

**Keywords:** *Android Malware, Goodware, Classification, Machine Learning, Random Forest Algorithm*

## TEMEL MAKİNE ÖĞRENİMİ YÖNTEMLERİNİ KULLANARAK ANDROİD KÖTÜ AMAÇLI YAZILIM SINIFLANDIRMASI

### ÖZET

Android kötü amaçlı yazılım saldırılarının hem karmaşıklığı hem de hacmi her geçen gün artmaktadır. Bu nedenle android kullanıcıları siber saldırılara karşı savunmasız kalmaktadırlar. Araştırmacılar bu saldırıları tespit etmek, engellemek veya azaltmak için birçok makine öğrenmesi tekniği geliştirmişlerdir. Ancak teknolojik gelişmeler, Android mobil cihazların ve bu cihazlarda kullanılan uygulamaların artması, kötü amaçlı yazılımlardan dolayı kullanıcı gizliliği açısından sorunları da artırmıştır. Bu çalışmada, 241 öznelik içeren güncel bir veri seti kullanılarak kötü amaçlı uygulamaların tespiti ve sınıflandırılması konusunda kapsamlı bir çalışma sunulmaktadır. Öncelikle hatalı ve eksik veriler tespit edilerek ilgili satırlar kaldırılmıştır, ardından normalizasyon bazlı ölçeklendirme gerçekleştirilmiştir. Bu ön işleme adımından sonra veri seti, çapraz doğrulama kullanılarak rastgele %70 eğitim ve %30 test verisine bölünmüştür. Son olarak Bernoulli Naive Bayes (BNB), Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP), Lojistik Regresyon (LOGR), K-En Yakın Komşu (KNN), Karar Ağacı Sınıflandırıcı (DTC), Rastgele Orman (RF) olmak üzere 6 farklı makine öğrenmesi yöntemi kullanılarak sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Modelleme sonuçlarının karşılaştırılması, RF makine öğrenmesi tekniğinin, gerçek dünyadaki Android uygulamalarında kötü amaçlı yazılım tespiti için %97 doğruluk düzeyi ve diğer çeşitli ölçümlerle en iyi performansı elde edebileceğini göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** *Android Kötü Amaçlı Yazılım, İyi yazılım, Sınıflandırma, Makine öğrenmesi, Rastgele Orman Algoritması*

\* e-posta1 : [tugba.palabas@gmail.com](mailto:tugba.palabas@gmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6985-6494>

## 1. Introduction

The most used smart mobile devices in the world are Android-based and generally occupy a large proportion of the market share [1]. In addition, in [2], “statista” data shows that Google Play users worldwide downloaded 1 million mobile applications in July 2013 and most recently placed at 2.59 million apps in 2023 [2]. The fact that Android-based systems allow the installation of scripts from unauthenticated sources such as application stores and file-sharing websites, and the high popularity of Android for many years has also increased the interest of cybercriminals who create unsafe or unwanted malicious applications that can steal personal information or damage your device [3]. For instance, in 2023, over 100 Android apps with more than 400 million downloads combined have been infected with a new malicious Android apps [4]. Cyber attackers use malicious applications created in many different forms, such as viruses, worms, Trojans, ransomware, spyware, adware, keylogger, botnets, rootkits, scareware, and many other types, to intentionally damage devices and networks [5]. Identifying and preventing of these malwares are very important for security.

Android malware detection solutions in the literature often capitalize on machine learning approach to detect pieces of malware. The proposed models may use a variety of features, such as security settings, permissions requested, managements of the documents, API calls made, network activity, etc. The model is trained using these features and relevant samples then new application may classify as malicious or non-malicious. For example, Sahs and Khan [6] performed the classification process with the Single Class Support Vector Machine (SVM) method after the feature extraction step, which allows taking advantage of the higher computing power of a server or server cluster for the detection of malware on Android devices. The authors have shown, based on various performance criteria, that the sensitivity of the algorithm decreases as the benign sample increases. Yerima et al. [7] propose a new Android malware detection approach consisting of function-based, tree-based, probabilistic, and two rule based algorithms using parallel machine learning classifiers. Thus, they introduced a scheme that takes advantage of the strengths of classifiers with different features. Wen and Yu [8] proposed a lightweight system that first feature extraction based on static analysis and dynamic analysis. The authors applied an approach using principal component analysis (PCA) and relief to reduce the dimensions of the features. Then, they performed a classification with the SVM algorithm. The results obtained showed that the system provides an effective method for Android malware detection. Similarly, Kakavand et al [9]. also performed Android malware detection using SVM and KNN algorithms. The results obtained showed that the KNN classifier showed better performance. Li et al. [10] developed a method includes three levels of pruning to identify the most important permissions, a malware detection system based on permission usage analysis which is Significant Permission IDentification (SigPID) and machine learning methods. Tahtacı and Canbay [11] presented machine learning models using n-gram features of smali files, which are Android packages, and evaluated their performance by combining them with different feature extraction/selection methods.

As stated before, Android applications on mobile systems are increasing rapidly, following this, malware also emerges. Therefore, many researchers have examined the Android malware detection problem and introduced different methods. These studies have suggested that machine learning methods are an effective method for detecting Android malware. In this context, in recent years, there have been many reviews aimed to examine the development of malware detection techniques based on machine learning algorithms focusing on the Android operating system in a wider range [12-15].

In this study, a comprehensive analysis is presented examining the performance of 6 different machine learning methods in detecting and classifying malicious applications using a current data set containing 241 features. In this context, the performance of the algorithms is evaluated comparatively according to various metrics.

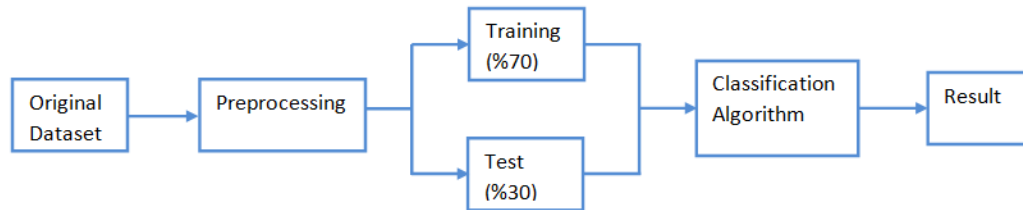
## 2. Materials and Methods

### 2.1. Dataset

In this study, the "TUNADROMD dataset", open source accessible via the Kaggle platform, consisting of 241 attributes such as, updates, media storage, google photos, permissions, file systems access, location, message reading, time setting, read social stream and 4465 sample values marked as "0" or "1" has been examined. Here, 0 represents the malware label and 1 represents the goodware label. The out of 4465 samples, 3564 are labeled malware and 901 are labeled goodware. Additionally, features between 1-214 are Permission-based features and between 215-241 are API (Application Programming Interface)-based features.

### 2.2. Preprocessing and Classification

First, some rows containing incorrect or missing data are removed from the original dataset with 4465 rows and the dataset is scaled using Standard Scaler (Normalization) in preprocessing step. Then a data set consisting of 650 samples is obtained by removing the duplicate lines (with drop.duplicate). Secondly, classification is performed in two phases with preprocessed dataset: learning and prediction. In the learning phase, the model is fitted based on the training data. In the prediction phase, the model is used for predicting the test data. Thus, the preprocessed dataset with 4462 rows (where 3 rows with missing or incorrect data are deleted) and 241 columns is randomly separated as 70% training (455) and 30% test (195) using hold-out cross validation. Finally, in the classification step, the success of the most popular classification algorithms BNB, MLP, LOGR, KNN, DTC and RF methods are analyzed separately. All steps of proposed android malware detection model are shown in Fig.1.



**Figure 1.** Proposed android malware detection steps.

#### 2.2.1 Bernoulli Naive Bayes (BNB)

BNB is a subcategory of the Naive Bayes Algorithm that is a supervised machine learning algorithm based on Bayes Theorem which predicts the posterior probability of an event, given that another event has already occurred. Namely, if Y is an event has already occurred, the probability of occurrence of X is calculated as below [17]:

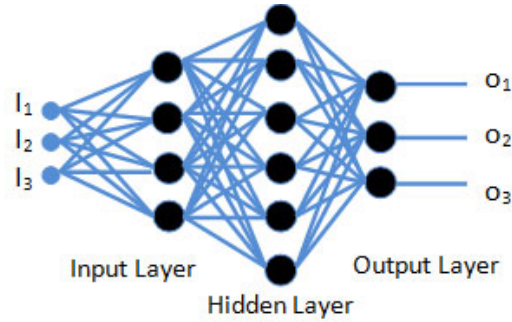
$$P(X|Y) = \frac{P(Y|X) \cdot P(X)}{P(Y)} \quad (1)$$

Here,  $P(X|Y)$  is the posterior probability which is probability of X being true given Y is true,  $P(Y|X)$  is the likelihood of the occurrence of the event namely Probability of Y being true given X is true,  $P(X)$  is the prior probability which is probability of A being true.

#### 2.2.2. Multilayer Perceptron (MLP):

In MLP, which consists of input, hidden and output layers as shown in Fig.2, the input layer receives the incoming data and sends it to the hidden layer. The number of hidden layers may vary depending on the problem, at least one. The output of each layer becomes the input of the next layer. Thus, the output layer determines the output of the network by processing the data from the previous

layers, and the number of outputs of the system is equal to the number of elements in the output layer [18].



**Figure 2.** Multilayer Perceptron network

In this study the hyperparameters of MLP are set as default. Namely hidden layer sizes=100, activation function is "relu" which uses the rectified linear unit function, the solver for weight optimization is "adam" which is a stochastic gradient-based optimizer proposed, batch size set to "auto" that batch size=min(200, n\_samples), learning rate is "constant" with learning\_rate\_init=0.001.

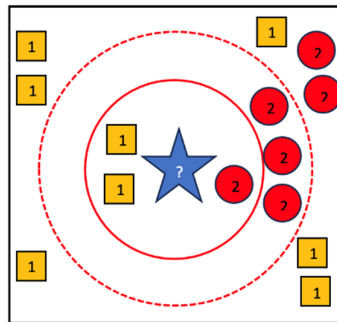
### 2.2.3. Logistic Regression (LOGR):

LOGR is a supervised machine learning classification algorithm used to estimate the relationship between a dependent categorical variable and independent variables. The class or category to be predicted contains data with binary values such as 0 or 1, yes or no, goodware or malware. The basis of this algorithm is the Sigmoid function. The sigmoid function, also called the logistic function, uses the result of the  $z$  linear regression equation to obtain a probability value ( $p$ ) between 0 and 1 with the following equation, and class assignment is made according to this probability value [19].

$$p = \frac{1}{1+e^{-z}} \quad (2)$$

$$z = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_nx_n \quad (3)$$

Here,  $x_i$  is independent variable for  $i=1, 2, \dots, n$ ;  $b_i$  is the slope coefficients of the logistic regression model for  $i = 0, 1, 2, \dots, n$  that  $b_0$  is the intercept of the model.



**Figure 3.** Determining the class (1 or 2) of a star sample using the KNN algorithm

### 2.2.4. K-Nearest Neighbor (KNN):

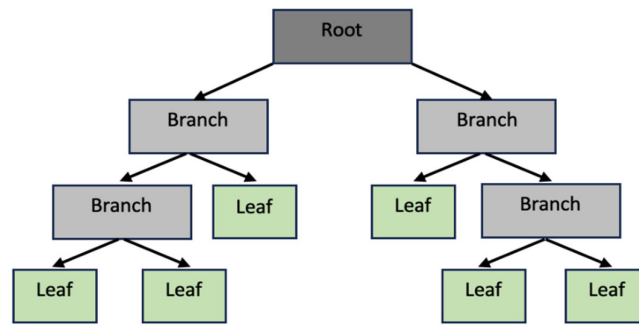
KNN algorithm predicts the class of the relevant variable based on the information in which class the nearest neighbors of the independent variables are concentrated. In this algorithm, determining the number of

neighborhoods (K) and calculating the distance of the point to be predicted from other points are two important issues [20]. For example, when  $K=6$ , the class of the new sample (asterisk) is determined as class 2, since there are 2 sample from class 1 and 4 sample from class 2 samples in set of 6 closest sample as shown in Fig. 3.

Euclidean, Manhattan, and Chebyshev are typical measurements for distance calculation. In this study, the Euclidean distance method is used for the KNN classifier and K is determined as 5.

#### 2.2.5. Decision Tree Classifier (DTC):

DT is a non-parametric supervised learning method used for classification and regression. It is a graphical representation for predicting the target variable by learning the decision rules inferred from features of the given dataset. It is called a decision tree because it starts with the root node, expands on further branches which represent the decision rules and includes internal node represents an attribute and leaf node represents the outcome as shown in Fig. 4.



**Figure 4.** Decision Tree

The most important problem in decision trees is determining the root node and in what order the branching will proceed to the leaves. For this purpose, the entropy measurement shown in Equation (4), where  $p_i$  is the probability value of a class, is frequently used [21].

$$E = - \sum_{i=1}^n (p_i) \log_2 (p_i) \quad (4)$$

Information gain is maximized by making choices that reduce the entropy value, which expresses the degree of randomness. For this, DT recalculates the error function in each question or node and selects the case with the lowest error.

Since the training time is longer when the entropy criterion is used, the Gini index as in Eq. 5 is also used as an alternative in the case of large datasets.

$$G = 1 - \sum_{i=1}^n (p_i)^2 \quad (5)$$

In this study, Gini index is taken into consideration as the splitting criterion in decision trees.

#### 2.2.6. Random Forest (RF):

RF algorithm, which is an ensemble learning method, aims to increase classification success by producing multiple decision trees during the classification process. Individual decision trees, which are randomly selected subsets from the data set they are connected to, come together to form a decision forest [22]. In this study, the number of decision trees for the RF algorithm is determined as 100.

### 2.3. Performance Evaluation Metrics

There are many metrics used to evaluate classification success in the literature [23-25]. Precision, Specificity, Accuracy, Kappa and RMSE criteria, which are also used within the scope of this study, are shown in Equations 6-10 [26-29].

Precision (Pre) shows the extent to which malware class values are predicted to be malware and is calculated as follows:

$$Pre = \frac{TP}{TP+FP} \quad (6)$$

Specificity (Spec) indicates the extent to which non-malware class values are predicted to be non-malware and is calculated as follows:

$$Spec = \frac{TN}{TN+FP} \quad (7)$$

Accuracy (Acc-%) is the ratio of correctly predicted malware and goodware values to all values and is calculated as follows:

$$Acc = \frac{TP+TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (8)$$

Kappa ( $\kappa$ ) is the statistic that measures the agreement between two observers. This coefficient gives a strong result because it also considers whether the fit could be due to chance.

$$\kappa = \frac{p_o - p_e}{1 - p_e} \quad (9)$$

Here,  $p_o$  is the total proportion of cases correctly classified and  $p_e$  is the probability of this case occurring by chance.  $\kappa = 1$  occurs when there is perfect agreement and  $\kappa = 0$  when the observed agreement is due to chance.

RMS (Root Mean Square Error), which measures the magnitude of error, is the standard deviation of the difference between the actual values and the predicted values and is calculated as follows:

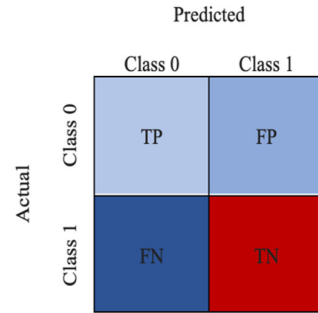
$$RMS = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{1}{n} (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (10)$$

RMSE value of zero means that the model does not make any errors.

AUC (Area Under of Curve –ROC) expresses the success of the model in separating positive groups from negative groups, that is, its discrimination power, and is calculated using the values of Equation (6) and Equation (7). An AUC value greater than 0.5 means that the discriminatory power of the model is good.

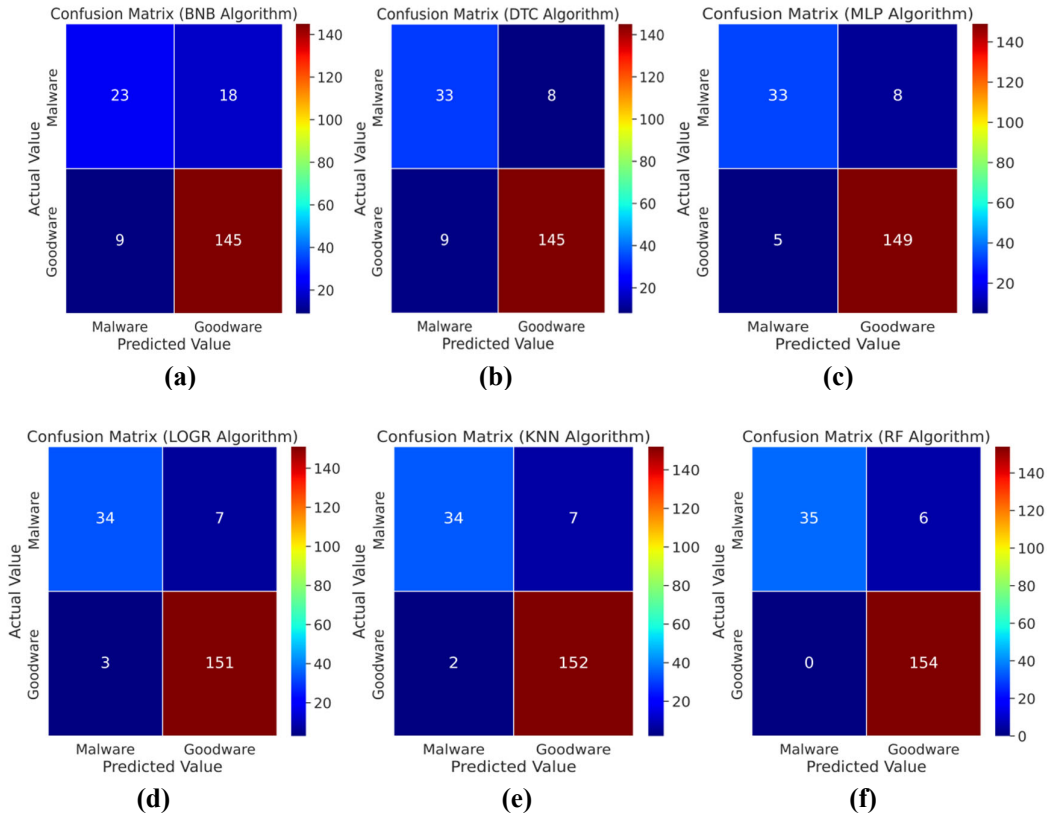
## 3. Results

Various criteria have been used to evaluate the classification success of machine learning methods on the data set.



**Figure 5.** Confusion matrix

Firstly, the confusion matrix expressing the prediction accuracy success as a 2x2 matrix is obtained, as shown in Fig. 5. Thus, the comparison of predictions with actual values is clearly shown. Here, TP (True Positive) indicates the correctly predicted malware class value. FP (False Positive) is the incorrectly predicted malware class value. FN (False Negative) is the incorrectly predicted non-malware (goodware) class value. TN (True Negative) is the correctly predicted non-malware (goodware) class value.



**Figure 6.** Confusion matrix (a) BNB Algorithm, (b) DTC algorithm, (c) MLP Algorithm, (d) LOGR Algorithm, (e) KNN Algorithm, (f) RF Algorithm.

Confusion matrices for six classifiers are shown in Fig. 6 to compare these values which are TP, FP, FN, TN which are important things to be considered while building a classification model. These matrices help to debug the model and to understand how the model behaves.

If expressed in more detail, the highest (9) FN value, which expresses the false detection of goodware samples, is obtained with the BNB and DTC algorithms and the lowest (0) with the RF

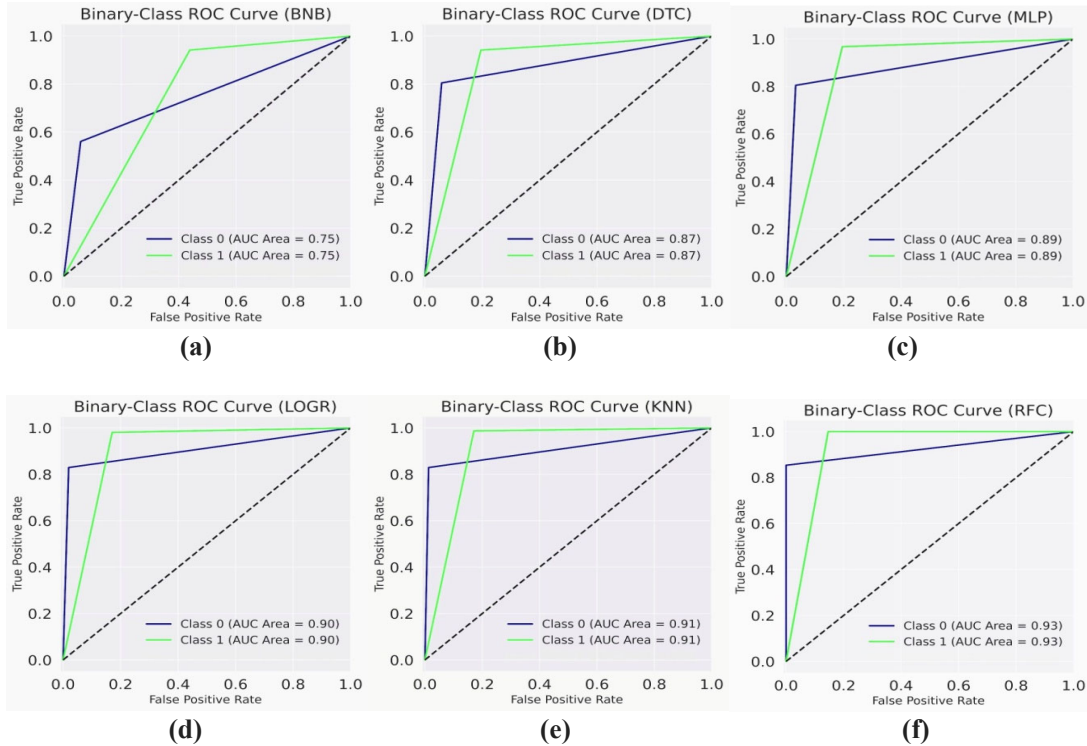


algorithm by using randomly selected 450 samples for training and 195 samples for testing from the preprocessed dataset with 650. Conversely, the TP value, which is the correct detection of malware, is achieved to be lowest (145) in the BNB and DTC classifiers and highest (154) in the RF classifier. Thus, the success of the RF algorithm in android malware detection can be clearly seen from this figure.

In addition to the confusion matrix, performance criteria are calculated for all classification algorithms and are shown in Table 1, considering the order of success. As seen in the table, the best classification performance according to all metrics is achieved with the RF algorithm and android malware is classified with a success rate of 97%. BNB method obtains the lowest success. However, the execution time (s) of the algorithm is faster than other methods. RF, which is performed in the optimal training-detection and analyzing time among the 6 methods, also has the minimum error rate, RMS.

**Table 1.** The values of precision, specificity, accuracy, training- detection and analyzing time, kappa and RMSE metrics for BNB, DTC, MLP, LOGR, KNN and RF classifiers.

|             | Pre  | Spec | Acc | Time | $\kappa$ | RMS  |
|-------------|------|------|-----|------|----------|------|
| <b>BNB</b>  | 0.56 | 0.88 | 86  | 1.14 | 0.54     | 0.37 |
| <b>DTC</b>  | 0.80 | 0.88 | 91  | 1.17 | 0.73     | 0.29 |
| <b>MLP</b>  | 0.80 | 0.91 | 93  | 1.73 | 0.79     | 0.25 |
| <b>LOGR</b> | 0.82 | 0.92 | 95  | 1.73 | 0.83     | 0.22 |
| <b>KNN</b>  | 0.82 | 0.93 | 95  | 1.89 | 0.85     | 0.21 |
| <b>RF</b>   | 0.85 | 0.94 | 97  | 1.36 | 0.90     | 0.17 |

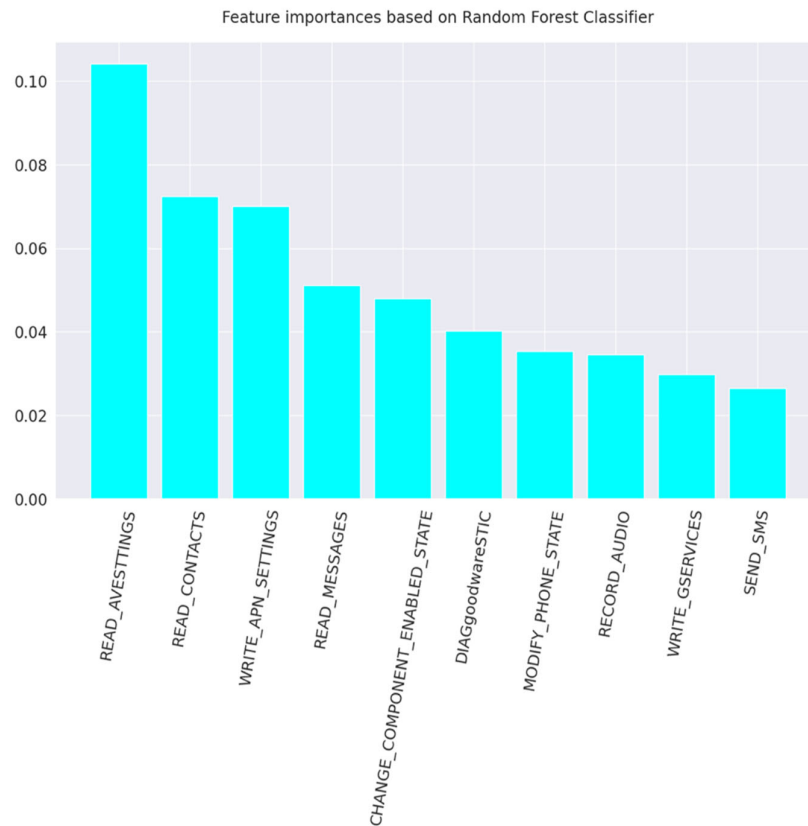


**Figure 7.** ROC curves (a) BNB Algorithm, (b) DTC algorithm, (c) MLP Algorithm, (d) LOGR Algorithm, (e) KNN Algorithm, (f) RF Algorithm.

The other important metric which expresses the successful of classification algorithm is ROC (receiver operating characteristic) curve [30]. As seen in the Fig. 7, the performance of classifiers based on RF algorithm is resulted in maximum Area under ROC curve (AUC) values "0.93".

Besides, ROC curves very close to the upper left corner are obtained with a perfectly discriminating distribution as seen in the six panels presented. On the other hand, the minimum AUC value is obtained with BNB, and in this panel the ROC curve is furthest from the upper left corner. Note that the ROC curves approach the True Positive Rate axis from (a) to (f).

One of the critical parameters affecting the success of the RF algorithm that exhibits the best classification performance is maximum depth information. As the maximum depth of randomly generated decision trees increases, the accuracy of the model increases, but after a certain level it decreases due to overfitting of the model. Therefore, it is important to determine it at the optimal level. In this study, the default value is set to "None". In other words, the nodes within the tree continue to grow until all the leaves become pure. These trees can grow very large and be difficult to visualize.



**Figure 9.** Feature importance based on RF classifier.

The RF algorithm determines the importance levels of the attributes in the data set in classification. Fig. 9 shows 100 different decision trees in the RF classification and the level of importance for the first 10 of 241 features in the dataset when the maximum depth is "None". As seen in the figure, the leftmost bar chart belongs to the attribute with maximum importance.

There are many suspicious permissions used for Android malware detection, it can read contact data, send or read messages or SMS. Here 10 permissions have been identified as important attributes for the RF classifier in Table 2.

**Table 2.** The important attributes and their definition for RF classifiers.

| Attribute                      | Definition   |
|--------------------------------|--|
| read avesttings                | App configuration file can read  |
| read contacts                  | Suspicious permissions can read contact data   |
| write apn settings             | The Access Point Name setting on mobile phone  |
| change component enabled state | There may be various components that constitute malware, this feature shows the active state of the components |
| DIAG goodwill STIC             | They are diagnostic tools to run a PC health check and fix various issues                                      |
| Modify phone state             | It is a system-only permission that allows situations such as changing the phone call status                   |
| record audio                   | suspicious permissions can record audio  |
| write Gservices                | A mysterious and undocumented Android Permission   |
| Send SMS                       | SMS send information   |

Ambekar et al. named the NATICUSdroid dataset and TUNADROMD dataset, which contain these and many attributes, as dataset 1 and dataset 2 and compared the performances of various studies with the TabLSTMNet method they proposed and presented them in a table like Table 3. In this study, the achievements obtained by using the data2 dataset, which is up-to-date and contains several features and samples that can guarantee analysis accuracy, are taken into account.

**Table 3.** Comparative study of existing models with proposed method [33]

| Model   | Accuracy |
|---|----------|
| Li et al. (2023) [34]                             | .87      |
| Shu and Yan (2023) [35]                           | .89      |
| Liu et al. (2022) [36]                            | .86      |
| Islam et al. (2023) [37]                          | .91      |
| Ullah et al. (2023) [38]                          | .92      |
| Ambekar et al. [33]<br>(10 fold cross validation) | .98      |
| FR<br>(hold out cross validation)<br>(proposed)   | .97      |

Using the TabLSTMNet method, the authors achieved 97.10% Android malware classification success on the NATICUSdroid dataset and 98% on the TUNADROMD dataset. The authors achieved a 98% correct classification result using the k-fold cross validation method by setting  $k = 10$  in the preprocessing step. When they compare their accuracy performance with 5 different studies, as shown in Table 2, they state that they achieve the best performance. A close accuracy is also achieved in this study and it is added to the bottom line of the table. In the proposed study, the RF method, which has the best performance among BNB, MLP, LOGR, KNN, DTC and RF methods, provided correct

classification of %30 test data with 97% success after training step with 70% of the data using hold-out cross validation. On the other hand, the runtime value of the algorithm is not shared in the paper. However, since the dataset in question consists of 4465 instances and 241 attributes, this method, which is obtained by taking the average of 10 classification processes, will naturally require a long time.

#### 4. Conclusions

In this paper, a machine learning-based Android malware detection method is proposed. As mentioned in the results section, Ambekar et al. [33] achieves a best performance with 98% using 10-fold cross-validation and TabLSTMNet classifier. In this study titled "TabLSTMNet: enhancing android malware classification through integrated attention and explainable AI", the authors present a table likes to Table 3 and compare the performance of 5 different studies with their own studies and state that they obtain the best success. In the proposed study, a similar success is achieved by using fewer samples for a rapid training step.

In another study, Borah et al. [32] evaluate the performance of 5 different classifiers comparatively by applying pre-processing, feature extraction and classification steps. When the authors analyze the methods', performance only based on the accuracy criterion, they state that the Extra Tree classifier show the best performance with 98.8%. However, it is not enough to evaluate classifier performance based on a single criterion. In this study, firstly, confusion matrices are obtained and Precision (0.85), Specificity (0.94), Accuracy (97%) values are calculated for 6 classifiers. Then, kappa coefficient (0.90) and RMSE (0.17) metrics are obtained. ROC analyzes based on the AUC Area (0.93) present to provide a more detailed representation. In addition, the method, which consists of only pre-processing and classification steps, with the less attribute obtains all analysis results very quickly.

As a result, it is important to detect and take precautions against changing threats due to constantly developing technology quickly and accurately. In this context, it is once again revealed that the random forest algorithm, which stands out with its high accuracy in classification, is also successful in detecting Android malware. However, it has been stated that very high performance can be achieved by using the hold out cross validation method in large data sets instead of the k-fold algorithm, which comes to the fore to guarantee success and accuracy in small data sets. In this context, it is thought that the success of the proposed method can be expressed as a generalized method in this regard by testing it with different data sets.

#### Conflict Of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest

#### References

- [1] "Smartphone OS market share 2023", 2024, <https://www.idc.com/promo/smartphone-market-share>.
- [2] "Statista, Number of available applications in the Google Play Store from December 2009 to June 2023", 2024, <https://www.statista.com/statistics/266210/number-of-available-applications-in-the-google-play-store>.
- [3] Li, J., Sun, L., Yan, Q., Li, Z., Srisa-An, W., & Ye, H. (2018). Significant permission identification for machine-learning-based android malware detection. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(7), 3216-3225.
- [4] "Tom'sguide", 2024, <https://www.tomsguide.com/news/over-400-million-infected-with-android-spyware-delete-these-apps-right-now>.
- [5] Ngo, F. T., Agarwal, A., Govindu, R., & MacDonald, C. (2020). Malicious software threats. *The Palgrave Handbook of International Cybercrime and Cyberdeviance*, 793-813.
- [6] Sahs, J., & Khan, L. (2012, August). A machine learning approach to android malware detection. In *2012 European intelligence and security informatics conference* (pp. 141-147). IEEE.

- [7] Yerima, S. Y., Sezer, S., & Muttik, I. (2014, September). Android malware detection using parallel machine learning classifiers. In 2014 Eighth international conference on next generation mobile apps, services and technologies (pp. 37-42). IEEE.
- [8] Wen, L., & Yu, H. (2017, August). An Android malware detection system based on machine learning. In AIP conference proceedings (Vol. 1864, No. 1). AIP Publishing.
- [9] Kakavand, M., Dabbagh, M., & Dehghantanha, A. (2018, November). Application of machine learning algorithms for android malware detection. In Proceedings of the 2018 International Conference on Computational Intelligence and Intelligent Systems (pp. 32-36).
- [10] Li, J., Sun, L., Yan, Q., Li, Z., Srisa-An, W., & Ye, H. (2018). Significant permission identification for machine-learning-based android malware detection. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(7), 3216-3225.
- [11] TAHTACI, B., & CANBAY, B. (2020, October). Android malware detection using machine learning. In 2020 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU) (pp. 1-6). IEEE.
- [12] Liu, K., Xu, S., Xu, G., Zhang, M., Sun, D., & Liu, H. (2020). A review of android malware detection approaches based on machine learning. *IEEE Access*, 8, 124579-124607.
- [13] Kouliaridis, V., & Kambourakis, G. (2021). A comprehensive survey on machine learning techniques for android malware detection. *Information*, 12(5), 185.
- [14] Odusami, M., Abayomi-Alli, O., Misra, S., Shobayo, O., Damasevicius, R., & Maskeliunas, R. (2018). Android malware detection: A survey. In *Applied Informatics: First International Conference, ICAI 2018, Bogotá, Colombia, November 1-3, 2018, Proceedings 1* (pp. 255-266). Springer International Publishing.
- [15] Pan, Y., Ge, X., Fang, C., & Fan, Y. (2020). A systematic literature review of android malware detection using static analysis. *IEEE Access*, 8, 116363-116379.]
- [16] “Kaggle, Android Malware Detection”, 2024, <https://www.kaggle.com/datasets/joebeachcapital/tuandromd>.
- [17] Chiong, R., & Theng, L. B. (2008, June). A hybrid naive bayes approach for information filtering. In 2008 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (pp. 1003-1007). IEEE.
- [18] Zhao, C., Gao, Y., He, J., & Lian, J. (2012). Recognition of driving postures by multiwavelet transform and multilayer perceptron classifier. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(8), 1677-1686.
- [19] Tsangaratos, P., & Ilia, I. (2016). Comparison of a logistic regression and Naïve Bayes classifier in landslide susceptibility assessments: The influence of models complexity and training dataset size. *Catena*, 145, 164-179.
- [20] Viswanath, P., & Sarma, T. H. (2011, September). An improvement to k-nearest neighbor classifier. In 2011 IEEE Recent Advances in Intelligent Computational Systems (pp. 227-231). IEEE.
- [21] Du, W., & Zhan, Z. (2002). Building decision tree classifier on private data.
- [22] Belgiu, M., & Drăguț, L. (2016). Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 114, 24-31.
- [23] Eroğlu, K., & Palabaş, T. (2016, December). The impact on the classification performance of the combined use of different classification methods and different ensemble algorithms in chronic kidney disease detection. In 2016 National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering (ELECO) (pp. 512-516). IEEE.
- [24] Palabas, T., & Eroğlu, K. (2018, May). Occupancy detection from temperature, humidity, light, CO2 and humidity ratio measurements using machine learning techniques. In 2018 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU) (pp. 1-4). IEEE.
- [25] ErKaymaz, O., & Palabaş, T. (2018, May). Classification of cervical cancer data and the effect of random subspace algorithms on classification performance. In 2018 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU) (pp. 1-4). IEEE.
- [26] Bowers, A. J., Sprott, R., & Taff, S. A. (2012). Do we know who will drop out? A review of the predictors of dropping out of high school: Precision, sensitivity, and specificity. *The High School Journal*, 77-100.
- [27] Chu, K. (1999). An introduction to sensitivity, specificity, predictive values and likelihood ratios. *Emergency Medicine*, 11(3), 175-181.

- [28] Vieira, S. M., Kaymak, U., & Sousa, J. M. (2010, July). Cohen's kappa coefficient as a performance measure for feature selection. In *International conference on fuzzy systems* (pp. 1-8). IEEE.
- [29] Chicco, D., Warrens, M. J., & Jurman, G. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *PeerJ Computer Science*, 7, e623.
- [30] Linden, A. (2006). Measuring diagnostic and predictive accuracy in disease management: an introduction to receiver operating characteristic (ROC) analysis. *Journal of evaluation in clinical practice*, 12(2), 132-139.
- [31] "BusinessofApps Android Statistics (2023)", 2024, <https://www.businessofapps.com/data/android-statistics>.
- [32] Borah, P., Bhattacharyya, D. K., & Kalita, J. K. (2020, December). Malware dataset generation and evaluation. In *2020 IEEE 4th Conference on Information & Communication Technology (CICT)* (pp. 1-6). IEEE.
- [33] Ambekar, N. G., Devi, N. N., Thokchom, S., & Yogita. (2024). TabLSTMNet: enhancing android malware classification through integrated attention and explainable AI. *Microsystem Technologies*, 1-19.
- [34] Li J, He J, Li W, Fang W, Yang G, Li T (2023) Syndroid: an adaptive enhanced android malware classification method based on CTGAN-SVM. *Comput Secur* 137:103604
- [35] Shu Z, Yan G (2023) Eagle: evasion attacks guided by local explanations against android malware classification. *IEEE Trans Depend Secure Comput*. <https://doi.org/10.1109/TDSC.2023.3324265>
- [36] Li J, He J, Li W, Fang W, Yang G, Li T (2023) Syndroid: an adaptive enhanced android malware classification method based on CTGAN-SVM. *Comput Secur* 137:103604
- [37] Islam R, Sayed MI, Saha S, Hossain MJ, Masud MA (2023) Android malware classification using optimum feature selection and ensemble machine learning. *Internet Things Cyber-Phys Syst* 3:100–111
- [38] Ullah F, Cheng X, Mostarda L, Jabbar S (2023) Android-iot malware classification and detection approach using deep url features analysis. *J Database Manag* 34(2):1–26

## GERÇEKTEN SANALA: 1 MWP GÜNEŞ SANTRALİNİN PVSYSYT SİMÜLASYON PROGRAMIYLA PERFORMANS ANALİZİ

Zafer Ramazan ŞAHİN<sup>1</sup>, Metin SALİHMUHSİN<sup>2\*</sup>

<sup>1-2</sup> Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, 46050, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 19.04.2024 Kabul Tarihi/Accepted Date: 17.08.2024 DOI: 10.54365/adyumbd.1471211

### ÖZET

Bu çalışma, Göksun Belediyesi'ne ait 1179 MWp kurulu güçteki güneş santralının Pvsyst programıyla simülasyonunu içermekte olup, elde edilen sonuçlar gerçek üretim verileri ile karşılaştırılmıştır. Analiz, termal kayıp, kablolama kaybı, gölgeleme kaybı, uyumsuzluk kaybı, tozlanma ve karlanma kaybı, panel kaybı, invertör kaybı gibi faktörleri kapsayarak, sistemin performansındaki kayıplar detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. 2023 senesi için santral çalışmasından alınan gerçek zamanlı veriler santralin toplamda 1893005 kWh elektrik enerjisi ürettiğini göstermiştir. Pvsyst programı ile yapılan simülasyonda ise aynı süre zarfında santralin 1896851 kWh enerji üretebileceği tahmin edilmiştir. İki set veri arasında sadece 3846 kWh yani %0,203'lük bir fark tespit edilmiştir. Simülasyon değeri ile gerçek değer arasında neredeyse ihmal edilebilecek bu az fark Pvsyst programının santral çalışmasını yüksek bir doğrulukla modelleyerek simülasyonunu yapabildiğini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Yenilenebilir Enerji, Pvsyst, Güneş Enerjisi, Simülasyon

## FROM REAL TO VIRTUAL: PERFORMANCE ANALYSIS OF A 1 MWP SOLAR POWER PLANT WITH PVSYSYT SIMULATION PROGRAM

### ABSTRACT

This study involves the simulation of a solar power plant owned by Göksun Municipality with a installed capacity of 1179 MWp using the Pvsyst program, and the results obtained are compared with real production data. The analysis evaluates losses in the system's performance in detail, covering factors such as thermal losses, wiring losses, shading losses, mismatch losses, dust and snow losses, panel losses, and inverter losses. Real-time data from the operation of the plant for the year 2023 indicates that the plant generated a total of 1893005 kWh of electricity. In the simulation performed with the Pvsyst program, it is estimated that the plant could generate 1896851 kWh of energy during the same period. Only a difference of 3846 kWh, equivalent to 0.203%, is observed between the two sets of data. This nearly negligible difference between the simulation value and the real value demonstrates that the Pvsyst program can accurately model and simulate the operation of the plant with high accuracy

**Keywords:** Renewable Energy, Pvsyst, Solar Energy, Simulation

### 1. Giriş

Fotovoltaik (PV) santraller, güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren ve çevre dostu elektrik üretimine olanak tanıyan tesislerdir. Bu santraller, fosil yakıtlara bağımlılığı azaltarak ve karbondioksit emisyonlarını en aza indirerek çevresel sürdürülebilirliğe önemli katkılarda bulunur. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında fotovoltaik sistemler, hızlı teknolojik ilerlemeler ve düşen maliyetler sayesinde, giderek daha cazip bir alternatif haline gelmiştir [1]. Gerek mikro ölçekte evlerde, gerekse makro ölçekte

\* e-posta<sup>1</sup>: [zaferr@hotmail.com](mailto:zaferr@hotmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8256-7531> (Sorumlu Yazar)

e-posta<sup>2</sup>: [msalihmuhsin@ksu.edu.tr](mailto:msalihmuhsin@ksu.edu.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2069-9376>

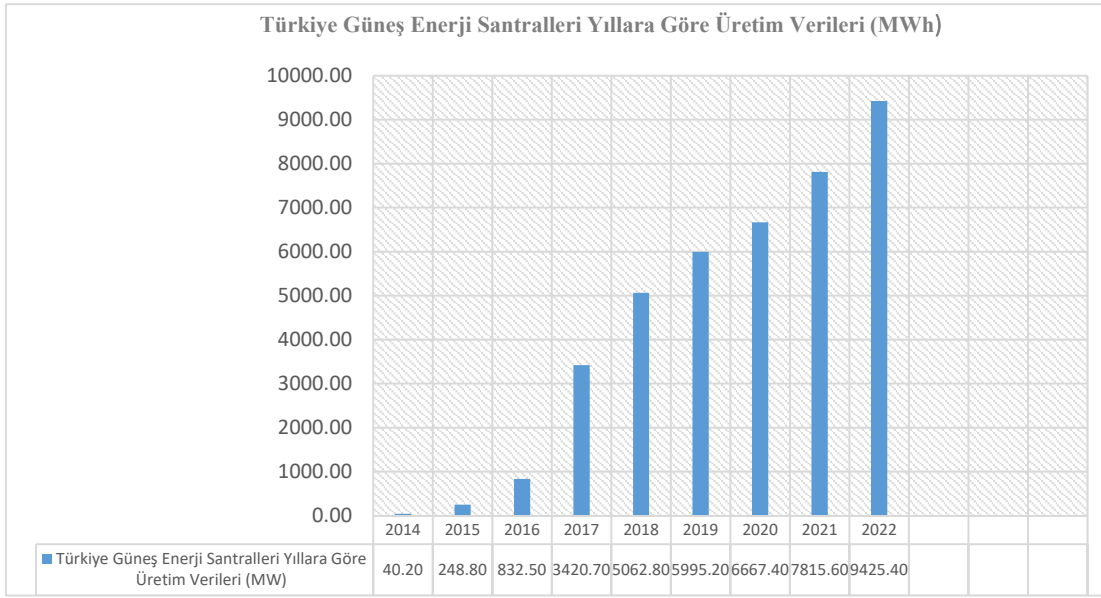




### 1.1. Türkiye’de Güneş Enerjisi Durumu

Türkiye, coğrafi konumu itibariyle 36° ile 42° kuzey enlemleri ve 26° ile 45° doğu boylamları arasında yer alan güneş kuşağının içinde bulunmaktadır. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA) verilerine göre, ülkemizde toplam güneşlenme süresi yılda 2.741 saat olarak kaydedilmiştir. Bu toplam süre günlük ortalama 7,5 saatlik bir güneşlenme süresine karşılık gelmektedir. Yine Türkiye geneli için m<sup>2</sup> başına gelen toplam güneş enerjisi miktarı yılda 1.527 kWh olup bu miktar günlük ortalama 4,18 kWh/m<sup>2</sup> olarak ta ifade edilmektedir. Bu değerler Türkiye’nin güneş enerjisi bakımından oldukça zengin bir kaynağa sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 1’de, Türkiye geneli için yıl bazında ışınım miktarlarını gösteren güneş enerjisi potansiyeli atlası sunulmaktadır [3,4].

Türkiye’de güneş enerji santrallerinin kurulmaya başlanması enerji sektöründe önemli bir değişimi beraberinde getirilmiştir. Son yıllarda yapılan yatırımlar ve teşvik politikalarıyla birlikte, ülkedeki güneş enerji santrali sayısı önemli ölçüde artmıştır. Güneş enerji santrallerinin yaygınlaşması, çevre dostu enerji üretimine yönelik bir adım olup, Türkiye’nin enerji bağımsızlığı ve temiz enerji hedeflerine katkı sağlamaktadır. Bu süreç, ülkedeki enerji üretim portföyünü çeşitlendirme ve atmosfere zehirli gaz salınımını azaltma yolunda önemli ilerlemeler sağlamıştır. Şekil 2, Türkiye’deki toplam güneş enerji santrali kurulum gücünün senelere göre değişimini göstermektedir [5].



**Şekil 2.** Türkiye’deki güneş enerjisi kapasitesinin yıllara göre dağılımı [5]

### 1.2. Göksun İlçesinin Güneş Enerjisi Potansiyeli

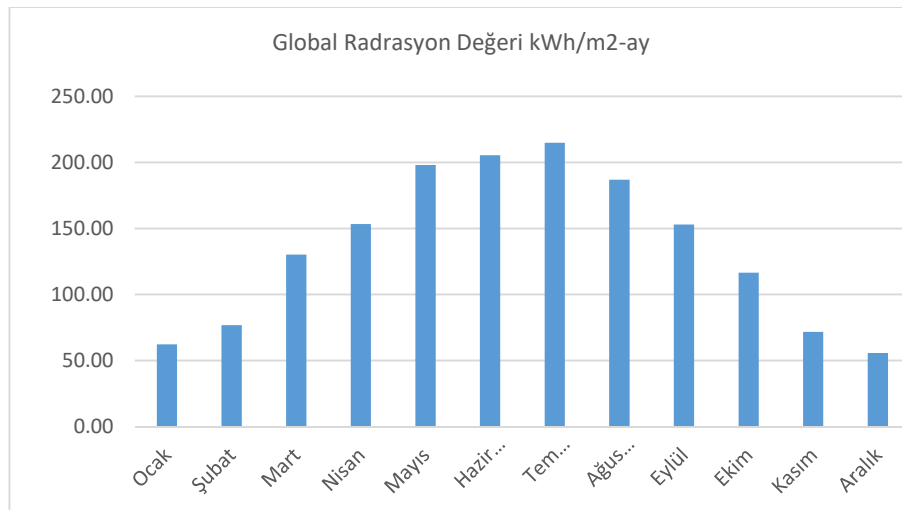
Metrekare başına düşen güneş ışınımının azalması veya fotovoltaik hücre sıcaklığının artması, PV panellerinin enerji dönüşüm verimliliğinde bir düşüşe neden olur. Bu durum, PV panellerin ısındıkça güç çıkışında bir azalmaya yol açar. Yüksek sıcaklıklar panel çıkış voltajın düşmesine neden olurken, panel akımı sınırlı ölçüde artar. Sonuç olarak, panellerin güç çıkışı düşer ve bu da verimliliğin azalmasına sebep olur. Bu sıcaklık bağımlılığı, güneş enerjisi sistemlerinin performansını önemli ölçüde etkileyen bir faktördür ve sistem tasarımında dikkate alınması gereken kritik bir unsurdur [6]. Göksun ilçesi, Kahramanmaraş’taki diğer pek çok belde ile karşılaştırıldığında rakımı sebebiyle daha düşük sıcaklık değerlerine sahip bir yerdir. Bu durum, Göksun’un güneş enerjisi sistemleri için daha elverişli bir çevresel ortam sunabileceği anlamına gelmektedir. İlçede özellikle yaz aylarında sıcaklıkların daha

ılıman seyretmesi, güneş panellerinin daha düşük sıcaklıkta daha etkin bir şekilde çalışmasına olanak sağlamaktadır.

Göksun ilçesinde yer alan Karaömer mevkininin coğrafi verileri, güneş enerjisi santrali kurulumu açısından önemli bir potansiyeli işaret etmektedir. Karaömer'in enlem değeri 38.1419, boylam değeri ise 36.6924 olarak belirlenmiş, rakımı da 1386 m'ye kadar çıkmaktadır. Bu coğrafi konum ılıman iklim ve güneş ışınım değeri gibi etkin çalışma koşullarını sağlamaktadır. Üstelik, Göksun ilçesindeki ortalama günlük global radyasyon değeri 4.45 kWh/m<sup>2</sup> olarak Türkiye ortalamasından daha yüksektir. Belirtilen coğrafi avantajlar bu beldemizi güneş enerjisi projeleri için ideal bir konum haline getirmektedir. Şekil 3'te Göksun Belediyesi GES'inin kurulum öncesi ve sonrasına ait resimleri yer almaktadır. Şekil 4'te ise Göksun ilçesinin aylık bazda enerji işleri genel müdürlüğü verilerinden elde edilen global ışınım değerleri verilmiştir.



Şekil 3. a) Göksun Belediyesi GES kurulum öncesi görüntüsü, b) Göksun Belediyesi GES kurulum sonrası görüntüsü



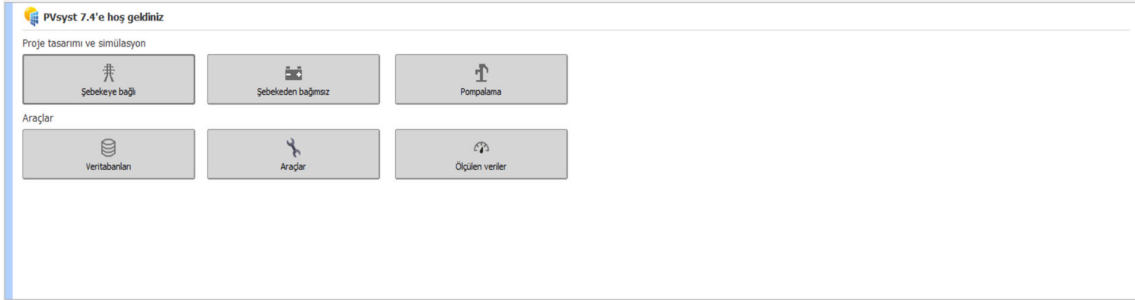
Şekil 4. Göksun ilçesine ait aylık global ışınım değerleri [1]

## 2. Materyal ve Metot

PV sistemlerinin performans analizi ve simülasyonlarını yapmak için pek çok bilgisayar programı mevcuttur. Bu programlar arasında PVsyst, Homer, RETScreen, PVplanner, PVSOL gibi seçenekler yer almaktadır. Bu programlar içerisinde PVsyst, geniş bir seçim yelpazesi sunması, PV sistem elemanlarını detaylı bir şekilde içermesi, hızlı erişim imkanları sağlaması, sistemdeki kayıpların ayrıntılı bir biçimde analiz edilebilmesi, 3D çizim özelliği ile gölgeleme kayıplarının tespit edilebilmesi, ekonomik analiz yapabilme yeteneği gibi pek çok özelliği sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Cenevre Üniversitesi tarafından geliştirilen PVsyst programı, güneş enerji sistemleri için özel bir tasarıma sahiptir. Bu yazılım, şebekeye bağlı, şebekeden bağımsız ve pompalama sistemlerinin detaylı tasarımını gerçekleştirmek amacıyla özel olarak geliştirilmiştir. Program güneş enerjili sistemlerinin modellenmesi ve simülasyonu için kullanıcılara kolay, hızlı, esnek ve özelleştirmelere açık bir program ortamı sunmaktadır [7].

### 2.1. Fotovoltaik Sistem Tasarımı

PVsyst programıyla simülasyona başlandığında program ilk olarak sistem türünü seçmemizi ister. Sistem türü için Şebekeye bağlı, Şebekeden bağımsız ve Pompalama seçeneklerinden birinin seçilmesi gerekmektedir. Şekil 5'te program açılışında karşımıza çıkan ve sistem türü seçiminin gerçekleştirildiği ekran penceresi gösterilmektedir.

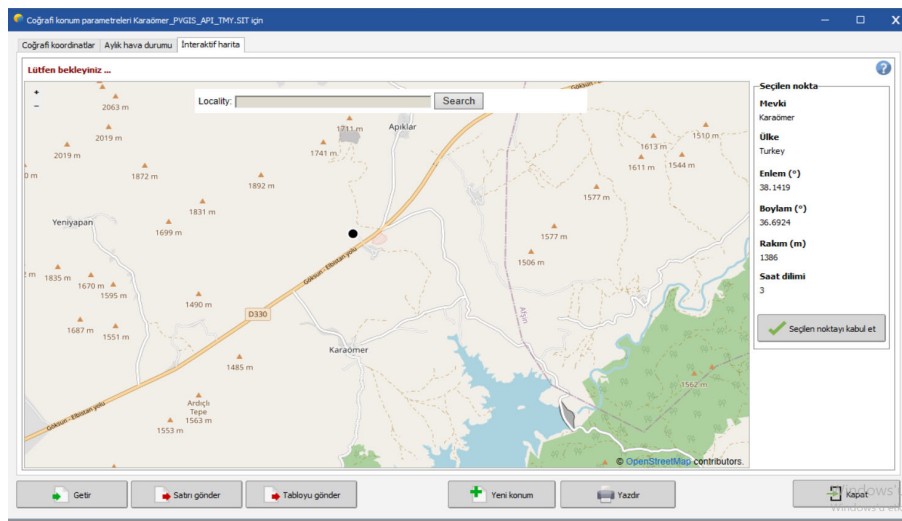


Şekil 5. PVsyst programında sistem türü seçme bölümü

Şebekeye bağlı sistem seçeneği, model oluşturulacak olan fotovoltaik sistemin elektrik şebekesi ile entegre bir şekilde simüle edilmesine olanak tanır. Bu seçenek, enerjinin şebekeye geri verilebilmesi veya ihtiyaç durumunda şebekeden enerji çekilebilmesini mümkün kılar. İkinci seçenek olan şebekeden bağımsız sistem seçeneği ise fotovoltaik panellerin enerji ürettiği ancak şebekeye bağlı olmadığı durumları simüle eder. Bu tür sistemler genellikle off-grid uygulamalar için kullanılır ve enerji depolama sistemlerinin, örneğin akülerin, şarj edildiği sistemlerin modellenmesinde tercih edilir. Son olarak, pompalama sistemi seçeneği, güneş enerjisi kullanarak su pompalama işlevini gerçekleştiren sistemlerin simülasyonunu gerçekleştirir. Bu sistemler, genellikle off-grid olarak çalışan ve suya doğrudan erişimi olmayan tarım arazilerinin sulanmasına olanak tanıyan sistemlerdir[8]. PVsyst, her bir sistem tipi için tasarım ve analiz süreçlerini optimize etmek amacıyla kapsamlı simülasyon olanakları sunmaktadır. Simülasyonunu yaptığımız Göksun GES santrali için sistem türü şebekeye bağlı olarak seçilmiştir [9].

Sistem türü tanımlandıktan sonra, Göksun Belediyesi Güneş Santrali'nin bulunduğu konum için meteorolojik verilerin sisteme girilmesi gerekmektedir. Bu işlem çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilebilir. İlk yöntem olarak, hava durumu veri tabanındaki coğrafi koordinatlar butonu tıklanarak yapılabilir. İkinci olarak, daha önce kayıtlı olan mevcut konumlardan biri seçilerek bu işlem gerçekleştirilebilir.

Alternatif olarak, farklı bir yerde yeni bir santral kurulumu yapılacaksa, bu yerin enlem-boylam değerleri girilerek veya istenilen konum harita üzerinde işaretlenerek sistem kaydı oluşturulabilir. Simülasyonunu yaptığımız Gökşun Belediyesi Güneş Enerji Santrali'nin meteorolojik veri bilgileri, santralin konumu harita üzerinde işaretlenerek sisteme kaydedilmiştir. İşaretlenen bu konumun coğrafi hava verileri ve global radyasyon durumu, PVsyst programının altyapısında mevcut olan PVGIS üzerinden görüntülenebilir. Şekil 7'de, PVsyst programında coğrafi konum seçiminin harita üzerinden tıklanarak yapılmasına olanak sağlayan pencerenin görüntüsü verilmiştir. Çizelge 1'de ise PVGIS arayüzü penceresinde gösterilen global yatay ışınım, yatay difüz ışınım, sıcaklık ve bağıl nem değerleri gösterilmektedir. Çizelge 1'de sunulan veriler incelendiğinde, bir yıl boyunca seçilen santral konumu için toplam 1710 kWh/m<sup>2</sup>/yıl global yatay ışınım değeri olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca, yıllık ortalama değerler olarak sıcaklığın 9,2 °C, rüzgar hızının 1,7 m/s ve bağıl nemin %63,5 olduğu belirlenmiştir.

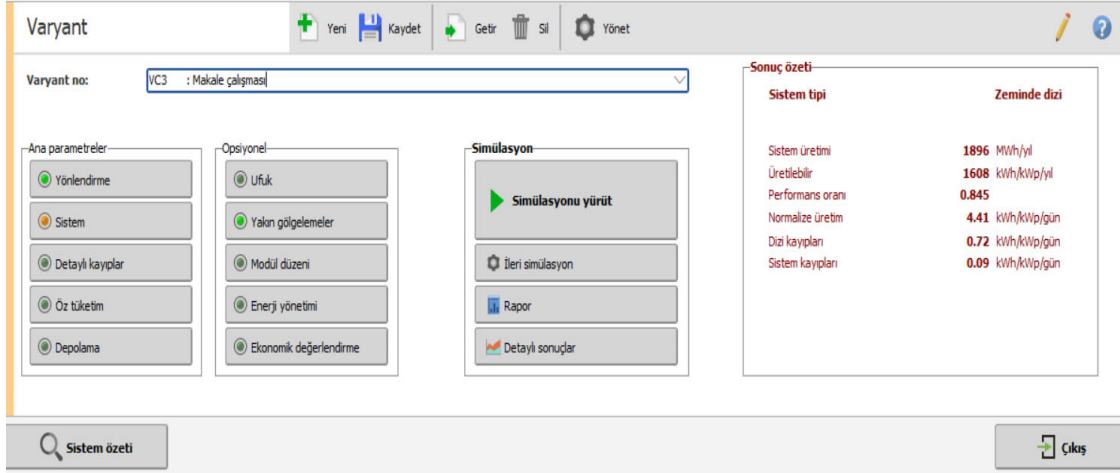


Şekil 7. PVsyst üzerinde coğrafi koordinatın tanımlanması.

Çizelge 1. Seçilen konumun ışınım, sıcaklık ve bağıl nem değerleri

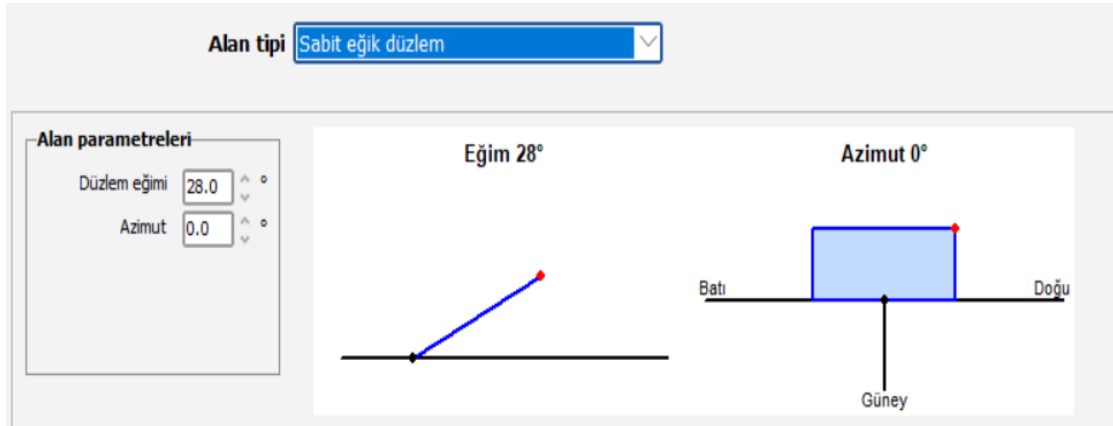
| Aylar          | Global Yatay Işınlama<br>kWh/m <sup>2</sup> /ay | Yatay Difüz Işınlama<br>kWh/m <sup>2</sup> /ay | Sıcaklık<br>°C | Bağıl Nem<br>% |
|----------------|---|--|----------------|----------------|
| <b>Ocak</b>    | 35.0  | 26.5   | -4.9           | 87.7           |
| <b>Şubat</b>   | 58.9  | 38.2   | -3.5           | 80.5           |
| <b>Mart</b>    | 119.8   | 59.5   | 3.5            | 76.8           |
| <b>Nisan</b>   | 153.7   | 64.5   | 5.7            | 68.6           |
| <b>Mayıs</b>   | 204.9   | 71.4   | 12.7           | 60.2           |
| <b>Haziran</b> | 235.1   | 66.2   | 18.0           | 47.3           |
| <b>Temmuz</b>  | 250.1   | 63.2   | 22.9           | 42.1           |
| <b>Ağustos</b> | 225.2   | 54.5   | 21.2           | 43.2           |
| <b>Eylül</b>   | 163.1   | 55.0   | 17.0           | 54.4           |
| <b>Ekim</b>    | 107.7   | 45.1   | 11.3           | 66.5           |
| <b>Kasım</b>   | 92.9  | 30.0   | 5.6            | 59.6           |
| <b>Aralık</b>  | 64.1  | 27.8   | 1.0            | 75.3           |
| <b>Yıllık</b>  | <b>1710.5</b>                                   | <b>601.9</b>                                   | <b>9.2</b>     | <b>63.5</b>    |

Simülasyonu yapılacak santral için konum ve hava durumu dosyası oluşturulduktan sonraki aşama şekil 8’de gösterildiği gibi “Varyant” kısmı olmaktadır. Bu aşamada santral için panel ve invertör seçimleri, sistem kayıpları tanımlamaları, varsa öz tüketim verileri, sistem akülü ise depolama verileri, ufuk çizgisi, gölgeleme durumu ve modül düzeni gibi veri girişleri yapılır.



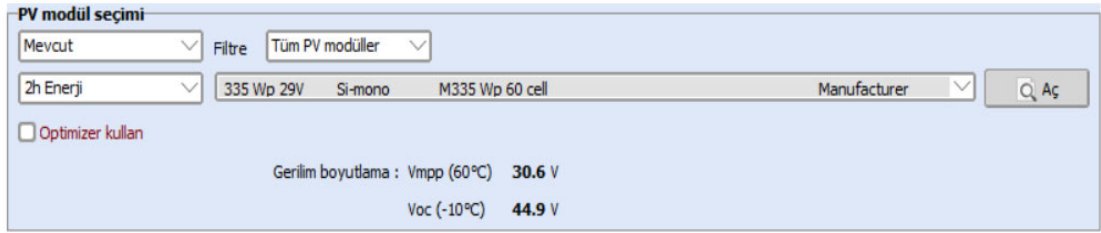
Şekil 8. PVsyst varyant bölümü

İstenen bu santral veri girişlerinin ardından enerji sisteminde kullanılan panellerin doğru bir şekilde yönlendirilmesi için “Yönlendirme” menüsü yine şekil 9’da görülen ekrandan seçilmelidir. Bu adım, güneş panellerinin optimum güneş ışığı alımını sağlamak amacıyla belirli bir yöne doğru hizalanması ve eğim açısının ayarlanması işlemi içermektedir. Bu kısımda şekil 10’da gösterilen alan tipi menüsünden panellerin üzerine yerleştirileceği konstrüksiyon tipi seçimi gerçekleştirilir. Alan parametreleri kısmından ise panelin zeminle arasındaki eğim açısı ve panelin güney yönünden sapma açısı olarak tanımlanan azimuth açısı girilebilir. Modelini oluşturduğumuz güneş enerjisi santrali için panelin zeminle yaptığı açı  $28^\circ$  ve azimuth açısı ise  $0^\circ$  olarak girilmiştir.



Şekil 9. Panel yönlendirme ekran görüntüsü

PVsyst simülasyon programında panel, invertör seçimi ve dizi oluşturulması Şekil 8’de yer alan “sistem” menüsünden gerçekleştirilmektedir. Program içerisinde santralin kurulumu gerçekleştirilirken 2h Enerji şirketinin Winasol markalı mono kristal yapıda 335 Wp gücünde modülü kullanılmıştır. Şekil 10’da PV modül seçimi ekran görüntüsü verilmiştir. Şeklin sağ tarafındaki aç butonu tıklandığında seçilen PV panelin data kılavuzuna ulaşmak mümkün olmaktadır.



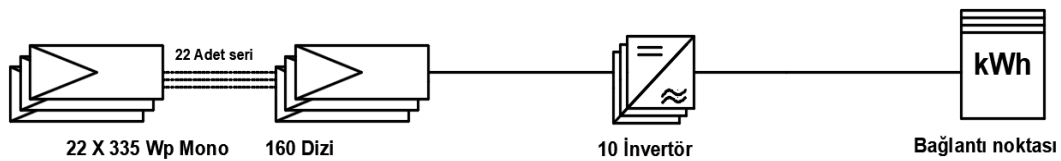
Şekil 10. Sistem menüsünden pv modül tanımlanması

Yine sistem menüsünden invertör seçimi ekranına erişim yapılabilmektedir. Programın İnverter seçimi ekran penceresi Şekil 11’de verilmiştir. Çalışmadaki simülasyonumuz için Huawei marka 100 kW güce sahip kendi içinde 10 mppt barındıran 400 volt, 50 Hz frekansa sahip trifaze invertör seçilmiştir.



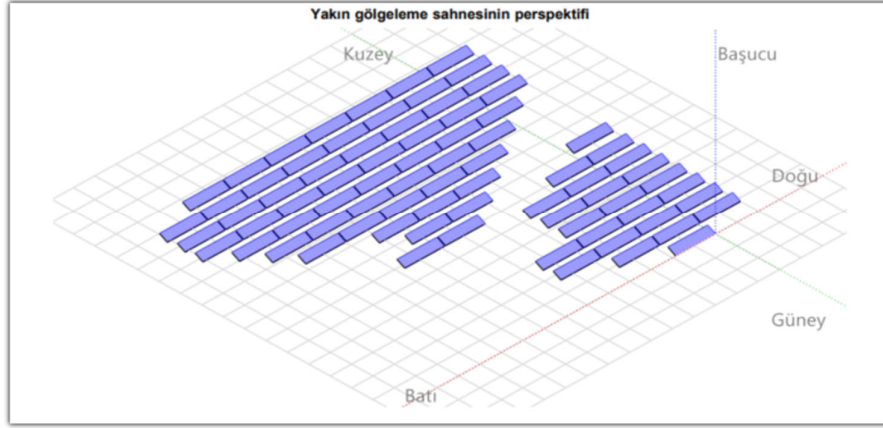
Şekil 11. Sistem menüsünden İnverter seçimi ekranı

Güneş enerji santrali kurulumunda dikkat edilecek hususlardan bir tanesi seri bağlanmış panel gerilimlerinin invertör çalışma gerilim aralığında olmasıdır. Panellerin soğuk hava koşullarında gerilimleri yükselirken akımları bir miktar düşer [10]. İklim koşulları temel alınarak en soğuk havada gerilimin maksimum yükseleceği değere göre hesap yapıp seri bağlanılacak panel sayısını bulmak gerekmektedir. Kurulumu gerçekleştirilmiş santralde bu hesaplamalar yapılarak 22 panel seri bağlı olacak şekilde invertör bağlantıları yapılmıştır. Bu sebeple dizi boyutlandırması bölümünde seri modül sayısı 22 olarak girilmiştir. Şekil 12’de bağlantısı gerçekleştirilen santralin tek hat şeması verilmiştir.

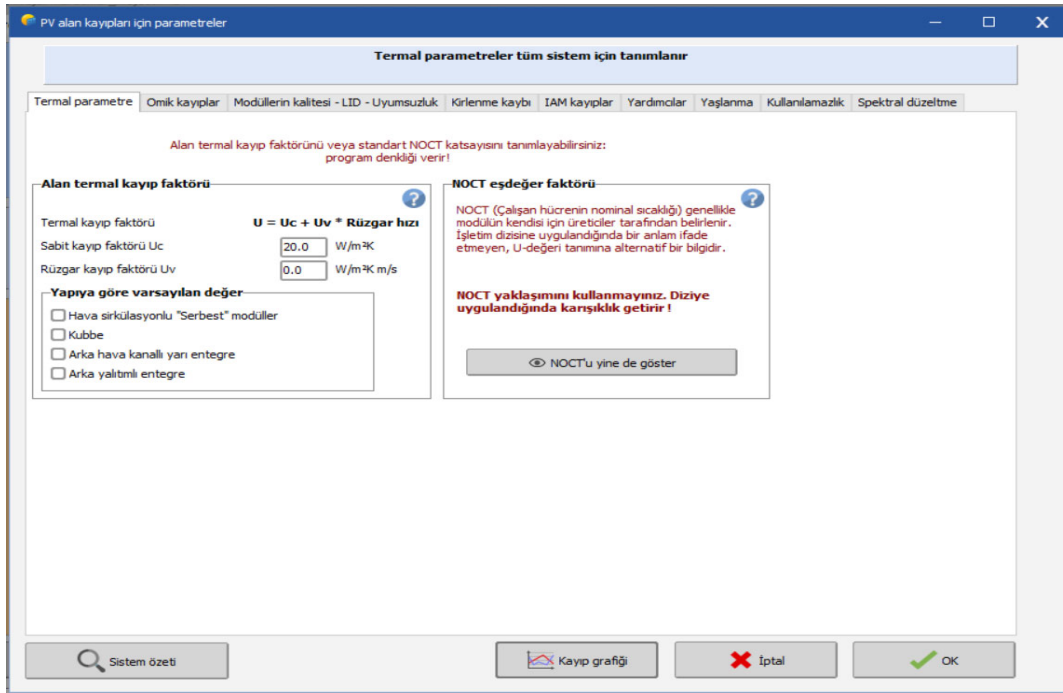


Şekil 12. Tek hat şeması

Gölgeleme, güneş enerjisi sistemlerinin verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahip kritik bir faktördür. Güneş panellerinin üzerine düşen gölgeler, panel verimliliğini azaltabilir ve dolayısıyla enerji üretimini olumsuz yönde etkileyebilir [11]. PVsyst benzeri tasarım yazılımları, gölgeleme analizleri yaparak, sistemde potansiyel gölgeleme kaynaklarını belirler ve bu gölgelerin panel üzerindeki etkilerini değerlendirir. Doğru bir gölgeleme analizi, güneş enerjisi sistemlerinin optimal konumlandırılması ve verimliliklerinin maksimum düzeye çıkarılması için kritiktir [12]. Modeli oluşturulan Gökşun belediyesi güneş enerji santralimizin ön yüzünde gölge oluşturacak ağaç, ev gibi nesnelere bulunmadığından sadece panel diziliminden kaynaklı birbirleri üzerine gün doğum ve batışına yakın zamanlarda bir gölgeleme olacağı varsayımıyla santralin 3 boyutlu gölgeleme çizimi Şekil 13'te gösterildiği gibi yapılarak sisteme aktarılmıştır.



Şekil 13. PVsyst programında santralin 3 boyutlu görüntüsü

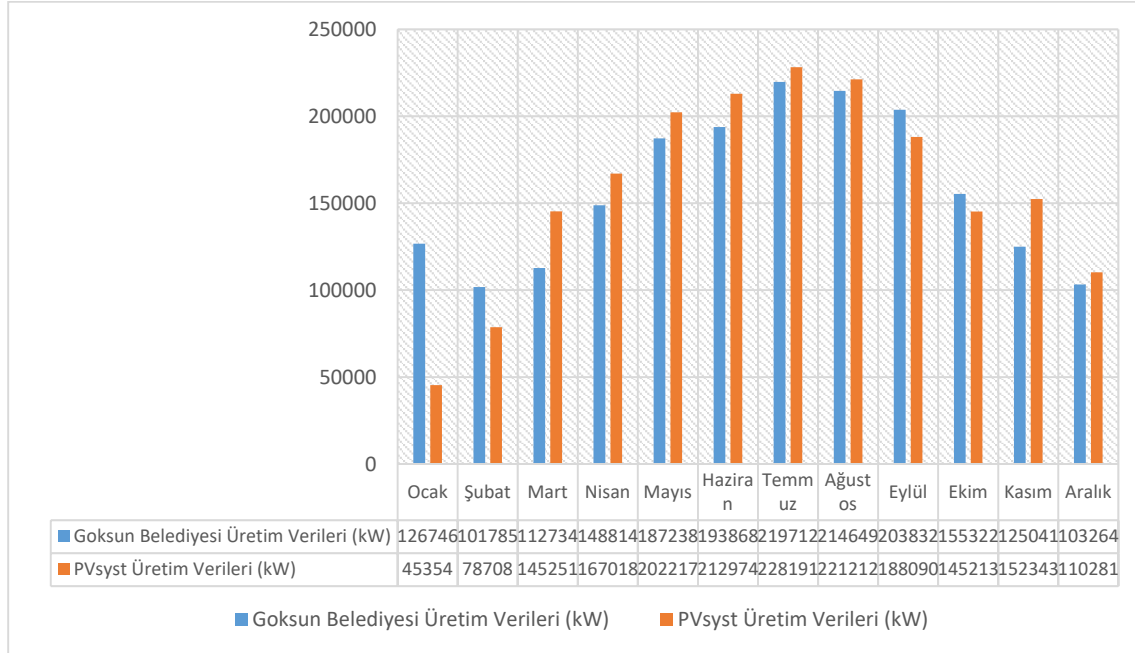


Şekil 14. Kayıplar bölümü ekran görüntüsü

PVsyst programındaki “Kayıplar” bölümü, enerji kayıplarını detaylı bir şekilde analiz ederek, sistem performansını saha koşullarında doğru bir şekilde tahmin etmeye yardımcı olur. Elektriksel, termal ve optik kayıpları içeren çeşitli faktörleri hesaplayarak, kullanıcılara sistemin optimize edilmesi için stratejiler sunar. Ayrıca, çevresel değişkenleri dikkate alarak günlük, aylık ve yıllık enerji üretimini daha doğru bir şekilde öngörür. “Kayıplar” bölümü, enerji kayıplarını minimuma indirmek için kullanıcılara önerilerde bulunarak, güneş enerjisi sistemlerinin çok daha yüksek verimlilikle çalışmasına imkan tanır. Bu nedenle, PVsyst’teki bu bölüm, güneş enerjisi projelerinin başarılı bir şekilde planlanması ve işletilmesi için kritik bir araçtır. Şekil 14’te kayıplar bölümünün ekran görüntüsü verilmiştir [13].

### 3. Bulgular ve Tartışma

PVsyst programı kullanılarak Göksun Belediyesi güneş enerjisi santralini modeli yukarıda detaylı bir şekilde açıklandığı şekilde oluşturularak santralin simülasyonu yapılmıştır. Simülasyon sonrasında santralin aylar ve yıllar bazında üreteceği enerji miktarı ve sistemde oluşacak kayıplar elde edilerek bu parametrelerin değerleri grafik veya tablo olarak gösterilmiştir. Sonrasında ise santralin simülasyonundan elde edilen bu parametre değerleri, santralin gerçek zamanlı çalışmasından elde edilen aynı parametre değerleri ile karşılaştırılarak sistemin ürettiği enerji ve sistemde oluşan kayıpların ayrıntılı bir analizi gerçekleştirilmiştir. Santralin ürettiği enerjinin aylık bazda gösterimi için simülasyondan elde edilen değerler ile bu parametrelere karşılık gelen gerçek zamanlı üretim değerleri Şekil 15’te verilmiştir.



Şekil 15. Üretim değerleri ile simülasyon değerleri karşılaştırması

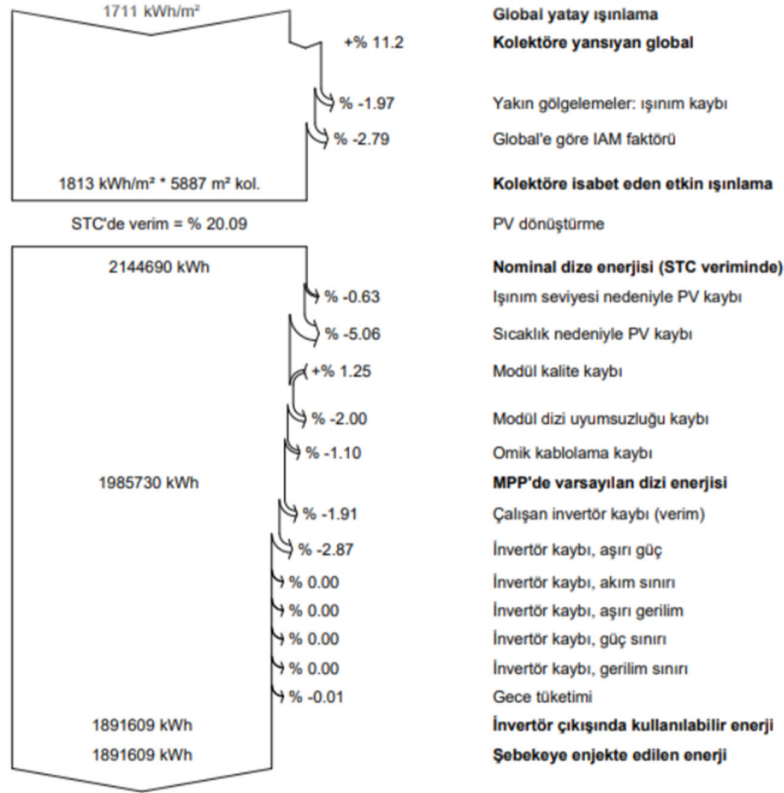
Şekil 15’e göre, Göksun Belediyesi güneş santrali bir yıl içinde gerçek zamanlı olarak toplamda 1893005 kWh elektrik enerjisi üretmiştir. Santralin PVsyst simülasyonu ise aynı süre zarfında 1896851 kW enerji üretilebileceğini tahmin etmiştir. İki set veri arasında sadece 3846 kWh yani %0,203’lük bir fark tespit edilmiştir.

Ocak, Şubat, Eylül, Ekim aylarında, güneş santralinden elde edilen gerçek üretim değerleri simülasyon sonuçlarından daha yüksekken, Mart, Nisan, Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos, Kasım ve Aralık aylarında simülasyon değerleri, gerçek üretim değerlerini aşmıştır. İki set arasındaki fark en



düşük Aralık ayında görülürken, en yüksek fark Ocak ayında kaydedilmiştir. En yüksek enerji üretimi Temmuz ayında 219,7 MWh ile gerçekleşmişken, en düşük üretim Şubat ayında 101,7 MWh ile kaydedilmiştir. Çizelge 1'e bakıldığında Göksun ilçesinin güneş ışığını en fazla Temmuz ayında aldığı görülmektedir. Bu sebeple en fazla elektrik enerjisi üretimi bu ayda gerçekleşmiştir. Diğer yandan, yine Şekil 8'den ilçenin Aralık ayında güneş ışığına en az maruz kaldığı görülmekte ve bu sebeple de bu ayın enerji üretimi açısından en düşük performansa sahip olması beklenmektedir. Ancak beklenenin aksine, ışınım alma miktarının Aralık ayından biraz daha fazla olduğu Şubat ayında enerji üretimi en düşük seviyededir. Bu durumun nedeninin, bu aydaki kar yağışı ve yağış sonrasında panellere gerekli bakımın zamanında yapılmamış olabileceği düşünülmektedir[14].

Şekil 16'da Göksun Belediyesi güneş santraline ait simülasyon sonuçlarından elde edilen kayıp akış diyagramı verilmiştir. Akış diyagramında görüleceği üzere, güneş panelleri 28 derecelik bir açı ile yerleştirildiğinde, panel yüzeyine gelen ışımaya yatay konumla karşılaştırıldığında %11.2 oranında artmaktadır. Bu artışın yanı sıra, panellerin birbirleri üzerinde oluşturduğu ışınım kaybı %1,97 olarak ölçülürken, birden fazla katmandan oluşan güneş panelleri için güneş ışığı bu katmanlar arasından geçerken yansıyan ışımaya yani IAM faktöründen kaynaklanan kayıp %2.79, tozlanma veya karlanmadan kaynaklı kayıp %3 iken, gölgelemenin sebep olduğu kayıp %0 olarak ölçülmüştür. Buna ek olarak panellerin zayıf ışık kaybı %0.63, panel sıcaklık kaybı %5.06, modül kalite kaybı %1,25, modül dizi uyumsuzluk kaybı %2.0 ve doğru akım kablolama kaybı %1.10 olmak üzere toplamda %10.04'lük dizi kaybı, %4,78 invertör kaybı ve %0.01 gece tüketiminden kaynaklı kayıplar mevcuttur.



Şekil 16. Kayıp akış diyagramı

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Bu makale, PVsyst'in etkili ve verimli bir şekilde kullanılması için gerekli adımları ve yönergeleri içerecek, programın en uygun şekilde kullanılmasını ve güneş enerjisi projelerinin daha isabetli ve doğru bir şekilde planlanmasını sağlayacaktır. PVsyst programıyla ilgili sınırlı sayıda çalışma bulunması, bu alandaki araştırmaların önemini ve gerekliliğini artırmaktadır. PVsyst'in güneş enerjisi projelerindeki kritik rolüne rağmen, programın kullanımıyla ilgili literatürde daha fazla yayın olmaması, bazı eksikliklerin ve geliştirilmesi gereken noktaların varlığını göstermektedir. Bu bağlamda, bu çalışmanın akademik camiada önemli bir katkı sağlayarak PVsyst programının kullanımıyla ilgili daha fazla bilgi sunması ve güneş enerjisi alanında yapılan araştırmalara destek olması beklenmektedir.

Çalışmada, Aralık 2021'de kurulan ve halen aktif enerji üretimi gerçekleştiren Göksun Belediyesi güneş enerjisi santralının gerçek zamanlı çalışması ve üretmiş olduğu elektrik enerjisi PVsyst programı kullanılarak simüle edilerek santralin performans analizi yapılmıştır. Simülasyon santralin 2023 senesi içindeki çalışması baz alınarak yapılmıştır. Sonrasında ise simülasyonda elde edilen değerler ile santralden alınan gerçek zamanlı karşılık gelen değerler karşılaştırılarak, PVsyst programının santral çalışmasını hangi doğrulukla modellediğine bakılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre, Göksun Belediyesi güneş santralının yıllık enerji üretim değeri 1893 MWh olarak tespit edilirken, PVsyst tarafından hesaplanan yıllık enerji üretim değeri ise 1896,8 MWh olarak hesaplanmıştır. Simüle edilen ve gerçekteki değerler arasında %0,203'lük fark bulunmaktadır. İki üretim değeri arasındaki bu yakınlık, PVsyst programının güneş enerjisi santrallerini yüksek doğrulukla modelleyerek simülasyonunu yapabildiğini göstermektedir.

Aylık üretim değerlerine bakıldığında, her iki veri setinde de en yüksek üretimin Temmuz ayında gerçekleştiği, en düşük üretimin ise Şubat ayında olduğu gözlemlenmiştir. Temmuz ayında Göksun ilçesinin almış olduğu yüksek güneş ışınım miktarı enerji üretimini maksimum seviyeye çıkarmıştır. Ancak, Aralık ayındaki ilçenin aldığı ışınım miktarı en düşük olmasına rağmen enerji üretiminin şubat ayında en düşük seviyede çıkmasında, şubat ayında yağın kar yağışının etkili olduğu düşünülmektedir.

Performans oranları karşılaştırıldığında, Haziran ve Temmuz aylarındaki performans oranlarının diğer aylara göre düşük kaldığı gözlemlenmiştir. Bu durumu yüksek sıcaklıkların invertör, paneller, kablolar üzerindeki etkilerine ve yaz mevsimindeki panel üzerindeki oluşan tozlanmaya bağlamak mümkündür.

Bu çalışmanın devamı niteliğinde yapılabilecek çalışma önerisi olarak Göksun ilçesi GES santralının simülasyonunun diğer popüler simülasyon programları ile yapılarak elde edilecek sonuçların PVsyst programından elde edilenler ile karşılaştırması verilebilir.

#### Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir kurum, kuruluş, kişi ile kişisel ve finansal çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedirler.

#### Kaynaklar

- [1] Küçükgoze OM. Erzincan İlinde Güneş Enerjili Elektrik Üretim Sisteminin Ekonomik Analizi. Yüksek Lisans Tezi. Erzincan: Erzincan Üniversitesi; 2016.
- [2] Ajder A. Fotovoltaik Güneş Enerjisi Sistemleri İçin Optimum Eğim Açısının Hesaplanması. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: Yıldız teknik Üniversitesi; 2011.
- [3] Enerji İşleri Genel Müdürlüğü (EİGM). <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/pages/46.aspx> (Erişim Tarihi: 29.03.2024).

- [4] Akcan E, Kuncan M, Minaz MR. "PVsyst Yazılımı ile 30 kW Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Sistemin Modellenmesi ve Simülasyonu". *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi* 2020;(18):248-261. <https://doi.org/10.31590/ejosat.685909>
- [5] Türkiye Elektrik İletim A.Ş (TEİAŞ). <https://www.teias.gov.tr/kurulu-guc-raporlari> (Erişim Tarihi: 16.12.2023).
- [6] Bigorajski J. Chwieduk D. (2019). "Analysis of a micro photovoltaic/thermal-PV/T system operation in moderate climate", *Renewable Energy* (2019);137:127-136
- [7] Tuğcu A. "PVSYST Simülasyon Aracı Kullanılarak Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Tavşanlı Yerleşkesi Şebeke Bağlantılı Güneş Enerjisi Santralinin Tasarımı ve Ekonomik Analizi". *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik Ve Fen Bilimleri Dergisi* 2023;9(2):397-417 <https://doi.org/10.34186/klujes.1251085>
- [8] Şahin ZR, Dinçer F, Yılmaz AS. "4 Kişilik Bir Ailenin Elektrik Enerjisi İhtiyacı İçin Şebeke Bağlantılı Güneş Enerjisi Santrali Tasarımı Ve Simülasyonu". *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* (2022);25(Özel Sayı):46-56.
- [9] Haydaroğlu C, Gümüş B. (2016). "Dicle Üniversitesi güneş enerjisi santralinin PVsyst ile simülasyonu ve performans parametrelerinin değerlendirilmesi". *Dicle Üniversitesi Mühendislik Dergisi* 2016; 7(3): 491-500.
- [10] Demiryürek HK, Arifoğlu U, Bolat M. "Lebit enerji güneş santralinin Pvsyst Programı ile analizi". *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 2020;9(3):1351-1363. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.650786>
- [11] Sougueh IY. Cibuti iklim şartlarında PV sistem ile pompa çalıştırılmasının modellenmesi. Yüksek lisans tezi. Karabük: Karabük Üniversitesi; 2022.
- [12] Aksangör NN. "Ankara Şartlarında Bir Fotovoltaik Sistemin PVsyst Programı Yardımı İle Performans Analizi". Yüksek Lisans Tezi. Ankara: Gazi Üniversitesi; 2019.
- [13] PVsyst. Scientific Publication. [www.pvsyst.com/scientific-publication](http://www.pvsyst.com/scientific-publication) (Erişim Tarihi: 27.01.2024).
- [14] Cengiz MS, Mamiş MS. "Termal güneş enerjisi kullanımı ve CSP sistemlerinin verimlilik analizi". *Bitlis Eren Üniversitesi Bitlis Eren University Journal of Science and Technology* 2016;5(1):1-13

## MODELING CHANGES IN THE QUALITY ATTRIBUTES OF COUSCOUS COOKED WITH OHMIC HEATING

**Basri OMAC<sup>1\*</sup>, Ali GOKSU<sup>2</sup>, Erdem ISIK<sup>3</sup>, and Serdal SABANCI<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Munzur University, Tunceli Vocational School, Department of Food Processing, Tunceli, 62000, Türkiye

<sup>2</sup>Munzur University, Faculty of Fine Arts, Design and Architecture, Department of Gastronomy and Culinary Arts, Tunceli, 62000, Türkiye

<sup>3</sup>Munzur University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Tunceli, 62000, Türkiye

<sup>4</sup>Munzur University, Faculty of Health Sciences, Department of Nutrition and Dietetics, Tunceli, 62000, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 25.04.2024 Kabul Tarihi/Accepted Date: 12.08.2024 DOI: 10.54365/adyumbd.1473698

### ABSTRACT

Kinetic studies on the quality alters of couscous are crucial to the suitable design of ohmic heating treatment. Hence, it has been targeted to build mathematical models to forecast the changes in quality attributes of couscous cooked using ohmic heating (OH) in the present study. In addition, the average power and total energy for cooking couscous with OH at a voltage gradient of 17 V/cm have been determined. Three dissimilar kinetic models—zero, first, and second—have been fitted to the data. Our findings have shown that, for the ohmic heating system, as cooking time increased, energy consumption increased while heating system efficacy declined. The best model to reflect the changes in color parameters has been the second-order model, while the zero-order model has provided the best fit for the experimental data observed for the cooking loss, moisture content, and weight increase (%). For all TPA parameters, however, neither model has yielded the greatest fit.

**Keywords:** *Pasta, texture, color, moisture content, cooking kinetics*

## OHMİK ISITMA İLE PİŞİRİLEN KUSKUSUN KALİTE ÖZELLİKLERİNDEKİ DEĞİŞİKLİKLERİN MODELLENMESİ

### ÖZET

Kuskusun kalite değişiklikleri üzerine yapılan kinetik çalışmalar, ohmik ısıtma işleminin uygun tasarımı için çok önemlidir. Bu nedenle, bu çalışmada ohmik ısıtma (OH) kullanılarak pişirilen kuskusun kalite özelliklerindeki değişiklikleri tahmin etmek için matematiksel modellerin oluşturulması hedeflenmiştir. Ayrıca 17 V/cm voltaj gradyanında OH ile kuskus pişirmek için gereken ortalama güç ve toplam enerji belirlendi. Üç farklı kinetik model (sıfır, birinci ve ikinci) verilerin modellenmesi için kullanıldı. Bulgularımız, ohmik ısıtma sistemi için pişirme süresi arttıkça enerji tüketiminin arttığını ve ısıtma sistemi etkinliğinin azaldığını gösterdi. Renk parametrelerindeki değişiklikleri en iyi yansıtan model ikinci dereceli model olurken, sıfır dereceli model pişirme kaybı, nem içeriği ve ağırlık artışı (%) için gözlemlenen deneysel verilere en iyi uyum sağlayan modeldir. Ancak tüm TPA parametrelerini için herhangi bir model tek başına en iyi uyumu sağlayamadı.

**Anahtar Kelimeler:** *Makarna, tekstür, renk, nem içeriği, pişirme kinetiği*

### 1. Introduction

Cooking dried pasta is a crucial step in the preparation of dishes because dried pasta can be produced with high quality, but its quality can be poor after the cooking process due to the incorrect cooking method [1]. Pasta is customarily cooked in boiling water for various times, which depends on the desired quality attributes, such as texture, color, and moisture content of the final product [2,3].

\*e-posta<sup>1</sup> : [basriomac@munzur.edu.tr](mailto:basriomac@munzur.edu.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6956-2720> (Sorumlu Yazar)  
e-posta<sup>2</sup> : [aligoksu58@hotmail.com](mailto:aligoksu58@hotmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2316-0704>  
e-posta<sup>3</sup> : [erdem@munzur.edu.tr](mailto:erdem@munzur.edu.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4715-6582>  
e-posta<sup>4</sup> : [serdalsabanci@hotmail.com](mailto:serdalsabanci@hotmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1630-0799>

Heat energy must be produced externally for conventional heating methods, and it is subsequently transferred to the food material by radiation, convection, and conduction [4]. Due to this indirect heat transfer, energy loss is too high during conventional heating [5]. Also, the outer surface of food materials is exposed to excessive heat processing, causing the degradation of food quality [4]. Hence, innovative heating techniques, such as ohmic heating, should be considered as an option to conventional heating to perform rapid and uniform heating for the purpose of enhancing heating efficiency and decreasing quality losses [4,5].

Using an electric current to heat food materials, ohmic heating (OH) is one of the direct heating methods [6]. This method has several advantages [7,8]. First, uniform heating can be achieved using OH because the electrical resistance of the heating permits the food material to be heated at the same rate. Second, OH reduces energy losses due to direct heating, thus providing fast heating and saving costs [6,9,10]. For example, Goksu et al. [10] found that the OH reduced the overall energy used in bulgur cooking by around 80% in comparison to traditional methods. Lastly, it can reduce the degradation of food quality [11].

Quantitative changes in quality attributes in thermal processes are crucial for the proper design of heat treatments, involving conventional or novel thermal processes, which need to deeply understand the thermal features of foods [5,12]. To minimize food quality degradation, the optimal process conditions should be selected. Therefore, many kinetic studies have been largely documented and discussed in the literature for conventional heat processes [1,5,12]. These models also contribute beneficial insights into understanding, forecasting, and managing food quality alterations throughout thermal processing [1,5]. Nevertheless, the research regarding the kinetic models developed for food products treated with ohmic heating is limited and most of them are about the kinetics of the quality of fruits and vegetables treated with this technology [13–15].

Therefore, the aim of the present study was (1) to develop kinetic models to conclude the alterations in quality characteristics of couscous cooked with ohmic heating (OH) depending on time; (2) to determine average power, current, and total energy values throughout the cooking process of dried couscous.

## 2. Materyal ve Method

### 2.1. Data

The data used in the present study was published in previous research [16]. Briefly, dried couscous was cooked in a 0.1% salt solution using an ohmic heating system. The cooking time started when the water started to boil. Following a specified cooking time (0, 4, 8, 12, and 16 min), the parameters of color, moisture content, texture profile analysis, total soluble solid content (TSSC), and weight gain (%) were determined by analyzing the samples. These parameters were selected based on studies already published [1-3,10].

### 2.2. Performance analysis

The general energy balance ( $E_{in}$ , Eq. 1) was applied to determine the energy input and output energy values throughout the cooking process [17].

$$E_{in} = E_{out} + E_{loss} \quad (1)$$

herein, the subscripts *in* and *out* represent input and output, respectively.

For the energy input in the cooking process, the ohmic energy ( $Q_{ohmic}$ ), ohmic heating equipment ( $Q_{eq, in}$ ), liquid ( $Q_{L, in}$ ), and solid ( $Q_{S, in}$ ) products in the cooking cell were considered as shown in Eq. 2.

$$E_{in} = Q_{ohmic} + Q_{S,in} + Q_{L,in} + Q_{Eq,in} \quad (2)$$

Also, the ohmic energy entering the cooking system was determined by using Eq. 3.

$$Q_{ohmic} = \sum[V \times I \times t] \quad (3)$$

herein,  $V$ ,  $I$ , and  $t$  represent voltage (V), current (A), and time (s), respectively.

Then, Eq. 4 was applied to determine the output energy ( $E_{out}$ ) value including removing water ( $Q_w$ ), solid ( $Q_{S,out}$ ) phase, and equipment ( $Q_{Eq,out}$ ), such as an electrode, test cell, cover, etc.

$$E_{out} = Q_{S,out} + Q_w + Q_{Eq,out} \quad (4)$$

During the cooking process, the energy input and output energy of liquid and solid phases and equipment were calculated by using Eq. 5. The temperature of liquid and solid phases was determined using T-type thermocouples whereas the temperature of equipment was evaluated using a thermal camera (Testo 882, Germany). The  $C_p$  values of the liquid and solid phases throughout the process were computed with the equation of [18] as follows.

$$Q_i = m_i \times Cp_i \times (T - T_0) \quad (5)$$

herein, the subscript “i” represents the solid and liquid phases and equipment whereas the subscript “0” represents the death state.

During the ohmic and conventional cooking process, the energy efficiency ( $\eta$ ) was calculated by using Eq. 6.

$$\eta (\%) = \frac{E_{out}}{E_{in}} \times 100 \quad (6)$$

### 2.3. Kinetic models

Several equations have been studied by researchers to find out the color and texture alterations of food materials as a function of process time [12,19,20]. The rate alteration of a quality factor  $C$  may be typically calculated by using Eq. 7.

$$\frac{dc}{dt} = -kC^n \quad (7)$$

herein,  $k$  symbolizes the kinetic rate constant,  $c$  symbolizes the concentration of a quality factor at a time ( $t$ ), and  $n$  symbolizes the order of the reaction. Chemical and physical changes in foods during processing were modeled in accordance with zero-order (Eq. 8), first-order (Eq. 9), and second order (Eq. 10) kinetic models derived as follows.

$$C = C_0 - k \times t \quad (8)$$

$$C = C_0 \times \exp(-k \times t) \quad (9)$$

$$\frac{1}{c} = \frac{1}{c_0} + k \times t \quad (10)$$

where  $C_0$  symbolizes the beginning value of the quality variable (before cooking),  $C$  symbolizes the value of the quality variable at a specific cooking time ( $t$ ), and  $k$  represents the rate constant of the quality variable ( $\text{min}^{-1}$ ). A positive value of  $k$  demonstrates a decrease whereas a negative value demonstrates an increase in the parameter throughout cooking.

The rightness of the three kinetic models was described by comparing the root mean squared errors (RMSE) and coefficient of determination ( $R^2$ ), which were provided by the software, SigmaPlot for windows version (11.0.0.77). In addition, the Akaike information criterion (AIC, Eq. 11) considers sample size and number variables in a model [21]. Therefore, it was used to compare the models.

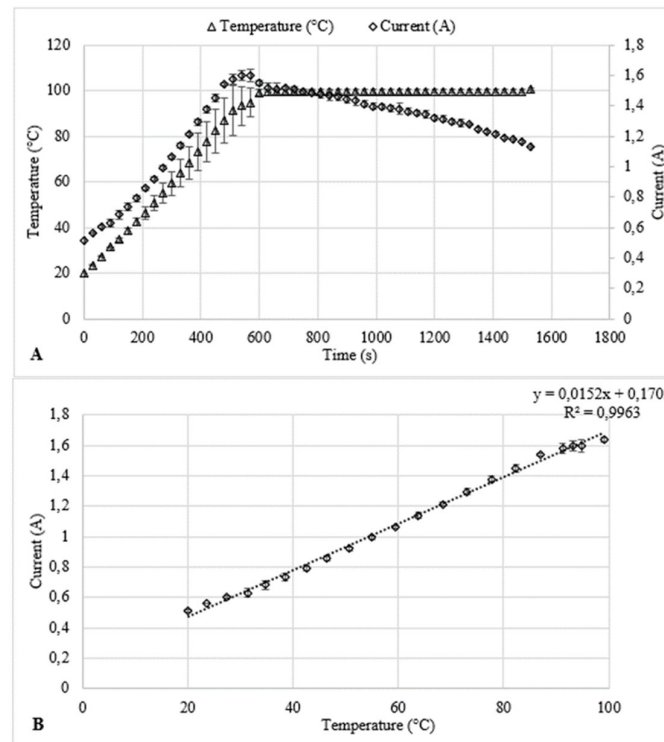
$$AIC = N \times \ln\left(\frac{SSE}{N}\right) + (2 \times (n + 1) + \left(\frac{2 \times (n+1) \times (n+2)}{N-n-2}\right)) \quad (11)$$

herein,  $N$  represents the count of observations,  $SSE$  represents the sum of the square error, and  $n$  represents the count of variables in the examined model.

### 3. Results and Discussion

#### 3.1. Performance analysis

In this study, couscous, an important pasta product, was cooked using ohmic heating technology, and temperature change, current, performance values, and cooking degree characteristics during the cooking process were investigated. Time-dependent temperature and current changes throughout the ohmic heating-assisted cooking process are provided in Figure 1A. During the cooking of couscous, a 0.1% salt couscous solution was first heated from 20 °C to 100 °C, and then the cooking operation was carried out at 4-minute intervals up to 16 minutes. The ohmic heating-assisted cooking process took  $545.9 \pm 18.6$  seconds to heat up to 100 °C in a fixed voltage gradient (17 V/cm).



**Figure 1.** During ohmic heating assisted cooking (A): current and temperature change with time and (B): current change with temperature

The time-dependent current alteration throughout the ohmic heating-assisted cooking treatment is given in Fig. 1B. Electrical conductivity (EC) is one of the primary variables during the ohmic heating treatment. The EC value depends on the current, voltage gradient, distance between two electrodes (m), and electrode contact surface area ( $m^2$ ). The distance and voltage gradient between the two electrodes was constant during ohmic heating-assisted cooking. However, electrode contact surface area ( $m^2$ ) and current were not constant during ohmic heating-assisted cooking. There were several factors affecting the electrode contact surface area such as swelling of the baked product, evaporation, and change in the density of the water. Because of these changes in it, current values were investigated in place of electrical conductivity in the ohmic heating-assisted cooking treatment in the present study. The current values

varied from 0.51 to 1.55 S/m when the temperature of the couscous specimens was altered from 20°C to 100°C while these values have been found to vary from 1.55 to 1.13 S/m for the samples cooked for 16 minutes at 100 °C, where the cooking treatment was started. In the ohmic heating-assisted cooking treatment, it has been found that the current value raised as the temperature raised throughout the heating stage and started to decline at the beginning of the cooking period. It has been found that the current value raised with the rise in molecular mobility as a result of the rise in temperature during heating. Due to the water being removed at the beginning of the cooking treatment, the molecular mobility in the product was limited and thus the current value was decreased. In studies where ohmic heating was used, it was observed that the current value enlarged as the temperature enlarged during the heating of products such as orange juice [22], grape juice [23], lemon juice [24], and sour cherry juice [6]. In addition, it has been published that the current value raised as a result of the rise in temperature in different food processing techniques such as thawing [9], evaporation [25], cooking [26], and extraction [7].

Also, it was discovered that temperature and current had a linear relationship that depended on the temperature rising throughout the ohmic heating-assisted cooking process (Fig. 2). When this relation was studied, it was noticed that the  $R^2$  value was above 0.99. As a result of the literature review, a linear correlation between current (or EC) and the temperature has been reported during heating, especially in heating different juices and milk [22,24,25]. In addition, it has been reported that there was a linear correlation between temperature and current during different processes with ohmic heating such as evaporation [27,28], extraction [29] and thawing [30].

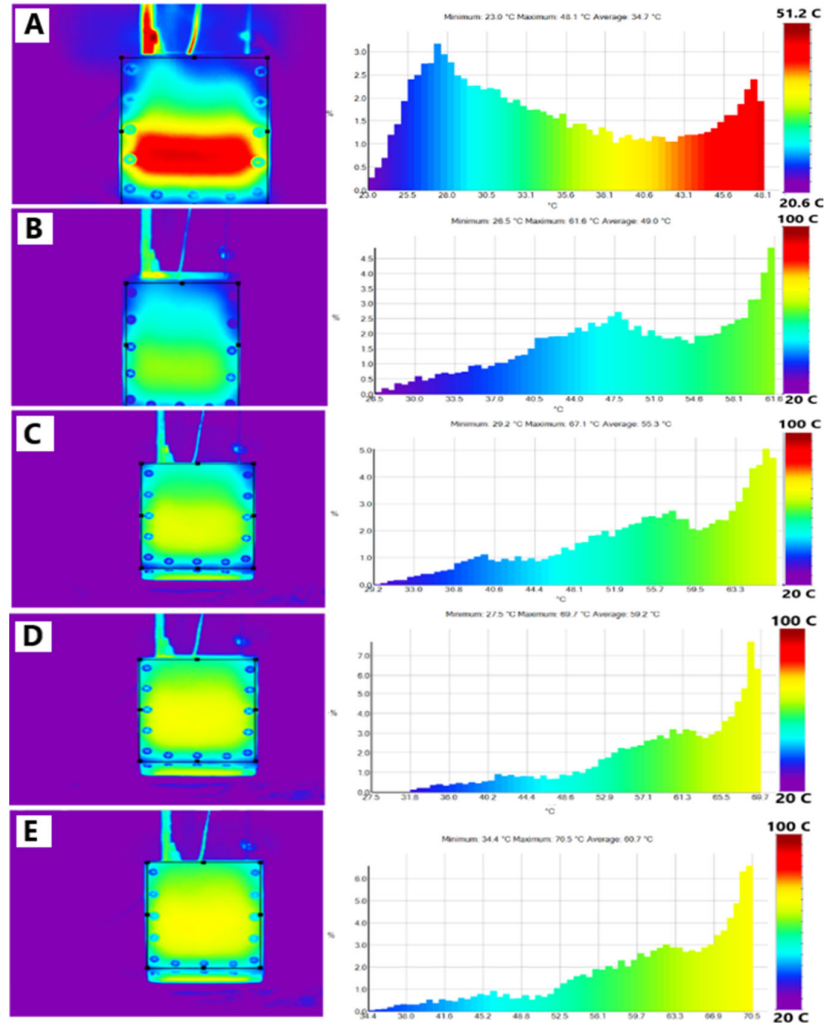
The total consumed energy (TCE), average power, and energy efficiency values depending on various process times during the ohmic heat cooking process are given in Table 1. As expected, TCE values raised as the process time raised. It has been found out that the increase in TCE value depended on the process time in the ohmic heating system. It has been found that the average power and TCE values altered with the change in the process time (Table 1). It has been found that the average power value is raised with increasing process time. Considering the energy efficiency values, it was determined that the holding time was adversely affected and decreased from 85.1% to 72.5%. It has been observed that significant losses in energy occurred with the increase in time for the heat transfer to the environment as a result of the raising holding time (Fig. 2). In addition, the current value decreased with the rise in the process time and the instant energy consumption was negatively affected due to this decrease. Similar energy consumption trends have been observed in different food ohmic-assisted heating applications such as evaporation [28], extraction [29], and thawing [30], and energy efficiency was adversely influenced by the rise in the processing time.

Owing to the lack of an opaque white center—a sign that the cooking process is finished—the couscous samples treated with OH required 12 minutes to cook [31]. Therefore, the conventional cooking process was implemented for 12 min. The energy required for couscous cooking with the conventional cooking technique was determined as  $871.2 \pm 46.8$  kJ. This value was approximately 5 times higher than that consumed in the OH. In addition, the average power value of OH was 126.7 W whereas the value of the conventional method was  $671 \pm 36$  W. Moreover, the energy efficiency of the conventional heating method (12 min) was 13.1% while it was calculated as 72.5% for OH for 12 min. Overall, the total energy consumed, average power, and energy efficiency of the conventional and OH treatments were significantly different for 12 min of cooking time ( $p < 0.05$ ).

Some of the energy generated by ohmic heating during the cooking process was lost as a result of the heat transfer between the container and the environment. Throughout the cooking treatment, the average temperature of the container increased with the rising cooking time. Thus, the amount of energy loss increased since the average temperature raised with increasing cooking time as seen in Fig. 2. In accordance with the outcomes acquired in the current study, the efficacy of ohmic heating reduced when the cooking time was increased because the energy loss between the container and environment was increased. Similarly, Goksu et al. [10] reported that during the pectin production by using ohmic heating at several voltage gradients (10, 13, 16, and 19 V/cm), the heat losses occurring on the surface of electrodes and containers were increased when the processing time was raised. As a result, the efficacy



of ohmic heating systems during the heating process is reduced with increasing cooking time or temperature.



**Figure 2.** Thermal camera images and surface temperature distributions of the ohmic system cell at different times (A: 0 min, B: 4 min, C: 8 min, D: 12 min, E: 16 min)

### 3.2. Kinetic models

The experimental color values of the couscous, such as L, a, b, chrome (C), total color change ( $\Delta E$ ), and browning index (BI) obtained from each cooking time, was fitted to zero order (Eq. 8), first order (Eq. 9), and second order (Eq. 10) models (Fig. 3). Kinetic parameters for color evolution of the couscous treated with ohmic heating at 17 V/cm are shown in Table 2. The model with the highest coefficient of determination ( $R^2$ ) and the least values of the Akaike information criterion (AIC) and root mean square error (RMSE) was chosen as the best one to describe the color change kinetics of the data. Overall, the second-order model is the best model based on  $R^2$ , RMSE, and AIC. On the other hand, Badin et al. [32] pointed out that  $a^*$ , L, and L-ascorbic acid values of crushed tomato samples due to the thermal degradation tracked the first order kinetic model, but they did not used the second order model, which may be better than the first order model. Furthermore, Gull et al. [33] found that color changes for pasta during

**Table 1.** Total consumed energy (TCE), average power, and energy efficiency values at different processing times during ohmic heating-assisted cooking

| Processing Time (min) | TCE (kJ)                                | Average Power (W)              | Energy Efficiency (%)      |
|-----------------------|---|--------------------------------|----------------------------|
| 0                     | 57.3 <sup>a</sup><br>(3.7) <sup>*</sup> | 105.1 <sup>a</sup><br>(0.0)    | 85.1 <sup>a</sup><br>(4.6) |
| 4                     | 91.6 <sup>b</sup><br>(3.2)              | 116.7 <sup>b</sup><br>(0.0)    | 74.3 <sup>b</sup><br>(2.6) |
| 8                     | 126.0 <sup>c</sup><br>(0.8)             | 122.9 <sup>b, c</sup><br>(0.0) | 74.6 <sup>b</sup><br>(0.5) |
| 12                    | 160.2 <sup>d</sup><br>(3.1)             | 126.7 <sup>c</sup><br>(0.0)    | 72.5 <sup>a</sup><br>(1.5) |
| 16                    | 193.1 <sup>c</sup><br>(3.8)             | 128.3 <sup>c</sup><br>(0.0)    | 72.5 <sup>a</sup><br>(1.4) |

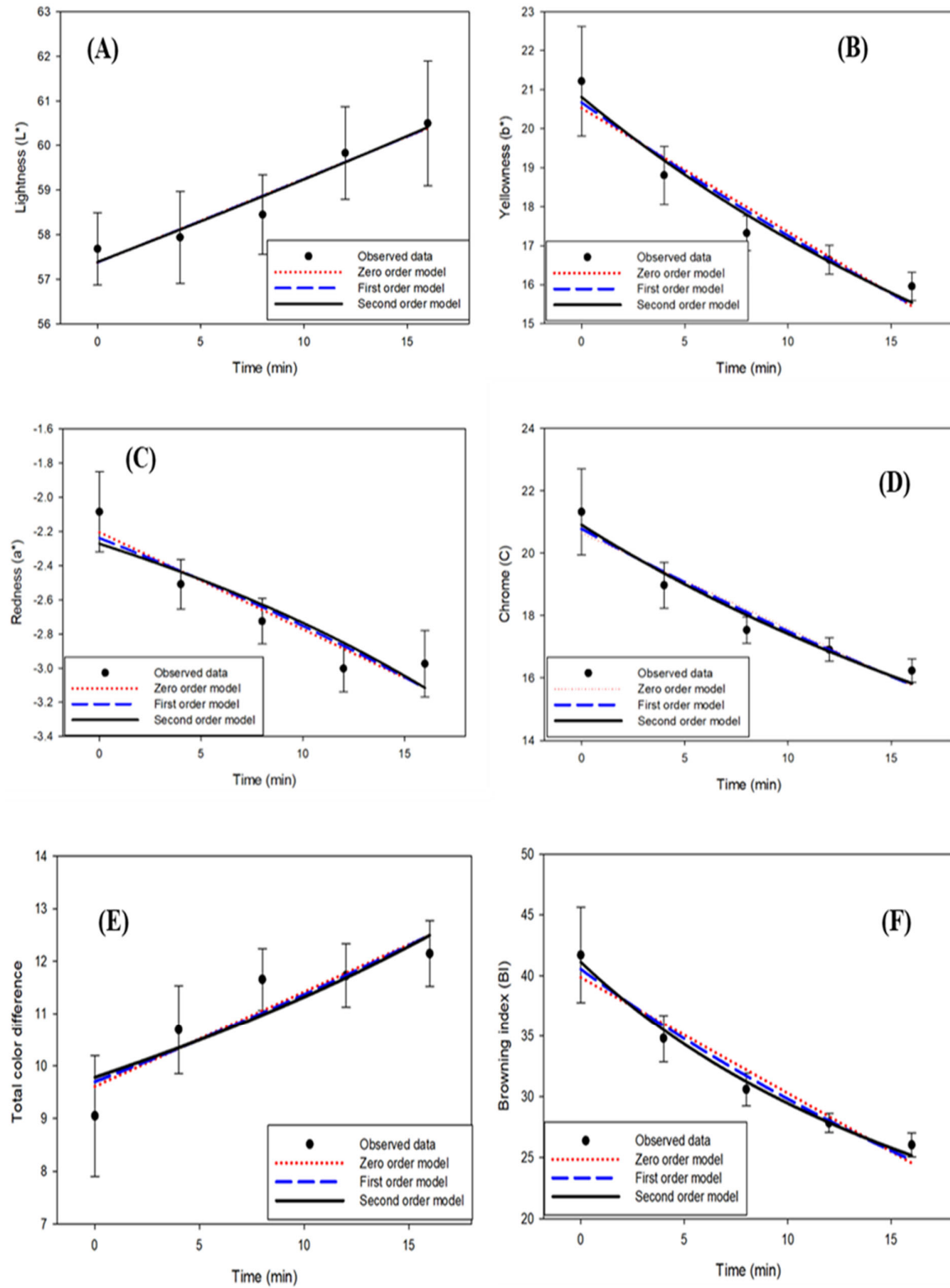
<sup>a, b, c, d, e</sup> Significant differences exist between the values in a column that has a different lowercase letter. ( $p < 0.05$ ).

<sup>\*</sup> Standard deviation.

storage followed zero order kinetic. Similarly, Olivera and Salvadori [34] stated that the alterations in the color of lasagna throughout storage were expressed from zero order kinetics. The difference between these studies and our results may be due to the thermal treatment used in the present study.

Figure 4 displays alters in TPA characteristics of the samples, including resilience, gumminess, chewiness, adhesiveness, hardness, and springiness. Kinetic parameters for TPA parameters of the couscous cooked with ohmic heating at 17 V/cm are displayed in Table 3. In terms of RMSE values, the zero, first, and second order did better in 29%, 14%, and 57% of the curves (7). In addition, when comparing the discrepancy in  $R^2$  value between Eq. 8, Eq. 9, and Eq. 10, the first (Eq. 9), and second order (Eq. 10) models fitted better one (14%) and six (86%), respectively, out of 7 curves. It is well recognized that when comparing models, the RMSE and  $R^2$  are typically not the best indicators [35]. Therefore, the values of the AIC criterion were calculated for comparing models used in the present study. The zero order (Eq. 8) and second order (Eq. 10) models were suitable for fitting the experimental data of springiness, cohesiveness, resilience and hardness, adhesiveness, gumminess, and chewiness, respectively, although neither model regularly generated the best fit to all TPA parameters on the basis of the Akaike information criteria (AIC) values. Gomez et al. [36] found that a linear model could be suitable to fit some TPA parameters, such as firmness, cohesiveness, springiness, curves of white bread, but it was not good for other TPA parameters such as resilience and gumminess.

Figure 5 shows the total soluble solid content (TSSC) values that entered the boiling water at different cooking durations (4, 8, 12, and 16 min). The models' parameters and statistical results are summarized in Table 4. Similarly, the percentage in weight increase and moisture content demonstrated a similar trend with TSSC (Fig 5). According to the models' results, the zero-order (Eq. 12) model was the better model to represent the alterations in TSSC, moisture content (%), and weight increase (%) during the cooking times (Table 4).



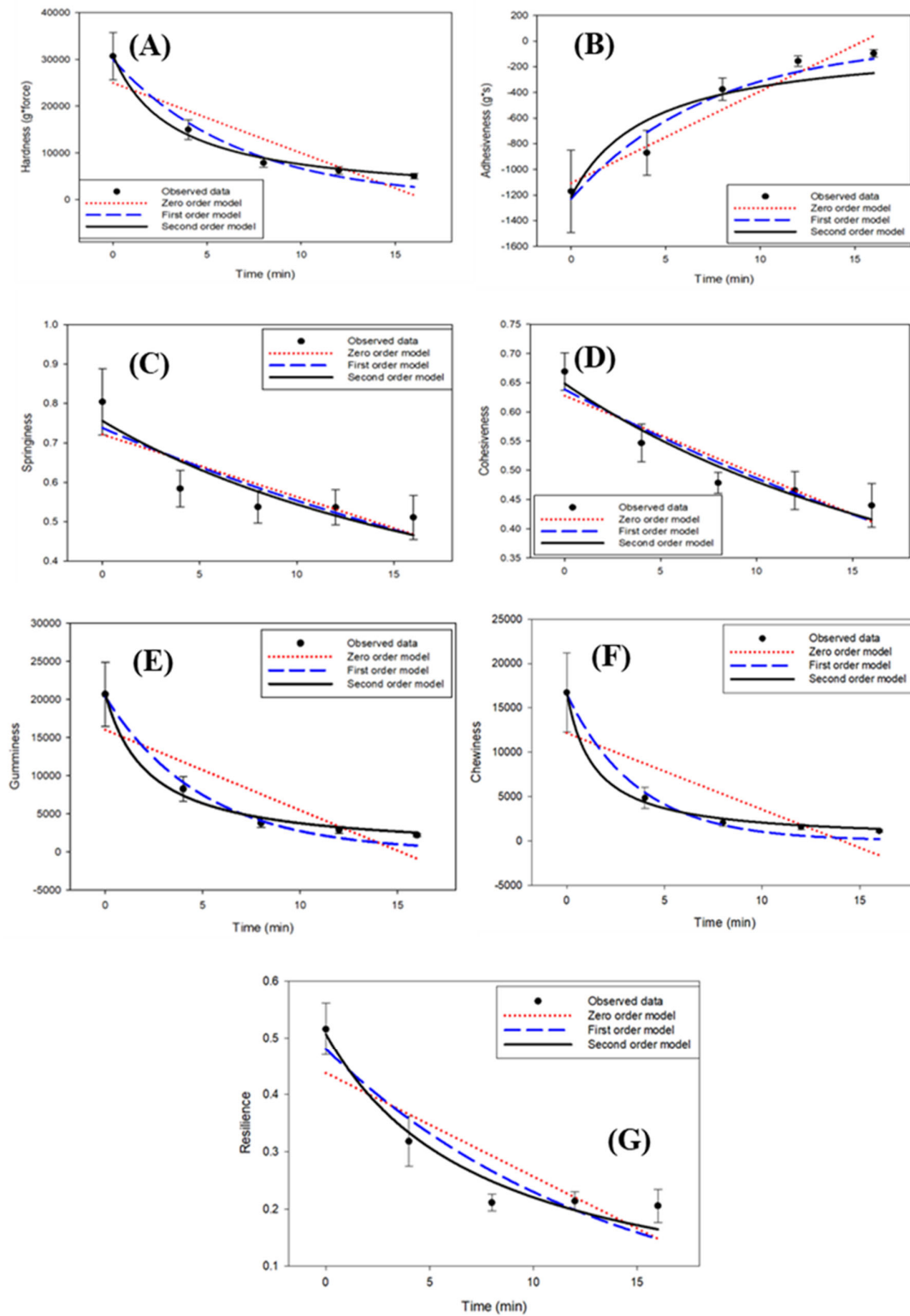
**Figure 3.** Kinetic change of color parameters (A) lightness ( $L^*$ ), (B) yellowness ( $b^*$ ), (C) redness ( $a^*$ ), and (D) chrome (C), (E) total color difference ( $\Delta E$ ), and (F) browning index (BI)

**Table 2.** Color kinetic parameters

| Model                   | Parameter                   | Lightness (L*)     | Redness (a*)     | Yellowness (b*)  | Chrome (C)       | Total color difference ( $\Delta E$ ) | Browning index (BI) |
|-------------------------|-----------------------------|--------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------------------------|---------------------|
| Zero order (Eq. 8)      | <sup>a</sup> C <sub>0</sub> | 57.37<br>(0.61)*   | -2.204<br>(0.24) | 20.52<br>(1.18)  | 20.64<br>(1.15)  | 9.604<br>(0.96)                       | 39.84<br>(3.17)     |
|                         | <sup>b</sup> k              | -0.188<br>(0.06)   | 0.057<br>(0.02)  | 0.317<br>(0.12)  | 0.306<br>(0.12)  | -0.181<br>(0.10)                      | 0.96<br>(0.32)      |
|                         | <sup>c</sup> RMSE           | 0.350              | 0.138            | 0.681            | 0.667            | 0.556                                 | 1.831               |
|                         | <sup>d</sup> R <sup>2</sup> | 0.94               | 0.90             | 0.92             | 0.92             | 0.85                                  | 0.94                |
|                         | <sup>e</sup> AIC            | -1.01              | -10.29           | 5.65             | 5.45             | 3.62                                  | 15.54               |
| The first order (Eq. 9) | C <sub>0</sub>              | 57.38<br>(0.59)    | -2.239<br>(0.26) | 20.67<br>(1.06)  | 20.77<br>(1.05)  | 9.695<br>(0.10)                       | 40.532<br>(2.48)    |
|                         | k                           | -0.003<br>(0.001)  | -0.02<br>(0.01)  | 0.018<br>(0.006) | 0.017<br>(0.006) | -0.016<br>(0.01)                      | 0.031<br>(0.01)     |
|                         | RMSE                        | 0.342              | 0.158            | 0.585            | 0.580            | 0.601                                 | 1.331               |
|                         | R <sup>2</sup>              | 0.94               | 0.87             | 0.94             | 0.94             | 0.82                                  | 0.97                |
|                         | AIC                         | -1.23              | -8.98            | 4.14             | 4.04             | 4.42                                  | 12.35               |
| Second order (Eq. 10)   | C <sub>0</sub>              | 57.47<br>(0.92)    | -2.272<br>(0.32) | 20.79<br>(1.89)  | 20.92<br>(1.86)  | 9.775<br>(2.33)                       | 41.152<br>(4.06)    |
|                         | k                           | -0.00005<br>(0.00) | 0.007<br>(0.004) | 0.001<br>(0.00)  | 0.001<br>(0.00)  | -0.001<br>(0.00)                      | 0.001<br>(0.00)     |
|                         | RMSE                        | 0.335              | 0.175            | 0.486            | 0.489            | 0.644                                 | 0.818               |
|                         | R <sup>2</sup>              | 0.94               | 0.84             | 96               | 0.96             | 0.80                                  | 0.99                |
|                         | AIC                         | -1.45              | -7.90            | 2.28             | 2.34             | 5.09                                  | 7.48                |

\* Standard deviation.

<sup>a</sup>C<sub>0</sub>: the initial value of the color parameter (before cooking)<sup>b</sup>k: the rate constant of the color parameter<sup>c</sup>RMSE: root mean square error<sup>d</sup>R<sup>2</sup>: the coefficient of determination<sup>e</sup>AIC: the Akaike information criterion



**Figure 4.** Kinetic change of (A) hardness, (B) adhesiveness, (C) springiness, and (D) cohesiveness, (E) gumminess, (F) chewiness, and (G) resilience

**Table 3.** Texture profile analysis (TPA) kinetic parameters

| Model                   | Parameter                   | Hardness (g)      | Adhesiveness (g*sec) | Springiness      | Cohesiveness     | Gumminess         | Chewiness         | Resilience      |
|-------------------------|-----------------------------|-------------------|----------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| Zero order (Eq. 8)      | <sup>a</sup> C <sub>0</sub> | 24963<br>(9581)*  | -1107<br>(241.4)     | 0.721<br>(0.132) | 0.628<br>(0.07)  | 15999<br>(7631)   | 12153<br>(3283)   | 0.438<br>(0.14) |
|                         | <sup>b</sup> k              | 1501<br>(977.9)   | -71.63<br>(24.64)    | 0.016<br>(0.013) | 0.014<br>(0.007) | 1055<br>(778.9)   | 861.89<br>(335.1) | 0.018<br>(0.01) |
|                         | <sup>c</sup> RMSE           | 5532              | 139.37               | 0.076            | 0.04             | 4406              | 4239              | 0.078           |
|                         | <sup>d</sup> R <sup>2</sup> | 0.80              | 0.93                 | 0.70             | 0.86             | 0.76              | 0.69              | 0.74            |
|                         | <sup>e</sup> AIC            | 95.68             | 58.86                | -16.26           | -22.59           | 93.40             | 93.01             | -16.00          |
| The first order (Eq. 9) | C <sub>0</sub>              | 29968<br>(4115)   | -1230<br>(241.59)    | 0.738<br>(0.128) | 0.638<br>(0.06)  | 20353<br>(2538)   | 16596<br>(864.8)  | 0.480<br>(0.11) |
|                         | k                           | 0.150<br>(0.04)   | 0.137<br>(0.05)      | 0.029<br>(0.021) | 0.027<br>(0.01)  | 0.2011<br>(0.023) | 0.278<br>(0.03)   | 0.074<br>(0.04) |
|                         | RMSE                        | 1916              | 113.49               | 0.069            | 0.035            | 1157              | 869.76            | 0.071           |
|                         | R <sup>2</sup>              | 0.97              | 0.96                 | 0.75             | 0.90             | 0.98              | 0.99              | 0.87            |
|                         | AIC                         | 85.08             | 56.81                | -17.20           | -24.13           | 80.03             | 77.18             | -19.34          |
| Second order (Eq. 10)   | C <sub>0</sub>              | 30813<br>(2059)   | -1250<br>(22360)     | 0.756<br>(23.61) | 0.648<br>(38.22) | 20715<br>(1235)   | 16743<br>(487.6)  | 0.507<br>(0.29) |
|                         | k                           | 0.00001<br>(0.00) | -0.0002<br>(0.00)    | 0.051<br>(0.03)  | 0.054<br>(0.02)  | 0.00002<br>(0.00) | 0.00004<br>(0.00) | 0.257<br>(0.09) |
|                         | RMSE                        | 925.20            | 195.99               | 0.061            | 0.028            | 695.05            | 424.70            | 0.035           |
|                         | R <sup>2</sup>              | 0.99              | 0.87                 | 0.81             | 0.93             | 0.99              | 1.00              | 0.95            |
|                         | AIC                         | 77.79             | 62.27                | -18.46           | -26.16           | 74.93             | 70.01             | -24.13          |

\* Standard deviation.

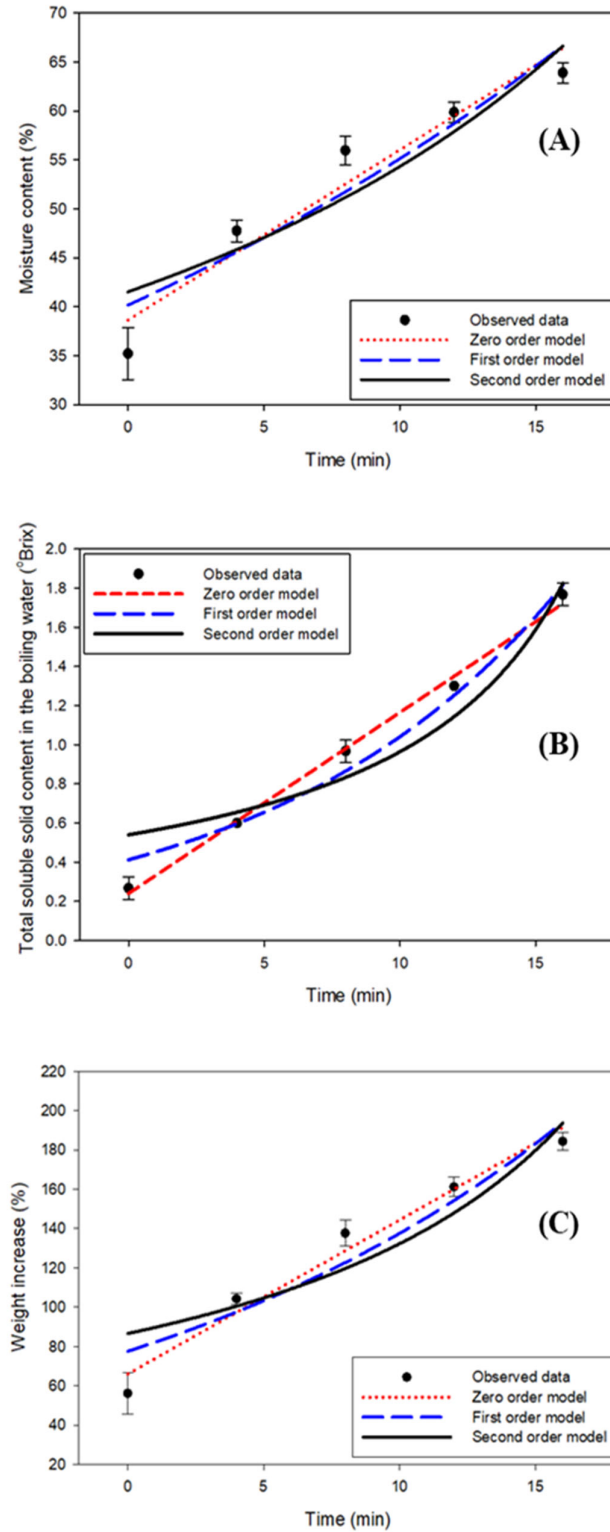
<sup>a</sup>C<sub>0</sub>: the initial value of the TPA parameter (before cooking)

<sup>b</sup>k: the rate constant of the TPA parameter

<sup>c</sup>RMSE: root mean square error

<sup>d</sup>R<sup>2</sup>: the coefficient of determination

<sup>e</sup>AIC: the Akaike information criterion



**Figure 5.** Kinetic change of (A) moisture content (MC), (B) total soluble solid content (TSSC), and (D) weight increase (WI)

**Table 4.** Kinetic parameters for weight increase (%), moisture content (%), and total soluble solid content (°brix)

| Model                   | Parameter          | Moisture content (%) | Total soluble solid content (°Brix) | Weight increase (%) |
|-------------------------|--------------------|----------------------|-------------------------------------|---------------------|
| Zero order (Eq. 8)      | <sup>a</sup> $C_0$ | 38.62<br>(5.89)*     | 0.24<br>(0.08)                      | 65.92<br>(16.63)    |
|                         | <sup>b</sup> $k$   | -1.74<br>(0.60)      | -0.09<br>(0.01)                     | -7.84<br>(1.70)     |
|                         | <sup>c</sup> RMSE  | 3.40                 | 0.04                                | 9.60                |
|                         | <sup>d</sup> $R^2$ | 0.93                 | 1.00                                | 0.97                |
|                         | <sup>e</sup> AIC   | 21.73                | -21.84                              | 32.11               |
| The first order (Eq. 9) | $C_0$              | 40.16<br>(6.78)      | 0.41<br>(0.13)                      | 77.53<br>(24.30)    |
|                         | $k$                | -0.03<br>(0.01)      | -0.09<br>(0.02)                     | -0.06<br>(0.03)     |
|                         | RMSE               | 4.31                 | 0.11                                | 17.05               |
|                         | $R^2$              | 0.89                 | 0.97                                | 0.91                |
|                         | AIC                | 24.11                | -12.61                              | 37.85               |
| Second order (Eq. 10)   | $C_0$              | 41.49<br>(8.03)      | 0.54<br>(0.72)                      | 86.21<br>(42.3)     |
|                         | $k$                | -0.0006<br>(0.00)    | -0.082<br>(0.05)                    | -0.0004<br>(0.05)   |
|                         | RMSE               | 5.09                 | 0.20                                | 22.60               |
|                         | $R^2$              | 0.85                 | 0.91                                | 0.85                |
|                         | AIC                | 25.77                | -6.47                               | 40.67               |

\* Standard deviation.

<sup>a</sup> $C_0$ : the initial value of the parameter (before cooking)<sup>b</sup> $k$ : the rate constant of the parameter<sup>c</sup>RMSE: root mean square error<sup>d</sup> $R^2$ : the coefficient of determination<sup>e</sup>AIC: the Akaike information criterion



#### 4. Conclusion

Our finding revealed that it is likely to apply the ohmic heating method for the cooking of dried couscous in advance of consumption. During the ohmic heating treatment, the current value was increased from 0.51 A to 1.55 A when the temperature was escalated from 20 °C to 100 °C. Then, the current value decreased from 1.55 A to 1.13 A due to the restriction of molecular mobility. The consumption of energy increased with the rise in the cooking time for the ohmic heating-assisted cooking process. Similarly, the energy losses raised since the temperature difference between the container and environment increased with increasing the cooking time according to the thermal camera's results. Thus, the efficacy of the ohmic heating-assisted cooking process was reduced with increasing cooking time.

In addition, the developed kinetic models can contribute to a deeper knowledge of the mechanism of the quality alterations throughout the ohmic heating process of couscous. These can be connected to physical-based models (such as heat and mass transfer) allowing the forecast of quality alterations throughout the ohmic heating process at 17 V/cm. Furthermore, the second order model was suitable to determine the color properties of couscous, whereas none of the models used in the present study were adequate alone for predicting all TPA parameters. Moreover, changes in TSSC, moisture content, and weight increase (%) can be defined using a zero-order model. Further studies are needed to determine whether changes in the voltage gradient have any effect on the best model used to represent the quality parameters of couscous.

#### Conflict Of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest

#### References

- [1] Cocci E, Sacchetti G, Vallicelli M, Angioloni A, Dalla Rosa M. Spaghetti cooking by microwave oven: Cooking kinetics and product quality. *Journal of Food Engineering* 2008; 85(4): 537–46.
- [2] De Noni I, Pagani MA. Cooking properties and heat damage of dried pasta as influenced by raw material characteristics and processing conditions. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 2010; 50(5): 465–72.
- [3] Dziki D, Laskowski J. Evaluation of the cooking quality of spaghetti. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences* 2005; 55(2): 153–8.
- [4] Wainaina I, Wafula E, Sila D, Kyomugasho C, Grauwet T, Van Loey A, Hendrickx M. Thermal treatment of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.): Factors determining cooking time and its consequences for sensory and nutritional quality. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 2021; 20(4): 3690–718.
- [5] Ling B, Tang J, Kong F, Mitcham EJ, Wang S. Kinetics of food quality changes during thermal processing: A review. *Food and Bioprocess Technology* 2015; 8(2): 343–58.
- [6] Sabanci S, Icier F. Enhancement of the performance of sour cherry juice concentration process in vacuum evaporator by assisting ohmic heating source. *Food and Bioproducts Processing* 2020; 122: 269–79.
- [7] Cilingir S, Goksu A, Sabanci S. Production of pectin from lemon peel powder using ohmic heating-assisted extraction process. *Food and Bioprocess Technology* 2021; 14(7): 1349–60.
- [8] Gavahian M, Tiwari BK, Chu YH, Ting Y, Farahnaky A. Food texture as affected by ohmic heating: Mechanisms involved, recent findings, benefits, and limitations. *Trends in Food Science & Technology* 2019; 86: 328–39.
- [9] Cevik M, Icier F. Characterization of viscoelastic properties of minced beef meat thawed by ohmic and conventional methods. *Food Science and Technology International* 2020; 26(4): 277–90.

- [10] Goksu A, Omac B, Sabanci S. Ohmic heating: A futuristic method for cooking bulgur. *Journal of Food Processing and Preservation* 2022; 46(11): e17025.
- [11] Alkanan ZT, Altemimi AB, Al-Hilphy ARS, Watson DG, Pratap-Singh A. Ohmic heating in the food industry: Developments in concepts and applications during 2013–2020. *Applied Sciences* 2021; 11(6): 2507.
- [12] Sadika Tuly S, Mahiuddin M, Karim A. Mathematical modeling of nutritional, color, texture, and microbial activity changes in fruit and vegetables during drying: A critical review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 2023; 63(13): 1877-1900.
- [13] Castro I, Teixeira JA, Salengke S, Sastry SK, Vicente AA. Ohmic heating of strawberry products: electrical conductivity measurements and ascorbic acid degradation kinetics. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 2004; 5(1): 27–36.
- [14] Darvishi H, Salami P, Fadavi A, Saba MK. Processing kinetics, quality and thermodynamic evaluation of mulberry juice concentration process using Ohmic heating. *Food and Bioprocess Processing* 2020; 123: 102–10.
- [15] Jakób A, Bryjak J, Wójtowicz H, Illeová V, Annus J, Polakovič M. Inactivation kinetics of food enzymes during ohmic heating. *Food Chemistry* 2010; 123(2): 369–76.
- [16] Omac B, Goksu A, Işık E, Sabanci S. The effect of ohmic heating on the quality properties of couscous during cooking. *Black Sea Journal of Agriculture* 2023; 6(6): 615–21.
- [17] Sabanci S, Icier F. Enhancement of the performance of sour cherry juice concentration process in vacuum evaporator by assisting ohmic heating source. *Food and Bioprocess Processing* 2020; 122: 269–279
- [18] Choi YH. Effects of temperature and composition on the thermal conductivity and thermal diffusivity of some food components. *Korean Journal of Food Science and Technology* 1986; 18(5): 357–63.
- [19] Ercoskun H, Özkal SG. Kinetics of traditional Turkish sausage quality aspects during fermentation. *Food Control* 2011; 22(2): 165–72.
- [20] Sehrawat R, Nema PK, Kaur BP. Effect of superheated steam drying on properties of foodstuffs and kinetic modeling. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 2016; 34: 285–301.
- [21] Soro AB, Whyte P, Bolton DJ, Tiwari BK. Modelling the effect of UV light at different wavelengths and treatment combinations on the inactivation of *Campylobacter jejuni*. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 2021; 69: 102626.
- [22] Icier F, Ilicali C. The effects of concentration on electrical conductivity of orange juice concentrates during ohmic heating. *European Food Research and Technology* 2010; 220(3): 406–14.
- [23] Assawarachan R. Estimation model for electrical conductivity of red grape juice. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 2010; 3(2): 52–7.
- [24] Darvishi H, Hosainpour A, Nargesi F, Khoshtaghaza MH, Torang H. Ohmic processing: Temperature dependent electrical conductivities of lemon juice. *Modern Applied Sciences* 2011; 5(1): 209.
- [25] Cevik M. Electrical conductivity and performance evaluation of verjuice concentration process using ohmic heating method. *Journal of Food Process Engineering* 2021; 44(5): e13672.
- [26] Bozkurt H, Icier F. Electrical conductivity changes of minced beef-fat blends during ohmic cooking. *Journal of Food Engineering* 2010; 96(1): 86-92.
- [27] Icier F, Yildiz H, Sabanci S, Cevik M, Cokgezme OF. Ohmic heating assisted vacuum evaporation of pomegranate juice: Electrical conductivity changes. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 2017; 39: 241–6.
- [28] Icier F, Cokgezme ÖF, Döner D, Bayana D, Kaya O, Çabas BM. Mathematical modelling of vacuum ohmic evaporation process. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 2021; 67: 102560.
- [29] Tunç MT, Odabaş Hİ. Single-step recovery of pectin and essential oil from lemon waste by ohmic heating assisted extraction/hydrodistillation: A multi-response optimization study. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 2021; 74: 102850.
- [30] Balthazar CF, Cabral L, Guimarães JT, Noronha MF, Cappato LP, Cruz AG, Sant’Ana AS. Conventional and ohmic heating pasteurization of fresh and thawed sheep milk: Energy

- consumption and assessment of bacterial microbiota during refrigerated storage. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 2022; 76: 102947.
- [31] Bayram M. Determination of the cooking degree for bulgur production using amylose/iodine, centre cutting and light scattering methods. *Food Control* 2006; 17(5): 331–5.
- [32] Badin EE, Quevedo-Leon R, Ibarz A, Ribotta PD, Lespinard AR. Kinetic modeling of thermal degradation of color, lycopene, and ascorbic acid in crushed tomato. *Food and Bioprocess Technology* 2021; 14(2): 324–33.
- [33] Gull A, Prasad K, Kumar P. Quality changes in functional pasta during storage in two different packaging materials: LDPE and BOPP. *Journal of Food Processing and Preservation* 2017; 41(5): e13115.
- [34] Olivera DF, Salvadori VO. Kinetic modeling of quality changes of chilled ready to serve lasagna. *Journal of Food Engineering* 2012;110(3): 487–92.
- [35] Kumar A, Ng D, Cao B. Fate of *Enterococcus faecalis* in stormwater matrices under ultraviolet-A (365 nm) irradiation. *Environmental Science Water Research & Technology* 2018; 4(5): 639–643.
- [36] Gómez M, Oliete B, Pando V, Ronda F, Caballero PA. Effect of fermentation conditions on bread staling kinetics. *European Food Research and Technology* 2008; 226(6): 1379–87.

## ATMOSFERİK SALINIMLARIN İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ: HATAY İLİ ÖRNEĞİ

Emir Cengiz DURGUN<sup>1</sup>, Utku ZEYBEKOĞLU<sup>2</sup>, Oğuz ŞİMŞEK<sup>3\*</sup>

<sup>1-3</sup>Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa, 063050, Türkiye

<sup>2</sup>Sinop Üniversitesi, Boyabat Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Sinop, 57200, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 11.05.2024 Kabul Tarihi/Accepted Date: 21.08.2024 DOI: 10.54365/adyumbd.1482163

### ÖZET

İklim değişikliği ve küresel ısınma neticesinde, azalan yağış ve artan sıcaklık kuraklığın oluşumunu hızlandırmaktadır. Kuraklığın zamansal ve mekansal değerlendirilmesi, kuraklığın neden olacağı olumsuzlukların yaşanmasını veya etkilerinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Bu çalışmada, Türkiye'nin güneyinde Suriye sınırında bulunan Hatay il sınırları içerisinde bulunan dört farklı meteoroloji gözlem istasyonunda 1970-2022 yılları arasındaki yağış ve SYİ yöntemiyle hesaplanan meteorolojik kuraklık indis değerlerinin zamansal ve mekansal değişimi değerlendirilmiştir. Ayrıca, bu iki parametrenin Kuzey Atlantik Salınımı (KAS), Arktik Salınımı (AS), Akdeniz 1 Salınımı (AKS1) ve Akdeniz 2 Salınımı (AKS2) ile olan ilişkisi belirlenmiştir. Kuraklığın değerlendirilmesinde Standartlaştırılmış Yağış İndeksi (SYİ), parametrelerin trendinin belirlenmesinde ise Mann-Kendall (MK) ve Spearman Rho (SR) yöntemleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, 12 aylık SYİ indis değerlerinde sadece Antakya istasyonunda kuraklık oluşum oranı %50'den büyük olmuştur. En şiddetli kuraklık Antakya istasyonunda 1989 yılında, İskenderun istasyonunda 1972 yılında, Dörtöyl ve Samandağ istasyonlarında ise 2022 yılında yaşanmıştır. Çalışma bölgesinde "Hafif Kurak" ve "Hafif Yağışlı" kuraklık sınıflarının oluşma oranı diğer kuraklık sınıflarından daha büyüktür. İncelenen istasyonlar arasında sadece İskenderun istasyonunda, MK ve SR yöntemlerinde istatistiksel olarak artan trend belirlenmiştir. Dörtöyl istasyonunda elde edilen yağış ve SYİ değerleriyle atmosferik salınımlar arasında negatif korelasyon bulunmuştur. Yıllık kuraklıklarda AS ve KAS ile tüm istasyonlar arasında negatif ilişki görülmektedir. Sonuç olarak, mekansal değerlendirmelerden gelecek yıllarda İskenderun istasyonunun bulunduğu bölgenin taşkın veya sel açısından büyük riskler taşıdığı, çalışma bölgesinin güney kesiminin ise kuraklık açısından daha riskli olduğu tespit edilmiştir. Bölgede, yağış ve kuraklıkta meydana gelen değişimin incelenen salınımlarla ilişkisinin zayıf olduğu belirlenmiştir.

*Anahtar Kelimeler:* Hatay, Meteorolojik kuraklık, Atmosferik salınım, Trend analizi, Korelasyon katsayısı

## ASSESSMENT OF THE EFFECTS OF ATMOSPHERIC OSCILLATIONS ON CLIMATE CHANGE: THE EXAMPLE OF HATAY PROVINCE

### ABSTRACT

As a result of climate change and global warming, decreasing precipitation and increasing temperature accelerate the occurrence of drought. Temporal and spatial evaluation of drought helps prevent or reduce the effects of drought. In this study, the temporal and spatial changes of meteorological drought index values calculated by the rainfall and SPI method between 1970 and 2022 at four different meteorological observation stations within the borders of Hatay province, located on the Syrian border in the south of Turkey, were evaluated. Additionally, the relationship of these two parameters with the North Atlantic (NAO), Arctic (AO), Mediterranean 1 (MIO1) and Mediterranean 2 (MIO2) oscillations was determined. Standardized Precipitation Index (SPI) was used to evaluate drought, and Mann-Kendall (MK) and Spearman Rho (SR) methods were used to determine the trend of the parameters. As a result of the study, the drought occurrence rate was greater than 50% only in Antakya station in the 12-month SYI index values. The most severe drought was experienced at Antakya station in 1989, at İskenderun station in 1972, and at Dörtöyl and Samandağ stations in 2022. The occurrence rate of "Mild Dry" and "Mild Rainy" drought classes in the study region is higher than other drought classes. Among the stations

e-posta<sup>1</sup> : [emir\\_cengiz89@hotmail.com](mailto:emir_cengiz89@hotmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-7594-2240>

e-posta<sup>2</sup> : [utkuz@sinop.edu.tr](mailto:utkuz@sinop.edu.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5307-8563>

\* e-posta<sup>3</sup> : [oguzsimsek@harran.edu.tr](mailto:oguzsimsek@harran.edu.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6324-0229> (Sorumlu Yazar)

examined, a statistically increasing trend was determined only in Iskenderun station in MK and SR methods. A negative correlation was found between precipitation and SPI values obtained at Dörtöyol station and atmospheric oscillations. There is a negative relationship between AO and NAO and all stations in annual droughts. As a result, from spatial evaluations, it has been determined that the region where the Iskenderun station is located carries great risks in terms of floods in the coming years, and the southern part of the study area is more risky in terms of drought. It has been determined that the change in precipitation and drought in the region has a weak relationship with the oscillations examined.

**Keywords:** *Hatay, Meteorological drought, Atmospheric oscillation, Trend analysis, Correlation coefficient*

## 1. Giriş

Günümüzde, iklim deđiŐikliđinin etkileri giderek daha bir net Şekilde hissedilmeye başlanmış ve dünya genelindeki iklim sistemleri üzerinde yıkıcı ve kalıcı etkilere neden olduğu yaşanan afetlerden anlaşılmaktadır. Bu etkiler arasında, atmosferik salınımların ve kuraklık olgusunun ilişkisi, bilim dünyasının ve karar vericilerin yakından incelediği konulardan biridir. Atmosferik salınımlar, dünya atmosferindeki basınç, sıcaklık, nem gibi meteorolojik faktörlerde meydana gelen değişiklikler olarak tanımlanırken ve bu salınımlar genellikle bölgesel veya küresel iklim sistemlerini etkileyebilmektedir. Bu salınımların büyüklüğu, süresi ve mevsimsel dağılımı, yağış desenleri ve iklim modelleri üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Öte yandan, kuraklık; belirli bir bölgede normalden daha az yağış alınması, su kaynaklarının azalması veya toprak neminin azalmasıyla karakterize edilen bir doğa olayıdır [1-2]. Kuraklık, tarım, su kaynakları, ekosistemler ve insan sağlığı gibi birçok alanda ciddi sonuçlara neden olabilir [3]. Atmosferik salınımların etkisiyle yağış gibi parametrelerde meydana gelecek azalma sonucunda kuraklık olayı kaçınılmaz olacaktır. Atmosferik salınımlar neticesinde değişim iklim koşulları altında yađıŐta meydana gelecek artış ani sel ve taşkınların yaŐanmasına neden olabilecektir.

Bu bağlamda, atmosferik salınımlar ile kuraklık arasındaki ilişkinin belirlenmesi ve anlaşılması büyük önem taşımaktadır [4]. Bu ilişkinin doğru bir Şekilde anlaşılması, gelecekteki kuraklık olaylarını tahmin etme ve bu olayların etkilerini azaltma çabalarına önemli bir katkı sağlayabilecektir. Atmosferik salınımların kuraklık oluşumuna etkileri, iklim modelleri ve veri analizi aracılığıyla incelenmektedir [5]. Bu çalışmalar, kuraklıkla mücadele stratejilerinin geliştirilmesine, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimine ve tarımın iklim deđiŐikliđiyle uyumlu hale getirilmesine yardımcı olabilir [6]. Ayrıca, tarım, su kaynakları yönetimi, ormancılık gibi sektörlerde karar vericilerin, kuraklık riskini azaltmak için daha etkili politikalar geliŐtirmelerine yardımcı olabilir. Özellikle, gelecekteki kuraklık olaylarının olası etkilerini değerlendirmek ve bu etkilere hazırlıklı olmak için atmosferik salınımlar ile kuraklık arasındaki ilişkiyi anlamak kritik öneme sahiptir.

Kuraklığın analizinde farklı kuraklık indisleri geliştirilmiş olsa da en yaygın kullanılan yöntem Standartlaştırılmış Yağış İndeksi (SYİ) yöntemidir [7-8]. Bu yöntemin araştırmacılar tarafından sık tercih edilmesinde indis değerinin hesaplanması için sadece yağış parametresini gerektirmesi ve hesaplama kolaylığının olması etkin rol oynamaktadır. Daha sonraki yıllarda, farklı araştırmacılar tarafından geliştirilen ve kuraklığın değerlendirilmesinde yağış verisinin yanında sıcaklık, nem ve potansiyel evapotranspirasyon değerleri gibi daha fazla parametrenin kullanımını gerektiren diğer yöntemlerin sonuçlarıyla SYİ yöntemi sonuçlarının benzer olduğu birçok çalışma sonucunda ortaya konmuŐtur [9-10]. Kuraklığın zamansal değişiminin yanında kuraklıkta meydana gelen azalış veya artış trendlerinin de belirlenmesi kuraklığın daha etkin izlenmesi ve tedbir düzeyinin belirlenmesi açısından önemlidir. Herhangi bir zaman serisindeki trendin belirlenmesinde Mann-Kendall (MK) ve Sperman Rho yöntemleri oldukça sık kullanılan bir yöntemlerdir [11-12]. Bu yöntemler sonucunda elde edilen test istatistiklerinin anlamlı olup olmadığı farklı anlamlılık düzeylerinde belirlenmektedir [13-15].

Türkiye'nin Akdeniz Bölgesi, iklim deđiŐikliđinin etkilerini oldukça yoğun bir Şekilde hissedilen bir bölgedir [16]. Bu bölgedeki kuraklık olayları, tarım, su kaynakları yönetimi ve ekosistemler üzerinde önemli etkilere sahiptir [17]. Atmosferik salınımlar, bu kuraklık olaylarının oluŐumunda ve süresinde kritik bir rol oynayabilir. Özellikle, Türkiye'nin Akdeniz Bölgesi'ndeki kuraklık ve atmosferik salınımlar arasındaki ilişkiyi inceleyen çalışmalar genellikle iklim modellemesi, meteorolojik verilerin analizi ve uzun vadeli iklim trendlerinin değerlendirilmesi gibi yöntemleri kullanmıştır [18]. Bu çalışmalar,

bölgedeki kuraklık eğilimlerini belirlemeye, kuraklık dönemlerinin atmosferik koşullarla nasıl ilişkilendirildiğini anlamaya ve gelecekteki kuraklık risklerini tahmin etmeye odaklanabilir [19]. Özetle, atmosferik salınımlar ile Türkiye'nin Akdeniz Bölgesi'ndeki kuraklık ilişkisini belirlemeye yönelik yapılan çalışmalar, bölgedeki iklim değişikliği etkilerini anlamak ve uygun çözümler geliştirmek için önemlidir. Bu çalışmalar, bölgedeki su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi, tarımın iklim değişikliğiyle uyumlu hale getirilmesi ve kuraklık risklerinin azaltılması gibi konularda politika yapıcılar ve yerel yönetimler için önemli bilgiler sağlayabilir [20]. Akdeniz bölgesi gibi yoğun tarımsal ve turistik faaliyetlerin yürütüldüğü bir bölgede iklim parametreleri ve meteorolojik kuraklık indis değerlerinin trendinin belirlenmesi ve bu deđerŐenkenlerin hava olayları üzerinde etkili olduğu bilinen salınımlarla olan ilişkisinin ortaya konması bu çalışmanın ana motivasyon kaynağını oluşturmaktadır. Ayrıca, farklı kuraklık sınıflarının oluŐumlarının ve trend istatistiklerinin mekansal dağılımlarının irdelenmesi çalışmayı literatürden ayıran bir diğer özellik olmuştur.

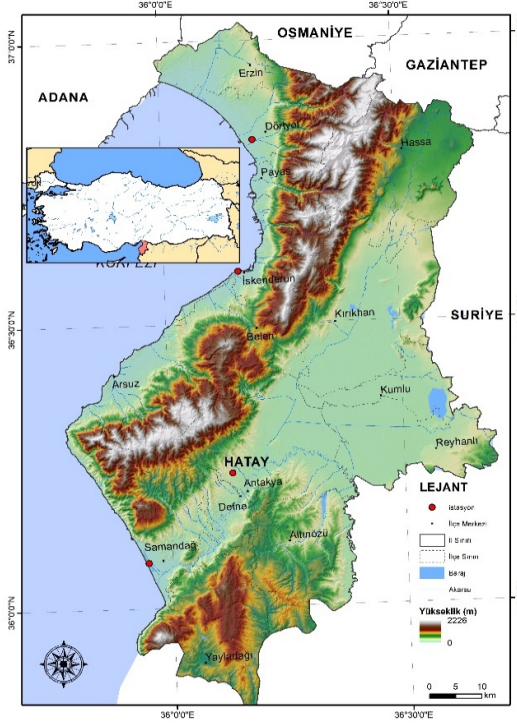
Bu çalışmada, atmosferik salınımlar ile Akdeniz Bölgesinin doğu kesiminde bulunan Hatay ilinde konumlanmış dört farklı meteoroloji gözlem istasyonunda 1970-2022 yılları arasındaki yağış verileri kullanılarak, SYİ yöntemiyle yıllık kuraklık indis değerleri hesap edilmiş kuraklık oluşum oranı, farklı kuraklık türlerinin meydana gelme yüzdeleri ve trendleri hesap edilmiştir. Ayrıca, yağış ve meteorolojik kuraklık indis değerlerinin Kuzey Atlantik Salınımı (KAS), Arktik Salınım (AS) ve Akdeniz Salınımları (AKS1 ve AKS2) olmak üzere dört farklı atmosferik salınımla olan ilişki düzeyleri belirlenmiştir. Çalışma sonucunun, iklim değişikliği ile mücadelede daha etkili stratejiler geliŐtirmeye katkıda bulunması amaçlanmıştır. Bu çalışmanın ana motivasyonu, Hatay ili özelinde iklimde meydana gelen deđerŐişimlerin ve olası kuraklığın atmosferik salınımlarla olan ilişkisinin belirlenmesidir.

## 2. Çalışma Alanı ve Yöntem

### 2.1. Çalışma Alanı

Hatay, tarih boyunca birçok medeniyete ev sahipliği yapmış stratejik bir konumda bulunmuştur. Türkiye'nin güneyinde Akdeniz Bölgesi'nde yer almaktadır. Türkiye'nin Suriye ile olan sınırının bir kısmını oluşturmaktadır. Kuzeyinde Osmaniye, kuzeybatısında Adana doğusunda Suriye ve kuzeydoğusunda Gaziantep, batısında ise Antakya Körfezi ve Akdeniz bulunmaktadır. Yüzölçümü yaklaşık olarak 5.500 km<sup>2</sup>'dir. Hatay ilinin enlemi 36° 16' ve 37° 39' kuzey enlemleri, boylamı ise 35° 24' ve 36° 17' doğu boylamları arasındadır. Hatay, iklim ve coğrafi çeŐitliliđi nedeniyle zengin bir bitki örtüsüne sahiptir. İlin dağlıklı bölgelerinde çam, meŐe ve ardıç gibi ağaç türleri yaygındır. Ovalık alanlarda ise zeytin, narenciye, incir, nar, üzüm gibi tarım ürünleri yetiŐtirilir. Hatay ilinde Akdeniz iklimi hakimdir. Yazlar sıcak ve kurak, kışlar ılık ve yağışlı geçer. İl genelinde yıl boyunca güneŐli günlerin sayısı fazladır. Dağlıklı bölgelerde karasal iklim görülmektedir.

Bu çalışmada, Hatay il sınırları içerisinde bulunan Şekil 1'de konumları ve Tablo 1'de istasyon bilgileri verilen dört farklı meteoroloji gözlem istasyonunda 1970-2022 yılları arasında Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından kaydedilen yağış verileri, MGM'den temin edilip kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan istasyonların adları, istasyon numaraları, enlem, boylam ve tanımlayıcı istatistiksel parametreler Tablo 1'de verilmiştir. Antakya istasyonu ele alınan istasyonlar arasında en büyük yükseltiye sahip iken İskenderun ve Samandağ istasyonları en düşük yükseltiye sahiptir. Ortalama yıllık toplam yağış en büyük değerine Antakya istasyonunda, en küçük değerine ise İskenderun istasyonunda sahiptir. Dağlıklı bölgelerde yağış miktarının daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Ortalamanın büyük olduğu istasyonda standart sapma ve çarpıklık değerleri en büyük olurken, ortalamanın küçük olduğu değerlerde bu parametreler küçük olmuştur. Samandağ istasyonu bölgenin en güneyinde yer alırken, Dört Yol istasyonu çalışma bölgesinin en kuzeyinde yer almaktadır. Hatay istasyonu çalışma bölgesinin orta kesiminde bulunurken, diğer üç istasyon çalışma bölgesinin Akdeniz ile olan sınırına oldukça yakın yerde bulunmaktadır. Çalışma bölgesinin ortasında kuzey -güney doğrultusunda Nurdağları bulunmakta ve bu bölge çalışma bölgesinde en büyük yükseltiye sahiptir.



Şekil 1. Çalışma bölgesi

Tablo 1. İstasyona ait bilgiler ve tanımlayıcı istatistikler

| İstasyon Adı | İstasyon No | Yükseltili (m) | Enlem   | Boylam  | Ort. Yağış (mm/m <sup>2</sup> ) | Standart sapma | Çarpıklık |
|--------------|-------------|----------------|---------|---------|---------------------------------|----------------|-----------|
| Antakya      | 17372       | 104            | 36.2368 | 36.1329 | 1082.76                         | 281.81         | 0.63      |
| Dört Yol     | 17962       | 29             | 36.8244 | 36.1981 | 913.44                          | 205.41         | -0.46     |
| İskenderun   | 17370       | 4              | 36.5924 | 36.1582 | 736.31                          | 126.10         | 0.15      |
| Samandağ     | 17986       | 4              | 36.0814 | 35.9492 | 860.28                          | 236.43         | -0.39     |

Tablo 2. SYİ yöntemine ait kuraklık sınıfları ve indis değerleri aralığı

| Kuraklık Sınıfı | İndis değeri aralığı |
|-----------------|----------------------|
| Aşırı Kurak     | SYİ < -2.00          |
| Çok Kurak       | -2.00 ≤ SYİ < -1.50  |
| Orta Kurak      | -1.50 ≤ SYİ < -1.00  |
| Hafif Kurak     | -1.00 ≤ SYİ < 0      |
| Hafif Yağışlı   | 0 < SYİ ≤ 1.00       |
| Orta Yağışlı    | 1.00 < SYİ ≤ 1.50    |
| Çok Yağışlı     | 1.50 < SYİ ≤ 2.00    |
| Aşırı Yağışlı   | SYİ > 2.00           |

## 2.2. Standartlaştırılmış Yağış İndeksi (SYİ)

SYİ, birden fazla zaman ölçeğinde yağış açığını belirlemek amacıyla tasarlanmıştır [21]. SYİ, belirli bir zaman dilimi için bir lokasyondaki yağış verilerinin frekans dağılımının oluşturulmasıyla belirlenir. Yağış verilerine bir gamma olasılık yoğunluk fonksiyonu uydurulur ve yağışın kümülatif dağılımı belirlenir. Daha sonra kümülatif dağılımdan ortalaması sıfır ve varyansı bir olan standart normal dağılıma bir eş olasılık dönüşümü yapılır. Bu dönüştürülmüş olasılık, +2,0 ile -2,0 arasında

değişen SYİ değeridir [22-23]. McKee ve ark. [21], SYİ'den kaynaklanan kuraklık yoğunluklarını tanımlamak amacıyla Tablo 2'de sunulan sınıflandırma sistemini kullanmıştır.

### 2.3. Trend Analizi Yöntemleri

#### 2.3.1. Mann-Kendall (MK) Testi

Mann-Kendall testi monotonik eğilimleri belirlemek amacıyla kullanılan sıralamaya dayalı istatistiki bir testtir [24]. Dünya Meteoroloji Örgütü tarafından kullanılması önerilen bu testte belirlenen eğilimler farklı anlamlılık düzeyleri için değerlendirilmektedir. MK test istatistiği ve işaret fonksiyonu Denklem 1-2 kullanılarak hesaplanır.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i) \quad (1)$$

$$\text{sign}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & x_j > x_i \\ 0 & x_j = x_i \\ -1 & x_j < x_i \end{cases} \quad (2)$$

burada n veri sayısıdır, x ise i ve j zamanlarındaki veri noktasıdır (j > i). S'nin varyansı Denklem 3 aracılığı ile hesaplanır.

$$\text{var}(S) = \frac{[n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m i(i-1)(2i+5)]}{18} \quad (3)$$

burada ti, i boyutundaki bağların sayısıdır ve m, bağlı grupların sayısıdır. 10'dan büyük n için standart test istatistiği Z, MK test istatistiği olarak Denklem 4 ile hesaplanır.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Z değerinin negatif değerler azalan eğilimleri gösterirken, pozitif değerler ise artan eğilimleri belirtmektedir. Seçilen  $\alpha$  anlamlılık düzeyinde belirlenen eğilimlerin istatistiki olarak anlamlı olabilmesi için |Z| değerinin düzeye ait sınır değerleri aşması gerekmektedir [25-26].

#### 2.3.2. Spearman'ın Rho (SR) Testi

MK'ye benzer şekilde Spearman's Rho, bir zaman serisindeki monotonik eğilimi tespit etmek amacıyla tercih edilen sıra tabanlı parametrik olmayan istatistiksel testtir [27-28]. Spearman'ın rho test istatistiği, rs ve standartlaştırılmış test istatistiği  $Z_{SR}$ , Denklem 5-6 ile hesaplanır.



$$r_s = 1 - \frac{6[\sum_{i=1}^n (R(x_i) - i)^2]}{(n^3 - n)} \quad (5)$$

$$Z_{SR} = r_s \sqrt{\frac{n-2}{1-r_s^2}} \quad (6)$$

Burada  $R(x_i)$ , zaman serisindeki  $i$ 'inci gözlem  $x_i$ 'nin sırasıdır ve  $n$ , zaman serisinin uzunluğudur.  $Z_{SR}$ 'nin pozitif değerleri zaman serisindeki yükseliş eğilimlerini, negatif  $Z_{SR}$  değerleri ise düşüş eğilimlerini gösterir. Sonucun anlamlı olabilmesi belirlenen değerin sınır değerleri aşması ile değerlendirilir [25].

#### 2.4. Atmosferik Salınımlar

Çalışma kapsamında yıllık yağış ile yıllık kuraklık indis değerleri Kuzey Atlantik Salınımı (KAS), Arktik Salınımı (AS) ve Akdeniz Salınımı (AKS) arasındaki ilişki araştırılmıştır. Yıllık indis değerleri ilgili linklerden temin edilmiştir (<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/moi/>; <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/nao.shtml>; [https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily\\_ao\\_index/ao.shtml](https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao.shtml)).

**Kuzey Atlantik Salınımı (KAS)**, Subtropikal (Azorlar) Yüksek ve Subpolar Alçak arasındaki yüzey deniz seviyesi basınç farkına dayanmaktadır [29]. Kuzey Yarımküre'nin iklimi üzerinde güçlü bir kontrol uyguladığı önem arz etmektedir [30-33].

**Arktik Salınım (AS)**, Kuzey Yarımküre halkasal modu olarak da adlandırılan, iklim değişkenliğinin büyük ölçekli bir modudur. AO, Kuzey Kutbu çevresinde yaklaşık  $55^\circ$  Kuzey enleminde saat yönünün tersine dönen rüzgarlarla karakterize edilen bir iklim düzenidir [34-36].

**Akdeniz Salınımı (AKS)**, ile ilgili iki farklı indis üretilmiştir [37-38]. İlki (AKS1), Palutikof ve ark. [39] ve Conte ve ark. [40] tarafından Cezayir ( $36,4^\circ\text{K}$ ,  $3,1^\circ\text{D}$ ) ve Kahire ( $30,1^\circ\text{K}$ ,  $31,4^\circ\text{D}$ ) arasındaki normalleştirilmiş basınç farkı olarak tanımlanır. Endeksin ikinci bir versiyonu (AKS2) ise Cebelitarık'ın Kuzey Kalesi ( $36,1^\circ\text{K}$ ,  $5,3^\circ\text{B}$ ) ve İsrail'deki Lod Havaalanından ( $32,0^\circ\text{K}$ ,  $34,5^\circ\text{D}$ ) arasındaki basınç farkından hesaplanmaktadır [39].

#### 2.5. Korelasyon Analizi

Yıllık atmosferik indis değerleri ile yıllık kuraklık ve yağış kayıtları arasındaki ilişki Denklem 7 ile ifade edilen Pearson Korelasyon Katsayısı aracılığı ile incelenmiştir [41-42].

$$r_{x,y} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{NS_x S_y} \quad (7)$$

Korelasyon katsayılarının istatistiksel değerlendirmesi ise Denklem 8'de belirtilen t testi kullanılarak  $\alpha=0.05$  önem seviyesi için değerlendirilecektir.

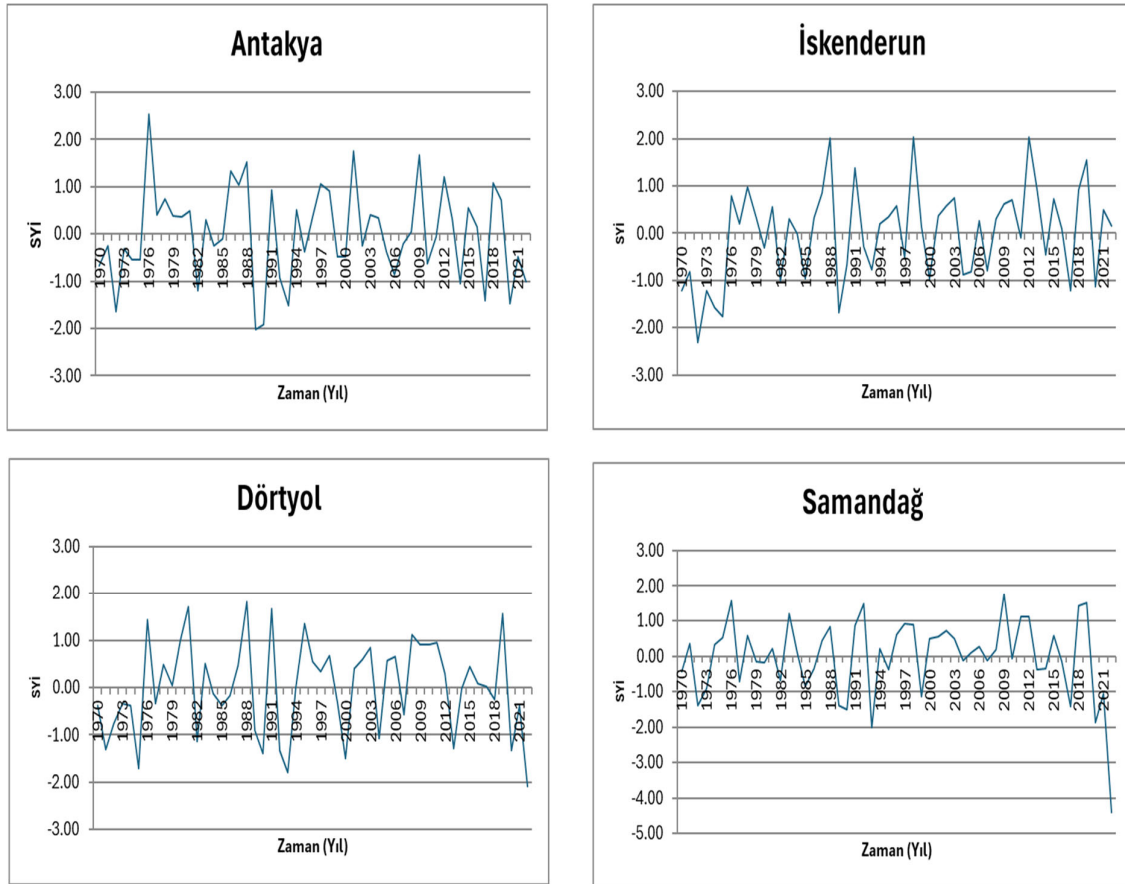
$$t = \frac{r\sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (8)$$

r korelasyon değerini ve N veri sayısını ifade etmektedir.

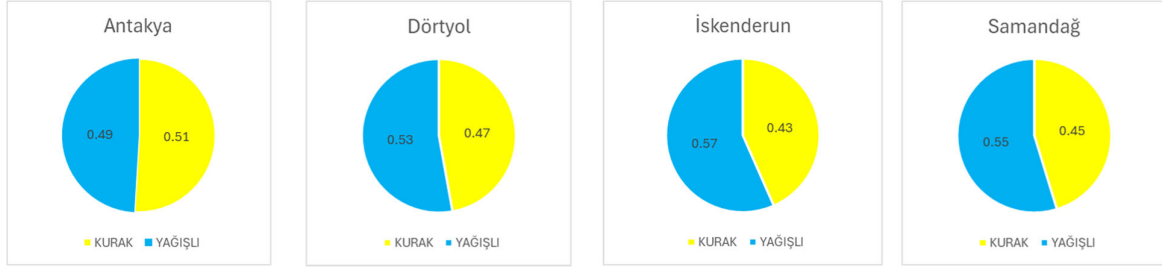
### 3. Bulgular

#### 3.1. Kuraklık Analizi Sonuçları

Antakya, İskenderun, Dörtıyol ve Samandağ istasyonlarının SYİ yöntemine göre 1970-2022 yılları arasındaki yıllık kuraklık indis değerleri Şekil 2’de, yıllık SYİ göz önünde bulundurularak hazırlanan kurak ve yağışlı yılların oransal dağılımlar ise Şekil 3’te sunulmuştur. Dörtıyol, İskenderun ve Samandağ’da yağışlı olarak sınıflandırılan yılların oransal dağılımı kurak yıllardan daha fazla olmaktadır. Belirtilen istasyonlarda yağışlı geçen yıllar oransal olarak sırasıyla %53 (28 yıl), %57 (30 yıl) ve %55 (29 yıl) olmaktadır. Yalnızca Antakya istasyonunda kurak geçen yıllar %51 (27 yıl) oran ile baskın haldedir. Antakya, Dörtıyol ve İskenderun istasyonlarında en uzun kuraklık 1970-1975 arasındaki 6 yıl süresince yaşanırken, Samandağ’da en uzun kuraklığın yaşandığı periyot 1970-1973 arası 4 yıl olarak belirlenmiştir. Antakya ve İskenderun’da en Şiddetli kuraklık ise sırasıyla 1989 (-2.01) ve 1972 (-2.31) yıllarında yaşanmıştır. İskenderun ve Samandağ’da 2022 en kurak yıl olurken SYİ değerleri -2.10 ve -4.41’dir. En uzun sulak dönemler ise Antakya istasyonunda 1976-1981 periyodundaki 6 yıl, İskenderun’da 1976-1979 ve Samandağ’da 2000-2003 arası kapsayan 4 yıl süresince da yaşanmıştır. Dörtıyol’da en uzun yağışlı dönem 1994-1998 ve 2008-2012 periyotlarında ve 5’er yıl olarak belirlenmiştir. Antakya, Dörtıyol ve Samandağ en yağışlı yıllar ise sırasıyla 1976 (2.54), 1988 (1.81) ve 2009 (1.76) olarak belirlenirken İskenderun’da 2.03 indis değerine sahip 1998 ve 2012 yılları en yağışlı yıllar olmaktadır.



Şekil 2. SYİ değerlerinin zamansal değişimi

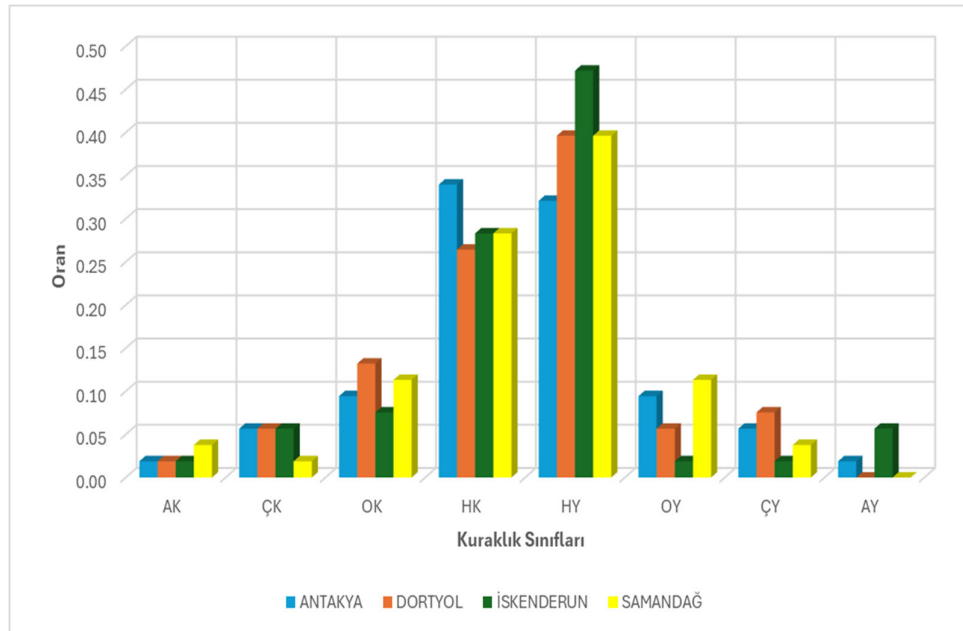


Şekil 3. Kurak ve yağışlı dönem oluşma oranları

İstasyonların SYİ göre hesaplanan yıllık kuraklık değerlerinin kuraklık sınıflarına göre oransal dağılımları Şekil 4'te görülmektedir. İstasyonlara ait yıllık kuraklık değerlerinin HK ve HY sınıflarında yoğunlaşmaktadır. Antakya'da oransal olarak HK (%34) yılların HY (%32) yıllarda daha fazla yaşanmıştır. Antakya'da 1970-1971, 1973-1975, 1984-1985, 1992, 1995, 1999-2000, 2002, 2005-2007, 2010-2011 ve 2021 hafif kuraklığın yaşandığı yıllardır.

Antakya'ya kıyasla Dört Yol, İskenderun ve Samandağ'da ise HY yıllar HK yıllar karşısında oransal olarak daha fazladır. HY yılların oransal dağılımı sırasıyla %40, %47 ve %40 olurken, HK yılların oransal dağılımı %26, %28 ve %28'dir.

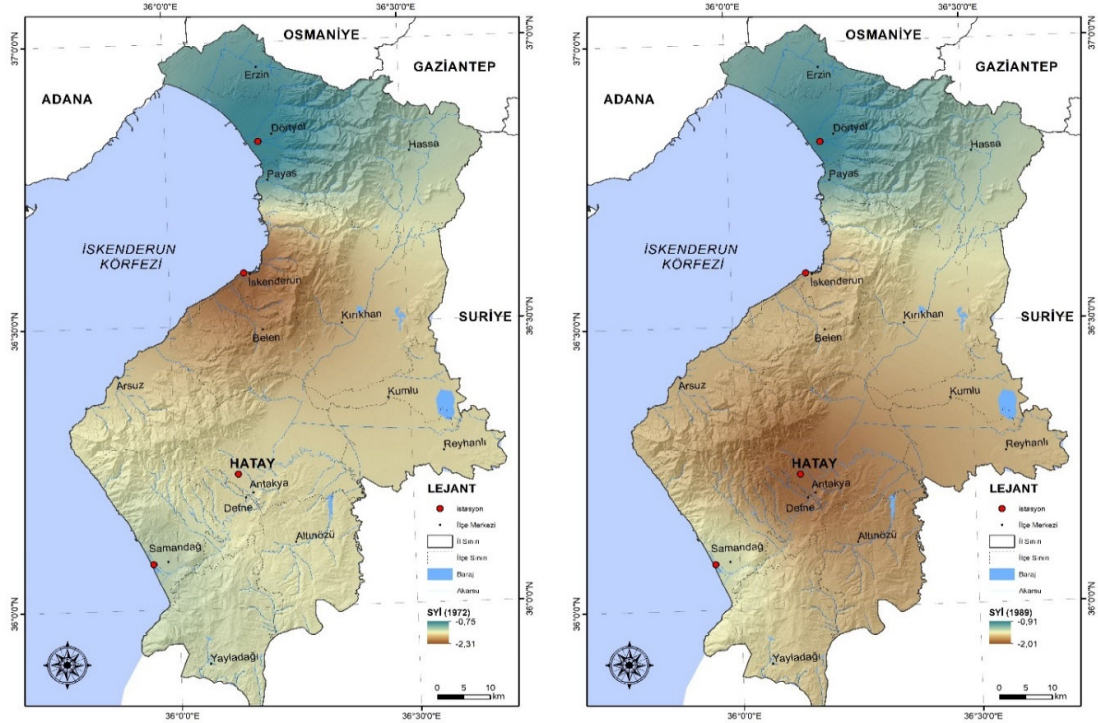
HY olarak belirlenen yıllar Dört Yol'da 1978-1980, 1983, 1987, 1994, 1996-1998, 2001-2003, 2005-2006, 2009-2012, 2015-2017; İskenderun'da 1976-1979, 1981, 1983, 1986-1987, 1994-1996, 1999, 2001-2003, 2006, 2008-2010, 2013, 2015-2016, 2018, 2021-2022 ve Samandağ'da 1971, 1974-1975, 1978, 1981, 1984, 1987-1988, 1991, 1994, 1996-1998, 2000-2003, 2005-2006, 2008, 2015 olarak belirlenmektedir.



Şekil 4. Kuraklık sınıflarının oluşma oranları

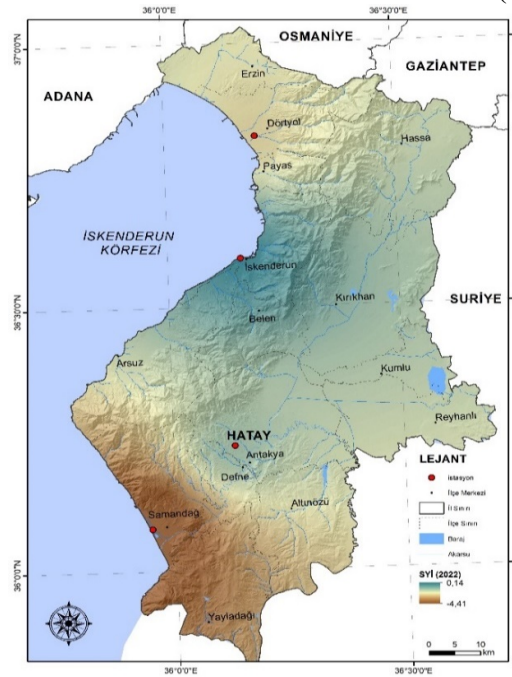
Şekil 5'te, ele alınan 4 farklı istasyonda en şiddetli kuraklığın yaşandığı yıllarda istasyonlarda elde edilen indis değerlerinin mekansal dağılımı sunulmuştur. İskenderun istasyonunun en şiddetli kuraklığı yaşandığı 1978 yılında çalışma bölgesinde bulunan diğer istasyonlar da kurak geçmiş ve en küçük indis değeri İskenderun istasyonunda elde edilmiştir. Hatay istasyonunda en şiddetli kuraklığın

yaŐandđđı 1989 yılında da 1978 yılına benzer olarak çalışma bölgesinde kuraklık etkilidir. Samandağ ve Dörtiyol istasyonlarında en Şiddetli kuraklık 2022 yılında yaşanmış ve bu yılda İŐkenderun istasyonu dışında kuraklık hakim olarak yaŐanmaktadır. Tüm Őekiller dikkate alındđđında çalışma bölgesinin güney kesiminin kuraklık riskinin daha yüksek olduğu söylenebilir.



(a) 1972

(b) 1989



(c) 2022

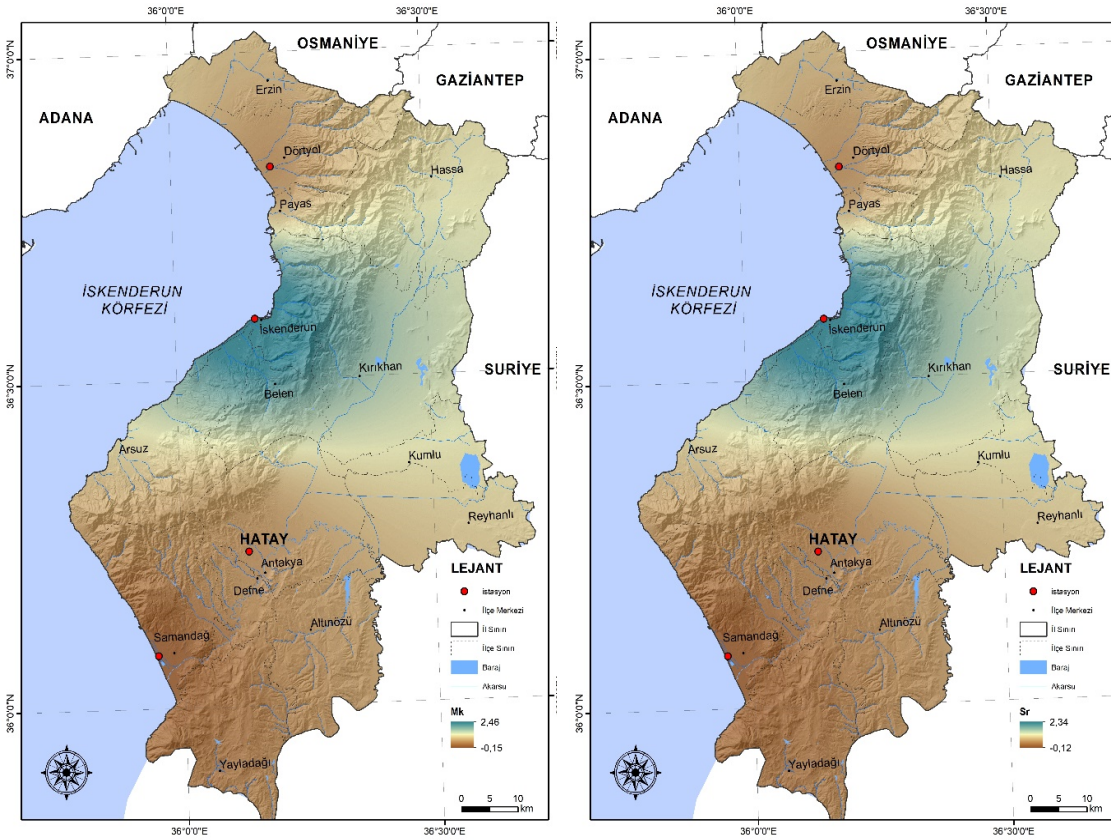
Şekil 5. En Şiddetli kuraklığın yaŐandđđı yıllara ait SYİ indis değerlerinin mekansal dađđılımı

### 3.2. Trend Analizi Sonuçları

Antakya, Dörtöyol, İskenderun ve Samandağ'a ait yıllık toplam yağışlar ile hesaplanan yıllık SYİ değerlerindeki muhtemel eğilimleri belirlemek amacı ile parametrik olmayan MK ve SR testleri uygulanmıştır. Trend analizlerine ait sonuçlar Tablo 3'te verilmektedir. Tablo 2'de yıllık toplam yağış serilerine ait MK ve SR sonuçlarına göre Antakya, Dörtöyol ve İskenderun'da artan trend, Samandağ'da ise azalan trend belirlenmektedir. Belirlenen eğilimlerden İskenderun'a ait belirlenen artan trend %95 güven düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı olmaktadır. Yıllık kuraklık indis değerlerinde ise Dörtöyol, İskenderun ve Samandağ artan eğilime, Antakya ise azalan eğilime sahiptir. İstatistiksel olarak anlamlı eğilim ise yağış gözlemlerindeki sonuçlara paralel olarak sadece İskenderun'a ait olmaktadır. İskenderun'da yağışlar ile SYİ değerlerinde artma olacağı düşünülmektedir. Sonuç olarak İskenderun istasyonunda kuraklık etkisinin azalacağı söylenebilir.

**Tablo 3.** Yağış ve SYİ değerlerinin trend analizi sonuçları

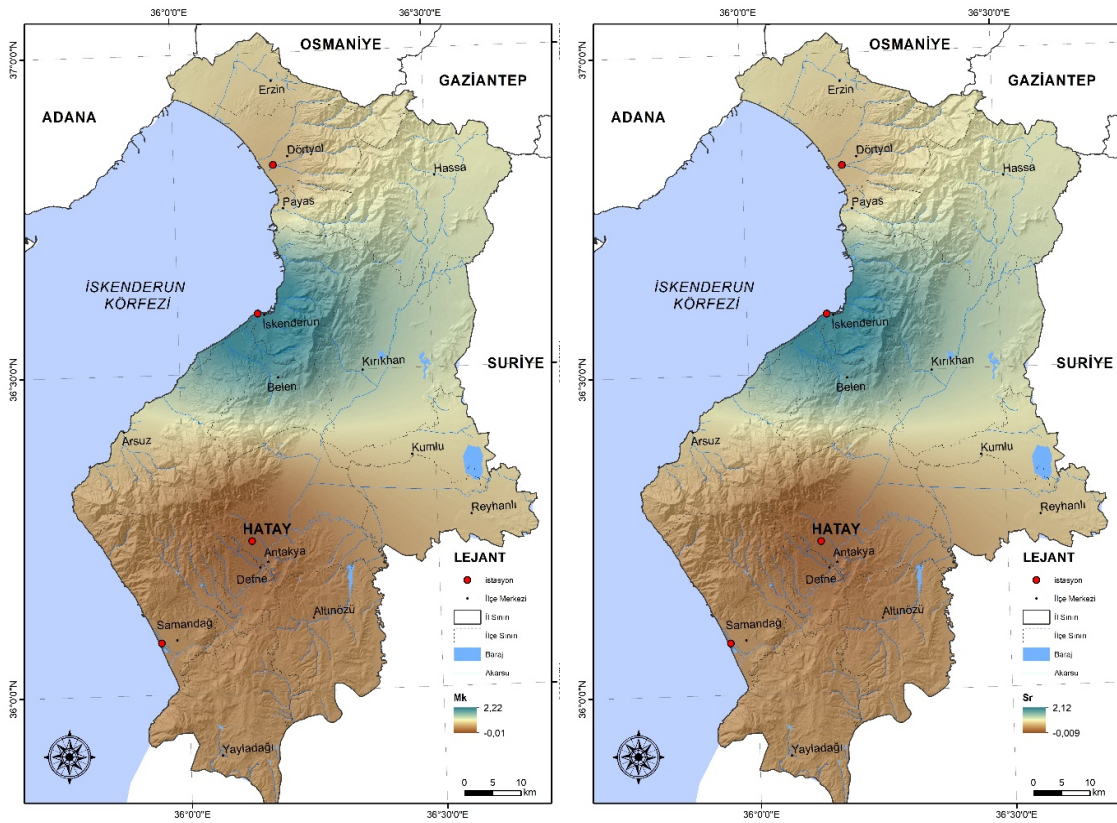
|            | Yağış           |        |                 |        | SYİ             |        |                 |        |
|------------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|
|            | Z <sub>MK</sub> | Eğilim | Z <sub>SR</sub> | Eğilim | Z <sub>MK</sub> | Eğilim | Z <sub>SR</sub> | Eğilim |
| Antakya    | 0.30            | -      | 0.20            | -      | -0.02           | -      | -0.01           | -      |
| Dörtöyol   | 0.28            | -      | 0.28            | -      | 0.61            | -      | 0.64            | -      |
| İskenderun | 2.46            | ▲      | 2.34            | ▲      | 2.22            | ▲      | 2.12            | ▲      |
| Samandağ   | -0.15           | -      | -0.12           | -      | 0.29            | -      | 0.32            | -      |



**Şekil 6.** Yağış verilerinin trend analizi sonuçlarının mekansal dağılımı

Şekil 6'da, çalışma bölgesinde bulunan dört farklı meteoroloji gözlem istasyonunda 1970-2022 yılları arasında ölçülen 53 yıllık yağış verilerinin MK ve SR trend yöntemleri sonucunda elde edilen trend analizi sonuçlarının haritaları verilmiştir. Her iki yöntemle ait sonuçların mekansal dağılımlardan İskenderun istasyonunun en büyük trend değerine sahip olduğu görülmektedir. Genel olarak MK ve SR yöntemleri benzer sonuçlar vermiştir. Çalışma bölgesinin orta kesimi hariç diğer bölgelerde istatistiksel olarak anlamlı artan veya azalan trend varlığından söz edilememektedir. İskenderun bölgesinde yağışlarda meydana gelen artış eğilimi, çalışma bölgesinin orta kesiminde gelecek yıllarda taşkın ve sel olaylarının yaşanma ihtimalini arttırmaktadır.

Çalışma bölgesinde 1970-2022 yılları arasında elde edilen yağış verileri kullanılarak elde edilen SYİ değerlerine ait MK ve SR yöntemlerine ait trend analizi sonuçları Şekil 7'de sunulmuştur. Şekil 6'da yağış parametresine ait trend analizi sonuçlarıyla SYİ indis değerlerine ait trend analizi sonuçları birbirine oldukça benzerdir. İskenderun istasyonunda kuraklık indis değerlerinde her iki trend analizi yöntemi sonucuna göre indis değerlerinde istatistiksel olarak anlamlı artan trend belirlenmiş ve bu istasyon çalışma bölgesinin orta kesiminde yer almaktadır. Çalışma bölgesinin güney kesiminde kuraklık indis değerlerinde meydana gelen azalma eğiliminden bu bölgenin kuraklık riskinin diğer kesimlere göre daha fazla olduğu anlaşılmaktadır.



(a) MK yöntemi

(b) Spearman Rho yöntemi

Şekil 7. Kuraklık indis değerlerinin trend analizi sonuçlarının mekansal değişimi

Şimşek ve ark. [43], Hatay ilinde bulunan Antakya ve İskenderun istasyonlarında 1970-2010 yılları arasında ölçülen yağış, sıcaklık, nem ve rüzgar hızı parametrelerinin mevsimsel ve yıllık zaman ölçeklerinde trendini MK ve SR yöntemleriyle ve trend büyüklüğü Sen'in eğim metodu ile analiz belirlemişlerdir. Gerçekleştirilen bu çalışmada Antakya istasyonunda Kış mevsimi hariç diğer

mevsimlerde ve yıllık ortalama sıcaklık verilerinde istatikselsel olarak anlamlı artan trend ve İskenderun istasyonunda ise yıllık zaman ölçeğinde yağış verilerinde istatikselsel olarak artan trend varlığı tespit edilmiştir. Yağış verilerine ait trend analizi sonuçlarının sunulan bu çalışma ile benzer olduğu görölmektedir. Gerçekleştirilen bu çalışmada Şimşek ve ark. [43] tarafından dikkate alınmayan 2010-2022 yılları arasındaki verilerin trend analizi sonuçlarında değişiklik meydana getirmediği söylenebilir. Soylu Pekpostalci ve ark. [44], Akdeniz bölgesinde 1971-2021 yılları arasında çok sayıda meteoroloji gözlem istasyonunda ölçölen yağış verileri yardımıyla SYİ indis değerleri ile bölgenin meteorolojik kuraklığını 3, 6 ve 12 aylık zaman ölçeklerinde analiz etmişlerdir. Farklı zaman ölçeklerinde elde edilen farklı kuraklık sınıflarının oluşum yüzdeleri bu çalışmanın sonuçlarıyla benzerliklere sahiptir. Kuraklık oluşum oranlarının mekansal değerlendirildiği çalışmada bu çalışmaya konu olan bölgede SYİ 12 için “Aşırı Kurak”, “Çok Kurak” ve “Orta Kurak” sınıflarının oluşma yüzdesi sırasıyla yaklaşık %1.9, %5.4 ve %8 olarak hesap edilirken, sunulan bu çalışmada bu oranlar sırasıyla %2, %5 ve %9 olmuştur. Keskiner ve Simsek [45], Akdeniz bölgesini ele aldıkları çalışmada 21, 31 ve 41 yıllık yağış verilerini kullanarak bölgenin meteorolojik kuraklığını SYİ yöntemi ile analiz etmişlerdir. Sunulan bu çalışma ile aynı bölgede 12 aylık SYİ indis değerlerinde 21 ve 41 yıllık verilerle istatikselsel olarak anlamlı olmamak kaydıyla çoğunlukla artan, 31 yıllık verilerle ise istatikselsel olarak anlamlı olmayan çoğunlukla azalan trend belirlenmiştir. Bu çalışma ile aynı veri aralığını kapsayan 41 yıllık veri aralığı için elde edilen indis değerlerine ait MK trend analizi sonuçları istasyon bazlı olarak genel olarak aynıdır. Çalışma sonucunda elde edilen kuraklık, kuraklık sınıflarının oluşum oranları ve trendlerine ait bulguların literatürdeki çalışmalar ile genel olarak uyumlu olduğu görölmüştür.

### 3.3. Korelasyon Analizi Sonuçları

Küresel atmosferik salınımlardan olan AKS1, AKS2, AS ve KAS ile yağış ve yıllık kuraklık indis değerleri arasındaki korelasyon katsayıları hesaplanarak sırayla Tablo 4 ve 5’te sunulmaktadır. Tablolarda 0.05 anlamlılık düzeyinde belirlenen korelasyon değerleri koyu renk ile gösterilmektedir. Seçilen atmosferik indisler ile istasyonlara ait yıllık toplam yağış değerleri arasındaki sonuçlara göre Antakya’da AKS1, AS ve KAS ile negatif; AKS2 ile pozitif korelasyon katsayıları belirlenmektedir. İskenderun’da AKS1 ve AKS2 pozitif, AS ve KAS ile negatif ilişki, Samandağ’da ise AKS1 ve AS ile negatif; AKS2 ve KAS ile pozitif korelasyon değerleri belirlenmektedir. Dörtöyol’da ise bütün atmosferik indisler ile negatif korelasyon değerleri hesaplanmaktadır. Antakya’da AS ile anlamlı negatif ilişki ile İskenderun’da KAS ile anlamlı negatif ilişki belirlenmiştir. Antakya’da AS ile İskenderun’da KAS ile belirlenen anlamlı negatif ilişki neticesinde anlamlı ilişki belirlenen istasyonlarda indis değerlerinin azalması ile yağışların artması beklenmektedir. İstasyonlarla atmosferik indisler arasında belirlenen diğer pozitif/negatif korelasyon değerleri sonucunda ise anlamlı bir ilişki belirlenememiştir.

**Tablo 4.** Yağış parametresi ile atmosferik salınımlar arasındaki korelasyon analizi sonuçları

|      | Antakya      | Dörtöyol | İskenderun   | Samandağ |
|------|--------------|----------|--------------|----------|
| AKS1 | -0.01        | -0.09    | 0.01         | -0.03    |
| AKS2 | 0.16         | -0.13    | 0.16         | 0.02     |
| AS   | <b>-0.31</b> | -0.24    | -0.22        | -0.05    |
| KAS  | -0.17        | -0.25    | <b>-0.27</b> | 0.01     |

Yıllık kuraklık indis değerleri ile atmosferik indisler arasında Antakya, İskenderun ve Samandağ’da AKS1 ve AKS2 ile pozitif, AS ve KAS ile negatif ilişki belirlenmekteyken Dörtöyol’da bütün indisler ile negatif ilişki bulunmaktadır. Antakya ve Dörtöyol’da AS ile anlamlı negatif ilişkiler belirlenmiştir. KAS ile yıllık kuraklık değerleri arasındaki sonuçlara göre ise sadece Dörtöyol’da anlamlı

negatif ilişki bulunmaktadır. Belirlenen anlamlı korelasyon değereler dışında atmosferik indisler ile istasyonlar arsında anlamlı ilişki bulunmamaktadır.

**Tablo 5.** Yıllık SYİ ile atmosferik salınımlar arasındaki korelasyon analizi sonuçları

|      | Antakya      | Dörtyol      | İskenderun | Samandağ |
|------|--------------|--------------|------------|----------|
| AKS1 | 0.01         | -0.03        | 0.01       | 0.06     |
| AKS2 | 0.19         | -0.06        | 0.16       | 0.1      |
| AS   | <b>-0.31</b> | <b>-0.31</b> | -0.23      | -0.1     |
| KAS  | -0.21        | <b>-0.37</b> | -0.24      | -0.10    |

#### 4. Sonuçlar

Kuraklığın tarihsel ve mekansal değerlendirilmesi, kuraklığın olumsuzlukların etki düzeylerini ve alınacak tedbirlerin seviyelerinin belirlenmesine yardımcı olacağı aşıkardır. Bu çalışmada, ülkemizin güneyinde bulunan ve Suriye ile sınırımızın bir kısmını oluşturan Hatay ilinin meteorolojik kuraklığı değerlendirilmiştir. Kuraklığın değerlendirilmesinde çalışma bölgesi içinde bulunan Antakya, Dörtyol, İskenderun ve Samandağ istasyonlarında 1970-2022 yılları arasında kaydedilen yağış verileri yardımıyla Standartlaştırılmış Yağış İndeksi yöntemi kullanılmıştır. Yağış ve 12 aylık zaman ölçeğinde elde edilen indis değerlerinde meydana gelen değişimin belirlenmesinde parametrik olmayan Mann-Kendall ve Sperman Rho trend yöntemlerinden yararlanılmıştır. Ayrıca, çalışma bölgesindeki yağış ve indis değerlerinin Kuzey Atlantik, Arktik , Akdeniz 1 ve Akdeniz 2 salınımlarıyla olan ilişkisi %95 güven aralığında belirlenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen bulgular özetle;

- Kuraklık oluşum oranı Antakya, Dörtyol, İskenderun ve Samandağ istasyonları için sırasıyla %51, %47, %43 ve %45 olmuştur.
- En fazla “AŞırı Yağışlı” sınıf %6 ile İskenderun istasyonunda, “AŞırı Kurak” sınıf ise %4 ile Samandağ istasyonunda yaşanmıştır.
- En Şiddetli kuraklık Antakya, Dörtyol, İskenderun ve Samandağ istasyonları için sırasıyla 1989, 2022, 1972 ve 2022 yıllarında meydana gelmiştir.
- En uzun kuraklık Antakya, Dörtyol ve İskenderun istasyonlarında 1970-1975 arasında 6 yıl, Samandağ istasyonunda ise 1970-1973 arasında 4 yıl sürmüştür.
- Çalışma bölgesinde İskenderun bölgesinin yağışlı geçtiği, kuraklığın çalışma bölgesinin güneyinde risk oluşturduğu belirlenmiştir.
- %95 güven aralığında MK ve SR yöntemleriyle yağış ve kuraklık indis değerlerinde sadece İskenderun istasyonunda istatistiksel olarak artan trend belirlenmiştir.
- AS ile bütün istasyonlar ait yıllık toplam yağışlar arasında negatif iliŐkiye sahiptir.
- Kuraklık indis değerleri ile AS ve KAS arasında tüm istasyonlar negatif ilişki bulunmaktadır.
- Dörtyol istasyonuna ait yağış ve SYİ indis değerleriyle çalışmada kullanılan bütün atmosferik indisler arasında negatif ilişki söz konusudur.

Çalışma sonucunda elde edilen bulgulardan, Hatay sınırları içerisinde kuraklığın genel olarak riskli olmadığı, bölgedeki yağış ve meteorolojik kuraklık olaylarında atmosferik salınımların negatif ilişkinin bulunduğu belirlenmiştir. Çalışma sonuçlarının, çalışma bölgesinde yürütölen yađıŐa bağlı tarımsal faaliyetlerin sürdürölmesinde ve planlanmasında ve yađıŐtan daha fazla yararlanılmasına katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir. Özellikle, İskenderun istasyonu bölgesinde meydana gelebilecek taşkın ve sel olaylarına dikkat edilmesi önerilmektedir.



### Teşekkür

Yazarlar olarak, çalışmada kuraklığın analizinde kullanılmak üzere meteorolojik parametrelerin ücretsiz teminini sağlayan Meteoroloji Genel M¼d¼rl¼đ¼ne (MGM) teşekkür ederiz.

Bu alışma Harran Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (HBAP) tarafından 24071 nolu ‘‘Atmosferik İndisler İle Akdeniz B¼lgesi Kuraklıkları İlişkisinin Araştırılması’’ adlı proje ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı HBAP’a teşekkür ederiz.

### ıkar atışması Beyanı

Yazarlar olarak herhangi bir kurum, kuruluş veya şahışlarla çıkar atışması olmadığını beyan ederiz.

### Kaynaklar

- [1] Robleh HB, Yuce MI, Esit M, Deger IH. Meteorological drought monitoring in Kızılırmak Basin, T¼rkiye. *Environmental Earth Sciences*, 2024; 83(9): 265. <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11550-0>.
- [2] Akturk G, Zeybekoglu U, Yıldız O. Assessment of meteorological drought analysis in the Kizilirmak River Basin Turkey. *Arab. J. Geosci.*, 2022; 15:850. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10119-0>.
- [3] Deger IH, Yuce MI, Esit M. An Investigation of Hydrological Drought Characteristics in Kızılırmak Basin, T¼rkiye: Impacts and trends. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2023; 12:126–139. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.1200742>.
- [4] Tosunoglu F, Can I, Kahya E. Evaluation of spatial and temporal relationships between large-scale atmospheric oscillations and meteorological drought indexes in Turkey. *International Journal of Climatology*, (2018); 38(12): 4579-4596. <https://doi.org/10.1002/joc.5698>.
- [5] Vazifekkhah S, Kahya E. Hydrological drought associations with extreme phases of the North Atlantic and Arctic Oscillations over Turkey and northern Iran. *International Journal of Climatology*, 2018; 38(12): 4459-4475. <https://doi.org/10.1002/joc.5680>.
- [6] Bouguerra H, Derdous O, Tachi SE, Hatzaki M, Abida H. Spatiotemporal investigation of meteorological drought variability over northern Algeria and its relationship with different atmospheric circulation patterns. *Theoretical and Applied Climatology*, 2024; 155(2): 1507-1518. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04705-9>.
- [7] Yuce MI, Esit M. Drought monitoring in Ceyhan Basin, Turkey. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 2021; 9(4): 293–314. <https://doi.org/10.1080/23249676.2021.1932616>.
- [8] Gumus, V. Evaluating the effect of the SPI and SPEI methods on drought monitoring over Turkey. *Journal of Hydrology*, 2023; 626, 130386. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130386>.
- [9] Katipoğlu OM, Acar R, Őeng¼l S. Comparison of meteorological indices for drought monitoring and evaluating: a case study from Euphrates basin, Turkey. *Journal of Water and Climate Change*, 2020; 11(S1): 29-43.
- [10] Simsek O, Yıldız-Bozkurt S, Gumus V. Analysis of meteorological drought with different methods in the Black Sea region, Turkey. *Acta Geophys.* 2024; 72, 1927–1943. <https://doi.org/10.1007/s11600-023-01099-0>.
- [11] Citakoglu H, Minarecioglu N. Trend analysis of monthly average flows of Kızılırmak Basin. *Anatolian Env. and Anim. Sciences*, 2019; 4(3): 435-440. <https://doi.org/10.35229/jaes.595095>.

- [12] Muse NM, Tayfur G, Safari MJS. Meteorological Drought Assessment and Trend Analysis in Puntland Region of Somalia. *Sustainability*, 2023; 15(13): 10652.
- [13] Katipoğlu OM, Yeşilyurt SN, Dalkılıç H.Y. Yeşilirmak havzasındaki hidrolojik kuraklıkların Mann-Kendall ve Yenilikçi Şen yöntemi ile trend analizi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2022; 12(2): 422-442. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1026893>.
- [14] Gümüş V, Şimşek O, Açar MK. Artvin ve Rize İstasyonlarına ait Aylık Toplam Yağış Verilerinin Trendinin Farklı Yöntemlerle Değerlendirilmesi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 2022; 7(3): 204-216. <https://doi.org/10.46578/humder.1207593>.
- [15] Esit M, Yuce MI, Deger İH, Yasa I. Trend and variability analysis in rainfall and temperature records over Van Province, Türkiye. *Theor. Appl. Climatol.* 2024; 155, 451–472. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04644-5>.
- [16] Simsek O. Hydrological drought analysis of Mediterranean basins, Turkey. *Arab. J. Geosci.*, 2021; 14: 2136. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08501-5>.
- [17] Soylu Pekpostalci D, Tur R, Danandeh Mehr A. Spatiotemporal variations in meteorological drought across the mediterranean region of Turkey. *Pure Appl Geophys.*, 2023; 180, 3089–3104 <https://doi.org/10.1007/s00024-023-03312-z>.
- [18] Uzun A, Ustaoglu B. The effects of atmospheric oscillations on crop (olive, grape and cotton) yield in the eastern part of the Mediterranean region, Turkey. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 2022; 9(1): 147-161. <https://doi.org/10.30897/ijegeo.1010181>.
- [19] Rezaei A. Ocean-atmosphere circulation controls on integrated meteorological and agricultural drought over Iran. *Journal of Hydrology*, 2021; 603, 126928. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126928>.
- [20] Erkol ZI, Yesilyurt SN, Dalkilic HY. Impacts of climate change on spatial drought distribution in the Mediterranean Basin (Turkey): different climate models and downscaling methods. *Theor. Appl. Climatol.* 2024; 155, 4065–4087. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-04867-0>.
- [21] Mckee TB, Doesken NJ, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: *In: Proc. 8th Conf. on Applied Climatol*, 1993, 17-22 January, Americ Meteorol Soc, Mass.179-184.
- [22] Edwards D, Mckee T. *Characteristics of 20th Century Drought in the United States at Multiple Time Scales*. 1997.
- [23] Wu H, Hayes MJ, Weiss A, Hu Q. An evaluation of the Standardized Precipitation Index, the China-Z Index and the statistical Z-Score. *International Journal of Climatology*, 2001; 21, 745-758.
- [24] Helsel DR, Hirsch RM. *Statistical Methods in Water Resources Techniques of Water Resources Investigations*. 2002. U.S. Geological Survey.
- [25] Rahmat SN, Jayasuriya N, Bhuiyan M. Trend analysis of drought using standard precipitation index (SPI) in Victoria, Australia. *34th Hydrology & Water Resources Symposium 2012*, pp.441-448.
- [26] Esit, M. Investigation of innovative trend approaches (ITA with significance test and IPTA) comparing to the classical trend method of monthly and annual hydrometeorological variables: a case study of Ankara region, Turkey. *Journal of Water and Climate Change*, 2023; 14(1): 305-329. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.356>.
- [27] Yue S, Pilon P, Cavadias G. Power of the Mann–Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*, 2002; 259, 254-271.
- [28] Yenigün K, Gümüş V, Bulut H. Trends in streamflow of the Euphrates basin, Turkey. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management 2008*; 189-198.

- [29] Hurrell JW. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation, *Science*, 1995; 269, 676-679.
- [30] Barnston AG, Livezey RE. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Mon. Wea. Rev.*, 1987; 115, 1083-1126.
- [31] Chen WY, van den Dool H. Sensitivity of Teleconnection Patterns to the Sign of Their Primary Action Center, *Mon. Wea. Rev.*, 2003; 131, 2885-2899.
- [32] van den Dool, HM, Saha S, Johansson Å. Empirical Orthogonal Teleconnections. *J. Climate*, 2000; 13, 1421-1435.
- [33] Osborn TJ. Winter 2009/2010 temperatures and a record-breaking North Atlantic Oscillation index. *Weather* 2011; 66, 19-21.
- [34] Higgins RW, Leetmaa A, Xue Y, Barnston A. Dominant factors influencing the seasonal predictability of U.S. precipitation and surface air temperature. *J. Climate*, 2000, 13, 3994-4017.
- [35] Higgins RW, Leetmaa A, Kousky VE. Relationships between climate variability and winter temperature extremes in the United States. *J. Climate*, 2002; 15, 1555-1572.
- [36] Zhou S, Miller AJ, Wang J, Angell JK. Trends of NAO and AO and their associations with stratospheric processes. *Geophys. Res. Lett.*, 2001; 28, 4107-4110.
- [37] Çiçek İ, Türkoğlu N, ÇalıŐkan A. Akdeniz Salınımı'nın (AS) Türkiye'de Sıcaklık Üzerine Etkisi. TÜCAUM V. Coğrafya Sempozyumu 2008; 349-356.
- [38] Sezen C, Partal T. Wavelet combined innovative trend analysis for precipitation data in the Euphrates-Tigris basin, Turkey. *Hydrological Sciences Journal*, 2020; 65(11): 1909-1927.
- [39] Palutikof JP, Conte M, Casimiro Mendes J, Goodess CM, Espirito Santo, F. Climate and climate change. In: Brandt, C.J., Thornes, J.B., (eds) *Mediterranean desertification and land use*. 1996. John Wiley and Sons, London.
- [40] Conte M, Giuffrida A, Tedesco S. The Mediterranean Oscillation. Impact on precipitation and hydrology in Italy. 1989. Publications of the Academy of Finland, Helsinki.
- [41] Bayazıt M, Yeğen Oğuz EB. Mühendisler İçin İstatistik, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2005. 197.
- [42] Kebapıoğlu, E, Partal, T. Küresel Atmosferik Salınımının Büyük Menderes ve Gediz Akarsularının Akımları Üzerindeki Etkisi. *Doğal Afetler Ve evre Dergisi*, 2022; 8(1): 1-13.
- [43] Şimşek O, Gümüş V, Soydan NG, Yenigün K, KavŐut ME, Topçu E. Hatay ilinde bazı meteorolojik verilerin gidiŐ analizi. *SDU International Journal of Technological Sciences*, 2013; 5(2): 132-144.
- [44] Soylu Pekpostalci D, Tur R, Danandeh Mehr A. Spatiotemporal Variations in Meteorological Drought Across the Mediterranean Region of Turkey. *Pure Appl. Geophys.* 2023, 180: 3089–3104.
- [45] Keskiner A.D., Simsek, O. Evaluation of the sensitivity of meteorological drought in the Mediterranean region to different data record lengths. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2024;196 (7): 1-29.

# TAŞKIN AFETLERİNİN ÖNCE DEN TAHMİN EDİLEBİLİRLİĞİ; GÜMÜŞHANE İLİNDE YAŞANAN AFETLERİNİN FARKLI YÖNTEMLERLE TAHMİN ÖRNEKLEMİ

**Ufuk YÜKSELER<sup>1\*</sup>, Ömerul Faruk DURSUN<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye

<sup>2</sup>İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 15.01.2024 Kabul Tarihi/Accepted Date: 01.07.2024 DOI: 10.54365/adyumbd.1420098

## ÖZET

Taşkın afeti ülkemizde sıklıkla yaşanan, can ve mal kaybı bilançosu yüksek olan bir afettir. Bu konuda uzun süredir hem akademik hem de ilgili kuruluşlarca uygulama çalışmaları yürütülmektedir. Bu çalışmaların büyük kısmını risk ve duyarlılık haritalarının belirlenmesi oluşturur. Risk haritaların çıkarılmasında pek çok yöntem kullanılmakta ve yöntemlerin başarılı ve başarısız yönleri literatürde ifade edilmektedir. Bunlar arasında Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ise en sık kullanılan yöntemlerdendir. Bu çalışmada, ülkemizde en fazla taşkına maruz kalan bölge olan Karadeniz bölgesinin sınırları içerisinde kalan Gümüşhane İlinde 1972, 1974, 2004 ve 2017 yıllarında yaşanan 4 büyük afet TOPSIS, Frekans Oran ve Entropi yöntemiyle tahmin edilmeye çalışılmıştır. Çalışma kapsamında 9 adet taşkına etki eden parametre kullanılarak yöntemlerin havza bazlı risk haritaları çıkarılmış ve 4 adet doğrulama metodu ile yöntemlerin doğruluk değerleri yorumlanmıştır.

Çalışma sonucunda, bu taşkınlarda etkili parametreler çoğunlukla yükselti ve yağış olarak belirlenirken bazı havza ve metotlarda bu durum farklılık göstermiştir. Frekans Oran ve Entropi metodu risk haritalarının gerçek durumla uyumlu sonuçlara sahip olduğu, doğrulama değerlerinin 0.8 değerinin üzerinde seyrettiği görülmüştür. TOPSIS metodunun ise uyumunun daha düşük olduğu, bazı havzalarda 0.5 değeri civarında doğrulama değerleriyle tahmin yaptığı belirlenmiştir. Çalışmada 4 havza ve 4 farklı doğrulama metodu bir bütün olarak incelendiğinde, Frekans Oran metodu diğer yöntemlere göre daha yüksek doğruluk değerlerine sahip olmuştur. Bunun nedeni, Frekans Oran metodunun havza öğrenimi sonucu algoritma oluşturmasıdır.

**Anahtar Kelimeler:** Coğrafi bilgi sistemleri, Taşkın, Entropi, Frekans Oran, TOPSIS, Gümüşhane ili, Afet, Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri, ArcGIS.

## PREDICTABILITY OF FLOOD DISASTERS; PREDICTION SAMPLE OF FLOODS IN GÜMÜŞHANE PROVINCE

### ABSTRACT

Flood hazard is a disaster that occurs frequently in our country and has a high cost of loss of life and property. Implementation studies have been carried out on this subject for a long time by both academics and relevant institutions. The majority of these studies consist of determining risk and sensitivity maps. Many methods are used to create risk maps, and the success and failure of the methods are expressed in the literature. Among these, Multi-Criteria Decision Making Methods are among the most frequently used methods. In this study, 4 major disasters that occurred in 1972, 1974, 2004 and 2017 in Gümüşhane Province, which is within the borders of the Black Sea region, which is the region most exposed to floods in our country, were tried to be predicted by TOPSIS, Frequency Ratio and Entropy methods. Within the scope of the study, basin-based risk maps of the methods were prepared using 9 parameters affecting floods, and the accuracy values of the methods were interpreted with 4 verification methods.

As a result of the study, while the effective parameters in these floods were mostly determined as elevation and precipitation, this situation differed in some basins and methods. It has been observed that the Frequency Ratio and Entropy method risk maps have results compatible with the real situation, and the verification values are above 0.8. It was determined that the TOPSIS method had lower compatibility and made predictions with validation

e-posta<sup>1</sup> : [ufukyuksele12@gmail.com](mailto:ufukyuksele12@gmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7233-0821> (Sorumlu Yazar)

\* e-posta<sup>2</sup> : [faruk.dursun@inonu.edu.tr](mailto:faruk.dursun@inonu.edu.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3923-5205>

values around 0.5 in some basins. When 4 basins and 4 different verification methods were examined as a whole in the study, the Frequency Ratio method had higher accuracy values than other methods. This is because the Frequency Ratio method creates an algorithm as a result of watershed learning.

**Keywords:** Geographic information systems, Flood, Entropy, Frequency Ratio, TOPSIS, Gümüşhane Province, Hazard, Multi-Criteria Decision Making Methods, Arc-GIS.

## 1. Giriş

Taşkınlar ülkemizde tekerrür sıklığı en yüksek olan afetlerden bir tanesidir. Özellikle son dönemlerde aylara sârecek miktardaki toplam yağış miktarlarının kısa bir süre içerisinde yağması nedeniyle önemli miktarda mal ve can kayıpları meydana gelmektedir. Taşkın konusu literatürde en sık çalışılan konulardan bir tanesidir. Birden çok parametre tarafından etkilenmesi farklı yöntemlerle daha iyi sonuçlar bulma konusunda sürekli güncelliğini korumaktadır. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri veya Yapay zekâ algoritmaları gibi pek çok yöntem taşkın tahmin edilebilirliği konusunda kullanılmaktadır. Samanta vd. yaptıkları çalışmada Gine'deki Morobo eyatindeki Markham akarsusunda Frekans oran yöntemi kullanılarak taşkın afetinin risk alanları belirlenme çalışılmıştır. Bu çalışma kapsamında 143 noktasal veri (%70 eğitim) kullanılmış olup taşkın tetikleyen 10 bağımsız parametreyle çalışılmıştır. Yapılan çalışmada 132 bin kişinin yaşadığı saha taşkın açısında ehlikeli noktalar olarak tespit edilmiştir [1]. Natarajan vd. yaptıkları çalışmada Çin'deki Adyar, Cooum ve Kasasthalaiyar bölgesindeki akarsu havzalarında frekans oran metoduyla taşkın risk analizleri yapılmıştır. Yaptıkları çalışma sonucunda arazinin toplam %49'u çok yüksek ve yüksek riskli alanlar olarak tespit edilmiştir. Yapılan çalışmanın doğruluk değeri %95.6 olarak bulunmuştur [2]. Ramesh vd. yaptıkları çalışmada Hindistan'daki taşkınlara en fazla maruz kalan büyük Mumbai havzası kalıtsal inanç fonksiyonu, frekans oran metodu ve bulanık gama operatörleri ile taşkın risk haritaları çıkarılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda bu üç yöntemin sırasıyla 0.74, 0.72 ve 0.73 doğruluk değerleri sonucuna ulaştığı görülmektedir [3]. Majeed vd. yaptıkları çalışmada Pakistan'ın jhelum ve pencap bölgesinde sel risk haritaları çıkarılmıştır. Çalışma kapsamında afeti tetikleyen 9 parametre kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda havzanın %42 lik kısmı yüksek risk barındırmaktadır [4]. Yükseler vd. yaptıkları çalışmada Lojistik regresyon ve ağaç modelleri ile Trabzon ilinin Of ilçesinde bulunan Solaklı akarsu havzasında meydana gelen taşkınlar tahmin edilmeye çalışılmıştır. Model ağaçların %90 üzerinde doğruluk değerlerine ulaştığı çalışmada model ağaçların taşkın öğrenimi konusunda başarıları vurgulanmıştır. Bu çalışmada taşkına etki eden 10 adet parametre kullanılırken en etkili parametreler yağış ve yükselti olarak tespit edilmiştir [5]. Mudashiri vd. yaptıkları çalışmada, Taşkın risk haritaları oluşturmak amacıyla yapılan ampirik, modelleme ve deneysel çalışmaları incelemiş ve yöntemlerin birbirine göre üstünlükleri ve eksikliklerini vurgulamıştır. Yaptığı çalışmaya göre taşkınla ilgili çalışmalarda önceki döneme göre %12 artış meydana geldiği, çalışmaların çoğunlukla modelleme yönünde olduğunu ifade etmiştir [6]. Chen vd., yaptıkları çalışmada Çin'in Wuhan kentindeki sele duyarlı alanların tespitinde entropi ağırlıklı Ahp yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada 14 taşkın tetikleyen faktör kullanılmıştır. Çalışma alanının yaklaşık %14'ü yüksek ve çok yüksek riskli alanlar olarak belirlenmiştir. Çalışmanın doğruluk tespiti için geçmişte yaşanan afetle mukayese yapılmıştır. Çalışma sonucunda doğruluk değerlerine bakıldığında bu yöntemin uygulanabilir ve önerilebilir bir yöntem olduğu ifade edilmiştir [7]. Dey vd., yaptıkları çalışmada makine öğrenimi yöntemleri ve frekans oran yöntemi kullanılarak Amerika'nın New Orleans bölgesinde yaşanan su baskınlarını tahmin edilmeye çalışılmıştır. Frekans Oran metodu ve makine öğrenimi yöntemlerinin geçmiş afet durumlarından yola çıkarak başarılı sonuçlar meydana getirdiği ifade edilmiştir [8]. Ekmekcioğlu vd., İstanbul ilinde yaşanacak olası sel olaylarını hibrit bir model olan bulanık AHP-TOPSIS yöntemiyle incelemiştir. Yapılan çalışmada Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinden (ÇKKV) en çok kullanılan AHP ve TOPSIS modellerinin hibrit uygulamasıyla daha iyi sonuçlara ulaştığı ifade edilmiştir [9]. Belazreg vd., (2024), yaptıkları çalışmada son yıllarda ciddi taşkın olaylarına maruz kalan Cezayirin büyük Hodna havzası Ahp metodu kullanılarak risk alanları belirlenme çalışılmıştır. Çalışmada kullanılan parametrelerin ağırlılandırma değerleri eğim için %39, drenaj yoğunluğu için %25, yağış için %18, yükseklik için %9, arazi kullanımı/örtüsü için %6 ve toprak tipi için %3'tür. Çalışma sonucu özellikle çalışma alanının Kuzey-Doğu, Kuzey-Batı ve Orta kesimlerinde yüksek bir sel potansiyeli olduğunu

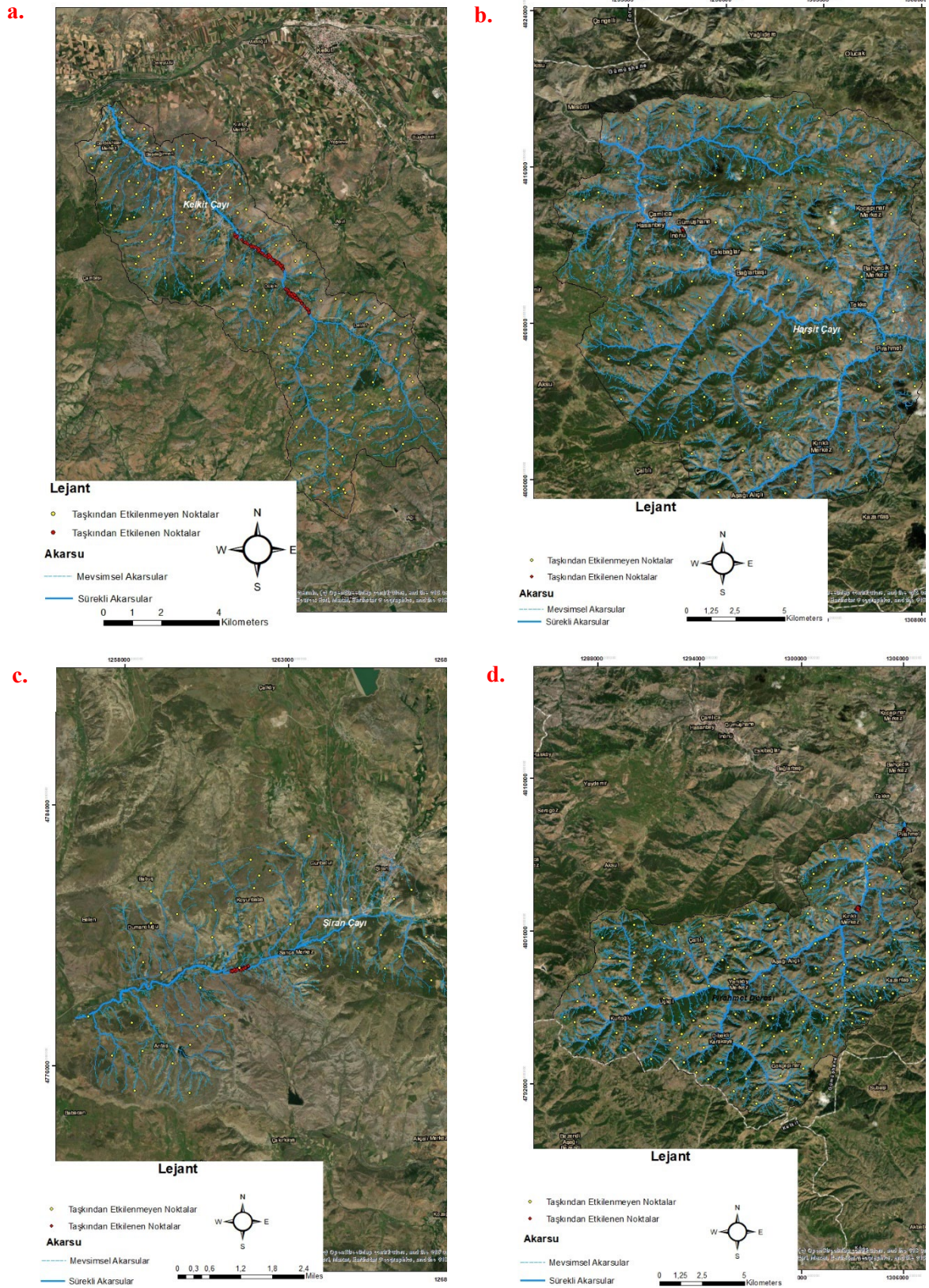
göstermektedir. Ancak güneye gidildikçe bu yüksek potansiyel daha da azaldığı ifade edilmiştir [10]. Toprak Vd. (2022), yaptığı çalışmada Ordu ilinin Fatsa ilçesindeki taşkın risk sahaslarını Frekans oran, AHP ve Lojistik Regresyon metotlarıyla incelemiştir. Yapılan çalışmada fekans oran metodunda 19,5 km<sup>2</sup>, AHP metodunda 30,7 km<sup>2</sup> ve lojistik regresyon modelinde 14 km<sup>2</sup> alan, yüksek ve çok yüksek riskli taşkın alanı olarak hesaplanmıştır. Çalışmada %95.9 doğruluk değeriyle frekans oran metodu en yüksek doğruluk değerlerine ulaşmıştır [11]. Senan vd., yaptıkları çalışmada Güney Hindistan'da sık sık meydana gelen taşkın olayları AHP, Bulanık AHP metoduyla incelenmiştir. Çalışmada taşkına etki edebileceği düşünülen 20 parametre kullanılmıştır. Çalışma sonucunda AHP ve F-AHP modelleri için AUC doğrulama yöntemi sonuçları sırasıyla 0,946 ve 0,943 olarak bulunmuştur. Çalışmada Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinden olan AHP yönteminin taşkın risk sahaslarını tespit etmede başarılı sonuçlar verdiği vurgulanmıştır [12]. Aksoy Vd., yaptıkları çalışmada Topoğrafik Islaklık İndeksinden Faydalanarak taşkın riski taşıyan alanların belirlenmesini amaçlamışlardır. Qgis ve Hecras yazılımları kullanılarak yapılan çalışmada Türkiyedeki su havzaları örneklem olarak kullanılmış ve bu çalışmanın kentsel alanlarda meydana gelecek su baskınlarını tahmin etmede kullanılabileceği ifade edilmiştir [13].

Bu çalışmada Gümüşhane İlinde 1972, 1974, 2004 ve 2017 yıllarında yaşanan 4 afet incelenmiştir. 9 adet taşkına etki eden parametre için Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinden olan ve yukarıda verilen literatürden de görüleceği üzere, en sık kullanılan Entropi, Frekans Oran ve TOPSIS metotlarıyla risk haritaları oluşturulmuştur. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri birden fazla bağımlı değişkenler sonucu oluşan sonuç olgusunun tespitinde bu değişkenlerin sonuca olan etkisini ortaya koymaya yarayan ve bu tarz problemlerde en sık kullanılan yöntemlerdir. Taşkın afeti pek çok parametreden meydana gelen ancak parametrelerin ne düzeyde etkilediği bilinmeyen bir afet türüdür. Bu afetin birden çok parametreden etkilenmesi nedeniyle literatürde sıklıkla Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile çalışmalar yapılmıştır. Ancak bu çalışmayı diğer literatürdeki çalışmalardan ayıran en önemli özelliği 4 farklı afet havzası 3 ayrı metot ve 4 ayrı doğrulama değerleriyle çalışılmasının yanısıra yöntemleri mukayese amacıyla gerçek afetlerin incelenmesidir. Bu amaçla çalışma alanı olarak belirlenen 4 afet sahasında ilgili kuruluşlardan alınan afet kayıtları neticesinde sayısallaştırılmıştır. Oluşturulan afet haritaları neticesinde afet oluşan bölgenin ölçüleri ile orantılı olacak şekilde noktasal veriler tanımlanmıştır. 1972 afet sahasına 150, 1974 afet sahasına 150, 2004 afet sahasına 50 ve 2017 afet sahasına 200 noktasal veri tanımlanmıştır. Bu 4 afet yaşanan havzada afet yaşanan noktasal veri kadar havza içerisinde kalan ve afet yaşanmayan noktalara da noktasal veri belirlenmiştir. Bu noktasal veriler doğrultusunda yöntemlerin doğruluk değerleri ACC (Accuracy), R (Recall), P (Precision) ve F (F-Score) ile belirlenmiştir.

## 2. Materyal ve Metod

### 2.1. Çalışma alanı ve Materyal

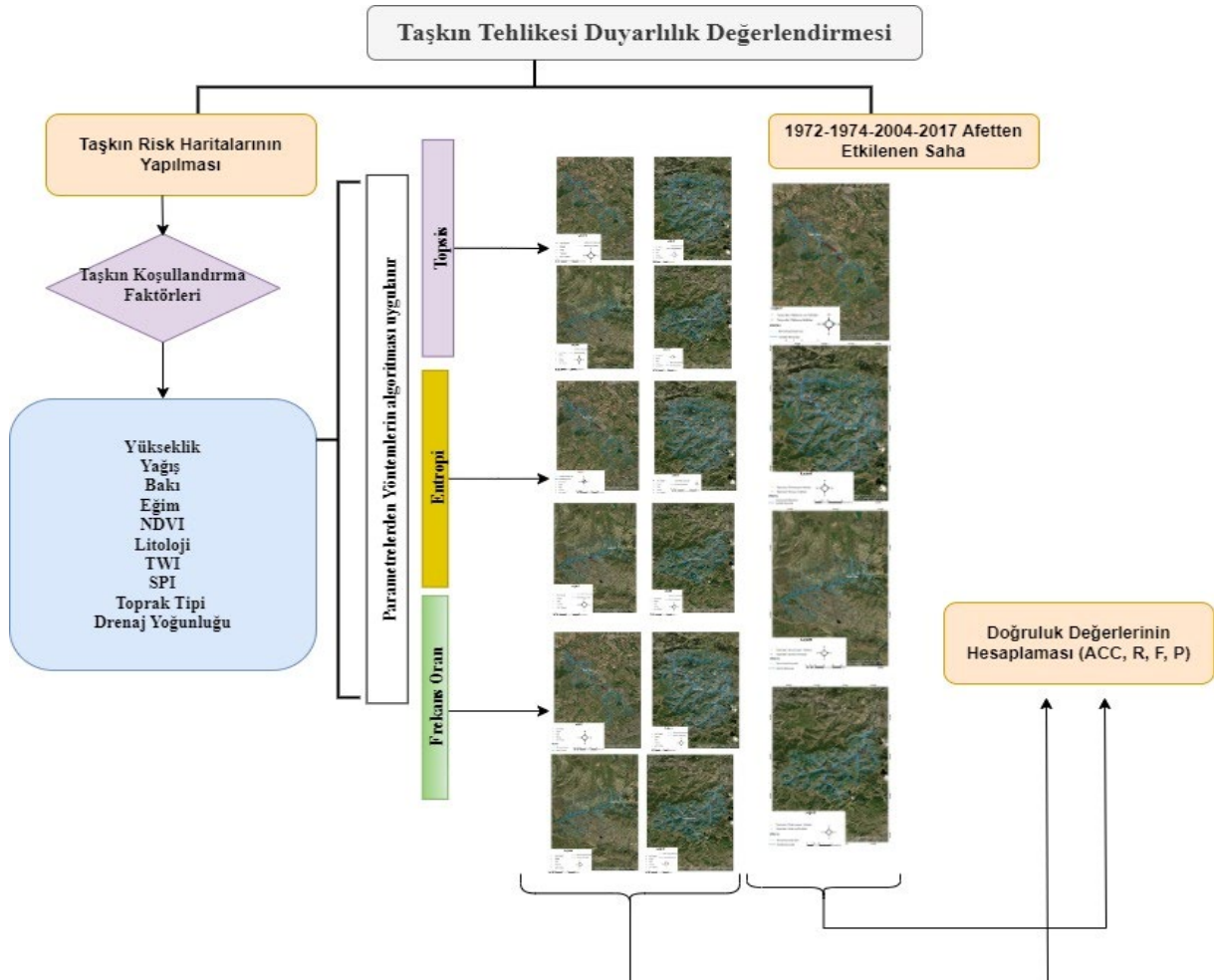
Çalışma alanı olan Gümüşhane ili; 6575 km<sup>2</sup> yüzölçümüne sahip olup, Doğu Karadeniz bölgesinin iç kısımlarında bulunmaktadır. Gümüşhane ilinin ortalama yüksekliği 1210 metredir. Genel olarak engebeli bir arazi tipine rastlanan bu ilde toplam arazisinin %60'ı dağlar, %29'u platolar, %11'ini ovalar meydana getirmektedir. Harşit çayı 142 km uzunluğu ve Karadeniz'e dökülmesi yönüyle önemli bir akarsuyu olmakla birlikte, il sınırları içindeki en uzun akarsu 320 km uzunluğuyla Kelkit çayıdır. 1927-2023 yılları arasında yağış değerleri ortalamalarında en yağışlı ay 68.6 mm ile Mayıs ayı olmuştur. Çalışma alanı olarak belirlenen Gümüşhane ilinde yakın geçmişte 4 adet büyük taşkın afeti yaşanmıştır (Şekil 1).



**Şekil 1.** Gümüşhane İlinde Yaşanan taşkınlara ve havzaları (a;1972, b;1974, c;2004, d;2017)



Şekil 2. Taşkın Afetinin Durumunu Belirten Resimler [14-15]



Şekil 3. Çalışmanın Akış Şeması

Bunlardan ilki 1972 yılında Kelkit çayının taşması sonucu meydana gelmiş ve 1583 dekar alanlık arazi zarar görmüş, can kaybı yaşanmamasına rağmen ciddi mal kaybı meydana gelmiştir. 19.08.1974



tarihinde Gümüşhane ilinin en önemli akarsularından Harşit çayının taşması sonucu bir taşkın afeti meydana gelmiştir. Bu afette 3 can kaybı yaşanmış, 86 hayvan telef olmuş ve ekonomik kayıplar meydana gelmiştir. Tarihler 2 Mart 2004 gösterdiğinde Gümüşhane'ye bağlı Şiran İlçesinde Şiran Çayının taşması neticesinde tarım arazileri sular altında kalmıştır. Yaşanan afette can kaybı yaşanmazken maddi hasarlar meydana gelmiştir. Ardından 14.04.2017 tarihinde Gümüşhane İlindeki Pir Ahmet deresinin taşması neticesinde Pir Ahmet ve Esenyurt köyleri sular altında kalmıştır Yaşanan bu afette can kaybı yaşanmazken tarım alanları sel altında kalmış ve 4 adet ev yıkılmıştır (Şekil 2). Bu afetler göstermektedir ki Gümüşhane ili taşkın afeti konusunda dönem dönem ciddi sorunlar yaşamaktadır.

Çalışma kapsamında, Gümüşhane ilinde yaşanan bu 4 afetten yola çıkarak kullanılan yöntemlerle afetlerin tahmin edilebilirliği denenmiştir. Bu amaçla sıklıkla çalışmalarda kullanılan taşkına etki eden 9 adet parametre kullanılmıştır. Bu parametreler sırasıyla: Yükselti, Yağış, Akarsu Güç İndeksi, Topoğrafik Islaklık İndeksi, Bitki Örtüsü, Toprak, Bakı, Eğim ve Drenaj Yoğunluğudur. Bu parametrelerin tespitinde konuyla alakalı mevcut çalışmaları ve yakın havzalarda daha önce yapılan çalışmalar dikkate alınmıştır. Taşkına etkili bu parametreler havza bazlı olarak çıkartılmıştır. Bu parametrelerin oluşturulması için 5 m çözünürlüklü sayısal yükseklik haritaları ile çalışılmıştır. Çıkarılan parametre haritaları; Entropi, Frekans Oran ve TOPSIS gibi yöntemlerin algoritması içerisinde kullanılarak taşkın risk haritaları elde edilmiştir. Bu risk haritaları 1972, 1974, 2004 ve 2017 yılındaki gerçekleşen taşkın afeti ile mukayese edilmek üzere noktasal veriye çevrilmiştir (Şekil 3). 1972 afeti 300 noktasal veri, 1974 afet, 300 noktasal veri, 2004 afeti 100 noktasal veri ve 2017 afeti 400 noktasal veriyle incelenmiştir. Belirlenen bu noktasal verilerin adeti havzaların alanları oranında belirenmiştir.

## 2.2. Yöntem

Taşkın afetlerinin nedenlerini doğrudan belirlemek zordur. Bazı taşkın afetlerinde ani şiddetli yağışlar neden olurken, bazı afetlerde yağışla beraber kar erimeleri, bazı afetlerde ise kesit daralmaları neden olabilir. Dolayısıyla taşkın afetlerinin beşeri ve beşeri olmayan pek çok nedenden etkilendiği yaşanan afetlerde görülmüştür. Taşkın afetini oluşturan beşeri nedenleri tespit etmek daha kolayken, beşeri olmayan nedenleri ortaya koymak kolay olamamaktadır. Meteorolojik, jeolojik ve fiziki pek çok etmen bir arada taşkına neden olabilmektedir. Pek çok parametrenin aynı anda etkileşimi sonucu ortaya çıkan taşkın afeti bu şekliyle Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri (ÇKKV) için iyi bir çalışma sahasını oluşturmaktadır. ÇKKV ile yapılan taşkın çalışmaları incelendiğinde bu yöntemlerin taşkın çalışmalarına çok uyumlu olduğu da gözlemlenmiştir. Bu çalışmada ÇKKV Yöntemlerinden TOPSIS, Frekans Oran metodu ve Entropi metotları kullanılmıştır. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinde bazı yöntemler parametrelerin arasındaki ilişkiyi uzman görüşü gibi vb. yöntemler kullanarak tespit ederken. Bu çalışmada kullanılan bu 3 yöntemin ortak özelliği gerçek durumlardan yola çıkarak tahminler yapmasıdır. Özellikle taşkın gibi farklı havzalarda farklı parametrelerin etkileyebileceği farklı olay örgüsüne sahip durumlarda havza bazlı incelemek büyük avantaj sağlamaktadır. Bu nedenle çalışmada havza bazlı inceleme yapılmasını sağlayan bu 3 yöntem seçilmiştir. 3 yöntem 4 farklı havzada 12 ayrı kombinasyonla çalışmakta ve her havzada parametrelere göre ağırlık değerleri farklılık arz etmektedir. Çalışmada kullanılan parametreler ve tüm sayısal modeller Coğrafi Bilgi Sistemleri yazılımlarından Arcmap 10.5 yazılı ile yapılmıştır. Yükselti verileri için Devlet hava komutanlığı Genel Müdürlüğünden 5\*5 metre yükselti sayısal yükselti modeli alınmış ve çalışmada kullanılmıştır. Akarsu Güç İndeksi, Topoğrafik Islaklık İndeksi, Bakı, Eğim ve Drenaj Yoğunluğu parametreler sayısal yükselti modeller aracılığıyla ilgili Arcmap ara yüzüyle oluşturulmuştur. Yağış verileri [www.worldclim.com](http://www.worldclim.com) adresinden bitki örtüsü ve toprak verileri ise Tarım Orman Bakanlığı'ndan çalışma kapsamından talep edilip Arcmap 10.5 programı ile sayısallaştırılmıştır.

### 2.2.1. Entropi Metodu (E) (Entropy Method)

Entropi, istatistik ve termodinamik mekaniğinin çok önemli bir kavramıdır ve incelenen sistemin özellikleri ne olursa olsun o sistemi en iyi şekilde tanımlamaya çalışır [16]. Su kaynakları konusunda Entropi metodu çeşitli araştırmacılar tarafından kullanılmıştır. Su kaynaklarına ait çalışmalarda belirsizlikler ve birden çok parametreden etkilenme durumu Entropi metodunu bu çalışma alanı için uyumlu bir yöntem olarak görülmüştür [17]. Kesikli bir değişken için Entropi, Shannon tarafından denklem 1 ile tanımlanmıştır [18].

$$e_j = -K * \sum_{i=1}^n p_{ij} * \ln p_{(ij)} \quad (1)$$

$$K = \frac{1}{\ln(m)} \quad (2)$$

$$d_j = 1 - e_j \quad (3)$$

Burada; m parametre sayısı, K olayın zaman aralığı, ij j aralığına karşılık gelen olay ve p(ij) ij olayının olasılığıdır.

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (4)$$

wj, her bir parametrenin tüm parametreler içerisindeki etki katsayısıdır.

### 2.2.2. Frekans Oran Metodu (FR) (Frequency Ratio Method)

Frekans Oran metodu bir olayın gerçekleşme olasılığı ile gerçekleşmeme olasılığı arasındaki orandır [19]. Frekans Oran metodu, geçmiş taşkınların yaşandığı yerlerin özelliklerini dikkate alarak parametreler arasında bir bağıntı kurmaktadır. Bu çalışmada 4 afetinde yaşanan noktalardaki parametrelerin özelliklerini dikkate alarak parametrelerin ve alt parametrelerin birbirleri arasındaki ağırlıklandırma değerlerinin belirlenmesi yapılmıştır. Frekans Oran metodunun hesaplamaları için denklem 5 kullanılmıştır.

$$FR = PLO \quad (5)$$

PLO= Taşkını etkileyen her bir faktörün kendi alt kategorilerindeki taşkın varlığı yüzdesi

PIF= Taşkını etkileyen bir faktörün her bir kategorisinin yüzdesi

Hesaplanan FR değeri 1'e yaklaştığı düzeyde taşkınla parametre arasındaki bağıntı kuvvetli, 0'a yaklaştığı durumlarda bağıntı düşük olduğunu ifade etmektedir.

### 2.2.3 TOPSIS Metodu (TOPSIS Method)

TOPSIS metodu (Technique for Order Preference by Similarity) Hwang ve Yoon tarafından 1980 senesinde ortaya konulmuş ve çoklu algoritmalarda çözüm problemlerinde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir [20]. TOPSIS metodunun pozitif istenen çözümlere en kısa negatif ideal çözümlere en uzak mesafede çözüm odaklı çalışılması istenir. TOPSIS metodu kullanım kolaylığı ve algoritmasının çok karmaşık olmaması nedeniyle sıklıkla kullanılan bir ÇKKV Yöntemidir [21]. TOPSIS metodu 6 adımdan oluşur. İlk olarak denklem 6'da gösterilen karar matrisi oluşturulur.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Ardından oluşturulan karar matrisi denklem 7'de belirtilen şekilde normalize edilir.

$$x_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n x_{ij}^2}} \quad (7)$$

Ardından ağırlıklı karar matrisleri oluşturulur. Bu matris normalize edilmiş matrisle ağırlıklandırma değerinin çarpımı sonucu bulunur.

$$A = \begin{bmatrix} wa_{11} & wa_{12} & \dots & wa_{1n} \\ wa_{21} & wa_{22} & \dots & wa_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ wa_{n1} & wa_{n2} & \dots & wa_{nn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Ardından her bir çözüm için pozitif ve negatif uygun değerleri bulunur.

$V^+$  = Parametrenin sonuca pozitif etkisine göre matristeki max veya min değeri alınır.

$V^-$  = Parametrenin sonuca negatif etkisine göre matristeki max veya min değeri alınır.

Daha sonra pozitif ve negatif uygun çözüme uzaklıklar belirlenir (denklem 9-10).

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (V_{ij} - V_{ij}^+)^2} \quad i=1,2,\dots,n \quad (9)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (V_{ij} - V_{ij}^-)^2} \quad i=1,2,\dots,n \quad (10)$$

Son olarak denklem 11 ile parametrenin taşkına etki katsayısı belirlenir.

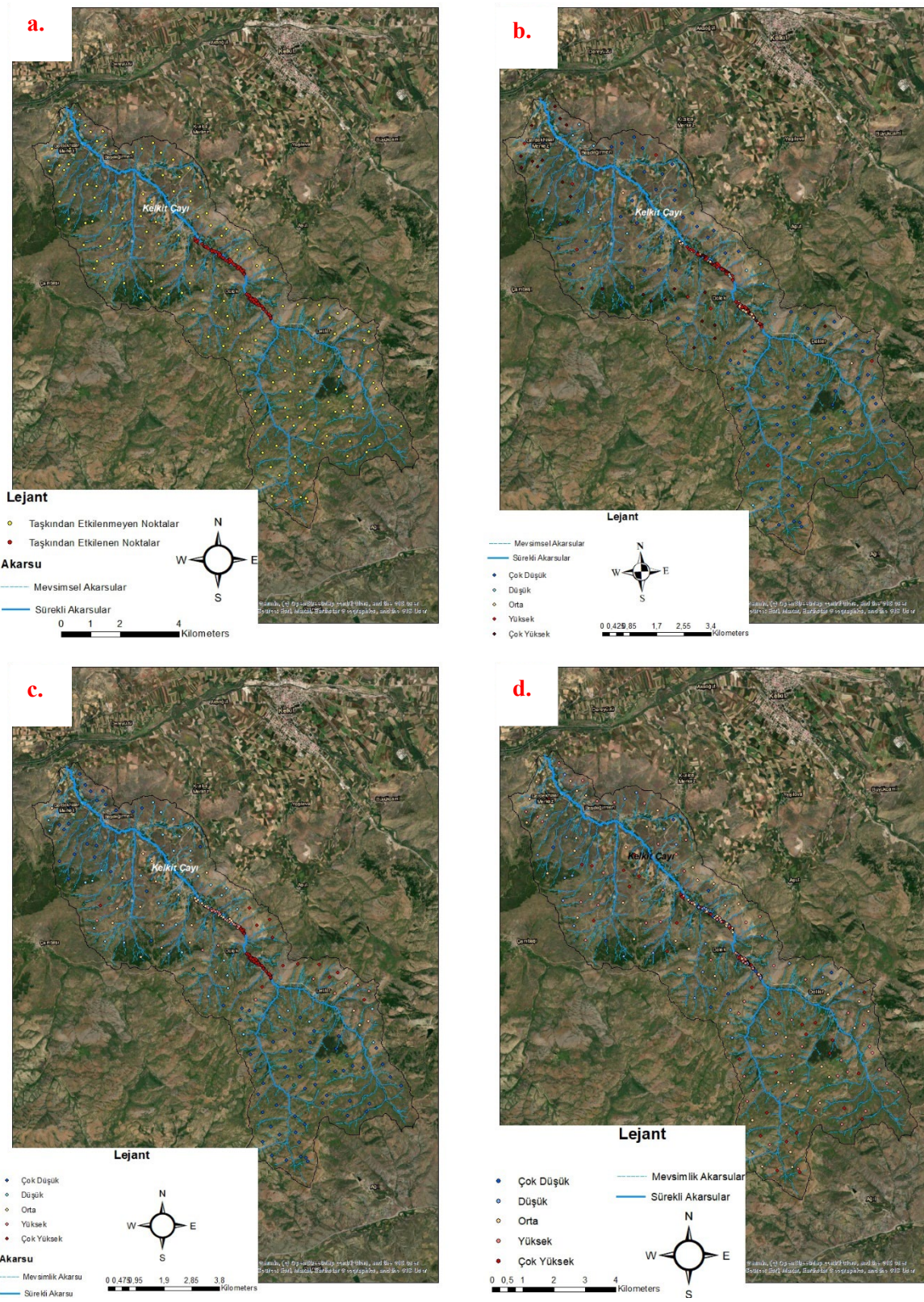
$$w_i = \frac{st^+}{st^-} \quad (11)$$

### 3. Tartışma

Çalışma kapsamında 1972 yılında yaşanan afetinin değerlendirilebilmesi amacıyla 300 adet rastgele seçilmiş noktalarla çalışılmıştır. 1972 yılında yaşanan taşkın afeti her bir metodun algoritması doğrultusunda 9 adet parametreyle görselleştirilmiştir (Şekil 4). 9 adet parametrelerin birbirlerine göre ağırlıklandırılma değeri farklı yöntem için tespit edilmiş ve bu değerler doğrultusunda 3 yöntemin risk haritaları çıkarılmıştır. Görselleştirilen bu veriler 140 adet taşkın yaşanan, 160 adet taşkın yaşanmayan verilerle mukayese edilmiştir ve 5 adet risk sınıfları ile sonuç değerleri eşleştirilmiştir (Tablo 1). Frekans Oran metodu gerçek durumda taşkın yaşanan 140 noktayı orta ve üstü değerlerde riskli sınıfta bulmuştur. Yine aynı yöntemde taşkın yaşanmayan 160 adet noktasal veriden 84 veri çok düşük riskli sınıfta bulunmuş ve kalan değerleri tüm risk sınıfları arasında tespit edilmiştir. Doğrulama değerleri Frekans Oran metodunda 0.78-0.80 arasında değişmektedir. Bu metotta etkili parametre Yükselti, en etkisiz parametre Drenaj Yoğunluğu olarak belirlenmiştir. TOPSIS metodu taşkın yaşanan 140 ve yaşanmayan 160 adet noktasal veriyi tüm risk sınıfları (0-5) arasında bulmuştur. Doğrulama değerleri 0.56-0.62 arasında değişmektedir. TOPSIS metodunda etkili parametre Topoğrafik Islaklık İndeksi, en etkisiz parametre Drenaj Yoğunluğu olarak belirlenmiştir. Taşkın yaşanan 140 noktasal veri Entropi metoduna göre 20 adet çok yüksek, 72 adet yüksek sınıfta bulunmuştur. 160 adet yaşanmayan noktasal verinin 107 noktasal verisi çok düşük risk sınıfı içerisinde bulunmuştur. Doğrulama değerleri bu metotta 0.78-0.82 arasında değişmektedir. Entropi metodunda etkili parametre Yağış, en etkisiz parametre Topoğrafik Islaklık İndeksi olarak belirlenmiştir (Tablo 1).

**Tablo 1.** 1972 yılı taşkını değerlendirme tablosu

| Gerçek Sonuç |             |                                  |                                     |   |
|--------------|-------------|----------------------------------|-------------------------------------|---|
|              | Risk Sınıfı | Taşkından Etkilenen Noktalar (1) | Taşkından Etkilenmeyen Noktalar (0) | Doğrulama Yöntemleri (ACC, R, P, F-Score) |
| Frekans Oran | Çok Yüksek  | 84                               | 12                                  |   |
|              | Yüksek      | 25                               | 9                                   | ACC: 0.80                                 |
|              | Orta        | 31                               | 17                                  | R:0.78                                    |
|              | Düşük       | 0                                | 39                                  | P:0.79                                    |
|              | Çok Düşük   | 0                                | 84                                  | F-Score:0.78                              |
| TOPSIS       | Çok Yüksek  | 33                               | 29                                  |   |
|              | Yüksek      | 40                               | 51                                  | ACC:0.56                                  |
|              | Orta        | 31                               | 45                                  | R:0.62                                    |
|              | Düşük       | 26                               | 28                                  | P:0.52                                    |
|              | Çok Düşük   | 10                               | 8                                   | F-Score:0.57                              |
| ENTROPI      | Çok Yüksek  | 20                               | 25                                  |   |
|              | Yüksek      | 72                               | 10                                  | ACC:0.79                                  |
|              | Orta        | 46                               | 4                                   | R:0.82                                    |
|              | Düşük       | 2                                | 15                                  | P:0.75                                    |
|              | Çok Düşük   | 0                                | 107                                 | F-Score:0.78                              |

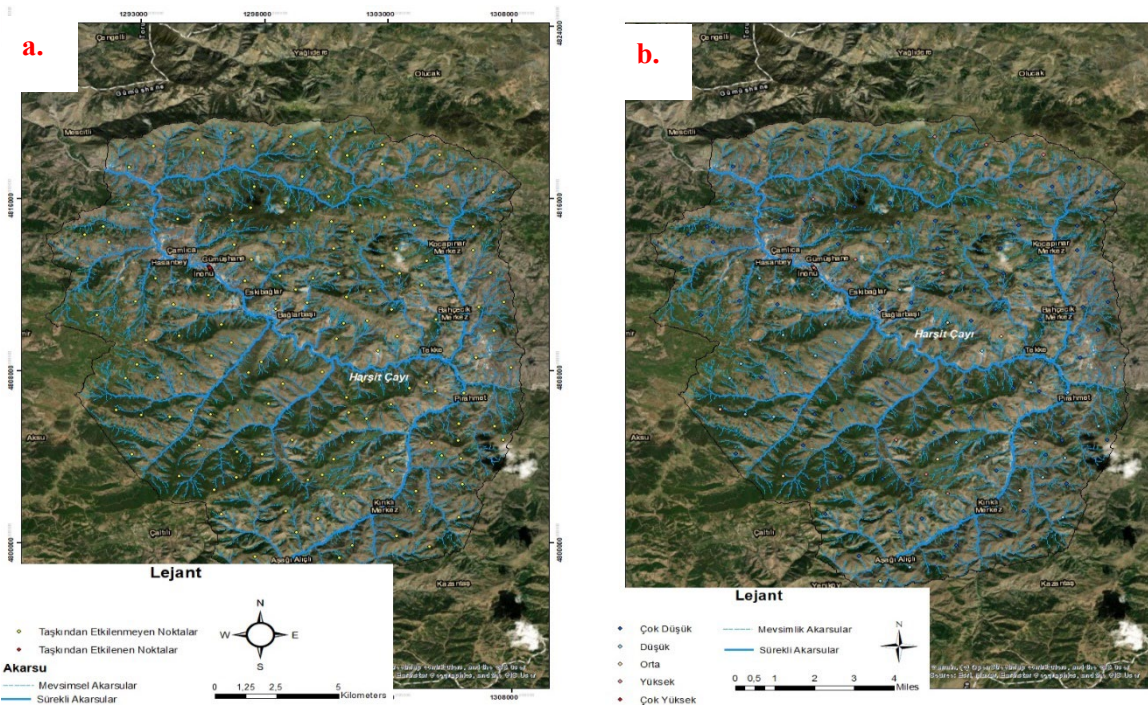


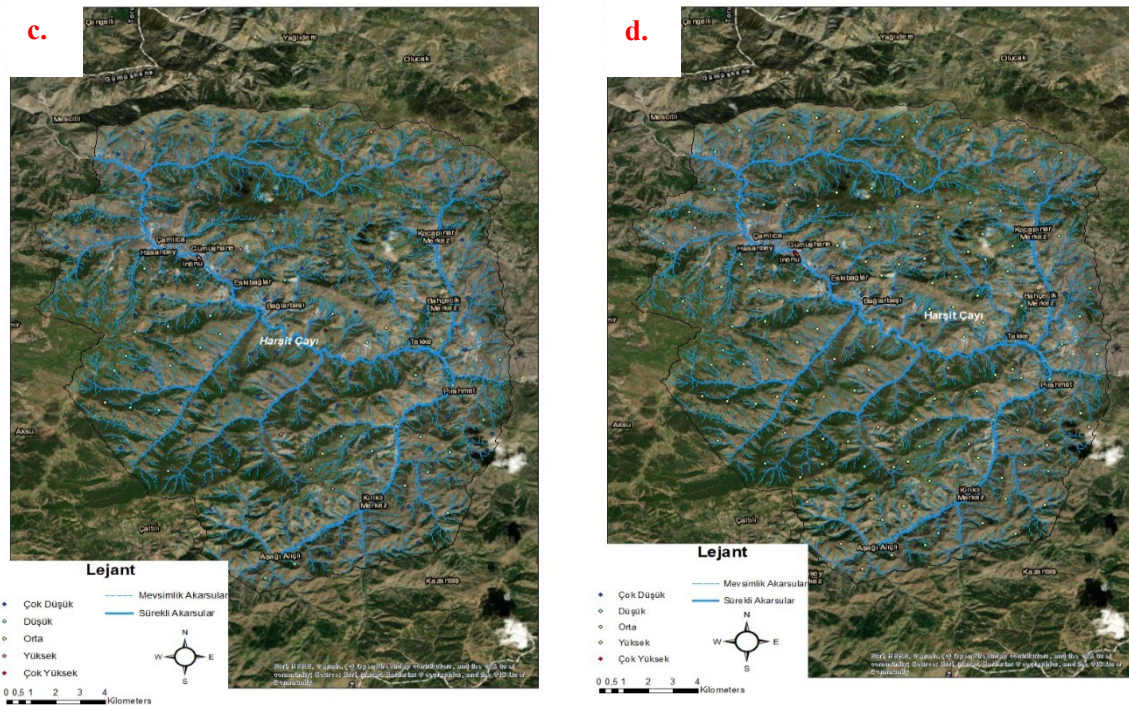
**Şekil 4.** 1972 Yılı Kelkit taşkınnın değerlendirilmesi (a; Gerçek Durum, b; Entropi Yöntemi, c; Frekans Oran Yöntemi, d; TOPSIS Yöntemi)

1974 yılında Gümüşhane ilinin en önemli akarsularından olan Harşit Çayının taşması sonucu afet meydana gelmiştir (Şekil 5). Yaşanan bu afet sahasının bulunduğu havzada rastgele seçilen 150 etkilenen, 150 etkilenmeyen noktasal veriyle çalışılmıştır. Etkilenen veriler Frekans Oran metodunda 143, TOPSIS metodunda 150 ve Entropi metodunda 149 tanesi çok yüksek ve yüksek riskli olarak sınıflandırılan bölgelere denk gelmiştir. Taşkından etkilenmeyen veriler yöntemlerde farklı risk sınıfları arasında dağılmaktadır (Tablo 2). Doğrulama değerlerine bakıldığında bu afeti Frekans Oran ve Entropi metodu çok yüksek doğruluk oranlarına ulaşarak tahmin etmişlerdir. Frekans Oran ve TOPSIS metodunda ağırlıklandırma değeri en yüksek olan değer yükselti iken Entropi metodunda yağış olarak belirlenmiştir. FR, TOPSIS ve Entropi metodundan en etkisiz bulunan parametreler sırasıyla bitki örtüsü, drenaj yoğunluğu ve bakı olarak belirlenmiştir.

**Tablo 2.** 1974 yılı taşkını değerlendirme tablosu

| Gerçek Sonuç |             |                                  |                                     |  |
|--------------|-------------|----------------------------------|-------------------------------------|--|
|              | Risk Sınıfı | Taşkından Etkilenen Noktalar (1) | Taşkından Etkilenmeyen Noktalar (0) | Doğrulama Yöntemleri (ACC, R, P, F-Score)    |
| Frekans Oran | Çok Yüksek  | 40                               | 0                                   | ACC:0.94<br>R:0.97<br>P:0.92<br>F-Score:0.94 |
|              | Yüksek      | 103                              | 3                                   |  |
|              | Orta        | 7                                | 21                                  |  |
|              | Düşük       | 0                                | 27                                  |  |
| TOPSIS       | Çok Yüksek  | 139                              | 4                                   | ACC:0.74<br>R:0.93<br>P:0.67<br>F-Score:0.78 |
|              | Yüksek      | 11                               | 30                                  |  |
|              | Orta        | 0                                | 66                                  |  |
|              | Düşük       | 0                                | 27                                  |  |
| ENTROPİ      | Çok Yüksek  | 33                               | 0                                   | ACC:0.95<br>R:0.99<br>P:0.92<br>F-Score:0.95 |
|              | Yüksek      | 136                              | 10                                  |  |
|              | Orta        | 1                                | 6                                   |  |
|              | Düşük       | 0                                | 27                                  |  |
|              | Çok Düşük   | 0                                | 107                                 |  |





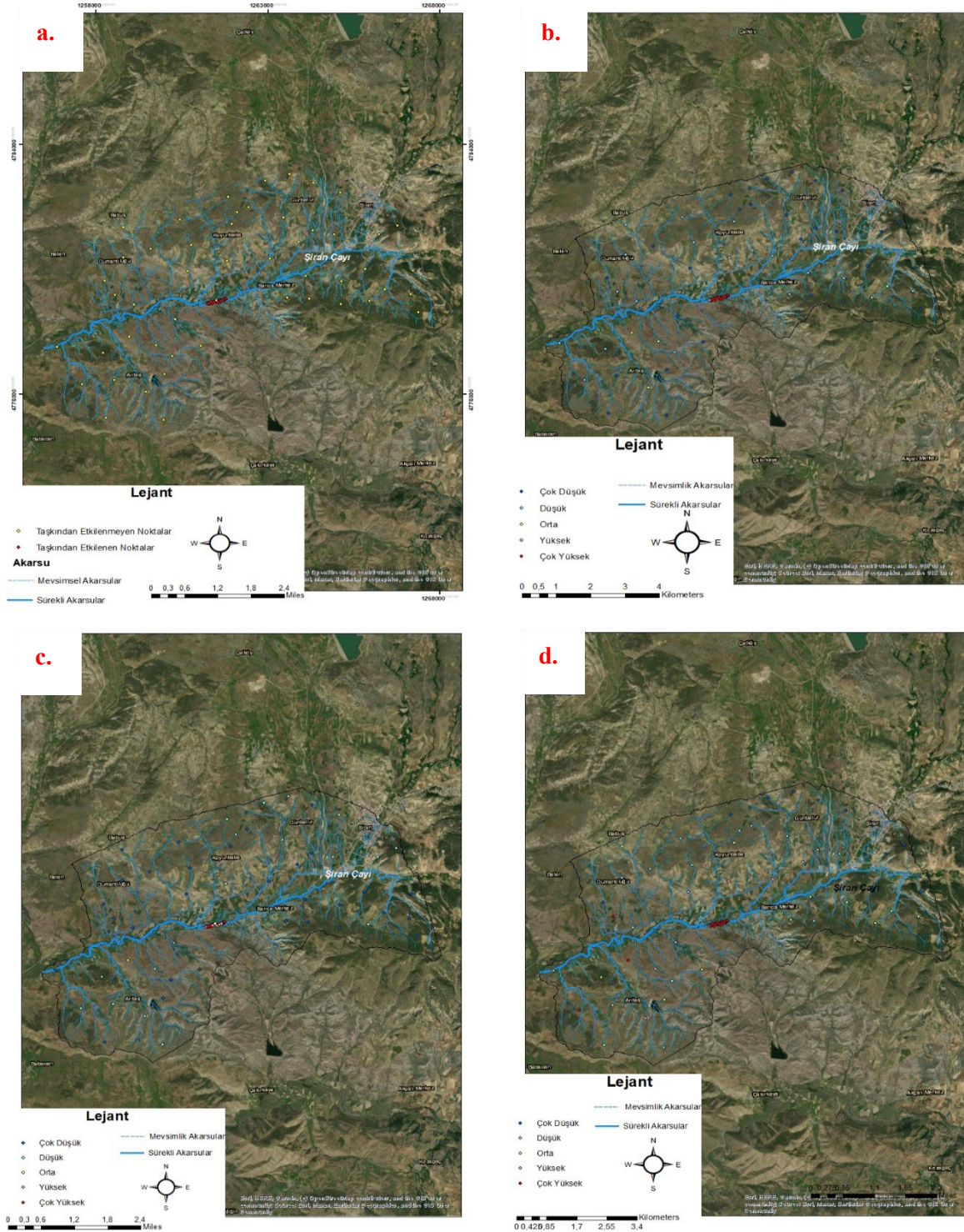
Şekil 5. 1974 Yılı Gümüşhane taşkınının değerlendirilmesi (a; Gerçek Durum, b; Entropi Yöntemi, c; Frekans Oran Yöntemi, d; TOPSIS Yöntemi)

Tablo 3. 2004 yılı taşkını değerlendirme tablosu

| Gerçek Sonuç |             |                                  |                                     |   |
|--------------|-------------|----------------------------------|-------------------------------------|---|
|              | Risk Sınıfı | Taşkından Etkilenen Noktalar (1) | Taşkından Etkilenmeyen Noktalar (0) | Doğrulama Yöntemleri (ACC, R, P, F-Score) |
| Frekans Oran | Çok Yüksek  | 16                               | 0                                   |   |
|              | Yüksek      | 33                               | 1                                   | ACC:0.97                                  |
|              | Orta        | 1                                | 2                                   | R:0.98                                    |
|              | Düşük       | 0                                | 18                                  | P:0.96                                    |
|              | Çok Düşük   | 0                                | 30                                  | F-Score:0.97                              |
| TOPSIS       | Çok Yüksek  | 44                               | 4                                   |   |
|              | Yüksek      | 2                                | 9                                   | ACC:0.78                                  |
|              | Orta        | 3                                | 13                                  | R:0.94                                    |
|              | Düşük       | 1                                | 11                                  | P:0.71                                    |
|              | Çok Düşük   | 0                                | 13                                  | F-Score:0.81                              |
| ENTROPİ      | Çok Yüksek  | 29                               | 1                                   |   |
|              | Yüksek      | 18                               | 0                                   | ACC:0.95                                  |
|              | Orta        | 3                                | 4                                   | R:0.96                                    |
|              | Düşük       | 0                                | 18                                  | P:0.94                                    |
|              | Çok Düşük   | 0                                | 17                                  | F-Score:0.95                              |

2004 yılında Şiran çayının taşması sonucunda oluşan afet 3 yöntemle tahmin edilmeye çalışılmıştır (Şekil 6). Bu havzada rastgele belirlenen taşkından etkilenen 50, etkilenmeyen 50 noktasal veri belirlenmiştir. Frekans Oran metodunda 49, TOPSIS metodunda 46 ve Entropi metodunda 47 noktasal veri Yüksek ve Çok Yüksek risk sınıfları içerisinde bulunmuştur. Taşkından etkilenmeyen

noktaların verilerinde gerçek sonuca en yakın sonucu Frekans Oran metodu ve Entropi metodu yüksek değerlerle karşılaşmıştır (Tablo 3). Entropi metodunda en etkili parametre Toprak, en etkisiz parametre Bakı olarak belirlenmiştir. Frekans Oran metodunda en etkili parametre Yükseklik, en etkisiz parametre bitki örtüsü olarak belirlenmiştir. TOPSIS metodunda en etkili parametre yükseklik, en etkisiz parametre Drenaj yoğunluğu olarak belirlenmiştir.



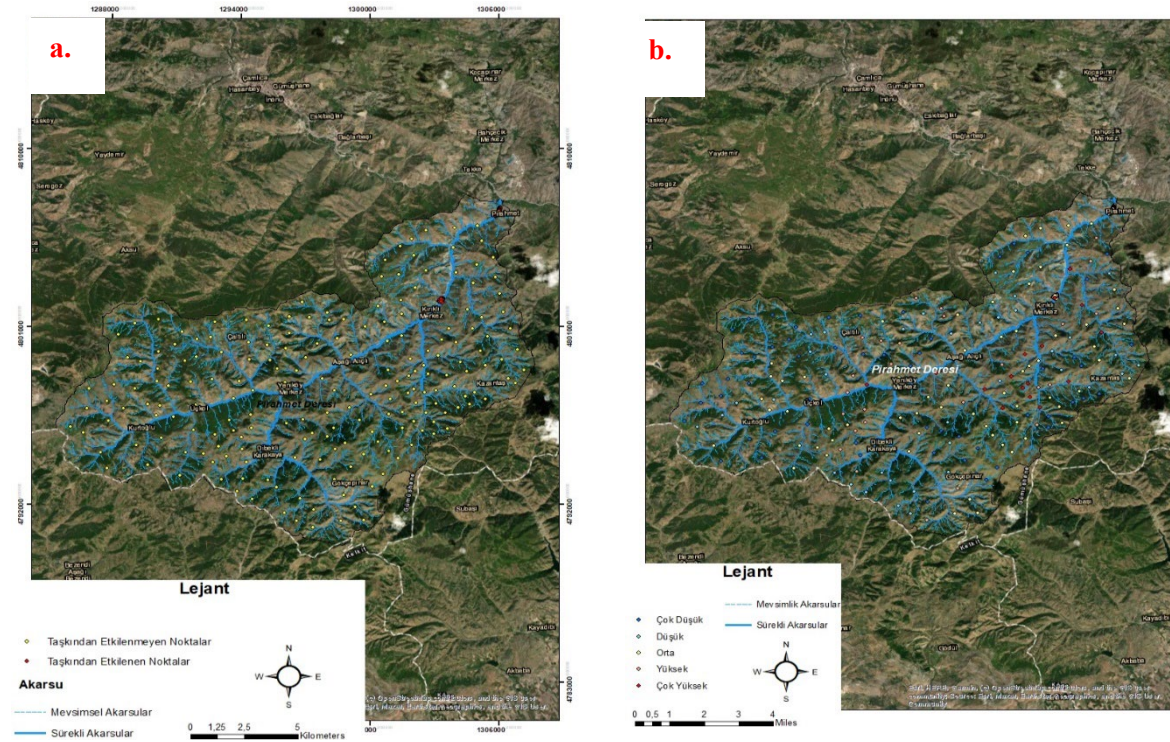
**Şekil 6.** 2004 Yılı Şiran çayı taşkınının değerlendirilmesi (a; Gerçek Durum, b; Entropi Yöntemi, c; Frekans Oran Yöntemi, d; TOPSIS Yöntemi)

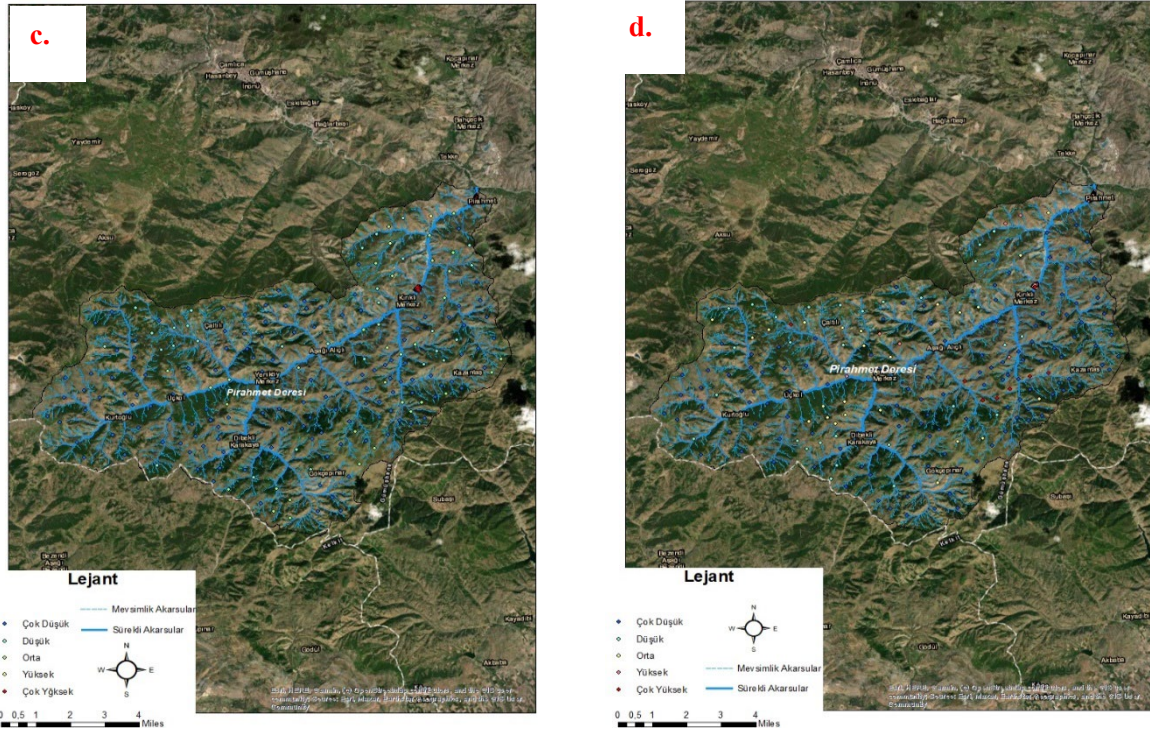


Çalışma alanından 2017 yılında Pirahmet deresinin taşması sonucunda afet meydana gelmiştir (Şekil 7). Bu yaşanan afet Frekans Oran metoduyla 0.92-0.95 arasında doğruluk değeriyle tahmin edilmiştir. Taşkından etkilenen 200, etkilenmeyen 200 adet noktasal veriyle bu afet incelenmiştir. Etkilenen 200 noktayı Frekans Oran metodu yüksek ve çok yüksek riskli alanlar olarak belirlerken, diğer metotlar farklı risk sınıfları içerisinde bulmuşlardır (Tablo 4). Frekans Oran metoduna göre taşkın afetine en etkili-en etkisiz parametre Yükselti ve Bitki örtüsü olarak belirlenmiştir. TOPSIS metodundan Topoğrafik Islaklık İndeksi-Bakı, Entropi metodunda Yükselti-Bakı sırasıyla en etkili ve en etkisiz parametre olarak belirlenmiştir.

**Tablo 4.** 2017 yılı taşkınmı değerlendirme tablosu  
Gerçek Sonuç

|              | Risk Sınıfı | Taşkından Etkilenen Noktalar (1) | Taşkından Etkilenmeyen Noktalar (0) | Doğrulama Yöntemleri (ACC, R, P, F-Score)    |
|--------------|-------------|----------------------------------|-------------------------------------|--|
| Frekans Oran | Çok Yüksek  | 191                              | 0                                   | ACC:0.93<br>R:0.95<br>P:0.92<br>F-Score:0.93 |
|              | Yüksek      | 9                                | 3                                   |  |
|              | Orta        | 0                                | 35                                  |  |
|              | Düşük       | 0                                | 30                                  |  |
|              | Çok Düşük   | 0                                | 134                                 |  |
| TOPSIS       | Çok Yüksek  | 102                              | 30                                  | ACC:0.83<br>R:0.88<br>P:0.80<br>F-Score:0.84 |
|              | Yüksek      | 75                               | 6                                   |  |
|              | Orta        | 21                               | 14                                  |  |
|              | Düşük       | 1                                | 20                                  |  |
|              | Çok Düşük   | 0                                | 130                                 |  |
| ENTROPİ      | Çok Yüksek  | 45                               | 15                                  | ACC:0.82<br>R:0.84<br>P:0.80<br>F-Score:0.82 |
|              | Yüksek      | 94                               | 26                                  |  |
|              | Orta        | 58                               | 67                                  |  |
|              | Düşük       | 2                                | 36                                  |  |
|              | Çok Düşük   | 0                                | 58                                  |  |





Şekil 7. 2017 Yılı Pirahmet deresi taşkınının değerlendirilmesi  
(a; Gerçek Durum, b; Entropi Yöntemi, c; Frekans Oran Yöntemi, d; TOPSIS Yöntemi)

#### 4. Sonuçlar

Taşkın çalışmalarının pek çoğunda en ciddi problem yöntem belirlenmesidir. Yapılan literatür çalışmalarının çoğunda ciddi başarılı sonuçlar görülmekte ve çalışmada kullanılan yöntemin diğer yöntemlere göre başarılı olduğu ifade edilmektedir. Ancak bu çalışmalarda yöntemlerinin doğruluk değerleri gerçek durumla mukayese edilmediğinden sadece ampirik doğrulama değerleri ile kalmaktadır. Bu amaçla bu çalışmada literatürde sıklıkla kullanılan 3 farklı Çok Kriterli Karar Verme Yöntemi ile geçmişte yaşanan 4 gerçek afet mukayese edilmiş ve literatürdeki en çok kullanılan 4 ayrı doğrulama metodu ile bu yöntemler test edilmiştir. Bu bahse konu amaçlarla bu çalışmada Türkiye’de en fazla taşkın afetine maruz kalan Karadeniz bölgesinin, Gümüşhane ili çalışma alanı olarak belirlenmiştir. Gümüşhane ilinde, ilki 1972 olmak üzere sırasıyla 1974, 2004 ve 2017 yıllarında 4 adet hem ekonomik hemde can kaybına neden olan afetler meydana gelmiştir. Taşkına etkili parametrelerin kendi arasındaki ilişkileri ve taşkına olan etkileri havzadan havzaya değişmektedir. Bu nedenle bu çalışmada bağımlı değişkenlerden etkilenen Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinden olan Frekans Oran, TOPSIS ve Entropi yöntemleri seçilmiştir. Sonuç haritaları incelendiğinde Frekans Oran ve Entropi yöntemi TOPSIS metoduna göre daha uyumlu sonuçlar verdiği görülmektedir. Frekans Oran metodu taşkınlara etki eden etkili parametreyi yükseltti olarak belirlerken, Entropi metodu Yağış ve Yükseltti olarak belirlemiştir. TOPSIS metodu 2 havzada Topoğrafik Islaklık İndeksi, 2 havzada Yükseltti parametresini etkili parametre olarak belirlemiştir. İncelenen 4 afette, 550 adet taşkından etkilenen, 550 adet ise etkilenmeyen noktasal veri ile 3 yöntemin doğruluk değerleri incelenmiştir. 4 adet doğrulama yöntemi ve 4 adet havza ortalamalarına bakıldığında Frekans Oran metodunun taşkın çalışmalarına yüksek uyum gösterdiği gözlemlenmiştir. Belediyelerin imar planlamalarında, Devlet Su İşleri ve İl ÖZ idaresi gibi kurumların taşkın koruma projelerinde taşkın risk sahasını bilmek önem arz etmektedir. Bu nedenle taşkın risk haritaları çalışmaları daha yaygınlaşarak daha gerçeğe yaklaşan haritalar tasarlamak ve ilgili kuruluşlarla işbirliği halinde çalışmak afetin önleyiciliği açısından önemlidir.

### Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir kurum, kuruluş, kişi ile kişisel ve finansal çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedirler.

### Teşekkür

Bu araştırma İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Araştırma Fonu (proje no: FDK-2022-2796) tarafından desteklenmiştir.

Bu çalışma kapsamında bize veri temini sağlayan Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü ve Hava Kuvvetleri Komutanlığı Harita Genel Müdürlüğüne teşekkür ederiz.

### Kaynaklar

- [1] Samanta, S., Pal, D. K., & Palsamanta, B. (2018). Flood susceptibility analysis through remote sensing, GIS and frequency ratio model. *Applied Water Science*, 8(2), 66.
- [2] Natarajan, L., Usha, T., Gowrappan, M., Palpanabhan Kasthuri, B., Moorthy, P., & Chokkalingam, L. (2021). Flood susceptibility analysis in chennai corporation using frequency ratio model. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 49, 1533-1543.
- [3] Ramesh, V., & Iqbal, S. S. (2022). Urban flood susceptibility zonation mapping using evidential belief function, frequency ratio and fuzzy gamma operator models in GIS: a case study of Greater Mumbai, Maharashtra, India. *Geocarto International*, 37(2), 581-606.
- [4] Majeed, M., Lu, L., Anwar, M. M., Tariq, A., Qin, S., El-Hefnawy, M. E., ... & Alasmari, A. (2023). Prediction of flash flood susceptibility using integrating analytic hierarchy process (AHP) and frequency ratio (FR) algorithms. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1037547.
- [5] Yükseler, U., Toprak, A., Gul, E., & Dursun, O. F. "Flood hazard mapping using M5 tree algorithms and logistic regression: a case study in East Black Sea Region", *Earth Science Informatics*, 1-15. (2023).
- [6] Mudashiru, R. B., Sabtu, N., Abustan, I., & Balogun, W., "Flood hazard mapping methods: A review. *Journal of hydrology*", 603, 126846, (2021).
- [7] Chen, Y., Wang, D., Zhang, L., Guo, H., Ma, J., & Gao, W. (2023). Flood risk assessment of Wuhan, China, using a multi-criteria analysis model with the improved AHP-Entropy method. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(42), 96001-96018.
- [8] Dey, H., Shao, W., Moradkhani, H., Keim, B. D., & Peter, B. G. (2024). Urban flood susceptibility mapping using frequency ratio and multiple decision tree-based machine learning models. *Natural Hazards*, 1-29.
- [9] Ekmekcioğlu, Ö., Koc, K., & Özger, M. (2021). Stakeholder perceptions in flood risk assessment: A hybrid fuzzy AHP-TOPSIS approach for Istanbul, Turkey. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 60, 102327.
- [10] Belazreg, N. E. H., Hasbaia, M., Şen, Z., & Ferhati, A. (2024). Flood risk mapping using multi-criteria analysis (MCA) through AHP method case of El-Ham wadi watershed of Hodna basin (Algeria). *Natural Hazards*, 120(2), 1023-1039.
- [11] TOPRAK, A., & CANPOLAT, F. A. (2022). FREKANS ORAN, ANALİTİK HİYERARŞİ VE LOJİSTİK REGRESYON MODELLERİNİN TAŞKIN TEHLİKE TAHMİNİNDE KARŞILAŞTIRMALI KULLANIMI, FATSA İLÇE MERKEZİ VE YAKIN ÇEVRESİ ÖRNEĞİ. *International Journal of Geography and Geography Education*, (45), 349-379.
- [12] Senan, C. P., Ajin, R. S., Danumah, J. H., Costache, R., Arabameri, A., Rajaneesh, A., ... & Kuriakose, S. L. (2023). Flood vulnerability of a few areas in the foothills of the Western Ghats: a comparison of AHP and F-AHP models. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 37(2), 527-556.

- [13] Aksoy, H., Kirca, V. S. O., Burgan, H. I., & Kellecioglu, D. (2016). Hydrological and hydraulic models for determination of flood-prone and flood inundation areas. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 373, 137-141.
- [14] DSİ, “Doğu Karadeniz Taşkınları Raporu (1970-1995)”, DSİ Yayınları, Trabzon. (1996)
- [15] DSİ, “Su Dünyası Dergisi”, Sayı: 34, DSİ Vakfı Yayınları, Ankara. (2006)
- [16] Wehri, A. “General properties of entropy, Reviews of Modern Physics”, 50(2), 221-260, (1978)
- [17] Singh, V. P. “The Entropy theory as tool for modeling and decision making in environmental and water resources”, Water SA, 26,1, ISSN: 0378-4738, (2000).
- [18] Shannon C.E. “Mathematical Theory of Information. The Mathematical Theory of Information”, The University of Illinois Press: Urbana, IL, USA, 27, 170–180, (1948).
- [19] Erener A., Şebnem H., Düzgün B., “Improvement of statistical landslide susceptibility mapping by using spatial and global regression methods in the case of more and romsdal (norway)”, Landslides, Volume 7, 55-68, (2010).
- [20] Lai, Y. J., Liu, T. Y., & Hwang, C. L. “TOPSIS for MODM”, European journal of operational research, 76(3), 486-500, (1994).
- [21] Olson, D. L. “Comparison of weights in TOPSIS models”, Mathematical and Computer Modelling, 40(7-8), 721-727, (2004).

## FARKLI EN/BOY ORANINA SAHİP DÖRTGENSEL KESİTLİ BİR KİRAL ÖKZETİK HÜCRESEL YAPININ TASARIM VE OPTİMİZASYONU

Cem YILMAZ<sup>1</sup>, İlyas KACAR<sup>2\*</sup>

<sup>1,2</sup> Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Niğde, 51240, Türkiye  
Geliş Tarihi/Received Date: 22.02.2024 Kabul Tarihi/Accepted Date: 09.08.2024 DOI: 10.54365/adyumbd.1440934

### ÖZET

Bu çalışmada kübik formda bir kiral kafes yapısı tasarlanmıştır. Kesit dörtgenseldir. Malzeme olarak polietilen, Ti6Al4V, AlSi10Mg, 316 paslanmaz çelik, polyamid-6, polipropilen ve reçine polyamid/Naylon-66 kullanılmıştır. Yapının bir ucu ankastre mesnet ile sabitlenmişken serbest ucu ise aksel yer değiştirmeye maruz bırakılmıştır. Yapısal analiz için sonlu eleman esaslı simülasyon kullanılmıştır. Simülasyon sonucunda gerilme, deformasyon, Poisson oranı değerleri elde edilmiştir. Bu parametreler genetik algoritma esaslı optimizasyona tabi tutulmuştur. Optimizasyonun amacı, minimum boyuta sahip yapıda, maksimum dayanım elde edebilmektir. Zira hafif yapılar hem inşa hem de malzeme maliyetleri açısından tercih edilmektedir. Amaca uyan en iyi boyutlar tespit edilmiştir. Ayrıca parametreler arasındaki ilişkiyi gösteren bir cevap fonksiyonu elde edilmiştir. Optimum kesit 0,5x0,2 mm olup bu durumda yapı -0,9 mm'lik bir yer değiştirmeye dayanabilmiştir. Yapıda en fazla 23,636 MPa çekme ve -1,3266 MPa basma gerilmesi oluşmuştur. Bu değer malzemenin akma dayanımının altındadır. Bu hâli ile yapı kütlesi 0,298 gramdır.

**Anahtar Kelimeler:** Sonlu elaman simülasyonu, Kompozit panel, 3B kiral ökzetik kafes, optimizasyon

## DESIGN AND OPTIMISATION OF A CHIRAL EUXETIC LATTICE STRUCTURE WITH RECTANGULAR CROSS-SECTION HAVING VARIOUS ASPECT RATIO

### ABSTRACT

In this study, a chiral lattice is designed in a cubic form. The cross-section is rectangular. Polyethylene, Ti6Al4V, AlSi10Mg, 316 stainless steel, polyamide-6, polypropylene, and resin polyamide/Nylon-66 were used as materials. One end of the structure is fixed with an anchored support while the free end is subjected to axial displacement. Finite element based simulations were used for structural analysis. As a result of the simulation, stress, deformation and Poisson's ratio values were obtained. These parameters were subjected to genetic algorithm based optimisation. The aim of the optimisation is to obtain maximum strength in the structure with minimum size. Because lightweight structures are preferred in terms of both construction and material costs. As a result, the best-fit-for-purpose dimensions were determined. In addition, a response function showing the relationship between the parameters was obtained. The optimum cross section is 0.5x0.2 mm and in this case the structure could withstand a displacement of -0.9 mm. A stress of 23.636 MPa occurred on the structure. This value is far below the yield strength of the material. In this case, the mass of the structure is 0.298 grams.

**Keywords:** Finite element simulations, Composite panel, 3D chiral auxetic lattice, optimization

e-posta<sup>1</sup> : [cemyilmz11@gmail.com](mailto:cemyilmz11@gmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-7439-9904>

\* e-posta<sup>2</sup> : [ikacar@gmail.com](mailto:ikacar@gmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5887-8807> (Sorumlu Yazar)

## 1. Giriş

Kiral kafes yapılar, ilk olarak kimyasal moleküllerin sınıflandırılmalarında kullanılmışsa da, günümüzde artık mekanik yapısal eleman olarak da kullanılmaktadır. Yüksek deformasyonlara, titreşimlere dayanabilmektedir. Kiral yapısal elemanlar, ayna görüntüsünün üzerine bindirilemeyen (enantiyomorf), birbirine bağlı kolon veya kirişlerin üç boyutlu dizilimleri ile oluşmaktadır. Bu yapılar, benzersiz mekanik, termal ve optik özellikleri nedeniyle malzeme bilimi, inşaat, makine ve mimari gibi çeşitli alanlarda ilgi çekmektedir. Kiral kafes yapılar asimetric şekle sahiptirler. Bu hâlleri ile meta-malzeme ve gelişmiş üretim için idealdirler. İşçi barınma, depolama, ekipman koruma ve diğer geçici alanların inşası için bu yapılar kullanılmaktadır. Hızlı kurulum, taşınabilirlik ve düşük maliyet gibi avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, bu yapılar genellikle standart modüler parçalardan oluştuğu için farklı boyutlarda ve şekillerde kolayca monte edilebilmektedir. Malzeme olarak genellikle çelik veya alüminyum gibi dayanıklı malzemelerden yapılmaktadırlar. Bu nedenle sert hava koşullarına dayanıklıdırlar.

Kiral kafes yapılar, mekanik alanda sıklıkla karşılaşılan titreşim problemlerine bir çözüm olanağı sunmaktadır. Ha ve ark. (2016) kübik hücelere sahip, aralarında deforme olabilen kiriş elemanların bulunduğu, üç boyutlu, izotropik kiral kafesler geliştirmiş ve sonlu eleman (SE) yöntemi esaslı analiz etmişlerdir. Bu kafes yapılar negatif Poisson oranına sahip (özketik) olup bu oran ayarlanabilmektedir. Hücre sayısı arttıkça pozitif değerlerden negatif değerlere doğru geçmektedir. İzotropi ise en-boy oranının ayarlanmasıyla elde edilmiştir [1].

Novac ve ark. (2019) Ti6Al4V alaşımından seçici elektron ışını eritme yöntemi kullanılarak kiral özketik hücresel yapılar üretmişlerdir. Daha sonra yarı statik ve dinamik sıkıştırma yükleme koşulları altında deneysel olarak test etmişlerdir. Analiz edilen kiral özketik yapının geometrisinin, Poisson oranı üzerindeki etkisi modellenmiştir. Özketik çekirdekli sandviç kompozit panellerin patlama yüklemesi altındaki tepkisi belirlenmiştir. Kompozit yapıların patlamaya karşı tepkisini iyileştirmek için özketik hücresel çekirdeklere sahip sandviç yapıların büyük potansiyele sahip olduğu raporlanmıştır [2].

Vasiliev ve Pavlov (2020) kiral mikro yapıya sahip Cosserat kafes modelinin oluşturulması için yapısal bir yaklaşım geliştirmiştir. Kafesin parçacıklarını bağlayan elemanlar için yay benzetimi yapılmıştır. Sonuçta bağlantı elemanlarının parametreleri elde edilmiş ve buna bağlı olarak Poisson oranı hesaplanmıştır. Metot olarak yayların potansiyel enerjisinin, bağıl uzamanın karesi ile orantılı olması prensibi kullanılmıştır. Ayrık bir model ve uzun dalga boylu bir sürekli kiral model geliştirilmiştir. Makro-parametrelerin mikroyapı parametrelerine bağımlılığı, karmaşık bağlantılara sahip sonlu boyutlu parçacıklardan ve kompozit kiriş elemanlardan oluşan kiral altıgen kafesler için elde edilmiştir [3].

Bacigalupo ve Gambarotta (2016), kiralitenin ve yerel rezonatörlerin dinamik özelliklerinin akustik davranış üzerindeki etkisinin daha iyi anlaşılması için yerel rezonatörler içeren periyodik kiral kiriş-kafeslerin basitleştirilmiş bir modelini oluşturmuşlardır. Kiriş-kafes modelleri, her biri diğerlerine elastik ince kütleli bağlarla bağlanan ve yumuşak elastik bir halka içinde rijit bir diskten yapılmış bir iç rezonatör içeren periyodik bir rijit diskler dizisinden oluşmaktadır. Bant yapısı ve düşük frekanslı bant boşluklarının oluşumu ayrık bir Lagrangian modeli aracılığıyla analiz edilmiştir. Hem altıgen hem de dörtgen kiral kafes için iki akustik mod ve dört optik mod tanımlanmış ve rezonatörün dinamik özelliklerinin bu dallar üzerindeki etkisi bant yapısının bazı özellikleriyle birlikte analiz edilmiştir. Ayrık Lagrangian modelinin halka yer değiştirmelerinin bir süreklilik alanı olarak yaklaştırılması ve genelleştirilmiş makro homojenlik koşulunun uygulanması yoluyla, genelleştirilmiş bir mikropolar eşdeğer süreklilik, genel hareket denklemi ve kapalı formda bir denklem ile birlikte türetilmiştir. Mikropolar model tarafından sağlanan dağılım fonksiyonlarının geçerlilik sınırları, ayrık model tarafından elde edilenlerle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir [4].

Ruan ve ark. (2021) dairesel plakalardan oluşan yenilikçi bir 2B kompozit kiral kafes hiyerarşik yapı önermiştir. Dairesel plakalar, bir uçtaki dairesel plaka kenarını ve diğer uçtaki kiral birim hücrenin

halkasının iç kenarını birbirine bağlayan dört bağ eklenerek kiral birim hücreye dâhil edilmiştir. Kiral kafes yapıların şok dalgası yayılma davranışları, sonlu elemanlar yöntemi ve Bloch teoremine dayalı olarak kendi geliştirdikleri bir programla hesaplanmıştır. Kiral birim hücre yapısının bağ sayısının, mesnet türünün, bağlantı çubuğundaki dönme açısının ve dairesel plaka boyutunun; bant boşluklarının dağılımları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Dalga yayılımını analiz etmek için izo-frekans konturları, grup hızları ve faz hızları hesaplanmıştır. Bant aralığının varlığını doğrulamak için düşük genlikli elastik dalga iletim testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, saat yönünün tersine teğetsel bağlantı modunun kompozit kiral kafes yapıların, plak yarıçapı 32 mm olduğunda en geniş ilk bant aralığına sahip olduğunu göstermektedir. Dairesel plaka eklenmesi, bant boşluğu işgal eden bölgeleri genişletmiş, ancak bant boşluklarının sayısını artırmamıştır [5].

Spadoni ve ark. (2009) kiral bir hücresel yapının fononik (farklı akustik özelliklere sahip iki veya daha fazla malzemeden meydana gelen akustik meta malzemeler) özellikleri üzerine yapılan araştırmaların sonuçlarını sunmuşlardır. Ele alınan geometri, düzlem içi altıgen simetriye sahip olup dairesel düğümler, bu düğümlere teğet olan altı adet bağ ile birbirine bağlanmıştır. Düzlem içi dalga yayılımı, iki boyutlu dağılım ilişkilerini tahmin etmek ve dikkate alınan kiral konfigürasyona özgü dağılım özelliklerini göstermek için kullanılan Bloch teoreminin uygulanması yoluyla analiz edilmiştir. Birim hücre geometrisinin dağılım, bant boşluğu oluşumu ve dalga yönlülüğü üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar küresel kafeslerin, akustik dalga kılavuzlara uygulamalarında kullanılabilir meta malzemelerin tasarımı için potansiyel taşıdığını göstermektedir [6].

Liu ve ark. (2011) süreklilik mekaniğinde, sentrosimetrik (merkez noktaya göre simetrik olan) olmayan mikropolar elastisite teorisini (mikro ve nano boyuttaki yapıların modellenmesinde ve analizinde kullanılan, yerel olmayan elastisite teorisi) kullanarak malzemelerin doğasında bulunan kiraliteyi analiz etmiştir. Kiral bir yapı, 2B izotropik bir probleme indirildiğinde, ortaya çıkan model artık kiralitesi olmayan bir hâle gelmiştir. Bu nedenle, kiralite, 2B kiral katılar için mevcut teoriler tarafından düzgün bir şekilde karakterize edilememektedir. Bu zorluğu aşmak için, 2B durumda izotropik tensörlerin yeniden yorumlanmasına dayanarak, 2B izotropik kiral katılar için kiral etkiyi modellemek üzere bir süreklilik teorisi önermişlerdir. Kiralite ile ilgili tek bir malzeme parametresi, 2B kiral katıların temel bir özelliği olan kütle deformasyonu ve iç rotasyon arasındaki bağlantıyı karakterize etmek için tanıtılmıştır. Önerilen süreklilik teorisi, kafesin etkin malzeme sabitlerinin analitik olarak belirlendiği üçgen kiral kafesler için tutarlı bir biçimde uygulanmıştır. Kiral örgüdeki benzersiz davranış, bir statik gerilme problemi ve bir düzlem dalga yayılımı probleminin analizleri yoluyla ifade edilmiştir. Kiral olmayan model tarafından tahmin edilemeyen sonuçlar, ayrık modelin kesin çözümü ile doğrulanmıştır [7].

Goerlitzer ve ark. (2020) metalik nanoparçacıkların periyodik dizilerinin, lokal yüzey plazmon rezonanslarının toplu olarak uyarılması yöntemini kullanmışlardır. Burada, yüzey kafes rezonanslarının yeni bir serbestlik derecesi, kiral yapıların rezonans frekanslarının değişmesine yol açmaktadır. Parçacıklar arası mesafenin bir fonksiyonu olarak yüzey kafes rezonanslarının uyarılması ve diziler içindeki düzen derecesi tespit edilmiştir. Bireysel 3B yapıların kiralitesi, kiral kafes modlarının oluşumuna yol açmıştır [8].

Gellman (2010) kiral yüzeyler ve kiralite derecesini atomik ve moleküler düzeydeki yapılarla belirlemiştir. Neticede doğal, modifiye (kiral moleküllerin adsorpsiyonu ile) ve modifiyelerin birleştirilmesi ile elde edilen üç tür kiral yapı sunmuşlardır [9].

Fecher (2022), kiralitenin belirli simetrilere bağlı olduğunu vurgulamıştır. Bu tür yapılarda ayna düzlemleri ve ters çevirme merkezleri bulunmamaktadır. Simetri elemanları olarak sadece rotasyonlara izin verilmektedir. Bununla birlikte simetri elemanı olarak izin verilen dönüşler üzerinde de ilave kısıtlamalar mevcuttur. Çünkü bunlar her zaman enantiyomorf çiftler hâlinde görünmektedirler. Bu çalışma kiral yapıları ve uzay gruplarını sınıflandırmıştır. Sınıflandırma için Hausdorff mesafeleri ve sürekli kiralite ölçüleri kullanılmıştır. Bant yapısının ve kiralite ile aynı kristal parametrelerden etkilendiği bulunmuştur. Bununla birlikte, eğrilikten bağımsızdır. Berry eğriliği, elektronik yapının topolojik bir ölçüsü olmakla birlikte bir yapının tersine çevrilmesine yanıt verdiği için kiralitenin kanıtı

değildir. Moleküller için, optik dairesel dikroizm değerinin kiralite için en önemli ölçütlerden biri olduğu sunulmuştur. Bu nedenle yüksek simetri konfigürasyonlarında fotoelektronların açılal dağılımındaki dairesel dikroizmin, kiral katıların ve yüzeylerinin yönlülüğünü ayırt etmek için kullanılabilceğı önerilmektedir [10].

Erdoğan ve Toktas (2023-a) yeni tasarlanmış ökzetik kafes yapıların Poisson oranı üzerinde geometri iç kalınlığının etkisini incelemeye odaklanmıştır. Araştırma, çeşitli yeni tasarlanmış yapıları incelemek için CAD modelleme ve sonlu elemanlar analizi kullanmıştır. Bulgular, yeni tasarlanmış ökzetik yapının, benzer şekillerle karşılaştırıldığında daha düşük negatif Poisson oranına sahip olduğunu göstermiştir. 4,9 mm iç kalınlık ve 4x2 kafes yapı en düşük -0,55 Poisson oranını göstermiştir [11].

Nergis ve ark. (2023) örme spor giyimde kişisel koruma için sarmal yardımcı ipliklerin geliştirilmesi ve değerlendirilmesine odaklanmıştır. Araştırma, farklı iplik bileşenlerinin ve sayılarının, ipliğın ve elde edilen kumaşların özellikleri üzerindeki etkisini araştırmaktadır. Amaç, spor uygulamalarında konfor, performans ve güvenliği artırmak için tekstillerin ökzetik davranışını geliştirmektir. Helisel ökzetik ipliklerin örme kumaşlardaki yapısını ve performansını araştıran çalışma, spor koruyucu ekipmanlar için yenilikçi malzemelerin geliştirilmesine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır [12].

Kaya ve ark. (2023-a) ökzetik bir kafes geometrisi, kabuk kalınlığı ve çekirdek kalınlığı gibi parametrelerin etkisini araştırarak silindirik sandviçlerin enerji emme performansını optimize etmeyi amaçlamıştır. Bu parametrelerin optimum kombinasyonunu belirlemek için Taguchi yöntemi kullanılmış, ANOVA yöntemiyle enerji emilimi üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Araştırma, çarpışma performansını artırmak ve silindirik yapılarda gelişmiş enerji emme yetenekleri için malzeme tasarımına rehberlik etmek amacıyla yapılmıştır [13].

Erdoğan ve Toktas (2023-b) sonlu elemanlar analizi kullanılarak yeni tasarlanan ve farklı iç kalınlıklara sahip bir ökzetik kafes yapının Poisson oranını incelemiştir. Amaç, yapının mekanik özelliklerini analiz etmek ve bunları literatürdeki mevcut ökzetik yapılarla karşılaştırmaktır. Araştırma, alana yeni bir birim hücre tasarımı ile katkıda bulunmayı ve üstün mekanik özelliklere sahip bir yapı oluşturmayı amaçlamıştır. İç kafes kalınlığının Poisson oranı, kütle, hacim ve yüzey alanı üzerindeki etkilerini inceleyerek, çalışma ökzetik yapıların anlaşılmasını ve hafif endüstrilerdeki potansiyel uygulamalarını geliştirmeyi amaçlamıştır [14].

Kaya ve ark. (2023-b) negatif Poisson oranına sahip yeni tasarlanmış bir kafes yapının ökzetik davranışını araştırmaya odaklanmıştır. Araştırmacılar, sonlu elemanlar analizini kullanarak, geometrik iç kalınlık ve Poisson oranı arasındaki ilişkiyi anlamak için 24 kafes yapıyı incelemiştir. Amaç, ökzetik yapılarla ilgili mevcut literatüre benzersiz bir tasarımla katkıda bulunmaktır. Bulgular, geometrik iç kalınlık arttıkça, kafes yapının özellikle 4x4 matris yapısında gelişmiş ökzetik özellikler sergilediğini ortaya koymuş ve yapısal davranışı optimize etmede geometrik parametrelerin önemini vurgulamıştır [15].

Çetin ve Seyitoğlu (2024) Çin, Amerika Birleşik Devletleri ve Birleşik Krallık'ın önde gelen tedarikçiler olduğunu vurgulayarak ökzetik yapıların evrimi ve eğilimlerini sunmuşlardır [16].

Kaboğlu (2022) otomotiv tampon uygulamaları için ökzetik çekirdekli sandviç kompozitlerin mekanik davranışını araştırmaya odaklanmıştır. Poliamid-12 ve cam elyaf takviyeli polipropilen yüzeylerden oluşan ökzetik çekirdek, üç noktalı bükme testlerinde üstün esneme özellikleri sergilemiştir. Ökzetik yapılar arasındaki mesafenin mukavemet ve darbe emilimi için kritik bir parametre olduğu bulunmuştur. Araştırma, optimum mekanik performans için malzeme seçimi ve geometrik hususları vurgulamış ve geleneksel çekirdeklere kıyasla gelişmiş enerji emme kabiliyetleri göstermiştir [17].

Becergen ve ark. (2022), topoloji optimizasyonu ve kafes yapılar gibi yöntemler kullanarak dişlilerin iç gövdelerinin tasarım optimizasyonuna odaklanmaktadır. Malzeme türlerini optimize etmek için eklemeli tasarım tekniklerini ve kafes yapılarını karşılaştırmaktadır. Sonuçlar, alan odaklı tasarım



ve topoloji optimizasyonu yoluyla önemli ağırlık tasarrufu ve gelişmiş mekanik özellikler göstermektedir [18].

Akgün ve ark. (2022) örgü ipliklerle dokunan kumaşların ökzetik performansı ve fiziksel özelliklerini incelemiştir. Örgü atkı ipliği ile dokunan kumaşlar, çekme durumunda, negatif poisson oranı (NPR) ile ökzetik bir davranış göstermiştir. NPR, örgü ipliğinin kalınlığından ve kumaş sıklığından etkilenmiştir. Örgü iplik kullanımı, çekme mukavemeti, termal direnç ve aşınma direnci gibi fiziksel özellikleri geliştirilmiştir [19].

Özkan ve Khosravi (2023) 3B metal yazıcı kullanılarak oluşturulan modifiye metal ökzetik yapıların mekanik davranışını incelemiştir. Bu yapılar, NPR nedeniyle artan kesme mukavemeti ve enerji emilebilirliği gibi benzersiz özellikler sergilemektedir. AlSi10Mg alaşımından yapılan ökzetik panellerin mekanik özelliklerini araştırmak için deneysel testler ve sayısal simülasyonlar yapılmıştır. Sonuçlar, sonlu elemanlar modelinin yapıların çekme davranışını maksimum %3'ten daha az bir hata ile doğru bir şekilde tahmin ettiğini göstermiştir. Ayrıca, yüksek çekme performansı için en uygun geometriyi belirlemek üzere parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışma, çeşitli uygulamalar için bu benzersiz yapıların mekanik özelliklerinin anlaşılması ve iyileştirilmesinde eklemeli üretim yöntemlerinin önemini vurgulamaktadır [20].

Kaya ve ark. (2022) birim hücre yüksekliğinin AlSi10Mg alaşımından yapılmış hacim merkezli kafes yapıların balistik performansı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Araştırma birim hücre yüksekliğinin optimize edilmesinin kafes yapıların balistik performansını artırabileceğini ortaya koymaktadır. Birim hücrenin en-boy oranının 0,75'ten 1,5'e çıkarılmasıyla penetrasyona karşı direnç artmış, daha yüksek en-boy oranlarında ise performans düşmüştür. Çalışma, kafes geometrilerinin mekanik performansının belirlenmesinde birim hücre boyutlarının önemini vurgulamaktadır [21].

Üzün ve Kayacan (2023) kafes yapılar, ağ yapılar ve periyodik yapılar içeren ökzetik havasız lastiklerin performans analizine odaklanmıştır. Sonlu eleman analizi yoluyla, mukavemet ve dinamik davranışlarını değerlendirmek için üç farklı lastik tasarımı incelenmiştir. Sonuçlar, yeniden girintili kafes yapılara sahip orijinal tasarımın ticari lastiklere kıyasla daha üstün mekanik özellikler sergilediğini göstermiştir. Gelişmiş mukavemet ve darbe emici enerji performansı gösteren yeni bir spline astarlı yapı geliştirilmiştir. Orijinal tasarım, incelenen diğer otomobil lastiklerine kıyasla en az %66 daha yüksek darbe emme enerjisi performansı göstererek havasız lastik tasarımının ilerlemesine önemli ölçüde katkıda bulunmuştur [22].

Akbulut ve ark. (2023) kafes hücre tasarım yaklaşımına, özellikle de eklemeli imalat için tasarlanan kafes yapıların yapısal davranışlarına odaklanmaktadır. Sonlu elemanlar analiz yöntemi kullanılarak incelenen küpöktahedron, oktahedron ve eşkenar dodekahedron kafes yapıları incelenmiş olup, sonuçlar küpöktahedron kafesin diğer kafes yapılarına kıyasla daha yüksek mukavemet sağladığını göstermektedir. Bulgular, ağırlığı azaltırken parça performansını artırmak için havacılık ve uzay uygulamalarında kafes yapıların kullanılma potansiyelini göstermektedir [23].

Öykünç ve Yıldızdağ (2023) gemi yapımında kullanılan yeni kompozit malzemelerin dayanıklılığını incelemiştir. Çalışmanın bulguları, bu malzemelerin bakım maliyetlerini azaltırken deniz araçlarının operasyonel ömrünü önemli ölçüde uzatabileceğini göstermiştir [24].

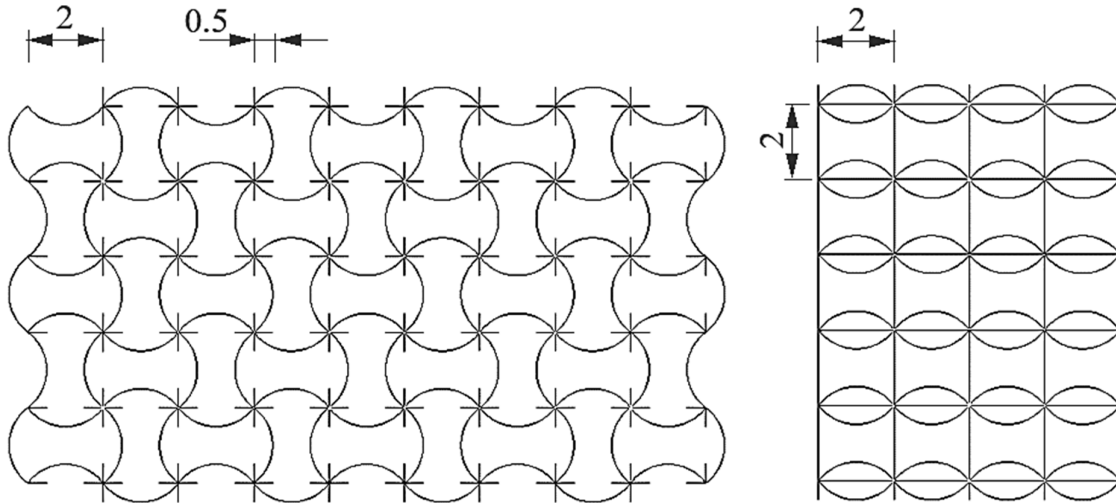
Çelebi ve İmanç (2023) 3B baskı teknolojisi kullanılarak üretilen polimer malzemelerin mekanik özelliklerini incelemektedir. Araştırma, malzeme tasarımı, üretimi ve test süreçlerini detaylı bir şekilde ele almaktadır. Ayrıca, malzeme seçimi, test yöntemleri ve sonuçların analizi gibi konular da ele alınmaktadır. Araştırma, malzeme mühendisliği ve 3B baskı teknolojisi alanında önemli bir katkı sağlamaktadır [25].

Yukarıda sunulan literatür taramasından da görülebileceği gibi, yapısal tasarım alanında kiral kafes tasarımları kullanılmaktadır. Optimizasyon ise tasarımcılar için en önemli araçlardan biridir. Açık literatürde kiral yapıların optimizasyonuna yönelik araştırmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Bu çalışmada, kübik kiral kafes yapısının optimal boyutları yapısal simülasyon ve genetik algoritma optimizasyon yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. Parametreler arasındaki korelasyon değerleri,

cevap yüzey fonksiyonu kullanılarak elde edilmiştir. Tasarım noktalarının elde edilmesinde Latin hiperküp yöntemi ve cevap fonksiyonunun elde edilmesinde Kriging tekniği kullanılmıştır. Optimum değerler ile parametreler arasındaki ilişkiler sunulmuştur. İkinci bölümde optimizasyon ve yapısal analiz yöntemleri anlatılmaktadır. Üçüncü bölümde araştırmanın sonuçları ve değerlendirilmesi yer almaktadır. Son bölümde ise çalışmanın neticesinde ulaşılan temel çıkarımlar sunulmaktadır. Bu çalışma negatif Poisson oranı elde edilmesi ve bu oranın ayarlanabilir olması nedeni ile dikkat çekicidir. Kiralite ve negatif Poisson oranının benzersiz kombinasyonu ile karakterize edilen kiral ökzetik kafes yapıları alanı, mekanik davranışlarını ve potansiyel uygulamalarını anlamada önemli bir araştırma boşluğu sunmaktadır. Çok sayıda çalışma bireysel kiral veya ökzetik malzemelerin mekanik özelliklerini araştırmış olsa da her iki özelliğin tek bir kafes yapısı içinde entegrasyonu büyük ölçüde keşfedilmemiştir. Bu boşluk, özellikle kiral geometrinin Poisson oranı, kesme modülü ve enerji emme kapasitesi üzerindeki etkisi de dâhil olmak üzere, kiral geometrinin ökzetik davranış üzerindeki etkisine ilişkin kapsamlı araştırmaların eksikliğinde belirgindir. Ayrıca, özel mekanik davranışa sahip kiral ökzetik kafesler oluşturmak için etkili tasarım metodolojilerinin geliştirilmesi henüz emekleme aşamasındadır. Bu araştırma boşluğunun ele alınması, enerji emilimi, şok azaltma ve biyomimikri gibi alanlarda potansiyel uygulamalar sunan üstün mekanik performansa sahip yeni malzemelerin tasarımını ve uygulanmasını ilerletmek için çok önemlidir.

## 2. Materyal ve Metod

Kafes yapısı seçilmesinin temel nedeni, hem hafif hem de sağlam bir yapı sunmasıdır. Kafes yapısı, birbirine bağlanmış çubukların bir ağı oluşturmasını ve bu da kuvveti eşit olarak dağıtarak ağırlık azaltımı sağlamaktadır. Bu daha fazla yük taşımaya sağlamaktadır. Şekil 1 (a)'da bu çalışmada kullanılan kiral kafes geometrisi gösterilmiştir. Bu tür kiral kafes biçimlerine, kübik kafes yapı denmektedir. Bu şekil literatürde sıklıkla rastlanan geometri olup [26]'da sunulan ve [27-29]'da daha ayrıntılı olarak incelenen bir kafes türüdür. Aslında düzgün bir kübik birim hücrenin, 10. burkulma moduna karşılık gelmektedir. Çubuklar sinüzoidal formda bir eğrilige sahiptirler. Düğüm noktalarında birbirleri ile birleşmektedirler. Tüm yapı 4 katmandan oluşmaktadır. Her katmanda yatay olarak 4 hücre ve dikey olarak 5 hücre bulunmaktadır. Her hücre 2 mm yatay ve 2 mm dikey boyuta sahiptir. Sinüzoidal eğriliklerin genliği ise 0,5 mm değerindedir. Başlangıçta kiris kesiti 0,5x0,5 mm olan kare kesittir. Bu hâli ile tüm yapı başlangıçta 783,56 mm<sup>3</sup> hacme ve 0,744 g kütleyle sahiptir.



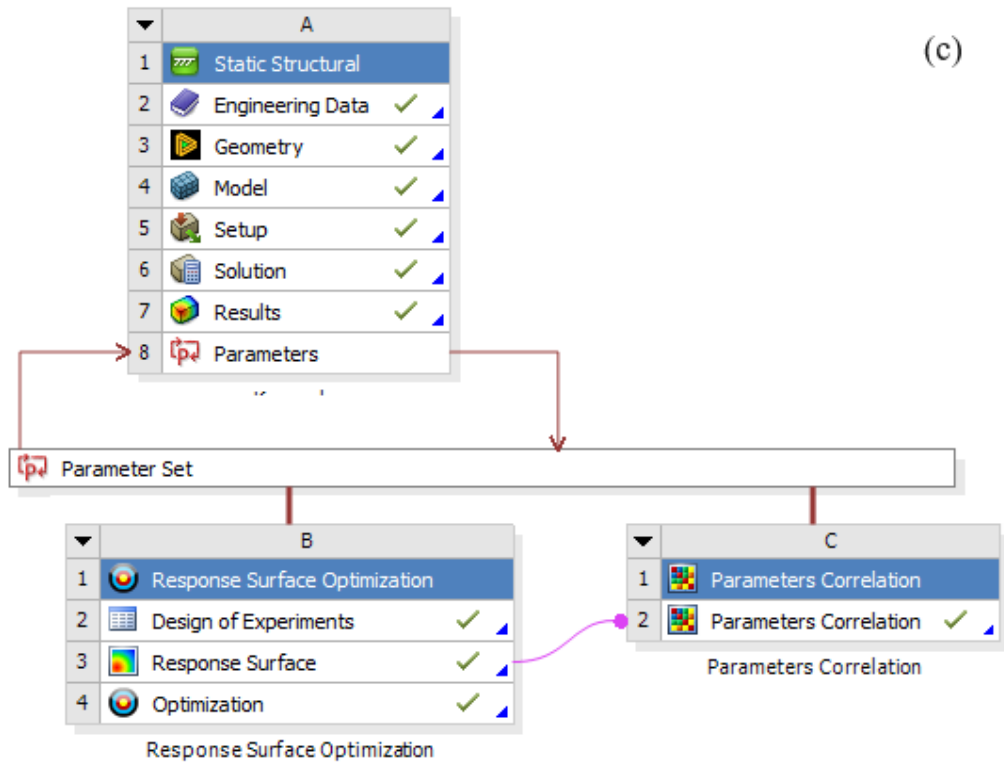
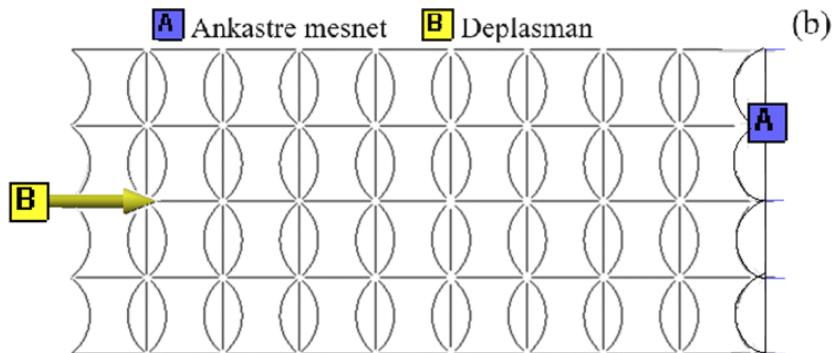
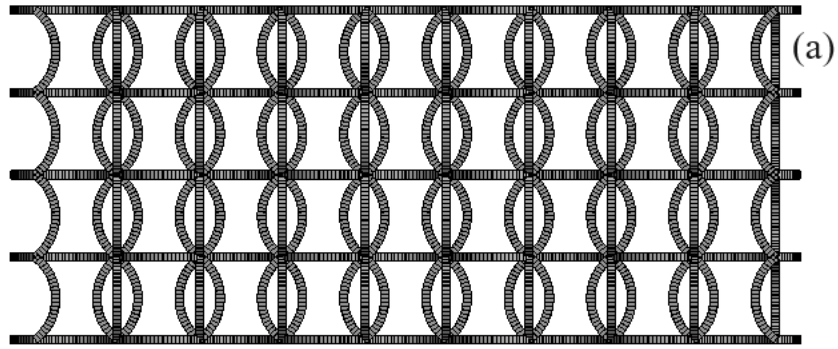
Şekil 1. Çalışmada kullanılan kiral kafes yapı, boyutları (mm)

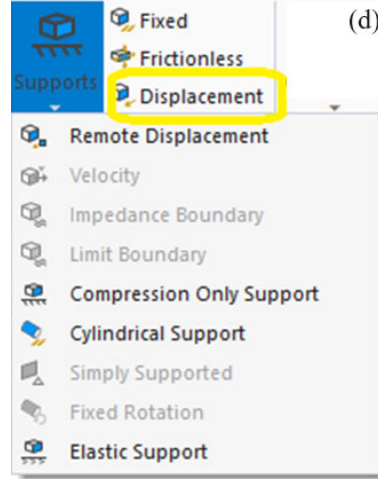
Malzeme olarak polietilen, Ti6Al4V, AlSi10Mg, 316 paslanmaz çelik, polyamid-6, polipropilen ve kompozit (reçine polyamid/Naylon-66) kullanılmıştır. Malzemelere ait mekanik özellikler Çizelge 1'de verilmiştir.

**Çizelge 1.** Oda sıcaklığında, mekanik, termal ve fiziksel özellikler

| Özellik                          | Polietilen | Ti6Al4V    | AlSi10Mg | 316     | PA6       | PP        | Kompozit |
|----------------------------------|------------|------------|----------|---------|-----------|-----------|----------|
| Yoğunluk (kg/mm <sup>3</sup> )   | 9,5e-007   | 4,62e-06   | 2,7e-6   | 8,0e-6  | 1,14e-06  | 9,034e-07 | 1,14e-06 |
| Termal genleşme katsayısı (1/°C) | 2,3e-004   | 9,4e-06    | 3,3e-5   | 2,0e-5  | 0,0001467 | 9,909e-05 | 0,00013  |
| Özgül ısı (mJ/kg°C)              | 2,3e+006   | 5,22e+05   | 1,3e6    | 7,7e5   | 1,5e+06   | 1,6e+06   | 1,52e+06 |
| Termal iletkenlik (W/mm°C)       | 2,8e-004   | 0,0219     | 1,2e-1   | 3,2e-2  | 0,0002428 | 0,000209  | 0,000243 |
| Direnç (ohm mm)                  | 10,16e10   | 0,0017     | 0,00035  | 7,4e-5  | 1,834e+15 | 1e+19     | 1,00e+9  |
| Basmadaki maksimum dayanım (MPa) | 22         | 970        | 460      | 290     | 71,89     | 37,62     | 94,176   |
| Basmadaki akma dayanımı (MPa)    | 25         | 950        | 210      | 580     | 43,13     | 34,6      | 94,176   |
| Çekmedeki akma dayanımı (MPa)    | 33         | 880        | 210      | 580     | 43,13     | 34,6      | 94,176   |
| Çekmedeki maksimum dayanım (MPa) | 22         | 950        | 460      | 290     | 71,89     | 37,62     | 94,176   |
| Young's modülü (MPa)             | 1100       | 96000      | 76600    | 1,95e+5 | 1111      | 1461      | 1620     |
| Poisson oranı                    | 0,42       | 0,36       | 0,33     | 0,25    | 0,3499    | 0,4087    | 0,41     |
| Bulk modülü (MPa)                | 2291,7     | 1,1429e+05 | 75098    | 1,3e+5  | 1233,6    | 2667      | 3000     |
| Kayma modülü (MPa)               | 378,32     | 35294      | 28797    | 78000   | 411,51    | 518,56    | 574,47   |

Metot olarak, yapısal simülasyon ve optimizasyon kullanılmıştır. Bu amaçla Ansys© yazılımı çalıştırılmıştır [30]. Yapısal simülasyonda Şekil 2'de gösterilen yük ve sınır şartları uygulanmıştır. Şekilde ayrıca kullanılan programda oluşturulan proje şeması da gösterilmiştir. Yük olarak, yer değiştirme uygulanmıştır. Sınır şartı olarak ankastre mesnet kullanılmıştır. SE yönteminin bir gereği olarak yapıda, eleman ağı oluşturmak üzere ayrıklaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Ayrıklaştırma için lineer şekil fonksiyonu ve tam integrasyon formülüne sahip giriş elemanlar kullanılmıştır. Ağdan bağımsızlık analizi neticesinde minimum eleman ile maksimum hassasiyetin elde edildiği en uygun bölüntüleme sayısı olarak 63844 adet düğüm noktası ve 32448 adet eleman tespit edilmiştir. Eleman, yapının konumsal ayrıklaştırılması sonucunda oluşan birim parçaya verilen addır. Düğüm noktası ise oluşan her elementin köşe noktalarıdır. Ağın kalite ölçütü olarak çarpıklık değerine bakılmış olup minimum, maximum ve ortalama değerler sıfır olmaktadır. Ortogonal kalite ise 1'dir. Kalite metrikleri ile ilgili detaylı bilgi Korkmaz ve Kacar (2022) tarafından verilmiştir [31]. Simülasyon sonunda gerilme, deformasyon, enerji ve Poisson oranı değerleri elde edilmiştir.





**Şekil 2.** Kafes yapının (a) FE modeli ve (b) uygulanan yük ve sınır şartları (c) yazılımda oluşturulan proje şeması (d) yük olarak deplasman tanımlanması

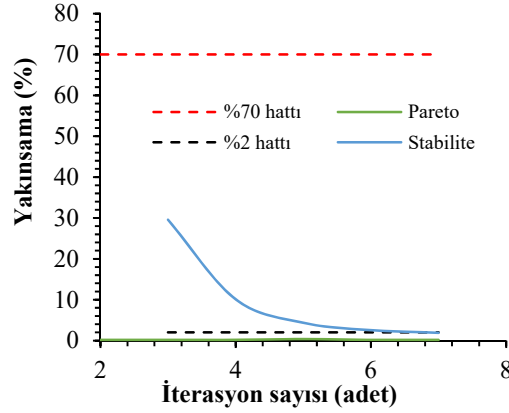
Optimizasyon için şu adımları takip edilmiştir. Parametrik hâle getirmek için öncelikle simülasyon yazılımında giriş ve çıkış değişkenleri seçilmiştir. Giriş değişkenlerinin başlangıç değerleri, alt ve üst sınırları Çizelge 2'deki gibi belirlenmiştir.

**Çizelge 2.** Parametrelerin alt ve üst sınırları

| Giriş değişkenleri                    |  |  | Başlangıç | Alt sınır | Üst sınır |
|---------------------------------------|--|--|-----------|-----------|-----------|
| En (mm)                               |  |  | 0,5       | 0,1       | 1         |
| Boy (mm)                              |  |  | 0,5       | 0,1       | 1         |
| Uygulanan eksenel yer değiştirme (mm) |  |  | -6        | -6        | 6         |
| Çıkış değişkenleri                    |  |  |           |           |           |
| Gerilme (MPa)                         |  |  | --        | --        | --        |
| Yanal deformasyon (mm)                |  |  | --        | --        | --        |
| Poisson oranı                         |  |  | --        | --        | --        |

Optimizasyon için iki tür değişken vardır: Giriş değişkenleri ve çıkış değişkenleri. Bir değişken parametrik hâle getirildikten sonra kullanıcı onu değiştirememektedir. Ancak parametrenin alt ve üst limitleri girilmektedir. Limitler belirlenirken, araştırılmak istenen aralık göz önüne alınmıştır. Bu aralıklar içerisinde Latin hiperküp yönteminin dağılım algoritması sayesinde tasarım noktaları (DP) oluşturulmaktadır. Toplam 100 adet DP oluşturulmuş ancak sadece 40 adetinin hesaplanabildiği görülmüştür. Bunun nedeni, karesel kesitli çubuk için her ne kadar aralık içerisindeki her türlü kombinasyon değeri matematiksel olarak uygulanabilir olsa da yapısal olarak hatalı şekillere yol açabilmesidir. Bu durumda o DP hesaplanamamaktadır. Hesaplama sonrasında ayrıca değişkenler arasındaki ilişkiler "yanıt yüzeyi" adı verilen bir fonksiyon ile belirlenebilmektedir. "Minimum kesit alanı" ile "maksimum dayanım" koşulları amaç fonksiyonları olarak uygulanmıştır. Optimizasyon için çok amaçlı, çok kısıtlı genetik algoritma (MOGA) yöntemi kullanılmıştır. MOGA yöntemi, örgütsel elitizm ilkesine dayanan ünlü NSGA-II'nin (Baskın Olmayan Sıralanmış Genetik Algoritma-II'nin) bir çeşididir. Birden fazla hedefi ve kısıdı desteklemektedir. En iyisini bulmayı amaçlamaktadır. MOGA için başlangıçta 3000 örnek üretilmiş, her iterasyonda 600 adet örnek incelenmiştir. En fazla 20 adet iterasyon limiti konulmasına rağmen 7 adet iterasyon sonunda yakınsamanın gerçekleştiği görülmüştür.

Bu esnada 6111 adet genetik değerlendirme yapıldığı görülmüştür. Sonuçta optimum olabilecek 3 adet aday hesaplanmıştır. Yakınsama grafiği Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Optimizasyon esnasında genetik algoritmanın yakınsama grafiği

### 3. Bulgular ve Tartışma

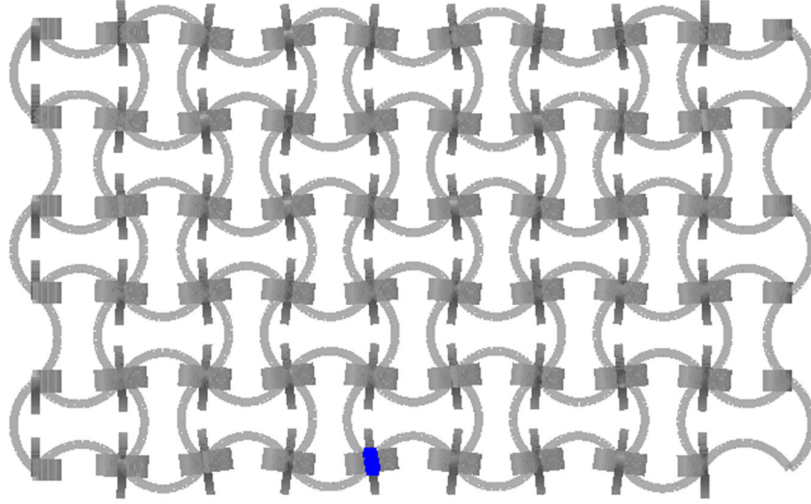
#### 3.1. Gerilme ve Deformasyon Sonuçları

Başlangıçta kiral yapının bir ucu ankastre mesnetlenirken diğer ucundan ana eksen (Z eksen) doğrultusunda -6 mm değerinde (basma türünde) yer değiştirme (deplasman) uygulanmıştır. Yer değiştirme 0'dan -6 mm'ye rampa şeklinde uygulanmaktadır. Her bir analiz 32 GB RAM ve 2,30 GHz 16 çekirdekli bir bilgisayar ile 231 saniye sürmüştür. Hesaplamaya dair istatistiki bilgiler Çizelge 3'te verilmiştir. 100 adet nokta ayrı ayrı hesaplanmış ve hesaplanamayan her bir nokta 3 kez hesaplanma girişiminde bulunulmuştur. Hesaplama 7 farklı malzeme için tekrarlanmıştır.

Çizelge 3. Çözüme dair hesaplama bilgileri

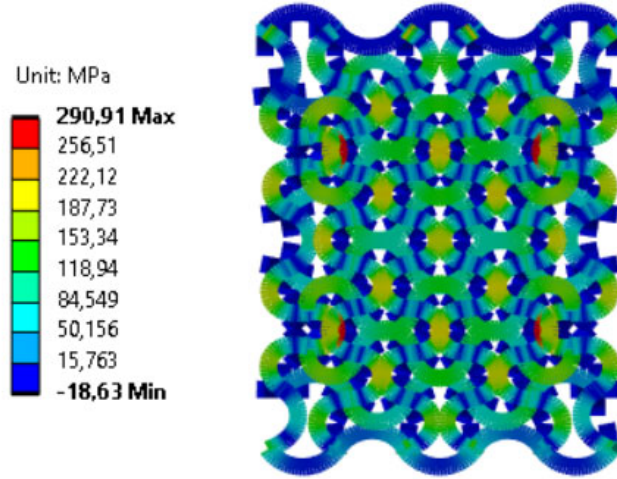
| Özellik                         | Değer  |
|---------------------------------|--------|
| MAPDL geçen süre (s)            | 231 sn |
| Kullanılan MAPDL bellek (MB)    | 813    |
| MAPDL sonuç dosyası boyutu (MB) | 51,8   |
| Toplam hesaplama süresi (saat)  | 98,82  |

Henüz optimizasyon yapılmadan önce başlangıç değerleri kullanılarak gerçekleştirilen simülasyon sonucunda aksel doğrultuda 6 mm basma yer değiştirmesi uygulanmıştır. Daha fazla yer değiştirme olduğunda hasar meydana geldiği görülmüştür. Böylece yapıya uygulanacak yer değiştirmenin üst sınır olarak -6 mm değeri uygulanmıştır. Böylece yapıya 0 ile -6 mm arasında yer değiştirme uygulanabilmiştir. Yer değiştirme -6 mm iken kiral yapıdaki yanal daralma -0,6459 mm olarak hesaplanmıştır. Yapının hesaplanan yanal ilk boyu 10,198 mm olup bu durumda yanal şekil değiştirme  $\epsilon_{yanal} = \frac{-0,6459 \text{ mm}}{10,198 \text{ mm}} = -0,063336$  olmaktadır. Aksel şekil değiştirme ise  $\epsilon_{aksel} = \frac{-6 \text{ mm}}{19,002 \text{ mm}} = -0,31576$  olmaktadır. Sonuçta Poisson oranı  $\nu = -\frac{-\epsilon_{yanal}}{-\epsilon_{aksel}} = -0,20059$  olmaktadır. Bu durum yapının özketik davrandığını göstermektedir. Yanal daralmanın ölçüldüğü nokta ve daralmış geometri Şekil 4'te gösterilmiştir. Bu sonuçlar -6 mm yerdeğiştirme ve sebep olduğu kesit şekli nedeniyle.



**Şekil 4.** Basmaya maruz yapının, negatif Poisson oranı nedeni yanal daralması ve ölçüm yapılan kafes noktası

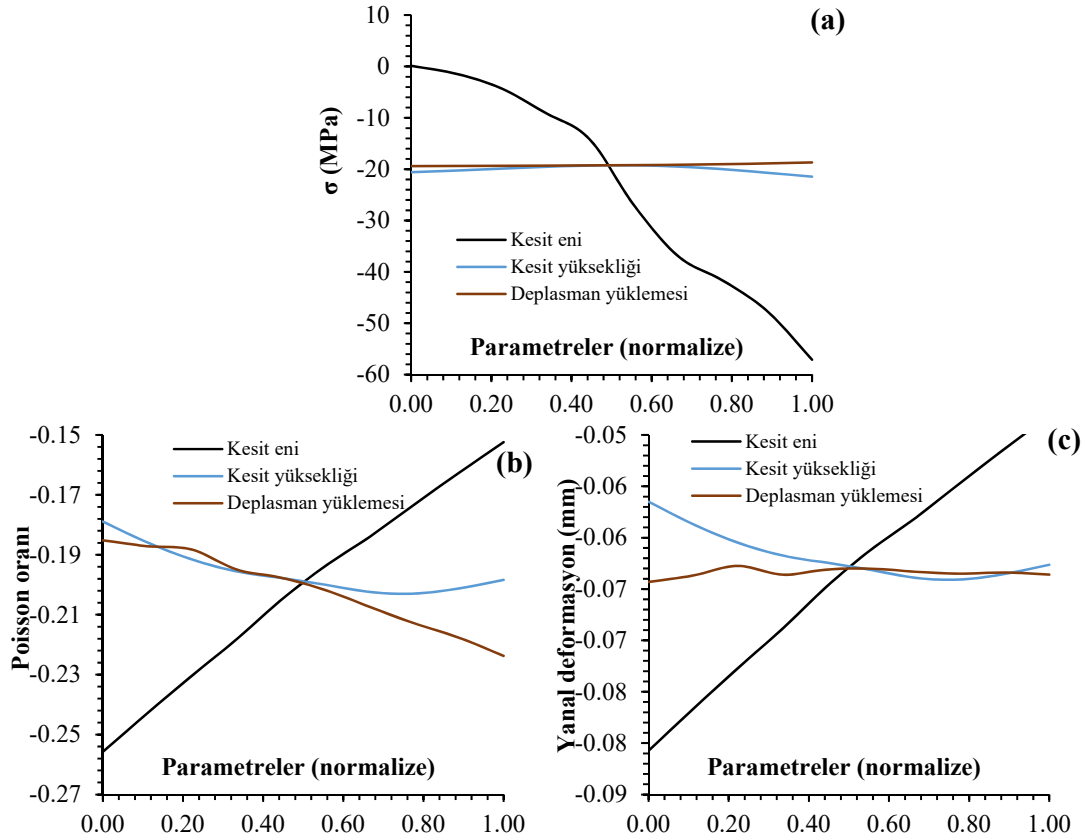
Bu durumda Şekil 5'te görüldüğü gibi yapıda  $-18,629$  MPa basma gerilmesi ve  $290,908$  MPa değerinde çekme gerilmesi oluşmaktadır. Kullanılan malzeme polietilendir, basmadaki akma dayanımı  $25$  MPa, çekmedeki akma dayanımı  $33$  MPa olup bu değerler akma sınırını aşmaktadır! Analizde malzemenin davranışı doğrusaldır. Bu nedenle maksimum gerilme değeri akma dayanımını aşmıştır. Şekil 5 incelendiğinde, genellikle dikey çubuklarda basma gerilmesinin, yatay çubuklarda ise çekme gerilmesinin oluştuğu görülmüştür.



**Şekil 5.** Kafes elemanlarındaki gerilme değerleri

### 3.2. Parametreler arasındaki ilişkiler

Kiral kafes yapının tasarımında önemli olan parametrelerin birbirleriyle olan ilişkileri cevap yüzey fonksiyonu sayesinde elde edilmiş olup Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Cevap fonksiyonundan elde edilen parametrik ilişkiler, kesit eninin, kesit yüksekliğinin ve deplasman yüklemesinin (a) gerilme, (b) Poisson oranı ve (c) yanıl deformasyon üzerine etkileri

RMSE, MSE, MAPE ve MAE değerleri 0'a yaklaştıkça modelin iyiliği artmaktadır [32]. Uydurulan fonksiyonun iyilik değerleri Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Cevap yüzeyinin iyilik ölçütleri

| Parametreler           | $R^2$ | RMSE       | MAE    |
|------------------------|-------|------------|--------|
| Yanal deformasyon (mm) | 0,984 | 1,4112E-10 | 0,0325 |
| Poisson oranı          | 0,998 | 3,87558E-5 | 0,0125 |
| Gerilme (MPa)          | 0,945 | 5,1385E-07 | 0,0684 |

### 3.3. Optimum değerler

Optimizasyon modülü, Çizelge 5'te gösterildiği gibi üç optimum değeri, aday nokta olarak önermiştir.

Çizelge 5. Önerilen üç optimum aday nokta

| Parametreler | Aday nokta 1 | Aday nokta 2 | Aday nokta 3 |
|--------------|--------------|--------------|--------------|
| En (mm)      | 0,3535       | 0,388        | 0,457        |



|       |                                       |         |         |          |
|-------|---------------------------------------|---------|---------|----------|
|       | Boy (mm)                              | 0,1018  | 0,104   | 0,1018   |
|       | Uygulanan aksel yer<br>değişirme (mm) | -0,5435 | -0,5539 | -0,65945 |
| Çıkış | Gerilme (MPa)                         | -0,9346 | -0,8460 | -0,90724 |
|       | Poisson oranı                         | -0,278  | -0,274  | -0,369   |
|       | Yanal deformasyon (mm)                | -0,0795 | -0,0799 | -0,0994  |

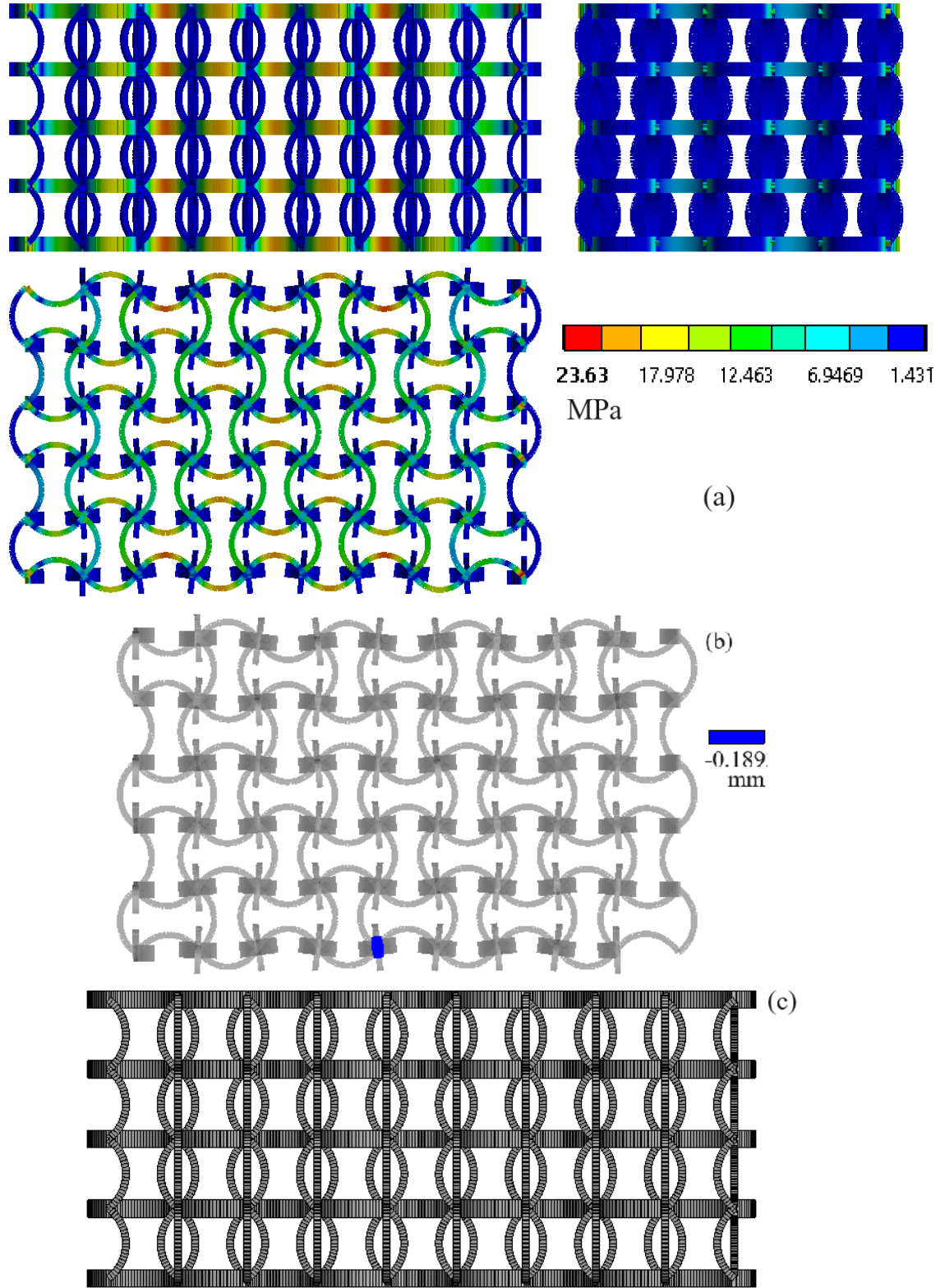
Çizelge 5. Devamı

Optimizasyon ile tespit edilen aday noktalar aslında cevap yüzeyi fonksiyonları kullanılarak elde edilen değerlerdir. Ayrıca, simülasyonda yeniden analiz edilerek doğrulanmışlardır. Optimizasyonla hesaplanan geometrik boyutlar, mevcut geleneksel imalat makinelerinin tolerans aralığının dışında kalan 0,457 mm gibi pek çok kusurat içermektedir. Bu nedenle bunların, bu hâli ile üretimi mümkün değildir. Üretilen değerler, kusuratları azaltmak için boyutların üste yuvarlanmasıyla elde edilmektedir. Üretilen değerler Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6. Doğrulanmış değerlerin üretilebilir değerleri

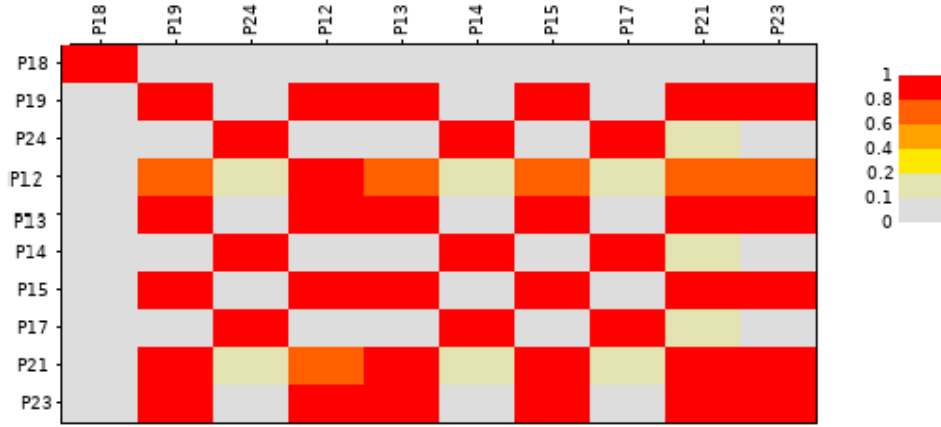
|       | Parametreler                          | Üretilen değerler |
|-------|---------------------------------------|-------------------|
| Giriş | En (mm)                               | 0,5               |
|       | Boy (mm)                              | 0,2               |
|       | Uygulanan aksel yer<br>değişirme (mm) | -0,9              |
| Çıkış | Gerilme (MPa)                         | -1,327            |
|       | Poisson oranı                         | -0,4128           |
|       | Yanal deformasyon (mm)                | -0,1894           |

Optimum en 0,5 mm ve boy 0,2 mm olarak tespit edilmiştir. Çünkü bu değerlerde yapıda -1,327 MPa basma gerilmesi ve 23,636 MPa değerinde çekme gerilmesi oluşmaktadır. Bu durumda kafes yapının aksel yer değişirmesi 0,9 mm, yanal daralma değeri de -0,18935 mm olmaktadır. Şekil 7, seçilen noktanın yeniden analiz edilmesiyle elde edilen deformasyon, gerilme sonuçlarını göstermektedir. Beklendiği gibi, sabit olarak mesnetlenen bölgede herhangi bir deformasyon yoktur. Ancak, yapının iç kısımları maksimum deformasyona sahiptir. Maksimum çekme gerilmesi 23,636 MPa değerindedir. Polietilenin basmadaki akma gerilmesi 25 MPa, çekmedeki akma gerilmesi 33 MPa olup, yapı içerisindeki -1,327 MPa basma gerilmesi ve 23,636 MPa çekme gerilmesi, akma sınırlarının altındadır. Bu nedenle de hasar oluşmamaktadır. Görülmektedir ki aksel yükün etkisiyle yapıda eğilme meydana gelmektedir. Eğilmeye bağlı çekme ve basma gerilmeleri oluşmaktadır. Aksel yükün etkisi altında yapısal bükülme olgusu Vigliotti ve Pasini (2013) tarafından da gösterilmiştir [33]. Mikroboşlukların kesitin atalet momentini önemli ölçüde azaltmadığını ancak makroskobik ölçekte malzemenin akma mukavemetini azaltan gerilim konsantrasyonları oluşturduğunu bildirmişlerdir. Gülcan ve ark. (2021), kiral ağ yapılarının tasarımında topoloji optimizasyon yöntemlerinin etkin bir şekilde kullanıldığını vurgulamıştır [34]. Küplere, oktahedralara, kesik küpoidlere ve 3×3×3 (20 mm × 20 mm × 20 mm) kafes desenine sahip kesik oktahedraya dayalı basit kafes yapılarının en iyi aksel basınç dayanımı özelliklerini sergilediği ileri sürülmüştür [35, 36]. Bu bağlamda bu çalışmada sunulan 9×4×5 kafes yapısı optimal bir şekle sahip değildir. Ancak süper hafiflik açısından son derece hafiftir. 3×3×3 düzende titanyum alaşımı (Ti6Al4V) kafes yapısından 1125,0 MPa akma dayanımı, 1200,0 MPa çekme dayanımı ve 0,34 Poisson oranı elde edilmiştir [35]. Kafesli tasarımlarda, uçtaki geleneksel kanat tabanlı tasarımlarla karşılaştırıldığında önemli ağırlık azalmaları rapor edilmiştir. Geleneksel kanat yapısıyla karşılaştırıldığında Kelvin yapısı, tüm kafes yapıları arasında %9,5 ile en yüksek ağırlık tasarrufunu sağlamaktadır [37]. İşbu çalışmada 0,774 g olan başlangıç kütlesi 0,298 g'a düşerek ciddi ağırlık kaybı sağlanmıştır. Simetrik kafesler ultra hafif olmaları nedeniyle dikkat çekmektedir.



Şekil 7. Optimum DP'nin sağladığı (a) gerilme, (b) yanıl deformasyon ve (c) mesh görüntüsü (yan)

Şekil 8'den Spearman'ın korelasyon matrisi verilmiş olup, parametrelerin birbirleri ile ne denli ilişkili olduklarının tespitinde önemli bir araçtır. Korelasyon  $R$  için 0,01-0,29 arasındaki değerler, düşük düzeyde ilişki, 0,3-0,7 arası orta düzeyde ilişki, 0,71-0,99 arası ise yüksek düzeyde ilişki anlamına gelmektedir. Sıfır değeri, ilişki olmadığını gösterirken, negatif değerler, ters bir ilişki anlamına gelmektedir. Mutlak değerce  $R$ 'nin artması, ilişkinin daha belirgin hale geldiğini göstermektedir.



**Şekil 8.** Spearman'ın korelasyon matrisi,  $P18$  en,  $P19$  boy,  $P24$  uygulanan aksenal yer değiştirme,  $P12$  maksimum kombine gerilmenin en fazla değeri,  $P13$  maksimum kombine gerilmenin en az değeri,  $P14$  aksenal deformasyon,  $P15$  aksenal deformasyon,  $P17$  yanal deformasyon,  $P23$  yanal gerilme,  $P21$  Poisson oranı

Görülebileceği üzere  $P12$ ,  $P15$ ,  $P19$ ,  $P21$  ve  $P23$ ,  $P13$  ile ters orantılıdır.  $P12$ ,  $P13$ ,  $P14$ ,  $P15$ ,  $P17$ ,  $P19$ ,  $P21$ ,  $P23$  ve  $P24$   $P18$  ile aralarında bir orantı olmadığı görülmektedir.  $P19$  ile  $P12$ ,  $P15$ ,  $P21$ ,  $P23$  doğru orantılıdır.  $P24$  ile  $P17$  ve  $P14$  doğru orantılıdır.

### 3.4. Malzemelerin etkisi

Eklemeli imalatla sıklıkla kullanılan malzemelerin etkisi de değerlendirilmiştir. Malzeme olarak polietilen, Ti6Al4V, AlSi10Mg, 316 paslanmaz çelik, polyamid-6, polipropilen ve kompozit (reçine polyamid/Naylon-66) kullanılmıştır. En, boy ve uygulanan aksenal yer değiştirme aynı kalmak üzere sonuçlar Çizelge 7'deki gibi elde edilmiştir.

**Çizelge 7.** Malzemenin sonuçlar üzerine etkisi

| Parametreler           | Polietilen | Ti6Al4V  | AlSi10Mg | 316      | PA6     | PP      | Kompozit |
|------------------------|------------|----------|----------|----------|---------|---------|----------|
| Gerilme (MPa)          | 23,636     | 2304,6   | 1650,9   | 4211,5   | 23,93   | 31,41   | 34,82    |
| Poisson oranı          | -0,4128    | -0,4139  | -0,4138  | -0,4147  | -0,4136 | -0,4129 | -0,41291 |
| Yanal deformasyon (mm) | -0,18935   | -0,18989 | -0,18985 | -0,19031 | -0,1974 | -0,1894 | -0,1894  |

Bu tabloda dikkat çekici sonuçlar bulunmaktadır. Malzeme değişse bile, yanal deformasyon ve Poisson oranının neredeyse hiç değişmediği ancak gerilmenin büyük oranda değiştiği görülmüştür.

Malzeme özellikleri, yük ve geometri değişmedikçe gerilmenin de değişmemesi gerekmektedir. Farklı malzemeler kullanıldığında, her ne kadar kafes geometrisi değişmemişse de, malzemenin elastiklik modülü farklı olduğundan dolayı yapının rijitliği değişmektedir. Bu durumda da aynı yüke verdiği tepki de farklı olmaktadır.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada kübik birim hücrelerin kullanıldığı bir kiral kafes yapı tasarlanmıştır. Hafif ancak dayanıklı olması amacıyla tasarımın optimum boyutları tespit edilmiştir. Bu çalışmanın sonunda ulaşılan temel çıkarımlar şunlardır:

- Kiral yapı tasarımlarında daha küçük ve daha hafif yapılar daha az enerji ve daha az maliyet amaçları ile tasarlanmaktadır. Kafes boyutları, genetik algoritma yöntemi kullanılarak deformasyonu artırmak ve dayanım sınırını aşmamak için optimize edilmiştir. Optimum değerler ile yapılan analiz sonunda, yapının ayırıt kesitinin ebadı 0,5x0,2 mm olup, bu durumda yapı -0,9 mm'lik bir yer değiştirmeye dayanabilmiştir. Yapı üzerinde en fazla 23,636 MPa değerinde çekme gerilmesi ve -1,327 MPa değerinde basma gerilmesi oluşmuştur. Her ikisi de malzemenin akma dayanımının altındadır.
- Başlangıçta 0,744 g olan kütle, optimizasyon neticesinde 0,298 g değerine düşmüştür. Daha küçük ve daha hafif yapı, daha düşük enerji tüketimi açısından tercih edilmektedir. Oldukça hafif ve dayanıklı bir yapı elde edilmiştir. Kullanılacak olan malzemenin hacmi az olduğundan maliyet açısından bu yapı geleneksel malzemelere iyi bir alternatiftir.
- Kafes yapıların üretimi genellikle eklemeli imalat ile yapıldığından dolayı uygun malzeme alternatifleri kısıtlıdır. Farklı malzemeler farklı elastiklik modülüne sahip olduğu için yapının rijitliğini değiştirmektedir.
- Cevap yüzey fonksiyonu sayesinde tasarımda kullanılan değişkenlerin birbirleri ile olan ilişkileri tespit edilmiştir.
- Optimum boyutları bu çalışma sonunda tespit edilmiş olan bu kiral yapının serbest ve zorlanmış titreşim analizleri yapılarak titreşim cevabının tespit edilmesi, müteakip çalışma olma potansiyeline sahiptir. Sadece kesit değil, kesit ile birlikte kafes boyutlarının, düğüm noktalarının çapının, ara dikmelerin, sıfır kuvvet elemanlarının, farklı kafes türlerinin (küpoktahedron, oktahedron ve eşkenar dodekahedron) incelenmesi, Poisson oranının ayarlanması ve Cosserat mekaniği ile karşılaştırma yapılması konuları gelecek çalışma potansiyeline sahiptir.

#### Teşekkür

Bu çalışmanın inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları değerli katkılardan dolayı editör, hakem ve emeği geçenlere içten teşekkür ederim.

#### Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir kurum, kuruluş, kişi ile kişisel ve finansal çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedirler.

#### Kaynaklar

- [1] Ha CS, Plesha M, Lakes R. Chiral three-dimensional isotropic lattices with negative Poisson's ratio: Chiral 3D isotropic lattices with negative Poisson's ratio. *physica status solidi (b)*. 2016; 253. 10.1002/pssb.201600055.
- [2] Novak N, Mauko A, Ulbin M, Krstulović-Opara L, Ren Z, Vesenjajk M. Development and characterisation of novel three-dimensional axisymmetric chiral auxetic structures. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022; 17. 10.1016/j.jmrt.2022.02.025.

- [3] Vasiliev A, Pavlov I. Models and parameters of Cosserat hexagonal lattices with chiral microstructure. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1008. 012017. 10.1088/1757-899X/1008/1/012017.
- [4] Andrea B, Luigi G. Simplified modelling of chiral lattice materials with local resonators. *International Journal of Solids and Structures*. Volume 83, April 2016, 126-141.
- [5] Haifeng R, Jiahong H, Dong L. Wave propagation characterization of 2D composite chiral lattice structures with circular plate inclusions. *Engineering Structures*. 2022; Volume 264, 1 August 2022, 114466.
- [6] Alessandro S., Massimo R., Stefano G., Fabrizio S. Phononic properties of hexagonal chiral lattices. *Wave Motion*. Volume 46, Issue 7, November 2009, 435-450.
- [7] Liu XN, Huang GL, Hu GK. Chiral effect in plane isotropic micropolar elasticity and its application to chiral lattices. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2011; Volume 60, Issue 11, November 2012, 1907-1921.
- [8] Eric SA, Goerlitzer, RM, Sergey N, Kirsten V, Marcel R, Peter B, Matthias K, Nicolas V. Chiral Surface Lattice Resonances. *Advanced Materials*, 21 April 2020.
- [9] Andrew JG. Chiral Surfaces: Accomplishments and Challenges. January 26, 2010. *ACS Nano* 2010, 4, 1, 5–10.
- [10] Gerhard HF., Kübler J, Felser C. Chirality in the Solid State: Chiral Crystal Structures in Chiral and Achiral Space Groups. *Materials (Basel)* 2022 Aug 23;15(17):5812. doi: 10.3390/ma15175812.
- [11] Erdoğan İ, Toktas İ. Investigation of The Effect of Geometry Inner Thickness on New Designed Auxetic Structure. *Politeknik Dergisi*, 2023-a; 26(2), 901-912. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1094739>
- [12] Nergis FB, Candan C, Duru SC. A novel yarn for personel protection in knitted sportswear. *Tekstil Ve Mühendis*. 2023; 30(131), 249-252. <https://doi.org/10.7216/teksmuh.1365889>
- [13] Kaya O, Bademlioğlu AH, Kaboğlu C. Performance Optimization of Auxetic Structures on Energy Absorption of Cylindrical Sandwich Using Taguchi and ANOVA Methods, *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*. 2023-a; vol. 12, no. 2, pp. 445–454, doi: 10.17798/bitlisfen.1237388.
- [14] Erdoğan İ, Toktas İ. Investigation of the Auxetic of a novel geometric structure and improvement of Poisson's ratio at different inner thicknesses. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*. 2023-b; 11(4), 893-902. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1346281>
- [15] Kaya N, Eldem C, Toktas I. Investigation of the auxetic behavior of an original lattice structure design. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*. 2023-b; 11(4), 1081 - 1091. 10.29109/gujsc.1367616
- [16] Cetin E, Seyitoglu SS. A bibliometric overview of research on auxetic structures: Trends and patterns. *International Journal of Automotive Science And Technology*. 2024; 8(1), 65-77. <https://doi.org/10.30939/ijastech..1374313>
- [17] Kaboğlu C. Statik yükleme altında oksetik iç yapılı sandviç kompozitlerin incelenmesi, *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 2022; c. 9, sy. 1, ss. 350–359, doi: 10.31202/ecjse.978310.
- [18] Becergen B, Çakmak M, Maral MF, Dayanç A, vd. Design Approaches on Inner Bodies of Gears with Methods Topology Optimization and Lattice Structures. *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi*. 2022; (39), 85-90. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1144818>
- [19] Akgün M, Süvari F, Eren R, Yurdakul T. Investigation of Auxetic Performance and Various Physical Properties of Fabrics Woven with Braid Yarns. *Textile and Apparel*. 2022; 32(3), 220-231. <https://doi.org/10.32710/tekstilvekonfeksiyon.1033681>
- [20] Özkan E, Khosravi F. Experimental and numerical investigation of the mechanical behavior of the modified metal auxetic structure. *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik Ve Fen Bilimleri Dergisi*, 2023; 9(1), 48-62. <https://doi.org/10.34186/klujes.1222192>
- [21] Kaya O, Hafizoğlu H, Babacan N. Effect of Unit Cell Height on the Ballistic Performance of the Body-Centered Lattice Structures. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 2022; 6(1), 30-34. <https://doi.org/10.46460/ijiea.1054219>

- [22] Üzün A., Kayacan MY. Investigation of over obstacle performance analysis of auxetic airless tyres. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 2023; 7(3), 415-427. <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1336826>
- [23] Akbulut A, Top N, Gökçe H. Eİ için tasarlanan kafes yapıların yapısal davranışlarının incelenmesi. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*. 2023; 4(2), 92-100. <https://doi.org/10.52795/mateca.1332895>
- [24] Öykünç D, Yıldızdag ME. Venüs'ün Çiçek Sepeti Süngerinden Esinlenerek Tasarlanmış Bir Kafes Sistemin Yapısal Davranışının İncelenmesi. *Gemi Ve Deniz Teknolojisi*. 2023; (222), 64-75. <https://doi.org/10.54926/gdt.1156139>
- [25] Çelebi A, İmanç, MM. Evaluation of Mechanical Properties of PLA Auxetic Structures Produced by Additive Manufacturing. *Journal of Materials and Mechatronics: A*. 2023; 4(2), 384-396. <https://doi.org/10.55546/jmm.1309858>
- [26] Körner C, Liebold-Ribeiro Y. A systematic approach to identify cellular auxetic materials. *Smart Mater Struct*. 2014; 24:025013 <https://doi.org/10.1088/0964-1726/24/2/025013>.
- [27] Warmuth F, Körner C. Phononic band gaps in 2D quadratic and 3D cubic cellular structures. *Materials (Basel)*. 2014; 8:8327–37. <https://doi.org/10.3390/ma8125463>.
- [28] Wormser M, Warmuth F, Körner C. Evolution of full phononic band gaps in periodic cellular structures. *Appl Phys A*. 2017;123.
- [29] Warmuth F, Osmanlic F, Adler L. Fabrication and characterisation of a fully auxetic 3D lattice structure via selective electron beam melting. *Smart Mater Struct*. 2017; 26:8.
- [30] Ansys, Theory Manual Version 9.0, Canonsburg, PA, USA., ANSYS Inc., 2004.
- [31] Korkmaz C, Kacar İ. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Simülasyonları İçin Optimum Eleman Ağ Yapısının Belirlenmesi, 7 January 2022, Editör: Deniz Yılmaz; Osman Gökdoğan; Önder Uysal; Mehmet Emin Gökdoğan; Ahmet Süslü, Tarımsal Mekanizasyon ve Enerji Üzerine Güncel Araştırmalar. 2022; ISBN: 978-625-8037-52-4
- [32] Büyüköztürk Ş, Çokluk-Bökeoğlu Ö, Köklü N. *Statistics for Social Sciences*, 27th ed. Pegem Press, Ankara, Turkey, 2011.
- [33] Vigliotti A, Pasini D. Mechanical properties of hierarchical lattices, *Mechanics of Materials*. 2013; Vol. 62, Pages 32-43.
- [34] Gülcan O, Simsek U, Kavas B. Eklemeli İmalatla üretilen işlevsel olarak derecelendirilmiş metal yapılar, *Mühendis ve Makine*. 2021; Cilt. 62, Sayı 702, Sayfa 1-12.
- [35] Park K-M, Min K-S, Roh Y-S. Design optimization of lattice structures under compression: study of unit cell types and cell arrangements. 2022; *Materials*, Vol. 15, Issue 1, Pages 97-102.
- [36] Fernandes RR, Tamijani AY. Design optimization of lattice structures with stress constraints, *Materials and Design*. 2021; Vol. 210, Issue 110026.
- [37] Khan N, Acanfora V. Non-Conventional wing structure design with lattice infilled through design for additive manufacturing. 2024; Vol. 17, Issue 7, Pages 1470-1478.

## **RSM-BASED MEASUREMENT OF CUTTING PERFORMANCE ON AL 7075 T6 AERO-STRUCTURAL ALLOY USING WEDM**

**Levent UĞUR<sup>1</sup>, Kutay AYDIN<sup>2\*</sup>, Hakan KAZAN<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup>Amasya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Amasya, 05100, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 04.04.2024 Kabul Tarihi/Accepted Date: 08.07.2024 DOI: 10.54365/adyumbd.1465339

### **ABSTRACT**

Wire electrical discharge machining (WEDM) is a machining method commonly used in the aerospace, die making, automotive, and biomedical fields for machining complex and challenging shapes of conductive materials. WEDM is used in manufacturing to reduce power consumption while maintaining product quality. The current study used Response Surface Methodology (RSM) to investigate the relationship of WEDM parameters with surface roughness, kerf width, and power consumption for environmental concerns. Cutting parameters such as feed rate, pulse width, pulse space, and wire speed were chosen for experimental studies using 0.18 mm Guangming Molybdenum alloy wire. RSM was used to design experiments, analyze, and optimize WEDM independent parameters to minimize surface roughness, power consumption, and kerf width. The experiments yielded optimal cutting parameters. Analysis of variance (ANOVA) was used to determine important cutting parameters. Furthermore, a validation experiment was carried out to verify the performance of the optimum cutting parameters, which were found to be in good agreement with the experimental values. As a result, the most effective parameters for surface roughness, cutting power, and kerf width were discovered to be pulse width (67.96%), wire speed (54.96%), and pulse width (63.65%), respectively.

**Keywords:** Wire cutting method, WEDM, Al 7075 T6, Surface roughness, Cutting power, Kerf width

## **AL 7075 T6 HAVACILIK ALAŞIMININ WEDM İLE KESME PERFORMANSININ RSM TABANLI ARAŞTIRILMASI**

### **ÖZET**

Wire electrical discharge machining (WEDM), havacılık, kalıp ve kalıp yapımı, otomobil endüstrileri ve biyomedikal alanda karmaşık ve zorlu şekillerdeki iletken malzemelerin işlenmesi için yaygın olarak kullanılan bir işleme yöntemidir. WEDM Ürün kalitesinden ödün vermeden güç tüketimini en aza indirmek için üretim sektöründe önemli bir yere sahiptir. Bu doğrultuda, mevcut araştırma, WEDM parametrelerinin sürdürülebilirlik için yüzey pürüzlülüğü, kerf genişliği ve çevresel kaygı için güç tüketimi ile ilişkisi Response Surface Methodology (RSM) ile araştırılmıştır. Deneysel araştırmalar için, 0,18 mm Guangming Molibden alaşım tel kullanılarak Feed rate, pulse width, pulse space ve wire speed gibi işleme parametreleri seçilmiştir. RSM, deneyleri tasarlamak ve yüzey pürüzlülüğünü, güç tüketimini ve kerf genişliğini en aza indirmek için WEDM'nin bağımsız parametrelerini analiz etmek ve optimize etmek için kullanılmıştır. Deneyler sonucunda optimum üretim parametreleri belirlendi. Varyans analizinden (ANOVA) önemli proses parametreleri belirlendi. Ayrıca, optimum proses parametrelerinin performansını doğrulamak için doğrulama deneyi yapılmış ve deneysel değerlerle iyi bir uyum içinde olduğu kaydedilmiştir. Sonuç olarak, yüzey pürüzlülüğü, kesme gücü ve kerf genişliği üzerindeki etkin parametreler sırasıyla %67,96 oranla pulse width, 54,96 oranla wire speed, %63,65 oranla pulse width olduğu anlaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Tel erozyon yöntemi, WEDM, Al 7075 T6, Yüzey pürüzlülüğü, Kesme gücü, Kerf genişliği

e-posta<sup>1</sup> : [levantozge@gmail.com](mailto:levantozge@gmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3447-3191>

\* e-posta<sup>2</sup> : [kutay.aydin@amasya.edu.tr](mailto:kutay.aydin@amasya.edu.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3614-4877> (Sorumlu Yazar)

e-posta<sup>1</sup> : [hakan.kazan@amasya.edu.tr](mailto:hakan.kazan@amasya.edu.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7745-8974>

## Highlights

- RSM based Box-Behnken design using WEDM cutting for Al 7075 T6 alloy.
- Using molybdenum alloy as cutter wire in the WEDM process.
- Applying feed rate, pulse width, pulse space, and wire speed as cutting parameters.
- Effects of cutting parameters on surface roughness, cutting power, and kerf width.

## Nomenclature

|             |  |           |                                     |
|-------------|--|-----------|-------------------------------------|
| ANOVA       | Analysis of variance                           | MRR       | Material removal rate               |
| CCD         | Central Composite Design                       | P         | Cutting power                       |
| CNC         | Computerized numerical control                 | $P_{cut}$ | Cutting power                       |
| df          | Degree of freedom                              | ps        | Pulse space                         |
| $E_{arc}$   | Electric arc                                   | pw        | Pulse width                         |
| $E_{conv}$  | Heat convection                                | Ra        | Surface roughness                   |
| $E_{rad}$   | Heat radiation                                 | RHA       | Rolled homogeneous armour           |
| $E_{total}$ | Toplam kesme enerjisi                          | RSM       | Response surface methodology        |
| f           | Feed rate                                      | V         | Voltage                             |
| I           | Current  | w         | Wire speed                          |
| ISO         | International organization for standardization | WEDM      | Wire electrical discharge machining |
| K           | Kerf width                                     |           |                                     |

## 1. Introduction

Aluminum and its alloys are indispensable engineering materials in various industrial applications due to their availability and superior machinability [1]. Among these alloys, the 7xxx series of aluminum alloys have garnered significant interest in the industry owing to their superior strength-to-weight ratio and lightness compared to other series such as Al-Si [2]. This lightweight characteristic has made them a prominent trend in modern aviation and automotive industries. Notably, Al 7075 T6 is extensively used in the construction of civil aviation aircraft, particularly in components such as the shell, nose, fuselage, and skeleton [3-5].

The traditional processing approach is insufficient for the needs of the aviation industry. Wire electric discharge machining (WEDM), which can produce parts with low dimensional deviation and high surface quality, is becoming more popular in the aviation industry. Furthermore, WEDM is becoming increasingly crucial in the manufacture of sensitive and complex geometries for a wide range of engineering applications [6-10].

WEDM is a non-traditional machining process commonly employed for electrically conductive materials that are difficult to cut, including Inconel, Hastelloy, graphite, steel, copper, aluminum, tungsten carbide, titanium, and metal matrix composites. This technique, which operates without direct contact, removes material by generating electrical spark discharges between the wire electrode and the workpiece. Its capability to cut electrically conductive materials regardless of their hardness or melting point provides a distinct advantage over traditional machining methods [11-13]. However, due to its primary use in processing low-conductivity and hard materials, the WEDM machining process incurs high energy consumption for melting and evaporation of electrodes [14]. Consequently, this directly impacts production costs, leading to an increase in the unit price per product. Therefore, in the context of sustainable machining operations, considerations such as energy consumption, surface finish, dimensional accuracy, and other machining performances are critical factors to be taken into account.

Bobbili et al. used the Buckingham Pi theorem to assess the effect of the inlet machining properties for WEDM of two different armor materials, such as aluminum alloy 7017 and RHA steel,



on material removal rate and surface roughness. The results showed that as the impact time value increased, so did the material removal rate (MRR) output response and surface roughness [15]. Grey Relational Analysis (GRA) was used by Kum et al. to optimize the kerf width and surface roughness during WEDM of a hard silicon carbide reinforced aluminum 6351 alloy composite. They claimed that the on-time pulse was the most effective in influencing the combined target, with 96.19 percent effectiveness [16]. Karabulut et al. conducted a study that considered the effect of processing parameters such as voltage, peak current, and wire tension on surface quality. Taguchi L27 full factorial array experimental design was used to optimize processing parameters, which were then followed by a mean effect plot and variance stub analysis. Three increasing parameter levels were used in the experiment. Following machining, it was discovered that peak current had a significant impact on surface roughness, wire tension, and spark gap [17]. Biswas et al investigated the Al 7075 WEDM processing parameters. For this alloy, a multi-objective genetic algorithm was used to optimize WEDM process parameters such as pulse width, pulse space, and wire tension. They recommended using pulse width ( $pw=0.2 \mu s$ ), pulse space ( $ps=50 \mu s$ ), and wire tension ( $Wt=1.1 \text{ kg}$ ) parameters for the best surface quality and machinability, respectively, as a result of the experiments and analyses [18]. In Shanthi et al. study, an analysis of variance (ANOVA) was performed and a mathematical model was developed to investigate the effect of WEDM's four input processing parameters on surface roughness. As a result of the experiments, it was discovered that the surface roughness increased with increasing pulse width and decreased with increasing pulse space and wire tension. It has been discovered that wire feeding has little effect on surface roughness [19].

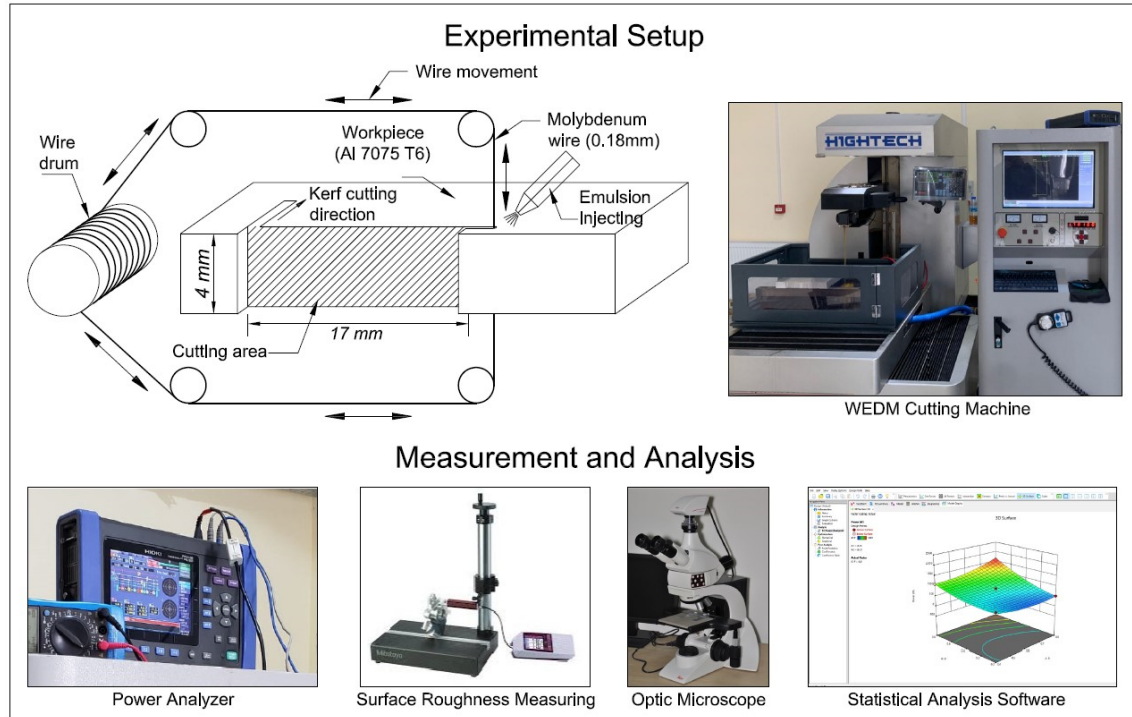
Machining processes inherently prioritise important performance criteria such as energy efficiency, surface integrity and dimensional accuracy. Therefore, in this study, a comprehensive investigation is carried out for WEDM of Al 7075 T6, which is characterised by superior mechanical properties such as high tensile strength, ductility, toughness, favourable strength-to-weight ratio and resistance to high temperatures. Al 7075 T6 is known for being an indispensable material in many industrial sectors. However, the machining of this alloy faces significant challenges such as high cutting temperatures and rapid tool wear in conventional machining techniques. Due to these machining difficulties, this study involves the investigation of innovative cutting parameters tailored specifically for Al 7075 T6 through WEDM methodology. These parameters are expected not only to improve energy consumption, but also to improve surface finish and dimensional accuracy. This study aims to unlock the full potential of Al 7075 T6 by overcoming the limitations of conventional machining paradigms, and thus promote advances in machining efficiency and precision in various industrial sectors.

## 2. Experimental Work

The workpiece in the study was Al 7075 T6 aluminum alloy. Table 1 shows the chemical composition of the Al 7075 workpiece obtained from the manufacturer. Hightech DK-7732 CNC WEDM machine was used for the experiments. Guangming 0.18 mm The cutting wire was made of molybdenum alloy wire, and the insulating liquid was made of pure water and JR3A Ointment Coolant, 1/30-40 (kg/kg) (JR3A/pure water) dielectric emulsion. The wire is constantly used as a drum in looms that use molybdenum wire. The emulsion circulation pressure was kept constant at 1 bar. Figure 1 depicts the experimental setup, measurement, and analysis stages schematically.

**Table 1.** Chemical composition of Al 7075 T6 alloy

| Alloy element | Al   | Zn  | Mg  | Cu  | Fe  | Cr   | Si  | Mn  | Zr   | Ti  |
|---------------|------|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|
| Wt. %         | Base | 5.1 | 2.1 | 1.2 | 0   | 0.18 | 0   | 0   | 0    | 0   |
|               |      | 6.1 | 2.9 | 2   | 0.5 | 0.28 | 0.4 | 0.3 | 0.25 | 0.2 |



**Figure 1.** Experimental schema

Experiments were carried out using the Box-Behnken design of the Response Surface Methodology (RSM). Design-Expert® v12 software was used for statistical analysis. Cutting parameters such as feed rate, pulse width, pulse space, and wire speed were chosen as independent control factors. For each control factor, three levels are defined. The effects of cutting parameters on surface roughness, cutting power, and kerf width were investigated as a result of the experiments (Table 2). The cutting parameters are meticulously selected within the operational capacity of the wire erosion machine and informed by comprehensive review of pertinent literature [20]. A quadratic model was established in analysis of variance, and empirical equations were obtained through regression analysis. The Mitutoyo Surfest SJ-210 device was used to take the measurements. The measurements were taken in accordance with the ISO 4288 standard, with a cut-off length ( $\lambda_c$ ) of 0.8mm and a traverse length ( $L_t$ ) of 5.6mm. A Leica DM170M optical microscope was used to measure kerf width. Figure 2 depicts a schematic representation of kerf width measurement. Hioki Power Analyzer PW3198 was used to measure cutting power. Details of the equipment used in the experiment and measurement process are given in Table 3. The majority of the electrical energy used in WEDM cutting is used to generate the electric arc ( $E_{arc}$ ) needed to melt the material between the wire and the workpiece. Furthermore, some of the energy is absorbed by the dielectric fluid through heat convection ( $E_{conv}$ ). Heat radiation emits a very small amount of energy into the environment ( $E_{rad}$ ). As a result, cutting energy is affected by the heat capacity, thermal conductivity, melting temperature, and other properties of the cutting wire, work material, and dielectric fluid. is determined by its physical and chemical properties [21]. Cutting energy can be expressed basically as in Equation 1.

$$E_{total} = E_{arc} + E_{conv} + E_{rad} \quad (1)$$

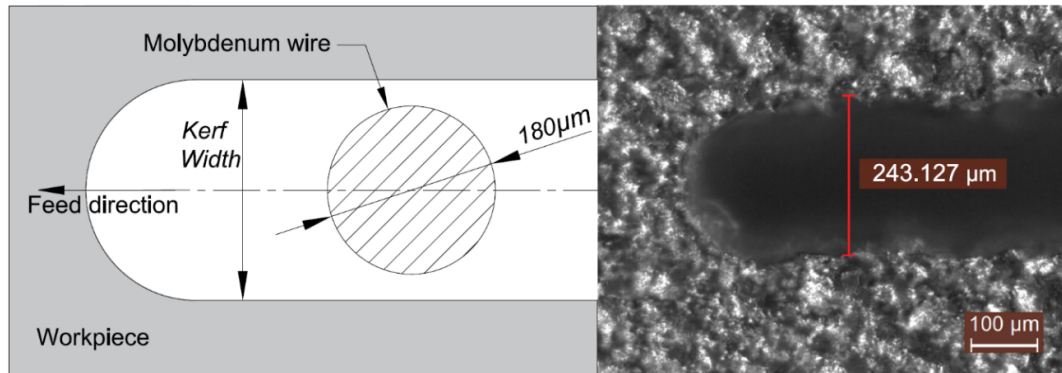
The measuring probes are connected between the wire and the workpiece to calculate the cutting force. As a consequence, the measured cutting power includes all components of the total cutting energy

(P). The breaking power was calculated by multiplying the power analyzer's average current (I) and average voltage (V) data during the cutting operation.

$$P_{cut} = I_{mean} \times V_{mean} \quad (2)$$

**Table 2.** Factors, levels, and responses

| Factors            | Symbol   | Level 1 | Level 2 | Level 3 |
|--------------------|--|---------|---------|---------|
|                    |  | -1      | 0       | 1       |
| Feed rate (mm/min) | f  | 2       | 2.5     | 3       |
| Pulse width (μs)   | pw   | 16      | 40      | 64      |
| Pulse space (μs)   | ps   | 88      | 284     | 480     |
| Wire speed (m/s)   | w  | 3       | 7.75    | 12.5    |
| Responses          | Ra, Surface roughness (μm)<br>P, Cutting power (W)<br>K, Kerf width (μm) |         |         |         |



**Figure 2.** Top view of kerf width

**Table 3.** Test and measurement equipment and properties

| Equipment  | Properties  |
|--|---|
| Hightech DK-7732 CNC WEDM machine                          | Wire: 0.18mm molybdenum alloy<br>Coolant: JR3A Ointment<br>Power: 2.3kW - 6kW         |
| Hioki Power Analyzer PW3198                                | Standard: EN50160<br>Measuring time: 10s  |
| Mitutoyo Surfest SJ-210 surface roughness measuring device | Standard: DIN EN ISO 3274<br>Resolution: 0.02 μm - 350 μm<br>Probe: 2μm, 60°, 0.75 mN |
| Leica DM170M optical microscope                            | Illumination: 5000K led<br>Magnification: 10x, 20x, 50x, 100x                         |

### 3. Response Surface Methodology

Response surface methodology (RSM) is a set of mathematical and statistical techniques that can be used to model and analyze parameters of a process of significance to the researcher. The goal of this method is to optimize the parameters that it considers important [22, 23]. In classical approaches, only one variable is changed at a time in order to examine the effects of the process parameters on the

response functions during the experimental design. Unlike the traditional method, RSM reduces the number of experiments required and optimizes operating parameters in multivariate systems by taking into account the interactions between variables [24].

RSM was first introduced by Box and Wilson (1951) as a Central Composite Design (CCD)-based mathematical model suitable for the quadratic model and later developed for experimental design and data analysis [25]. The method includes a sequential process that employs statistical and mathematical techniques. The researcher investigates the type of appropriate approximation function, experimental design, optimum site selection, and transformation requirements for design variables using this method [26].

The RSM design process can be listed in three stages;

- i. New experiment design (Sufficient and reliable measurement of responses),
- ii. Developing the mathematical model with the best fit between the independent variables and the response and determining the optimum set of experimental parameters that give the upper and lower values of the response,
- iii. Expressing the effects of process parameters with graphics [27].

The RSM method has two design types: Central Composite Design (CCD) and Box-Behnken Design (BBD) [28]. Among these, the modified central composite experimental design, known as the Box Behnken design, enables the calculation of the response function and estimation of the system performance at any experimental point in the examined range, with little work done [26]. The selection of the Box-Behnken design was made considering the purpose of the research, experimental conditions and analysis methods. This design is a response surface methodology experimental design commonly used to determine interactions between multiple variables and optimal conditions. Additionally, there are many examples showing that the Box-Behnken design has been widely used in the literature and has been successfully applied in similar research [29-31].

Design Expert 12 statistical software was used to create the experimental design. A total of 29 experiments were carried out in order to assess the attachments of the four major independent factors listed in Table 4 on Ra, P, and K. Because the material removal mechanism of WEDM has a very complex structure involving multiple physics phenomena, obtaining a statistical model based on the principle of electrical discharge generation is difficult. To establish the relationship between WEDM control variables and output responses such as Ra, P, and K, second-order polynomial regression models (quadratic model) were developed. The quadratic response model is represented by  $y$  in the equation, and the control parameters are symbolized by  $k$  [32].

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3)$$

In this equation;  $y$  response variable,  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$  unknown regression parameters,  $x_i, x_j$  process (decision) variables ( $i=1, 2, \dots, k$ ) and ( $j=1, 2, \dots, k$ ), and  $\varepsilon$  error term [32].

#### 4. Result and Discussion

Table 4 shows the experimental setup established in the RSM Box-Behnken design with the independent factors of feed rate, pulse width, pulse space, and wire speed. Table 4 displays the surface roughness, cutting power, and kerf width values obtained from the experiments for all cutting conditions.

**Table 4.** RSM matrix design and responses

| Run | Factors       |                  |                  |            | Responses        |          |                 |
|-----|---------------|------------------|------------------|------------|------------------|----------|-----------------|
|     | f<br>(mm/min) | pw<br>( $\mu$ s) | ps<br>( $\mu$ s) | w<br>(m/s) | Ra<br>( $\mu$ m) | P<br>(W) | K<br>( $\mu$ m) |
| 1   | 2.5           | 16               | 88               | 7.75       | 4.735            | 2.113    | 242.1           |
| 2   | 2.5           | 64               | 284              | 3          | 6.533            | 3.111    | 255.5           |
| 3   | 2             | 40               | 284              | 3          | 6.174            | 3.235    | 249.2           |
| 4   | 2             | 16               | 284              | 7.75       | 4.778            | 1.591    | 243.1           |
| 5   | 2.5           | 64               | 88               | 7.75       | 7.825            | 2.887    | 253.7           |
| 6   | 2.5           | 64               | 480              | 7.75       | 7.848            | 2.547    | 252.9           |
| 7   | 2.5           | 16               | 284              | 12.5       | 5.408            | 1.074    | 246.9           |
| 8   | 3             | 64               | 284              | 7.75       | 8.326            | 3.096    | 251.6           |
| 9   | 3             | 40               | 88               | 7.75       | 7.234            | 2.963    | 250.8           |
| 10  | 2.5           | 40               | 88               | 12.5       | 7.876            | 1.657    | 248.2           |
| 11  | 2.5           | 16               | 284              | 3          | 4.311            | 3.243    | 244.3           |
| 12  | 2.5           | 40               | 480              | 3          | 5.903            | 3.129    | 252.6           |
| 13  | 2.5           | 40               | 88               | 3          | 5.649            | 3.527    | 247.2           |
| 14  | 2.5           | 40               | 284              | 7.75       | 6.808            | 1.916    | 248.2           |
| 15  | 2.5           | 40               | 284              | 7.75       | 6.718            | 1.997    | 248.7           |
| 16  | 2             | 40               | 480              | 7.75       | 7.254            | 2.129    | 250.9           |
| 17  | 2.5           | 40               | 284              | 7.75       | 6.714            | 1.783    | 250.6           |
| 18  | 3             | 16               | 284              | 7.75       | 4.897            | 2.693    | 247.6           |
| 19  | 2.5           | 40               | 284              | 7.75       | 6.719            | 1.839    | 248.9           |
| 20  | 2.5           | 40               | 480              | 12.5       | 7.313            | 2.063    | 249.1           |
| 21  | 2             | 40               | 284              | 12.5       | 7.646            | 1.188    | 247.2           |
| 22  | 3             | 40               | 480              | 7.75       | 7.036            | 3.246    | 250.6           |
| 23  | 2.5           | 64               | 284              | 12.5       | 9.134            | 1.984    | 250.5           |
| 24  | 2             | 40               | 88               | 7.75       | 7.283            | 2.115    | 246.5           |
| 25  | 2.5           | 40               | 284              | 7.75       | 6.720            | 2.089    | 250.4           |
| 26  | 3             | 40               | 284              | 12.5       | 8.012            | 2.548    | 249.8           |
| 27  | 2.5           | 16               | 480              | 7.75       | 4.945            | 2.497    | 249.2           |
| 28  | 2             | 64               | 284              | 7.75       | 8.745            | 2.467    | 253.5           |
| 29  | 3             | 40               | 284              | 3          | 5.366            | 3.559    | 249.3           |

##### 4.1. Analysis of surface roughness

Surface roughness is great of importance in terms of metalworking and tribology since it defines the material properties such as friction, corrosion, fatigue, lubrication, etc [33]. Also, it is an important factor in determining the production quality [34]. As a result, the values of surface roughness were investigated in this study. Figure 3 depicts the effects of changing cutting conditions on surface roughness. The graphs were made in the shape of a surface graph, showing the interaction of two independent factors as well as their effects on surface roughness (Figure 3). Examining the graphics reveals a correlation between rising surface roughness values when the pulse width and wire speed are increased. The electron flow from the wire to the workpiece increases as the pulse width and wire speed are increased. The size of the micro-craters on the workpiece grows as the electron bombardment

increases. This situation is thought to increase the surface roughness values [12, 35, 36]. Although increasing the pulse space slightly increases the surface roughness values, it has no significant effect. The change in feed rate had no effect on surface roughness as well. Surface roughness is expected to decrease in wedm machining operations due to an increase in pulse space and a decrease in feed rate as the insulating cutting fluid moves the chips away from the cutting zone [22, 37]. However, it is clear that this situation does not apply to the Al 7075 T6 alloy. Aluminum alloys have low melting points but high heat transfer coefficients. It is believed that the material, which melts rapidly when bombarded with electrons, solidifies quickly again before it can move away from the cutting zone during the waiting period [38]. Therefore, it can be interpreted that the pulse space and feed rate parameters do not have a significant effect on the surface roughness due to the presence of residual debris and craters on the cutting surface during the waiting period without electron bombardment.

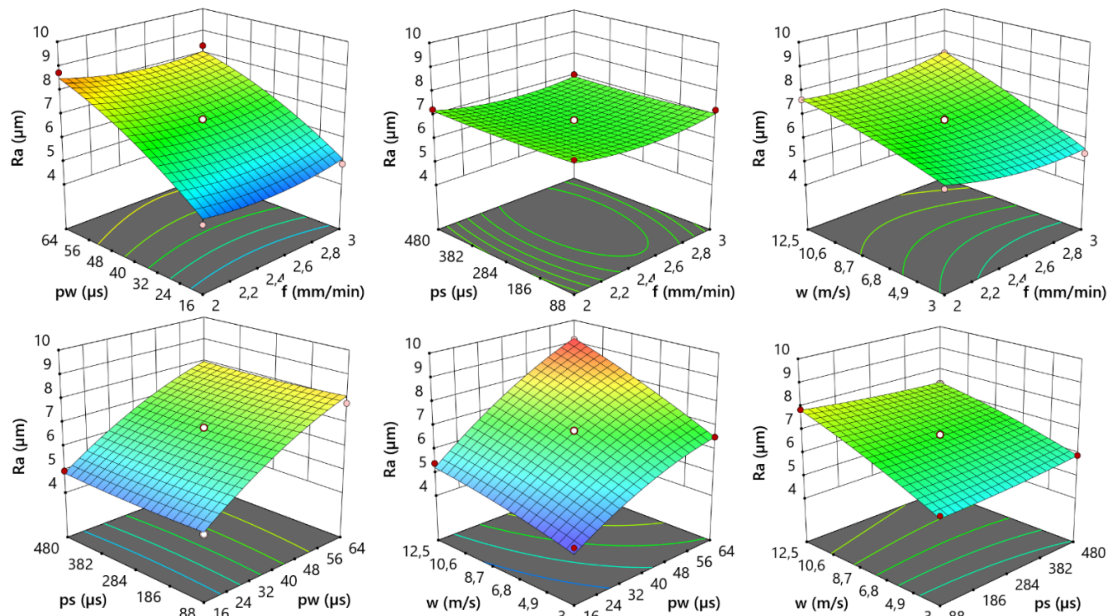


Figure 3. Effect of cutting parameters on surface roughness

Variance and regression data analyses were carried out with a 95% confidence level, assuming that the surface roughness results vary depending on the feed rate, pulse width, pulse space, and wire speed parameters chosen as independent control factors. Table 5 shows the results of the analysis of variance and the percentage contribution ratio (C-value). As the results shows that some P values exceeded 5% ( $P < 0.05$ ). However, the P values for the model and effective parameters ( $P < 0.0001$ ) are quite low. In addition, the F values of the model and the active parameters appear to be 4.196 greater than the critical F value ( $F_{0.05,1,28}$ ). Thus, the selection of control factors and levels can be considered to be statistically significant [39]. In terms of surface roughness, the most effective cutting parameters were found to be pulse width and wire speed, with C-value ratios of 67.96% and 23.84%, respectively. When the coefficients of determination ( $R^2$ ) are examined, the surface roughness model is found to be 98.7% compatible with the experimental results (Table 5). Equation 4 depicts the empirical mathematical model derived from regression analysis. Figure 4 depicts measurement-estimate values and residual plot graphs for surface roughness. The graphs show that the measured and estimated surface roughness values are compatible and at an acceptable level. The solid line indicates that the level of error is normal [40, 41]. From the residual plot graph, it can be interpreted that the residues are at the normal level due to the accumulation along the straight line.

Table 5. ANOVA table for surface roughness

| Source                | Sum of Squares | df                       | Mean Square | F-value | p-value | C-value |
|-----------------------|----------------|--------------------------|-------------|---------|---------|---------|
| Model                 | 45.2516        | 14                       | 3.2323      | 75.88   | <0.0001 | 98.70   |
| f                     | 0.0848         | 1                        | 0.0848      | 1.99    | 0.1800  | 0.19    |
| pw                    | 31.1600        | 1                        | 31.1600     | 731.50  | <0.0001 | 67.96   |
| ps                    | 0.0077         | 1                        | 0.0077      | 0.18    | 0.6782  | 0.02    |
| w                     | 10.9309        | 1                        | 10.9309     | 256.61  | <0.0001 | 23.84   |
| f.pw                  | 0.0724         | 1                        | 0.0724      | 1.70    | 0.2135  | 0.16    |
| f.ps                  | 0.0071         | 1                        | 0.0071      | 0.17    | 0.6884  | 0.02    |
| f.w                   | 0.3446         | 1                        | 0.3446      | 8.09    | 0.0130  | 0.75    |
| pw.ps                 | 0.0087         | 1                        | 0.0087      | 0.21    | 0.6575  | 0.02    |
| pw.w                  | 0.5655         | 1                        | 0.5655      | 13.28   | 0.0027  | 1.23    |
| ps.w                  | 0.1669         | 1                        | 0.1669      | 3.92    | 0.0678  | 0.36    |
| f <sup>2</sup>        | 0.5826         | 1                        | 0.5826      | 13.68   | 0.0024  | 1.27    |
| pw <sup>2</sup>       | 0.8340         | 1                        | 0.8340      | 19.58   | 0.0006  | 1.82    |
| ps <sup>2</sup>       | 0.0304         | 1                        | 0.0304      | 0.71    | 0.4126  | 0.07    |
| w <sup>2</sup>        | 0.1072         | 1                        | 0.1072      | 2.52    | 0.1349  | 0.23    |
| Residual              | 0.5964         | 14                       | 0.0426      |         |         | 1.30    |
| Lack of Fit           | 0.5898         | 10                       | 0.0590      | 36.09   | 0.0018  | 1.29    |
| Pure Error            | 0.0065         | 4                        | 0.0016      |         |         | 0.01    |
| Cor Total             | 45.8480        | 28                       |             |         |         | 100.00  |
| <b>Fit Statistics</b> |                |                          |             |         |         |         |
| Std. Dev.             | 0.2064         | R <sup>2</sup>           | 0.9870      |         |         |         |
| Mean                  | 6.6866         | Adjusted R <sup>2</sup>  | 0.9740      |         |         |         |
| C.V. %                | 3.0867         | Predicted R <sup>2</sup> | 0.9257      |         |         |         |
|                       |                | Adeq Precision           | 34.5716     |         |         |         |

$$\begin{aligned}
 Ra = & 10.64149 - (6.54880 \times f) + (0.12223 \times pw) + (2.04 \times 10^{-3} \times ps) - (0.08932 \times w) \\
 & - (0.01121 \times f \times pw) - (4.31 \times 10^{-4} \times f \times ps) + (0.12358 \times f \times w) \\
 & - (9.94 \times 10^{-6} \times pw \times ps) + (3.30 \times 10^{-3} \times pw \times w) - (2.19 \times 10^{-4} \times ps \times w) \\
 & + (1.19873 \times f^2) - (6.23 \times 10^{-4} \times pw^2) + (1.78 \times 10^{-6} \times ps^2) \\
 & - (5.70 \times 10^{-3} \times w^2)
 \end{aligned} \tag{4}$$

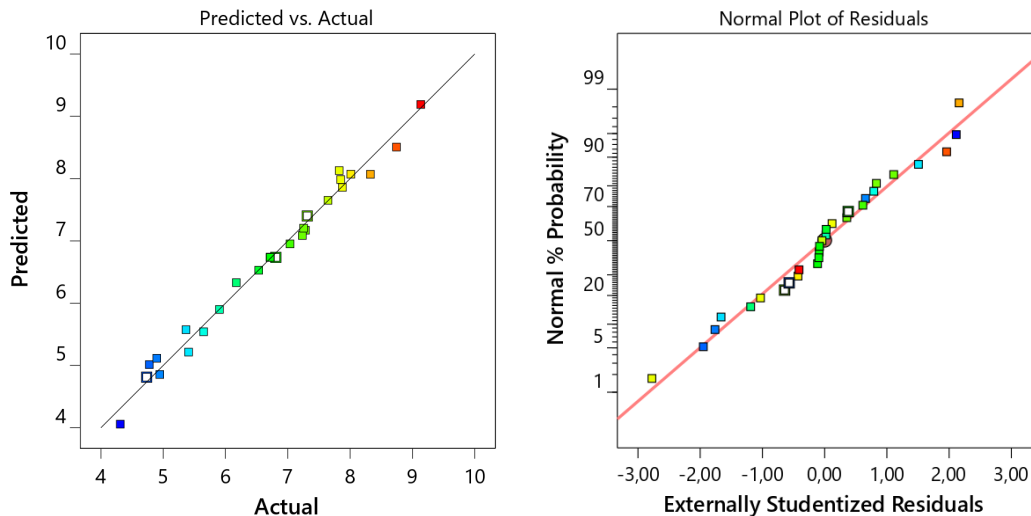
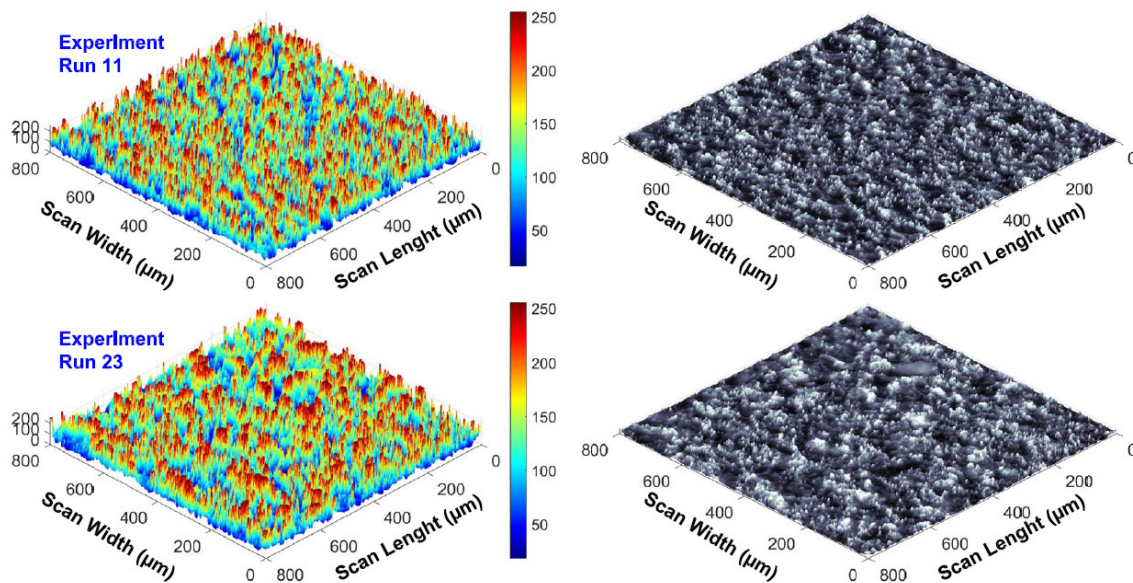


Figure 4. RSM versus experimental predicted values and residuals plot for surface roughness (Ra)

The images needed for topographic analysis are obtained with the Leica DM170M optical microscope. High-resolution images of the workpiece are obtained in the magnification 10x. The acquired images are visualized stacking in Z direction in the Matlab® program for step height, surface/line smoothness, and area/volume measurement. The topographic process is carried out on a specific area of 800x800 $\mu\text{m}$ . The results of surface topography of the experiments with the lowest surface roughness (Run no. 11) and the highest surface roughness (Run no. 23) obtained from the WEDM are shown in Figure 5. When examining the topographic surface of experiment 23, the increase in pw and w values appears to be coarse morphology on the WEDM cutting surface. Serious thermal damage to the machined component that produces a high energy discharge pulse. In contrast, when examining the topographic surface of experiment 11, minimal thermal damage to the WEDM cut-off surface of the Al 7075 T6 aluminum components produces a low density and low energy discharge pulse.



**Figure 5.** Cutting surface topographies of maximum (run 23) and minimum (run 11) surface roughness

#### 4.2. Analysis of cutting power

Cutting power is a critical factor in determining production costs in the manufacturing sector, and therefore, the study also evaluated the cutting power output. Figure 6 illustrates the effects of changing cutting conditions on cutting power. In WEDM processes, due to the low feed rate and the use of coolant, there are chips adhering to the cutting surface that need to be remelted. As the wire speed increases, these chips are removed from the cutting zone more rapidly since wire movement occurs in the direction of gravity, aiding the coolant in removing chips from the cutting zone. The graph demonstrates a significant decrease in cutting power values when wire speed increases and feed rate decreases. This reduces the amount of chips that melt and resolidify. Consequently, as the amount of chips adhering to and needing to be remelted on the cutting surface decreases, the cutting power decreases. A reduction in feed rate has a similar effect; when the feed rate is decreased, the cleaning time of the cutting fluid increases, allowing for more effective chip removal. This also explains the decrease in cutting power. However, changes in pulse width and pulse space appear to have no effect on cutting power.



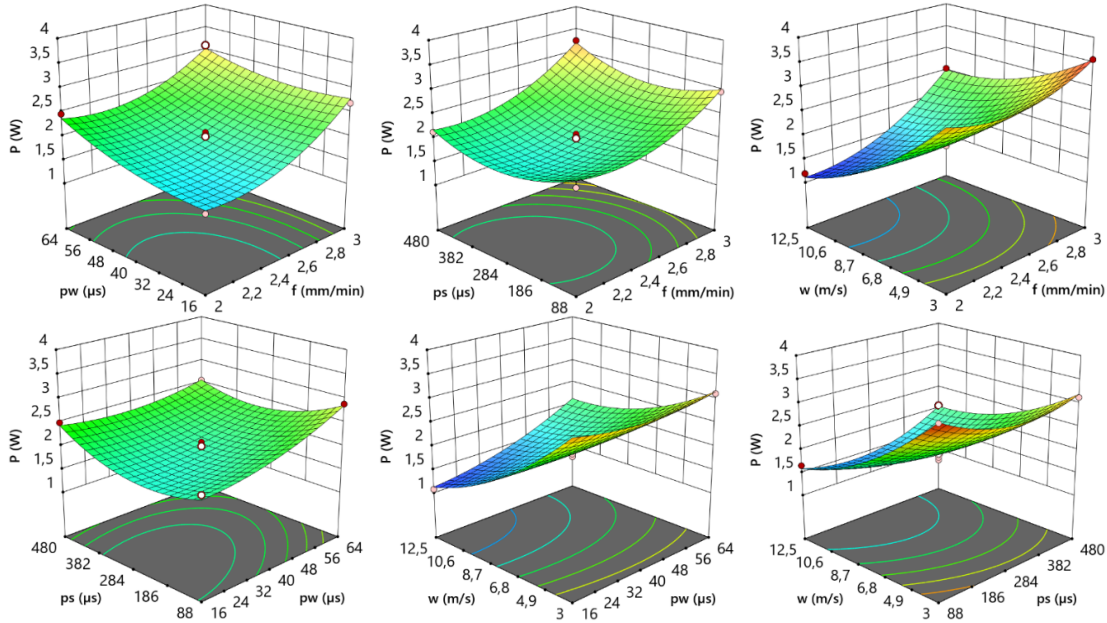


Figure 6. Effect of cutting parameters on cutting power

Variance and regression data analyzes were performed with the assumption that the cutting power findings vary according to the independent control factors and with a 95% confidence level. The results of analysis of variance and % contribution ratio (C-value) are given in Table 6. Some P values were found to be greater than 5% ( $P < 0.05$ ) according to the results. The P values of the model and the effective parameters ( $P < 0.0001$ ), on the other hand, are quite low. Furthermore, the model and active parameter F values appear to be 4.196 greater than the critical F value ( $F_{.05,1,28}$ ). As a result, the choice of control factors and levels can be considered statistically significant [39]. Wire speed and feed rate were found to be the most efficient cutting parameters in terms of cutting power, with C-values of 54.96% and 18.43%, respectively. The coefficients of determination ( $R^2$ ) show that the cutting power model is 98.7% compatible with the experimental results (Table 6). Equation 5 depicts the empirical mathematical model derived from regression analysis. Figure 7 depicts measurement-estimate values and residual plot graphs for cutting power. The graphs show that the measured and estimated cutting power values are compatible and at an acceptable level. The solid line indicates that the level of error is normal [40, 41]. The residual plot graph indicates that the residues are at normal levels due to accumulation along the straight line.

Table 6. ANOVA table for cutting power

| Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F-value | p-value | C-value |
|--------|----------------|----|-------------|---------|---------|---------|
| Model  | 12.9158        | 14 | 0.9226      | 75.99   | <0.0001 | 98.70   |
| f      | 2.4120         | 1  | 2.4120      | 198.67  | 0.0000  | 18.43   |
| pw     | 0.6917         | 1  | 0.6917      | 56.97   | 0.0000  | 5.29    |
| ps     | 0.0102         | 1  | 0.0102      | 0.84    | 0.3760  | 0.08    |
| w      | 7.1920         | 1  | 7.1920      | 592.37  | <0.0001 | 54.96   |
| f.pw   | 0.0559         | 1  | 0.0559      | 4.61    | 0.0498  | 0.43    |
| f.ps   | 0.0181         | 1  | 0.0181      | 1.49    | 0.2424  | 0.14    |
| f.w    | 0.2683         | 1  | 0.2683      | 22.10   | 0.0003  | 2.05    |
| pw.ps  | 0.1310         | 1  | 0.1310      | 10.79   | 0.0054  | 1.00    |
| pw.w   | 0.2714         | 1  | 0.2714      | 22.36   | 0.0003  | 2.07    |

|                       |         |                          |         |       |         |        |
|-----------------------|---------|--------------------------|---------|-------|---------|--------|
| ps.w                  | 0.1616  | 1                        | 0.1616  | 13.31 | 0.0026  | 1.23   |
| f <sup>2</sup>        | 0.8583  | 1                        | 0.8583  | 70.70 | <0.0001 | 6.56   |
| pw <sup>2</sup>       | 0.1939  | 1                        | 0.1939  | 15.97 | 0.0013  | 1.48   |
| ps <sup>2</sup>       | 0.8839  | 1                        | 0.8839  | 72.80 | <0.0001 | 6.75   |
| w <sup>2</sup>        | 0.5829  | 1                        | 0.5829  | 48.01 | <0.0001 | 4.45   |
| Residual              | 0.1700  | 14                       | 0.0121  |       |         | 1.30   |
| Lack of Fit           | 0.1103  | 10                       | 0.0110  | 0.74  | 0.6834  | 0.84   |
| Pure Error            | 0.0597  | 4                        | 0.0149  |       |         | 0.46   |
| Cor Total             | 13.0858 | 28                       |         |       |         | 100.00 |
| <b>Fit Statistics</b> |         |                          |         |       |         |        |
| Std. Dev.             | 0.1102  | R <sup>2</sup>           | 0.9870  |       |         |        |
| Mean                  | 2.4237  | Adjusted R <sup>2</sup>  | 0.9740  |       |         |        |
| C.V. %                | 4.5463  | Predicted R <sup>2</sup> | 0.9443  |       |         |        |
|                       |         | Adeq Precision           | 30.8535 |       |         |        |

$$\begin{aligned}
 P = & 14.01257 - (7.02455 \times f) + (0.00384 \times pw) - (0.00716 \times ps) - (0.79427 \times w) - (0.00985 \times f \\
 & \times pw) + (6.86 \times 10^{-4} \times f \times ps) + (0.10905 \times f \times w) - (3.85 \times 10^{-5} \times pw \times ps) \\
 & + (0.00229 \times pw \times w) + (2.16 \times 10^{-4} \times ps \times w) + (1.45507 \times f) + (3.00 \times 10^{-4} \\
 & \times pw) + (9.61 \times 10^{-6} \times ps) + (0.01329 \times w)
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

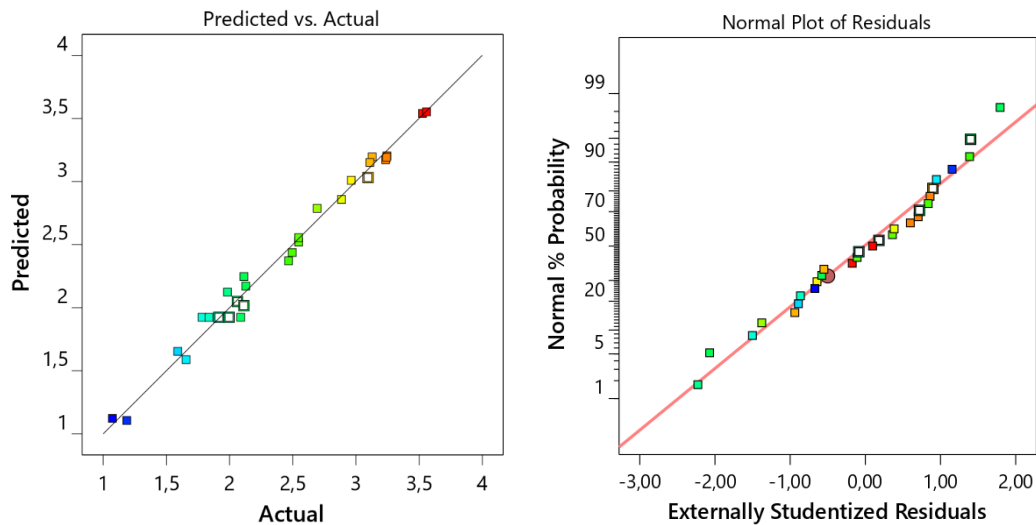
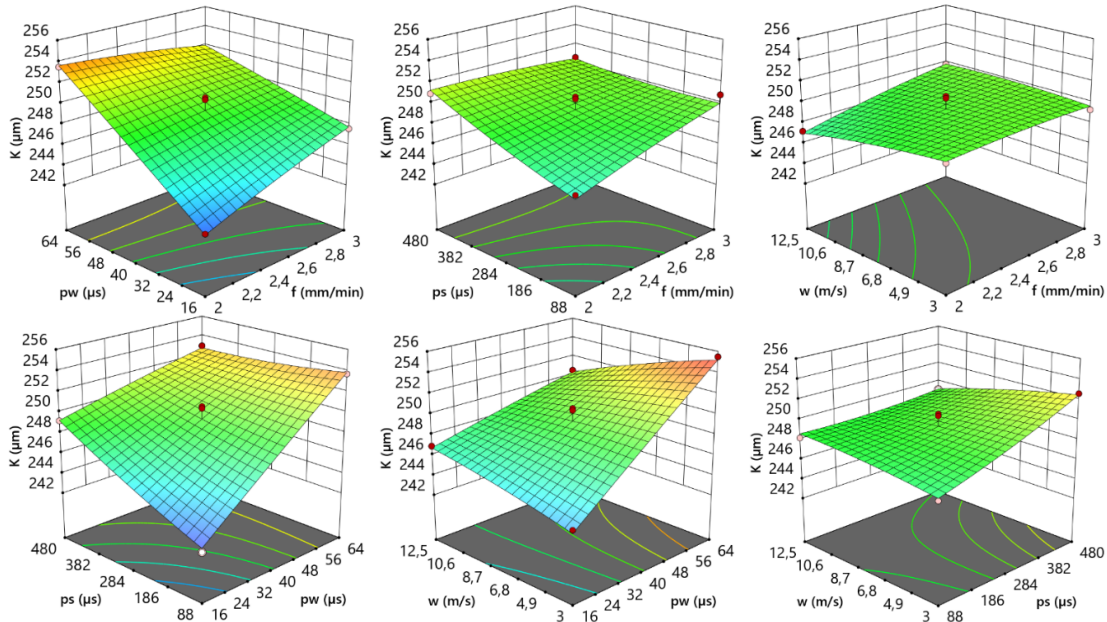


Figure 7. RSM versus experimental predicted values and residuals plot for cutting power (P)

### 4.3. Analysis of kerf width

As a critical parameter in machining processes, kerf width is crucial for post-processing dimensional accuracy and final product quality. Therefore, an extensive research was conducted to understand the kerf width values. The findings presented in Figure 8 clearly show the effect of various cutting conditions on kerf width. Detailed analysis of the graph reveals that there is a significant increase in kerf width values with increasing pulse width. This increase is related to the fact that the pulse width increases the electron bombardment applied to the workpiece. Increased bombardment leads to more intense melting and larger chip formation in the cutting zone, resulting in an increase in kerf width [42-44]. This emphasizes that kerf width plays a critical role in the machining process and is a parameter that needs to be carefully monitored. The study also revealed a slight increase in kerf width with increasing pulse space and feed rate [43]. This is because pulse width and feed rate increase the kerf

width by supporting each other, while pulse space and feed rate parameters suppress the effect of each other. Pulse space and pulse width parameters show opposite effects in terms of kerf width [36]. However, at low pulse width values, the effect of wire speed on kerf width is uncertain. On the contrary, at high pulse width values, kerf width decreases as the wire speed increases. The reason for this is thought to be the rapid cleaning of the cutting zone from chip with the increase in wire speed during cutting at high pulse width values. This finding underlines the complex interaction between various cutting parameters and their cumulative effect on kerf width.



**Figure 8.** Effect of cutting parameters on kerf width

Table 7 shows the results of the analysis of variance in terms of kerf width and % contribution ratio (C-value). The results demonstrated that some P values exceeded 5% ( $P < 0.05$ ). However, the P values for the model and effective parameters ( $P < 0.0001$ ) are quite low. Furthermore, the model and active parameter F values appear to be 4.196 greater than the critical F value ( $F_{0.05,1,28}$ ). As a result, the choice of control factors and levels can be considered statistically significant [39]. In terms of kerf width, the most effective cutting parameters were found to be pulse width and pulse space, with C-value ratios of 63.65% and 9.07%, respectively. Examining the coefficients of determination ( $R^2$ ) reveals that the kerf width model agrees with the experimental findings at a rate of 97.46%. (Table 7). Equation 6 represents the empirical mathematical model derived from regression analysis. Figure 9 depicts measurement-estimate values and residual plot graphs for kerf width. The graphs show that the measured and estimated kerf width values are compatible and at an acceptable level. The solid line indicates that the level of error is normal [40, 41]. From the residual plot graph, it can be understood that the residues are at the normal level due to the accumulation along the straight line.

Table 7. ANOVA table for kerf width

| Source          | Sum of Squares | df | Mean Square | F-value | p-value | C-value |
|-----------------|----------------|----|-------------|---------|---------|---------|
| Model           | 252.6498       | 14 | 18.0464     | 38.29   | <0.0001 | 97.46   |
| f               | 7.2075         | 1  | 7.2075      | 15.29   | 0.0016  | 2.78    |
| pw              | 165.0208       | 1  | 165.0208    | 350.16  | <0.0001 | 63.65   |
| ps              | 23.5200        | 1  | 23.5200     | 49.91   | <0.0001 | 9.07    |
| w               | 3.4133         | 1  | 3.4133      | 7.24    | 0.0176  | 1.32    |
| f.pw            | 10.2400        | 1  | 10.2400     | 21.73   | 0.0004  | 3.95    |
| f.ps            | 5.2900         | 1  | 5.2900      | 11.22   | 0.0048  | 2.04    |
| f.w             | 1.5625         | 1  | 1.5625      | 3.32    | 0.0901  | 0.60    |
| pw.ps           | 15.6025        | 1  | 15.6025     | 33.11   | <0.0001 | 6.02    |
| pw.w            | 14.4400        | 1  | 14.4400     | 30.64   | <0.0001 | 5.57    |
| ps.w            | 5.0625         | 1  | 5.0625      | 10.74   | 0.0055  | 1.95    |
| f <sup>2</sup>  | 0.2102         | 1  | 0.2102      | 0.45    | 0.5151  | 0.08    |
| pw <sup>2</sup> | 0.0415         | 1  | 0.0415      | 0.09    | 0.7710  | 0.02    |
| ps <sup>2</sup> | 0.5177         | 1  | 0.5177      | 1.10    | 0.3124  | 0.20    |
| w <sup>2</sup>  | 0.3069         | 1  | 0.3069      | 0.65    | 0.4332  | 0.12    |
| Residual        | 6.5978         | 14 | 0.4713      |         |         | 2.54    |
| Lack of Fit     | 1.9858         | 10 | 0.1986      | 0.17    | 0.9889  | 0.77    |
| Pure Error      | 4.6120         | 4  | 1.1530      |         |         | 1.78    |
| Cor Total       | 259.2476       | 28 |             |         |         | 100.00  |

| Fit Statistics |          |                          |         |
|----------------|----------|--------------------------|---------|
| Std. Dev.      | 0.6865   | R <sup>2</sup>           | 0.9746  |
| Mean           | 249.2793 | Adjusted R <sup>2</sup>  | 0.9491  |
| C.V. %         | 0.2754   | Predicted R <sup>2</sup> | 0.9281  |
|                |          | Adeq Precision           | 25.7736 |

$$\begin{aligned}
 K = & 204.27580 + (11.77651 \times f) + (0.74736 \times pw) + (0.05846 \times ps) + (0.38909 \times w) - (0.133 \times f \\
 & \times pw) - (0.01174 \times f \times ps) + (0.26316 \times f \times w) - (4.20 \times 10^{-4} \times pw \times ps) \\
 & - (0.01667 \times pw \times w) - (1.21 \times 10^{-3} \times ps \times w) - (0.72 \times f^2) - (1.39 \times 10^{-4} \\
 & \times pw^2) + (7.35 \times 10^{-6} \times ps^2) - (0.00964 \times w^2)
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

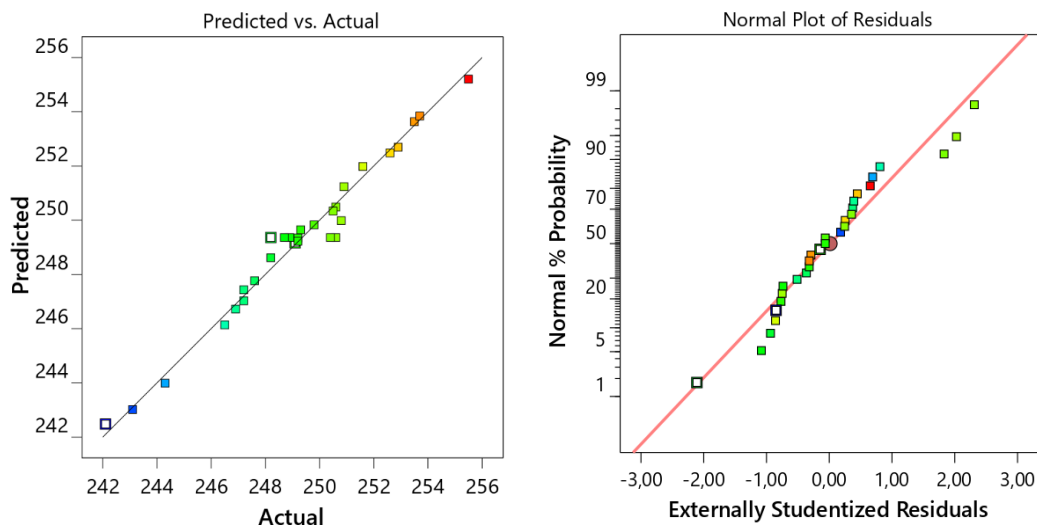


Figure 9. RSM versus experimental predicted values and residuals plot for kerf width (K)

#### 4.4. Confirmation experiments

Three prediction tests were carried out in the study for the verification tests, in machining conditions not listed in Table 4, where surface roughness, cutting power, and kerf width outputs were minimal. Table 8 shows the percentage error rates between the measured surface roughness, cutting power, and kerf width values and the RSM results. The error rates were calculated using the equation in Equation 7.

$$\text{Error \%} = [(measured\ result - predicted\ result)/measured\ result] \times 100 \quad (7)$$

Table 8 shows that there is more than 98% agreement between the measured values and the predicted values. It was understood that the error rates between the measured and predicted data were very low, and the prediction performance of the statistical model was at a satisfactory level as in similar studies [6, 29].

**Table 8.** Optimization of response parameters

| Run | Optimize value of factor |         |         |         | Response | Measured value | Predicted value | Error % |
|-----|--------------------------|---------|---------|---------|----------|----------------|-----------------|---------|
|     | f (mm/min)               | pw (μs) | ps (μs) | w (m/s) |          |                |                 |         |
| 1   | 2.27                     | 16      | 168.59  | 7.33    | Ra (μm)  | 4.792*         | 4.754*          | 0.79    |
|     |                          |         |         |         | P (W)    | 1.795          | 1.812           | 0.95    |
|     |                          |         |         |         | K (μm)   | 241.3          | 242.1           | 0.33    |
| 2   | 2.12                     | 16      | 176.16  | 10.09   | Ra (μm)  | 5.193          | 5.091           | 1.96    |
|     |                          |         |         |         | P (W)    | 1.067*         | 1.074*          | 0.66    |
|     |                          |         |         |         | K (μm)   | 243.5          | 242.1           | 0.57    |
| 3   | 2.12                     | 16      | 176.12  | 10.09   | Ra (μm)  | 5.101          | 5.091           | 0.20    |
|     |                          |         |         |         | P (W)    | 1.086          | 1.074           | 1.10    |
|     |                          |         |         |         | K (μm)   | 239.2*         | 241.1*          | 0.79    |

#### 5. Conclusion

In this study, the effects of different machining conditions on surface roughness, cutting power and kerf width were investigated by machining Al 7075 T6 aluminum alloy through WEDM. In this context, experimental study and statistical analyzes were carried out in the RSM Box-Behnken design by selecting the feed rate, pulse width, pulse space and wire speed parameters. The results are summarized as follows:

- Surface roughness values increase with increasing pulse width and wire speed. No significant effect of other cutting parameters was observed.
- Cutting power decreases significantly with increase in wire speed and decrease in feed rate. Other factors have little influence.
- Kerf width amounts increase significantly with increasing pulse width. A slight increase was observed with the increase in pulse space and feed rate. No significant effect of the wire speed factor was observed.

- In terms of variance analysis; The most effective parameters on surface roughness, cutting power and kerf width were found to be pulse width with 67.96%, wire speed with 54.96% and pulse width with 63.65%, respectively.
- In terms of regression analysis; The coefficients of determination ( $R^2$ ) of the models were obtained as 98.7%, 98.7% and 97.46 for surface roughness, cutting power and kerf width, respectively. These ratios showed that the measurements and the estimation were in agreement.

**Competing Interests:** Authors declare there is no conflict of interest.

**Funding Information:** There were no public or private sources of funding.

**Author Contribution:** The authors confirms responsibility for the following: study conception and design, data collection, analysis and interpretation of results, and manuscript preparation.

**Data Availability Statement:** The data generated and/or analyzed during the current study are not publicly available, but data may be provided by the corresponding author upon reasonable request.

### Conflict Of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

### References

- [1] Feng, L, Che, Y, Liu, Y, Qiang, X, and Wang, Y. Fabrication of superhydrophobic aluminium alloy surface with excellent corrosion resistance by a facile and environment-friendly method. *Applied Surface Science*. 2013;283:367-374.
- [2] Zuo, M, Sokoluk, M, Cao, C, Yuan, J, Zheng, S, and Li, X. Microstructure control and performance evolution of aluminum alloy 7075 by nano-treating. *Scientific reports*. 2019;9(1):1-11.
- [3] Attahu, CY, An, L, Li, Z, and Gao, G. Influence of shim layers on progressive failure of a composite component in composite-aluminum bolted joint in aerospace structural assembly. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*. 2018;35(1):188-202.
- [4] Yang, Y, Li, M, and Li, K. Comparison and analysis of main effect elements of machining distortion for aluminum alloy and titanium alloy aircraft monolithic component. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014;70(9):1803-1811.
- [5] Singh, AK, Singhal, D, and Kumar, R. Machining of aluminum 7075 alloy using EDM process: An ANN validation. *Materials Today: Proceedings*. 2020;26:2839-2844.
- [6] Sharma, P, Chakradhar, D, and Narendranath, S. Measurement of WEDM performance characteristics of aero-engine alloy using RSM-based TLBO algorithm. *Measurement*. 2021;179:109483.
- [7] Dewan, P, Kundu, P, and Phipon, R. Powder mixed electric discharge machining–A review. *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing, 2020.
- [8] Dewan, PR and Kundu, PK. On Titanium Powder Mixed Electric Discharge Machining of Nimonic C-263. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*. 2022:1-8.
- [9] Dewan, PR and Kundu, PK. Optimizing process parameters for EDM of nimonic C-263 under green dielectric. *Sādhanā*. 2023;48(4):230.
- [10] Goyal, A and Ur Rahman, H. Experimental studies on Wire EDM for surface roughness and kerf width for shape memory alloy. *Sādhanā*. 2021;46(3):160.
- [11] Das, S and Joshi, SN. Measurement and analysis of molybdenum wire erosion and deformation during wire electric discharge machining of Ti-6Al-4V alloy. *Measurement*. 2021;179:109440.

- [12] Kanlayasiri, K and Boonmung, S. Effects of wire-EDM machining variables on surface roughness of newly developed DC 53 die steel: Design of experiments and regression model. *Journal of materials processing technology*. 2007;192:459-464.
- [13] Zheng, J, Lai, X, Chen, A, and Zheng, W. Energy modeling and minimizing energy consumption control strategy of wire electrical discharge machining (WEDM) through electrical parameters. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019;103(9):4341-4353.
- [14] Shastri, RK and Mohanty, CP. Sustainable electrical discharge machining of Nimonic C263 superalloy. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2021;46(8):7273-7293.
- [15] Bobbili, R, Madhu, V, and Gogia, A. Modelling and analysis of material removal rate and surface roughness in wire-cut EDM of armour materials. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2015;18(4):664-668.
- [16] Kumar, SS, Uthayakumar, M, Kumaran, ST, Parameswaran, P, Mohandas, E, Kempulraj, G, Babu, BR, and Natarajan, S. Parametric optimization of wire electrical discharge machining on aluminium based composites through grey relational analysis. *Journal of Manufacturing Processes*. 2015;20:33-39.
- [17] Karabulut, Ş, Kökçan, R, Bilgin, M, and Özdemir, A. Study on the Wire Electrical Discharge Machining of AA 7075 Aluminum Alloy. 2018 9th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE). IEEE, 2018.
- [18] Biswas, MS, Mandal, K, and Sarkar, S. MOGA approach in WEDM of advanced aluminium alloy. *Materials Today: Proceedings*. 2020;26:887-890.
- [19] Jayachandran, S, Raman, M, and Ramasamy, T. Experimental investigation for the optimization of the WEDM process parameters to obtain the minimum surface roughness of the Al 7075 aluminium alloy employed with a zinc-coated wire using RSM and GA. *Materiali in Tehnologije*. 2019;53(3):349-356.
- [20] Aydın, K, Uğur, L, Güvercin, S, and Gül, F. Investigation of the machining performance of ferritic ductile cast Iron in WEDM using response surface methodology. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*. 2022;40(1):95-107.
- [21] Zhang, Z, Yu, H, Zhang, Y, Yang, K, Li, W, Chen, Z, and Zhang, G. Analysis and optimization of process energy consumption and environmental impact in electrical discharge machining of titanium superalloys. *Journal of Cleaner Production*. 2018;198:833-846.
- [22] Sharma, N, Khanna, R, and Gupta, R. Multi quality characteristics of WEDM process parameters with RSM. *Procedia Engineering*. 2013;64:710-719.
- [23] Anderson-Cook, CM, Borror, CM, and Montgomery, DC. Response surface design evaluation and comparison. *Journal of Statistical Planning and Inference*. 2009;139(2):629-641.
- [24] Shandilya, P, Jain, P, and Jain, N. RSM and ANN modeling approaches for predicting average cutting speed during WEDM of SiCp/6061 Al MMC. *Procedia Engineering*. 2013;64:767-774.
- [25] Box, GE and Hunter, JS. Multi-factor experimental designs for exploring response surfaces. *The Annals of Mathematical Statistics*. 1957:195-241.
- [26] Murat, D, Ensarioğlu, C, Gürsakal, N, Oral, A, and Çakır, MC. Evaluation of tool wear for hard turning operations through response surface methodology. 2018.
- [27] Gunaraj, V and Murugan, N. Application of response surface methodology for predicting weld bead quality in submerged arc welding of pipes. *Journal of materials processing technology*. 1999;88(1-3):266-275.
- [28] Montgomery, DC. *Design and analysis of experiments*: John Wiley & sons; 2017.
- [29] Raj, A, Misra, J, Khanduja, D, Saxena, K, and Malik, V. Design, modeling and parametric optimization of WEDM of Inconel 690 using RSM-GRA approach. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. 2022:1-11.
- [30] Ishfaq, K, Anwar, S, Ali, MA, Raza, MH, Farooq, MU, Ahmad, S, Pruncu, CI, Saleh, M, and Salah, B. Optimization of WEDM for precise machining of novel developed Al6061-7.5% SiC squeeze-casted composite. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020;111:2031-2049.
- [31] Dzionk, S and Siemiątkowski, MS. Studying the effect of working conditions on WEDM machining performance of super alloy Inconel 617. *Machines*. 2020;8(3):54.

- [32] Anderson, MJ and Whitcomb, PJ. RSM simplified: optimizing processes using response surface methods for design of experiments: Productivity press; 2016.
- [33] Altın Karataş, M. Inconel 718'in tel erozyon ile işlenmesinde yüzey pürüzlülüğünün Taguchi tabanlı gri ilişkisel analiz yöntemi ile çok kriterli optimizasyonu. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi. 2022;28(4):516-532.
- [34] Dobes, J, Leal, JES, Profeta, J, de Sousa, MM, Neto, FPL, Piratelli-Filho, A, and Arencibia, RV. Effect of mechanical vibration on Ra, Rq, Rz, and Rt roughness parameters. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017;92(1):393-406.
- [35] Azam, M, Jahanzaib, M, Abbasi, JA, and Wasim, A. Modeling of cutting speed (CS) for HSLA steel in wire electrical discharge machining (WEDM) using moly wire. Journal of the Chinese Institute of Engineers. 2016;39(7):802-808.
- [36] Gajjar, DH and Desai, JV. Optimization of MRR, Surface Roughness and KERF Width in wire EDM Using Molybdenum Wire. International Journal for Research in Education. 2015;4(2).
- [37] Soota, T and Rajput, S. Optimization and measurement of kerf width and surface roughness of AISI 316L. Forces in Mechanics. 2022;6:100071.
- [38] Çaydaş, U and Haşçalık, A. Tel Erozyon Yönteminde İşleme Parametrelerinin Alüminyum Alaşımının Yüzey Yapısına Etkisi. Politeknik Dergisi. 2004;7(1):31-36.
- [39] Bolar, G, Das, A, and Joshi, SN. Measurement and analysis of cutting force and product surface quality during end-milling of thin-wall components. Measurement. 2018;121:190-204.
- [40] Kaçal, A and Yıldırım, F. PMD23 Çeliğinin Tornalanmasında CBN Kesici Uçların Kesme Performansının Yüzey Pürüzlülüğü ve Takım Aşınması Üzerindeki Etkilerinin Belirlenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi. 2016;31(1).
- [41] Asiltürk, I, Neşeli, S, and Ince, MA. Optimisation of parameters affecting surface roughness of Co28Cr6Mo medical material during CNC lathe machining by using the Taguchi and RSM methods. Measurement. 2016;78:120-128.
- [42] Goswami, A and Kumar, J. Optimization in wire-cut EDM of Nimonic-80A using Taguchi's approach and utility concept. Engineering Science and Technology, an International Journal. 2014;17(4):236-246.
- [43] Tosun, N, Cogun, C, and Tosun, G. A study on kerf and material removal rate in wire electrical discharge machining based on Taguchi method. Journal of materials processing technology. 2004;152(3):316-322.
- [44] Koklu, U. Optimization of Kerf and Surface Roughness of AL 7 475-T 7 351 Alloy Machined with WEDM Process Using The Grey-Based Taguchi Method. Metalurgija/Metallurgy. 2012;51(1):47-50.



# HİBRİT DERİN ÖĞRENME ALGORİTMALARI KULLANILARAK BİYOGAZ REFORM SÜREÇLERİNİN OPTİMİZASYONU: CNN-LSTM MODELİ İLE ÇIKTI PARAMETRELERİNİN TAHMİNİ

Saadin OYUCU<sup>1\*</sup>, Münür Sacit HERDEM<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Adiyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Adiyaman, 02040, Türkiye

<sup>2</sup>Adiyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Adiyaman, 02040, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 23.05.2024 Kabul Tarihi/Accepted Date: 26.07.2024 DOI: 10.54365/adyumbd.1488710

## ÖZET

Bu çalışma, biyogaz reform süreçlerinde çeşitli çıktı parametrelerini tahmin etmek için Evrişimli Sinir Ağları (CNN: Convolutional Neural Networks) ve Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM: Long Short-Term Memory) algoritmalarını birleştiren hibrit bir derin öğrenme modelinin uygulamasını incelemektedir. Çalışmanın amacı, bu süreçlerin yönetimini iyileştiren tahmine dayalı modeller geliştirmektir. CNN-LSTM modeli, zaman serisi verilerindeki uzun vadeli bağımlılıkları ve karmaşık özellikleri yakalama konusundaki yeterliliği nedeniyle seçilmiş ve Destek Vektör Regresyonu (SVR: Support Vector Regression) gibi diğer modellerle karşılaştırılmıştır. Araştırma metan dönüşüm oranı, hidrojen-karbon monoksit oranı ve sentez gazı bileşimi gibi biyogaz reformunun önemli çıktılarını değerlendirmektedir. Modelin etkinliği RMSE, MAE ve MAPE ölçümleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Farklı eğitim dönemleri sonrasında, metan dönüşüm oranı için RMSE 0,1905, MAE 0,1311 ve MAPE 0,0036 olarak kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçlar, modelin tahmin başarısındaki yüksek doğruluğu ortaya koymaktadır. Bu çalışma, makine öğrenimi tekniklerinin endüstriyel uygulamalarda biyogaz reform süreçlerinin optimize edilmesi ve kontrol edilmesine katkı sağlayabileceğini göstermektedir. CNN-LSTM modelinin özellikle karmaşık biyokimyasal süreçleri yönetmedeki başarısı, derin öğrenme tekniklerinin potansiyelini vurgulamaktadır. Gelecekteki çalışmalar, modelin farklı biyogaz tesislerinde uygulanmasını ve optimizasyon parametrelerinin daha da iyileştirilmesini amaçlayacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** *Biyogaz Reformu, CNN-LSTM, SVR, Sürdürülebilir Enerji*

## OPTIMIZATION OF BIOGAS REFORMING PROCESSES USING HYBRID DEEP LEARNING ALGORITHMS: PREDICTION OF OUTPUT PARAMETERS WITH CNN-LSTM MODEL

### ABSTRACT

This study examines the application of a hybrid deep learning algorithm, combining Convolutional Neural Networks (CNN) with Long Short-Term Memory (LSTM), for predicting various output parameters in biogas reforming processes. The objective is to develop predictive models that enhance the management of these processes. The CNN-LSTM model was selected for its proficiency in capturing long-term dependencies and complex features in time-series data, and it was benchmarked against other models, including Support Vector Regression (SVR). This research evaluates crucial outputs of biogas reforming, such as the methane conversion rate, the hydrogen-to-carbon monoxide ratio, and the synthesis gas composition. The effectiveness of the CNN-LSTM model was assessed using RMSE, MAE, and MAPE metrics. After different training epochs, the RMSE for CONMET (%) was recorded at 0.1905, MAE at 0.1311, and MAPE at 0.0036, demonstrating the model's high accuracy in prediction. This study marks a significant advancement in incorporating machine learning techniques into optimizing and controlling biogas reforming processes for industrial applications. The success of the CNN-LSTM model, particularly in managing complex biochemical processes, underscores the potential of deep learning techniques. Future efforts will explore the model's application across different biogas plants and aim to refine optimization parameters further.

**Keywords:** *Biogas Reforming, CNN-LSTM, SVR, Sustainable Energy*

\* e-posta<sup>1</sup> : [saadinoyucu@adiyaman.edu.tr](mailto:saadinoyucu@adiyaman.edu.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3880-3039> (Sorumlu Yazar)

e-posta<sup>2</sup> : [herdem@adiyaman.edu.tr](mailto:herdem@adiyaman.edu.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0079-0041>

## 1. Giriş

Biyogaz reformu, yenilenebilir enerji üretimi ve organik kalıntıların doğru bir şekilde değerlendirilmesi için tercih edilen bir teknolojidir. Biyogaz, farklı mikroorganizmaların organik maddeyi ayrıştırmak için çeşitli metabolik yolları izlediği, biyolojik aracılı bir sürecin anaerobik sindirimin son ürünüdür. Günümüzde biyogaz sektörü hızla büyümekte ve yeni biyogaz tesislerinin gelişmiş biyoenerji fabrikaları olarak oluşturulmasının temeli oluşturmaktadır. Bu bağlamda biyogaz tesisleri, besin maddelerinin geri dönüşümü, sera gazı emisyonlarının azaltılması ve biyorafineri amaçlı kullanılarak döngüsel ekonomi konseptinin temeli oluşturmaktadır [1].

Biyogaz reformunun temeli olan Anaerobik Bozunma (AD: Anaerobic Decomposition) veya sindirim yüzlerce yıldır bilinmesine ve uygulanmasına rağmen hem teknoloji hem de geliştirilen uygulamalar hala basit teknolojiye dayanmaktadır. Zaman içerisinde süreç büyük ölçüde bir “kara kutu” olarak görülmüştür. Ancak mikrobiyal ekolojideki son gelişmelerle birlikte biyogaz reformu sürecinde büyük gelişmelerden yararlanılarak ve biyoinformatik kullanılarak biyogaz mikrobiyomu deşifre edilmeye başlanmıştır. Güncel birkaç çalışma, metabolik etkileşimlerin birçoğunun açıklığa kavuşturulmasıyla birlikte yeni keşfedilmiş mikropları tanımlamaktadır. Yeni bilgilerin büyük bir hızla kademeli olarak ilerlediği görülmektedir. Bu yeni bilgilerin gelecekte AD sürecini özel ihtiyaçlara göre uyarlanmış daha özel bir şekilde yönlendirmek için kullanılması muhtemeldir.

Biyogaz, esas olarak metan ve karbondioksitten oluşan bir karışımdır. Biyogaz sadece önemli bir elektrik enerjisi kaynağı olarak değil [2], aynı zamanda hidrojen üretimi [3], metanol üretimi [4] ve Fischer Tropsch sentezi [5] gibi geniş bir uygulama yelpazesinde büyük potansiyele sahiptir. Biyogazın çok yönlülüğü, araştırmacıların merakını uyandırmaya ve teşvik etmeye devam etmektedir. Minutillo ve diğerleri [6], biyogaz kullanarak hidrojen, ısı ve elektrik üreten bir polijenerasyon sistemi üzerine çalışmışlardır. Çalışılan sistem [6], oto termal bir biyogaz reaktörü ve bir su gazı kaydırma reaktörünü içermektedir. Sistemin gücü, katı oksit hücreli bir güç ünitesi kullanılarak üretilmektedir. Phan ve diğerleri [3], biyogazın hidrojen değerlendirilmesi programı çerçevesinde çeşitli metan reformu tekniklerinin kapsamlı bir değerlendirmesini yapmışlardır. Bulguları, %30 oranında arka gaz geri dönüşümü ile tri-reform tekniğinin, hidrojen verimi ve enerji verimliliği açısından yaygın olarak kullanılan buharla reform tekniğini aştığını ortaya koymuştur. Chein ve diğerleri [7], biyogazdan elde edilen karbon dioksit ve sentez gazını metanol sentezi için hammaddeler olarak kullanmanın potansiyelini araştırmışlar. Reaktör tasarımının, işletme koşullarının ve yan ürünlerin giderilmesinin metanol üretimi üzerindeki önemli etkisini göstermişlerdir. Sistemik analizler, aşırı ısınma reaksiyon sıcaklıklarını yönetme yeteneği nedeniyle izotermal reaktörün, adyabatik reaktöre göre daha yüksek metanol üretimi sağladığını belirlemiştir. Ayrıca çalışma kapsamında metan ve su eklenerek sentez gazı bileşiminin ayarlanmasının optimal endüstriyel metanol sentezi için etkili olduğu vurgulanmıştır. Marchese ve diğerleri [8], iki farklı yöntem kullanarak, biyogazdan endüstriyel atık karbon dioksiti Fischer-Tropsch sentetik yakıtlarına dönüştürme üzerine odaklanan güçten-sıvıya yollarının iç görülü bir analizini sağlamışlardır. Al-Wahaibi ve diğerleri [9], çeşitli gıda atıklarından biyogaz üretim potansiyeli üzerine bir teknik-ekonomik çalışma yürütmüş, fermantasyon kapasitesini etkili bir şekilde belirlemek için hem kısa (24 saat) hem de uzun (21 gün) test aralıkları kullanmışlardır. Çalışma kapsamında bu zaman dilimleri arasında yüksek bir korelasyon elde edilmiştir. Potansiyel gaz üretimini hızlı bir şekilde değerlendirmek için 24 saatlik testin uygun bir yöntem olduğu önerilmiştir. Polinom modelleri, teorik ve pratik veriler arasında yüksek bir uyum ( $R^2 = 0.99$ ) göstererek, toplam gaz ve metan üretimini yüksek bir doğrulukla tahmin etmiştir. Roy ve diğerleri [10], biyogazı yüksek hidrojen içerikli sentez gazına dönüştürmek için bir buhar-biyogaz reformu sürecini Katı Oksit Yakıt Hücresi (SOFC: Solid Oxide Fuel Cell) ile entegre etmişlerdir. Yenilenebilir metan kaynaklarını kullanarak yerel güç üretimini artırmışlardır. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve Aspen Plus benzetimlerini içermekte olup, yüksek sıcaklıklarda (1073 K üzeri) önemli metan dönüşümü ve olumlu karbondioksit dönüşümünün mümkün olduğunu göstermiştir. Reformer sıcaklıkları 948 K ve üzerindeyken sistem enerji verimliliği yaklaşık %40'a ulaşmıştır. Elde edilen sonuçlar, biyogazı

yenilenebilir güç üretimi için etkili bir şekilde kullanma potansiyelini vurgulamaktadır. İşletme sıcaklıklarının ve buhar-karbon oranlarının verimliliği arttırmak için optimize edilmesinin önemini belirtmektedir.

Literatürde belirtildiği gibi biyogaz reformu, metanol üretimi gibi çeşitli endüstriyel uygulamalarda biyogazın kullanılabilmesi için büyük önem taşımaktadır. Biyogazı sentez gazına dönüştürebilecek farklı biyogaz reformu yöntemleri arasında kuru-reform, çift-reform ve tri-reform bulunmaktadır [11]. Biyogaz reformu süreci için kritik girdi parametreleri arasında biyogazın bileşimi, reformer sıcaklığı ve reform ortamı bulunmaktadır. Diğer yandan, biyogazdaki metanın dönüşüm oranı, hidrojen ile karbon monoksit oranı, biyogazdaki metana göre sentez gazındaki hidrojen oranı, sentez gazındaki karbon monoksit ve karbon dioksit oranları ile sentez gazındaki kok yüzdesi biyogaz reformu için önemli çıktı parametreleridir. Makine öğrenimi teknikleri, biyogaz reform sürecindeki çeşitli çıktı parametrelerini tahmin etmek için kullanılabilir. Literatürde, çeşitli yakıt reformu süreçlerinin sonuçlarını tahmin etmek için başarıyla makine öğrenimi teknikleri uygulayan birçok çalışma bulunmaktadır [12–14]. Bu çalışmalar genellikle bir Makine Öğrenimi (ML: Machine Learning) yaklaşımı veya daha karmaşık Yapay Sinir Ağları (ANN: Artificial Neural Networks) kullanmıştır. Bu araştırmada, biyogaz reformunun çeşitli çıktılarını tahmin etmek için birden fazla ML tekniği geliştirilmiştir. Farklı koşullar altında biyogaz hammaddesindeki değişiklikler ve reform ortamı dahil olmak üzere bir biyogaz reformerinin farklı çalışma koşullarında ML tekniklerini uygulamak için kapsamlı bir çerçeve tasarlanmıştır. Bu çalışmada önerilen metodoloji, çeşitli biyogaz reform yöntemlerinin sonuçlarını doğru bir şekilde tahmin etmek için farklı senaryolara kolayca uyum sağlamak üzere geliştirilmiştir.

Bu çalışma, biyogaz reformu süreçlerinde makine öğrenimi tekniklerinin kullanımına odaklanarak literatürdeki boşluğu doldurmaktadır. Literatürde, biyogaz reformu süreçlerinin çıktılarını tahmin etmek için makine öğrenimi tekniklerinin uygulanmasına dair çalışmalar bulunmakla birlikte, mevcut çalışmalar genellikle ANN gibi klasik yaklaşımlar üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu çalışmada, daha gelişmiş bir model olan CNN-LSTM kullanılarak biyogaz reformu süreçlerinin çeşitli çıktılarını tahmin etme yeteneği araştırılmıştır. Ayrıca bu çalışmada önerilen metodoloji, farklı biyogaz reformu yöntemleri ve koşulları altında yüksek doğrulukla tahmin yapabilen kapsamlı bir çerçeve sunmaktadır. Bu bağlamda araştırmamız, makine öğrenimi tekniklerinin biyogaz reformu süreçlerinde nasıl daha etkin kullanılabileceğine dair yeni ve özgün bir perspektif sunmaktadır.

Çalışmanın giriş bölümünde, biyogaz reformunun tarihsel ve teknolojik önemi verilmiş, çeşitli kullanım alanları ve mevcut bilimsel ilerlemeler kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Çalışmanın ilerleyen bölümleri ise şu şekilde düzenlenmiştir: İkinci bölümde, araştırmada kullanılan materyaller ve metotlar detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Üçüncü bölümde, biyogaz reformu sürecinin çeşitli çıktı parametrelerini tahmin etmek için kullanılan modellerin geliştirilmesi süreci anlatılmıştır. Dördüncü bölüm, deneysel sonuçların sunulduğu kısımdır; burada elde edilen verilerin analizi, model doğrulaması ve sonuçların değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Son bölümde ise elde edilen bulguların tartışılması ve araştırmanın sonuçlarına dair genel bir değerlendirme yapılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

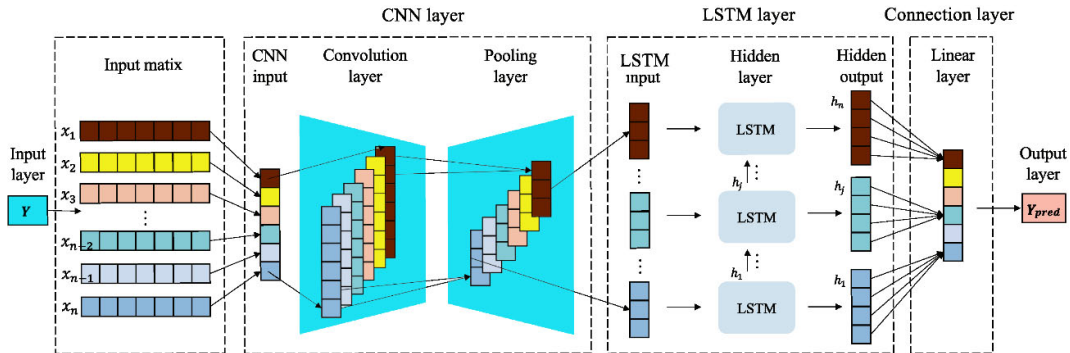
Biyogaz AD ağırlıklı olarak karbondioksit (CO<sub>2</sub>), metan (CH<sub>4</sub>), su (H<sub>2</sub>O) ve oksijen(O<sub>2</sub>) içermektedir. Biyogaz yanabilir bir gaz olduğundan ısınma ve ısıtma başta olmak üzere çok amaçlı olarak kullanılabilir. Kullanım alanının geniş olması biyogazdan olabildiğince verimli bir şekilde faydalanmayı gerektirir. Bu nedenle biyogaz işleminde ortaya çıkacak ürünlerin doğru tahmin edilmesi üretim hattında arz ve tüketim hattında kararlılığı doğru yönetmeye yardımcı olacaktır.

Bu çalışmada, karbondioksit/metan (CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>), su/metan (H<sub>2</sub>O/CH<sub>4</sub>), oksijen/metan (O<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>) ve reaktör sıcaklığı (RTEMP, °C) değerleri kontrol edilerek biyogaz reformu sürecindeki dönüşüm verimliliği (CONMET %), hidrojen/karbon monoksit oranı (H<sub>2</sub>/CO), karbon yüzdesi (C %) ve hidrojen/metan oranı (H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>) tahmin edilmiştir. Biyogazın enerji değeri büyük ölçüde içerdiği CH<sub>4</sub>

miktarına bağlıdır. Bu nedenle, H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> değerini tahmin etmek önemlidir. Tahmin edilen her bir değer genellikle karmaşık süreçleri daha iyi anlamak ve optimize etmek için kullanılmaktadır. Biyogaz reformu süreçlerini optimize etmek için deterministik modeller, stokastik modeller, makine öğrenmesi ve yapay zekâ yöntemleri kullanılabilir. Deterministik modeller, genellikle denklemler kullanılarak biyogaz üretim süreçlerini modellemeye çalışır. Stokastik modeller, belirsizlik ve rastgelelik faktörlerini dikkate alır. Bu modeller, süreç parametrelerinin belirli bir aralıktaki değerlerine dayalı tahminler yapmaktadır. Ancak son yıllarda, makine öğrenmesi ve yapay zekâ, biyogaz üretim tahminlerinde kullanılan önemli araçlardan biri haline gelmiştir. Özellikle Derin Öğrenme (DL: Deep Learning) modelleri, karmaşık süreçleri modellemek için kullanılmaktadır. Bu model ve algoritmaların temel görevi biyogaz reformu süreçlerinin karmaşıklığını ve belirsizliğini daha iyi anlamak ve yönetmektir. Her modelin veya algoritmanın kendi avantajları ve sınırlamaları vardır ve hangi modelin kullanılacağına karar verirken bu faktörler dikkate alınmalıdır.

Bu araştırmada, biyogaz reformu sürecine ilişkin verilerin tahmin edilmesi amacıyla makine öğrenmesi algoritmalarından Destek Vektör Regresyonu (SVR: Support Vector Regression) kullanılmıştır. SVR, sürekli çıktılar elde edildiği durumlarda, karmaşık ilişkilerin modellenmesi ve tahminlerin yapılması için başvurulan bir yöntemdir. Biyogaz reformu süreci, çeşitli girdi parametreleri (karbondioksit/metan oranı (CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>), su/metan oranı (H<sub>2</sub>O/CH<sub>4</sub>), oksijen/metan oranı (O<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>) ve reaktör sıcaklığı (RTEMP, °C) ile çıktılar (dönüşüm verimliliği (CONMET, %), hidrojen/karbon monoksit oranı (H<sub>2</sub>/CO), karbon yüzdesi (C%), hidrojen/metan oranı (H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>) arasındaki ilişkileri kapsar. Bu karmaşık ilişkiler, SVR gibi makine öğrenmesi teknikleri ile etkin bir şekilde modellenebilir. SVR, aykırı değerlere ve hatalı verilere karşı gösterdiği yüksek dayanıklılık ile bilinir ve yüksek genelleme kapasitesine sahiptir. Ayrıca modelin eğitim verilerine aşırı uymasını (overfitting) engellemeye yönelik bir düzgünleştirme (regularization) parametresi içerir. Bu parametre, modelin yeni verilere olan uyum kabiliyetini artırarak genelleme yeteneğini güçlendirir. Bu özelliklerinden dolayı SVR, bu çalışmada tercih edilen yöntem olmuştur.

Bu araştırmada, biyogaz reformu sürecindeki faktörlerin tahmin edilmesi için yalnızca makine öğrenmesi algoritmalarına değil, aynı zamanda karmaşık ilişkileri daha etkin bir şekilde modelleyebilen LSTM yöntemine de başvurulmuştur. Geleneksel tekrarlayan sinir ağlarındaki uzun süreli bağımlılıkları öğrenmede karşılaştığı güçlükleri aşmak amacıyla geliştirilen LSTM'ler, her bir hücrenin veya nöronun bir "hafıza hücresi" ile donatılmasıyla öne çıkmaktadır [15]. Bu hafıza hücreleri, bilgiyi uzun süreler boyunca koruma ve gerektiğinde yeniden kullanma kapasitesi sağlar. Biyogaz reformu sürecinde LSTM'ler özellikle zaman serisi verilerini modellemek için tercih edilmektedir. Bu modeller, normal operasyonlardan sapmaları tespit etmede de kullanılabilir. Örneğin, biyogaz üretim tesisindeki beklenmedik bir düşüş veya artış durumunda, LSTM modeli bu anomaliyi belirleyerek operatörlere uyarıda bulunabilir. Ayrıca LSTM'lerin başarısı, derin öğrenme modelleri ile birleştirildiğinde daha da artmaktadır [15]. Bu nedenle araştırmada zaman serisi ve sıralı verileri işlemek için kullanılan bir tür derin öğrenme modeli olan CNN ile LSTM yapısı bir arada kullanılmıştır.



Şekil 1. CNN-LSTM mimarisi [16].

CNN-LSTM, genellikle zaman serisi verileri ve sıralı verileri işlemek için kullanılan bir tür derin öğrenme modelidir. CNN-LSTM modeli, hem CNN'nin derin özellikleri öğrenme yeteneğinden hem de LSTM'nin uzun süreli bağımlılıkları modelleme yeteneğinden faydalanmaktadır. Biyogaz reformu sürecinde, CNN-LSTM genellikle zaman serisi verilerini tahmin etmede kullanılmaktadır. CNN yapısı birden çok zaman serisi girişi arasındaki özellikleri öğrenirken, LSTM bu özelliklerin zamana göre değişim hareketlerini öğrenir ve istenilen üretim hattının verilerini tahmin etmek için kullanır. CNN-LSTM yapısının genel yapısı Şekil 1'de verilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan CNN-LSTM yapısında, CNN bölümü bir dizi evrişimli ve havuzlama katmanlarından meydana gelmektedir. Bu katmanlar girdi verilerinden özellikleri otomatik olarak tespit etmektedir. Evrişimli katmanlar, giriş verileri üzerinde kayan pencereler kullanarak yerel özellikleri tespit eder. Havuzlama katmanları, özelliklerin boyutlarını küçülterek modelin ölçeklenme ve dönüşüm varyasyonlarına karşı daha dirençli hale gelmesini sağlar. LSTM kısmı ise evrişimli katmanlar tarafından çıkarılan özelliklerin zaman içindeki değişimlerini modellemek amacıyla kullanılır. LSTM hücreleri, bilgiyi uzun süreler boyunca muhafaza eder ve ihtiyaç duyulduğunda bu bilgiyi geri çağırabilir. Bu özellik modelin uzun vadeli bağımlılıkları öğrenmesini ve zaman serisi veriler üzerinde tahminlerde bulunmasını mümkün kılmaktadır.

### 3. Model Geliştirme

Bu araştırmada üç farklı modelin geliştirilmesine odaklanılmıştır. İlk olarak, makine öğrenmesi temelli bir SVR modeli ele alınmıştır. İkinci ve üçüncü modeller ise sırasıyla LSTM ve CNN-LSTM birimlerinin entegrasyonundan oluşan CNN-LSTM modelleridir. Bu modellerin geliştirilmesi belirlenen bir düzen dahilinde yürütülmüştür. Model geliştirme sürecinde, alt başlıklar altında detaylı bir şekilde açıklanan işlem adımları takip edilmiştir. Bu adımlar, modelin yapısının kurgulanmasından başlayarak, performansının değerlendirilmesine kadar olan süreçleri kapsamaktadır.

Model geliştirme sürecinin ilk aşaması olarak veri toplama ve ön işleme gerçekleştirilmiştir. İlgili modelleme problemimiz (biyogaz reformu) ile alakalı tarihsel veriler toplanmış ve bu veriler, SVR, CNN veya CNN-LSTM yapısına uygun biçimde ön işlemeye tabi tutulmuştur. Sürecin ikinci aşamasında, toplanan veriler üzerinden modelin tahmin kapasitesini artıracak önemli özellikler seçilmiş ve analiz edilmiştir. Bu özellikler regresyon problemlerinde hedef değişkenin değerini optimum düzeyde belirlemeye yardımcı olmaktadır. Üçüncü aşamada veri seti eğitim ve test veri kümelerine ayrılmıştır. Burada eğitim kümesi modelin eğitilmesi, test kümesi ise modelin performansının değerlendirilmesi amacıyla kullanılmıştır. Modelin geliştirilmesi ve eğitimi, kullanılan makine öğrenmesi veya yapay zekâ algoritmalarının özelliklerine bağlı olarak farklılık göstermektedir ve bu nedenle farklı başlıklar altında incelenmiştir. Geliştirilen modelin performansı, test veri kümesi üzerinden değerlendirilmekte olup performans değerlendirmesi esas olarak modelin hedef değişkeni ne kadar doğru tahmin ettiğini ölçmektedir. Regresyon problemleri için sık kullanılan performans ölçütlerinden biri Kök Ortalama Kare Hata (RMSE: Root Mean Squared Error)'dir [17]. Son aşamada model gerçek dünya uygulamalarına entegre edilmelidir. Eğitim ve doğrulama işlemlerinden sonra model, yeni verilere dayalı olarak hedef değişkenin değerini tahmin etmek üzere kullanılabilir. Bu, modelin gerçek dünya verileri üzerindeki tahmin çalışmalarını mümkün kılmaktadır.

#### 3.1. Veri Toplama ve Ön İşlem

Bu çalışma için veri üretimi, farklı girdi koşulları altında biyogaz reformu süreçlerinin çeşitli sonuçlarını elde etmek amacıyla RGibbs reaktör modelini kullanan Aspen Plus benzetim yazılımı kullanıldı. Bu analizde, biyogazın sadece CH<sub>4</sub> ve CO<sub>2</sub> içerdiği varsayıldı ve CO<sub>2</sub> ile CH<sub>4</sub> oranı 0.3 ile 3 arasında değiştiği kabul edildi. Çalışma ayrıca birkaç başka değişkeni de göz önünde bulundurdu. H<sub>2</sub>O ile metan oranı 0 ile 9 arasında değişti, O<sub>2</sub> ile metan oranı 0 ile 0,3 arasında değişti ve reformer sıcaklığı 200 ile 1000°C arasında olacak şekilde ayarlandı.

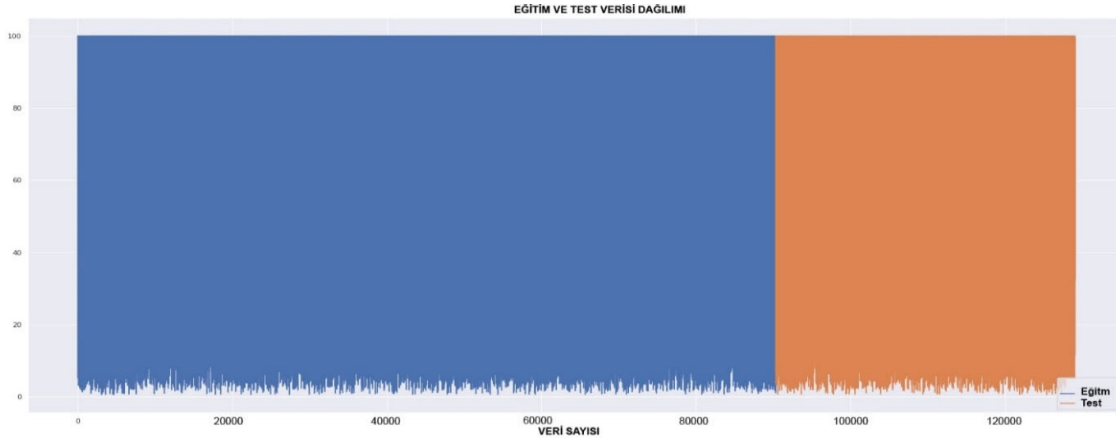
Benzetimlerden elde edilen çıktı parametreleri arasında, biyogazdaki metanın mol başına hesaplanan metan dönüşüm oranı, H<sub>2</sub>/CO oranı, kok oluşum oranı ve sentez gazındaki CO, CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub> oranları bulunmaktadır. Bu veri seti, farklı reform senaryolarının verimliliğini ve uygulanabilirliğini analiz etmek için kapsamlı bir temel sağlamaktadır. Gelecekteki çalışmalarda özel araştırma ihtiyaçlarına uygun olarak daha da geliştirilebilir veya ek parametreleri incelemek için genişletilebilir bir yapıda ele alınmıştır.

Elde edilen veriler üzerinde ön işlem uygulanmış ve eksik değerler kontrol edilmiştir. Ek olarak aykırı değerler uzman değerlendirmesinin ardından veri kümesinden çıkarılmıştır. Veriler hazırlandıktan sonra SVR modeli için 'numpy' dizileri kullanılmıştır. Yapay zekâ algoritmaları için verilere 'scaler' dönüşüm uygulanmıştır. Ayrıca derin öğrenme modellerinde, özelliklerin normalleştirilmesi genellikle modelin daha hızlı ve daha etkin bir şekilde eğitilmesine yardımcı olmaktadır. Normalleştirme, gradyan iniş gibi optimizasyon algoritmalarının daha hızlı ve daha etkin bir şekilde yakınsamasını sağlamaktadır.

CNN yapısı, genellikle görüntü işleme gibi alanlarda kullanılır ve bu tür uygulamalar tipik olarak üç boyutlu veri gerektirir. Örneğin bir renkli görüntü genellikle yükseklik, genişlik ve renk kanallarından oluşan üç boyuta sahiptir. Bu bağlamda model eğitimi için verilerin üç boyutlu olarak hazırlanması önem taşır. CNN girişinde kullanılan üç boyutlu veriler, CNN'nin birden fazla boyutta yerel özellikleri eş zamanlı olarak yakalamasına olanak tanır ve bu da verinin daha kapsamlı bir temsilini sağlar. Çalışma kapsamında, verileri üç boyutlu formatlara dönüştürmek için Python'un 'numpy' kütüphanesine ait 'reshape' fonksiyonundan yararlanılmıştır. 'Reshape' fonksiyonu, verileri belirlenen boyutlara uygun şekle getirmek için kullanılmaktadır. Derin öğrenme modellerimiz için veriler örnek sayısı, zaman adımı sayısı ve özellik sayısı olmak üzere üç boyutta yapılandırılmıştır. Böylece veri ön işleme süreci bu üç boyuta göre optimize edilmiştir.

### 3.2. Veri Bölme

Biyogaz reformu aşamasında elde edilen verileri bölme işlemi, sınıflandırma tür verilerle ilgili farklı olmalıdır. Biyogaz reformu zamana bağlı veriler sıralı bir yapıya sahiptir ve bu yapı, modelin eğitim ve test sürecinde korunmalıdır. Çalışma kapsamında ele alınan problem geçmiş verilere dayanarak gelecek verileri tahmin edebilmektir. Bu nedenle veri bölme işlemine dikkat edilmez ise gelecekteki bilgilere dayalı olarak geçmişi tahmin etmeye çalışan bir model oluşturabilir. Bu durum gerçek problemlerde istenmeyen bir hatayı ortaya çıkaracaktır. Çalışma kapsamında elde edilen veriler zaman tabanlı olarak bölümlenmiştir. Bu bölümlenme işlemi ile veri setinin bir bölümü (70% - 90.321 adet) (genellikle eski veriler) modelin eğitilmesi için ve kalan bölümü (yeni veriler - 38.709 adet) modelin test edilmesi için ayrılmıştır. Şekil 2'de veri bölme işlemi gösterilmiştir.



Şekil 2. Veri bölme işlemi.

Şekil 2’de veri setinin eğitim ve test verilerinin dağılımı verilmiştir. Mavi alan, eğitim verilerini temsil ederken, turuncu alan test verilerini göstermektedir. X eksen, veri setindeki veri noktalarının sayısını gösterirken, y eksen ise bu veri noktalarının sıklığını temsil etmektedir. Şekil 2, veri setinin bölünmesi ve kullanımının görsel bir özetini sağlayarak, eğitim ve test verilerinin veri seti üzerindeki kapsamını ve dağılımını sunmaktadır.

### 3.3. Model Parametreleri ve Eğitim

Model geliştirme sürecinde, SVR, CNN ve CNN-LSTM yapısı olmak üzere farklı yapılar için çeşitli modelleme parametreleri kullanılmıştır. SVR, Destek Vektör Makinelerinin (SVM: Support Vector Machines) sınıflandırma yeteneği, sürekli hedef değişkenleri tahmin etmek üzere uyarlanmış bir versiyonudur. SVM, genellikle iki sınıf arasındaki farkı en üst düzeye çıkarmaya çalışırken, SVR modeli belirlenen bir hata farkı içinde kalan tahminlerin sayısını en üst düzeye çıkarma amacına yönelik çalışmaktadır. Python programlama dilinde SVR modellerini eğitmek ve tahminlerde bulunmak için sıklıkla kullanılan ‘Scikit-learn’ kütüphanesi bu süreçte tercih edilmiştir [18]. SVR algoritmalarının en önemli özelliklerinden biri çekirdek (kernel) fonksiyonlarıdır. Bu algoritmalarda kullanılan çekirdek fonksiyonu, özelliklerin daha yüksek boyutlu bir uzaya dönüştürülmesini sağlamaktadır. Doğrusal olarak ayrılabilen verilerin ayrılabilir hale gelmesine olanak tanır. Bu çalışmada, çekirdek fonksiyonu olarak Radyal Taban Fonksiyonu (RBF: Radial Basis Function) kullanılmıştır. RBF çekirdeği, veri noktaları arasındaki mesafeyi hesaplar ve bu mesafeyi Gaussian (Normal) dağılım fonksiyonuna tabi tutarak verinin daha yüksek boyutlu bir uzaya dönüştürülmesini sağlar. RBF çekirdeğinin bir diğer önemli parametresi olan ‘gamma’, çekirdek fonksiyonunun şeklini etkileyerek modelin performansını doğrudan etkiler.

Klasik makine öğrenmesi algoritmalarından biri olan SVR üzerine model geliştirme çalışmaları tamamlandıktan sonra, LSTM ve CNN ile bütünleşmiş LSTM modelleri üzerindeki çalışmalara geçilmiştir. LSTM modeli için kullanılan parametreler, Çizelge 1’de detaylandırılmıştır. Bu geçiş farklı modelleme tekniklerinin karşılaştırmalı analizini ve her birinin veri seti üzerindeki performansını değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

**Çizelge 1. LSTM Model Parametreleri.**

| Parametreler                                | Değerler          |
|---|-------------------|
| Gizli Durum Boyutu (Hidden State Size)      | 8                 |
| Katman Sayısı (Number of Layers)            | 3                 |
| Aktivasyon Fonksiyonu (Activation Function) | tanh              |
| Bırakma Oranı (Dropout Rate)                | 0.2               |
| Optimizasyon Algoritması                    | Adam optimization |
| Öğrenme Oranı (Learning Rate)               | 0.001             |
| Toplu Boyut (Batch Size)                    | 64                |
| Eğitim Dönemi (Number of Epochs)            | 250, 500, 750     |

LSTM modeli için kullanılan parametreler, Çizelge 1’de verilmiştir. Bu parametrelerden Gizli Durum Boyutu (Hidden State Size), modelin öğrenebileceği bilgi miktarını etkileyen önemli bir faktördür. Genellikle daha büyük bir gizli durum boyutu, modelin daha karmaşık özellikler öğrenmesine imkân tanırken, aşırı uyum riskini de artırabilir. Bu nedenle veri miktarına uygun bir boyut belirlenmiştir. Çalışmada bu değer 8 olarak ayarlanmıştır. Katman Sayısı (Number of Layers) ise, modelin daha detaylı özellikleri öğrenmesine yardımcı olur ancak hesaplama maliyetini ve aşırı uyum riskini yükseltir. Bu nedenle 3 olarak belirlenmiştir. Aşırı öğrenmeyi önlemek için Bırakma Oranı

(Dropout Rate), eğitim sırasında rastgele seçilen nöronların devre dışı bırakılmasını sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Toplu İş Boyutu (Batch Size), hesaplama verimliliği ve modelin genelleme yeteneğini artırmak için 64 olarak ayarlanmıştır. Modelde aktivasyon fonksiyonu olarak ise genellikle -1 ile 1 arasındaki çıktı gerektiren durumlar için tercih edilen ‘tanh’ fonksiyonu kullanılmıştır. Bu fonksiyon, zaman serisi verilerinin bu aralıkta başarıyla normalleştirilmesi durumunda idealdir. Modelin aşırı öğrenme durumunu izlemek ve model başarısını dönemsel olarak değerlendirebilmek amacıyla 250, 500 ve 750 eğitim dönemi değerlerinde eğitimler gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında geliştirilen bir diğer model yapısı ise CNN ve LSTM bileşenlerini birleştiren CNN-LSTM mimarisidir. Bu yapı hem uzamsal hem de zamansal özelliklerin öğrenilmesine olanak tanır ve bu avantajı sayesinde, video analizi veya çok boyutlu zaman serisi veriler gibi karmaşık problemlerin çözümünde son derece etkilidir. Ancak CNN ve LSTM bileşenlerinin çok sayıda parametresi bulunmaktadır ve bu parametrelerin ayarlanması zaman alıcı ve karmaşık bir süreç gerektirebilir. CNN-LSTM yapısında kullanılan parametreler, Çizelge 2’de ayrıntılı olarak sunulmuştur.

**Çizelge 2.** CNN-LSTM Model Parametreleri.

| Parametreler                               | Değerler            |
|--|---------------------|
| Evrişim katmanı filtreleri                 | 32                  |
| Evrişim katmanı çekirdek boyutu            | 1                   |
| Evrişim katmanının aktivasyon fonksiyonu   | tanh                |
| Havuzlama katmanı havuz boyutu             | 1                   |
| Havuzlama katmanının aktivasyon fonksiyonu | ReLU                |
| Zaman adımı, yerleştirme boyutu            | 12                  |
| Parti boyutu                               | 32                  |
| Öğrenme oranı                              | 0.0001              |
| Optimizasyon                               | Adam                |
| Kayıp fonksiyonu                           | Mean absolute error |
| Dönem Sayısı                               | 250, 500, 750       |
| LSTM katmanındaki gizli birimlerin sayısı  | 64                  |
| LSTM katmanının aktivasyon fonksiyonu      | tanh                |

Çizelge 2’de verilen parametreler CNN-LSTM modelinin performansını ve eğitim süresini önemli ölçüde etkilemektedir. Parametre ayarlanması genellikle deneme yanılma süreci ile gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle ilk denemelerde LSTM yapısında gizli katman sayısı 48 olarak belirlenmiştir. Elde edilen ilk sonuçlar yeterli başarı göstermediğinden ikinci bir katman daha eklenerek 16 gizli katman sayısı belirlenmiştir. İlk sonuçlar iyileştirme göstermiştir. Ancak kabul edilebilir seviyede değildir. Bu nedenle model yapısı değiştirilmiş ve ilk LSTM katman sayısı 64, ikincisi ise 48 olarak ayarlanmıştır.

Hazırlanan modeli geliştirmek için her türden derin öğrenme modelini tanımlamak ve eğitmek için uygun koşulları sağlayan Python programlama dilinde oluşturulmuş bir derin öğrenme kütüphanesi olan TensorFlow Keras kullanılmıştır. Model yapısında aktivasyon fonksiyonu olarak ReLU kullanılmıştır. ReLU, diğer aktivasyon fonksiyonlarına göre (sigmoid veya tanh gibi) daha az hesaplama maliyetine sahiptir. Bu durum zaman serisi verilerinde daha az işlem gerektirmektedir. Ayrıca ReLU, çıktıları sifıra eşitleme yeteneği sayesinde, nöronların aktif hale gelmesi için bir tür seçim mekanizması sağlamaktadır. Bu yeteneği sinir ağının genel olarak daha etkili ve verimli olmasına yardımcı olmaktadır. Model eğitimi LSTM yapısında da olduğu gibi kademeli olarak gerçekleştirilmiştir. Böylelikle modelin aşırı öğrenmesi üzerine bilgi edinilmiştir.



## 4. Deneysel Sonuçlar

### 4.1. Değerlendirme Metrikleri

Çalışma kapsamında hazırlanan modelleri test edebilmek için birden fazla yöntem kullanılmıştır. İlk test işlemlerinde istatistiksel tahminlerin doğruluğunu değerlendirmekte kullanılan bir metrik olan RMSE kullanılmıştır [17,18]. RMSE, tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki farkların karesinin ortalamasının karekökü olarak hesaplanmaktadır (Denklem 1).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{a}_i - a_i)^2}{n}} \quad (1)$$

Deneysel çalışmalarda model testi için kullanılan diğer bir yaklaşımda Ortalama Mutlak Sapma Hatası (MADE: Mean Absolute Deviation Error)'dir [19]. Genellikle regresyon modellerinin performansını ölçmek için kullanılan MADE, tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki ortalama mutlak farkı temsil etmektedir. Diğer bir deyişle her bir tahminin ne kadar "yanıldığını" belirlemeye çalışır. MADE hem pozitif hem de negatif hataların büyüklüğünü dikkate almaktadır. Ancak hata yönünü (yani tahminin gerçek değerden çok mu yüksek yoksa çok mu düşük olduğunu) dikkate almaz. Bu nedenle RMSE ve Ortalama Mutlak Yüzde Hatası (MAPE: Mean Absolute Percentage Error) gibi diğer hata metrikleriyle birlikte kullanılır [20].

MAPE, tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki mutlak yüzde farkın ortalamasını hesaplar. Tahminlerin gerçek değerlere göre ne kadar yüzdesel olarak sapma gösterdiğini belirler. MAPE Denklem 2'de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

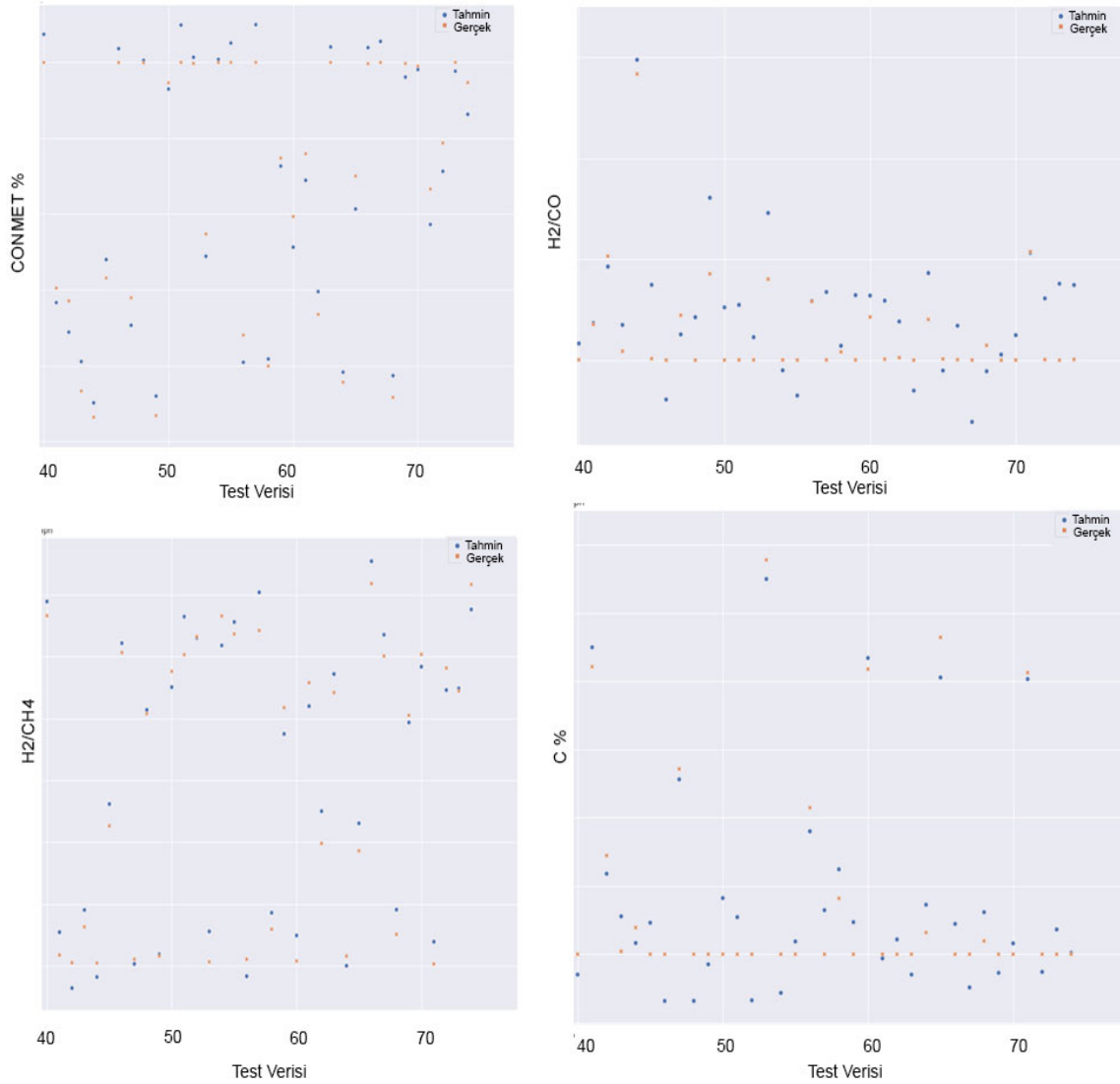
$$MAPE = (1/n) * \sum \left( \frac{|actual - forecast|}{|actual|} \right) * 100 \quad (2)$$

Denklem 2'de gösterildiği gibi her bir tahmin için, tahmin edilen değer ile gerçek değer arasındaki farkı hesaplanır. Ardından bu farkın mutlak değerini alınır. Bu mutlak fark, gerçek değere bölünerek yüzdesel hata değerini elde edilir. MAPE, hataları orijinal ölçekte değil de yüzdesel olarak değerlendirmenin daha anlamlı olduğu durumlar için yararlıdır.

### 4.2. SVR Modeli ile CONMET (%), H2/CO, C(%), H2/CH4 Verilerinin Tahmini

Bu çalışmada geliştirilen SVR modeli, belirli parametreler üzerinden CONMET (%), H2/CO, C (%), H2/CH4 verilerinin tahmini amacıyla kullanılmıştır. Model doğrulama sürecinde, test işlemleri için seçilen veriler, modelin eğitim aşamasında kullanılmamıştır. Modelin görmediği veriler üzerindeki performansının değerlendirilmesi açısından önemlidir. Şekil 3, tahmin edilen değerlerin gerçek verilere göre konumlarını görsel olarak sunmakta ve böylece modelin tahmin doğruluğu hakkında bilgi vermektedir.

Şekil 3'te SVR modeli ile tahmin edilen CONMET (%), H2/CO, C (%), ve H2/CH4 değerleri ile bu parametrelerin gerçek değerleri arasındaki ilişki gösterilmektedir. Her bir grafik, x ekseninde test verisi indekslerini ve y ekseninde ilgili parametre değerlerini temsil etmektedir. Mavi noktalar gerçek değerleri, kırmızı noktalar ise SVR modeli tarafından tahmin edilen değerleri göstermektedir. CONMET(%) grafiğinde, tahmin edilen değerlerin gerçek değerlere göre oldukça dağılmış olduğu görülmekte, bu da modelin bu parametre için daha yüksek bir hata oranına sahip olabileceğine işaret etmektedir. H2/CO ve C (%) grafiklerinde, tahminlerin genel olarak gerçek değerlere daha yakın olduğu, ancak yine de belirli noktalarda önemli sapmaların mevcut olduğu gözlemlenmektedir. H2/CH4 grafiğinde ise, modelin tahminleri gerçek değerlere nispeten daha düşük bir doğrulukla uyum sağlamış görünmektedir.

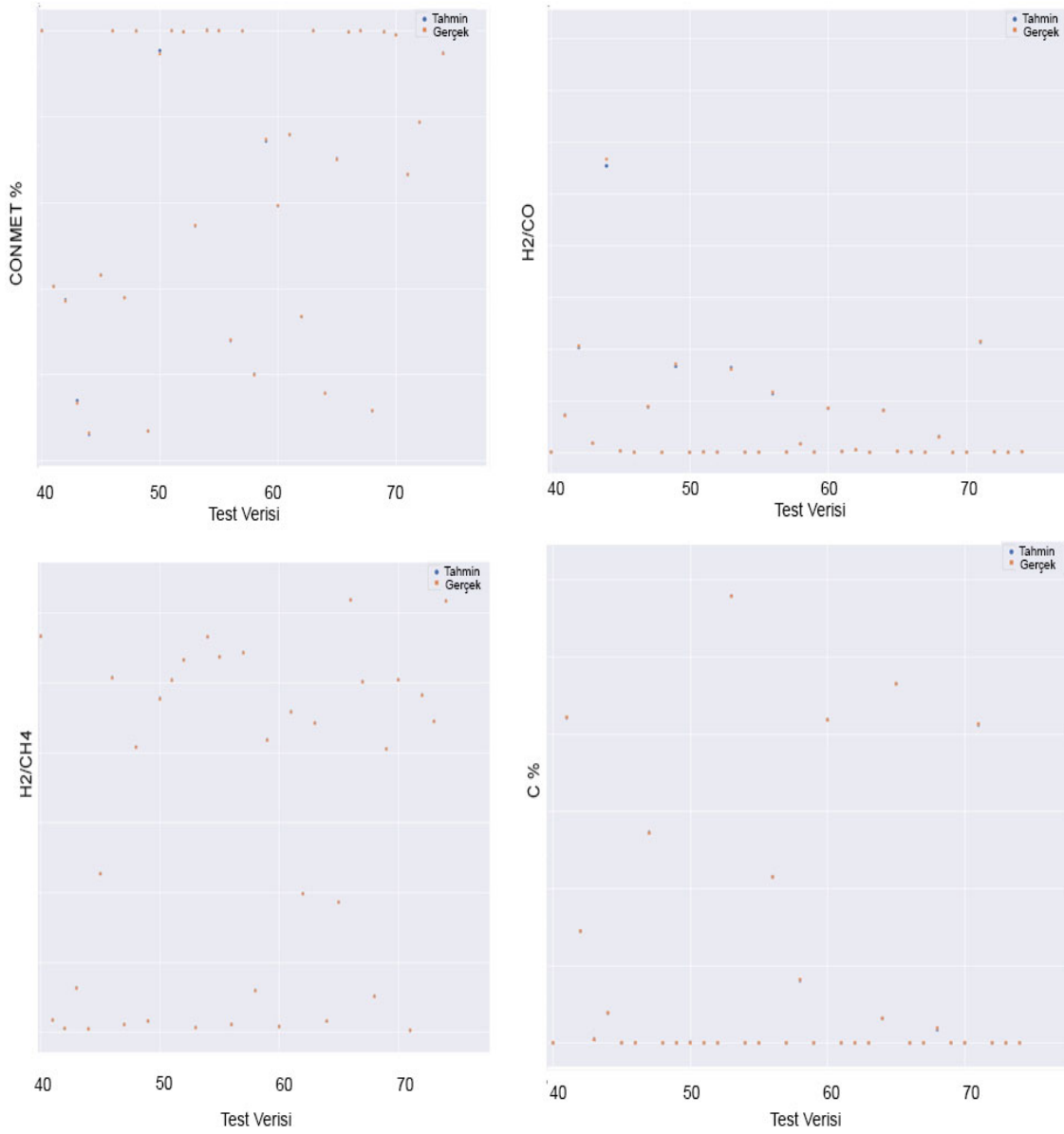


Şekil 3. SVR modeli ile tahmin edilen ve gerçek değerlerinin karşılaştırmalı analizi.

#### 4.3. LSTM Modeli ile CONMET (%), H2/CO, C(%), H2/CH4 Verilerinin Tahmini

Bu çalışmada geliştirilen LSTM modeli, belirli bir veri seti üzerinden CONMET (%), H2/CO, C (%), ve H2/CH4 verilerinin tahmin edilmesi amacıyla kullanılmıştır. Model 250, 500 ve 750 eğitim dönemi olmak üzere üç farklı iterasyon sayısında eğitilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde 250 ile 500 eğitim dönemi arasında iyileşmenin fazla olduğu, 500-750 eğitim dönemi arasında model başarısının çok değişmediği gözlemlenmiştir. 750 eğitim dönemi sonucunda elde edilen LSTM sonuçları Şekil 4’te verilmiştir.

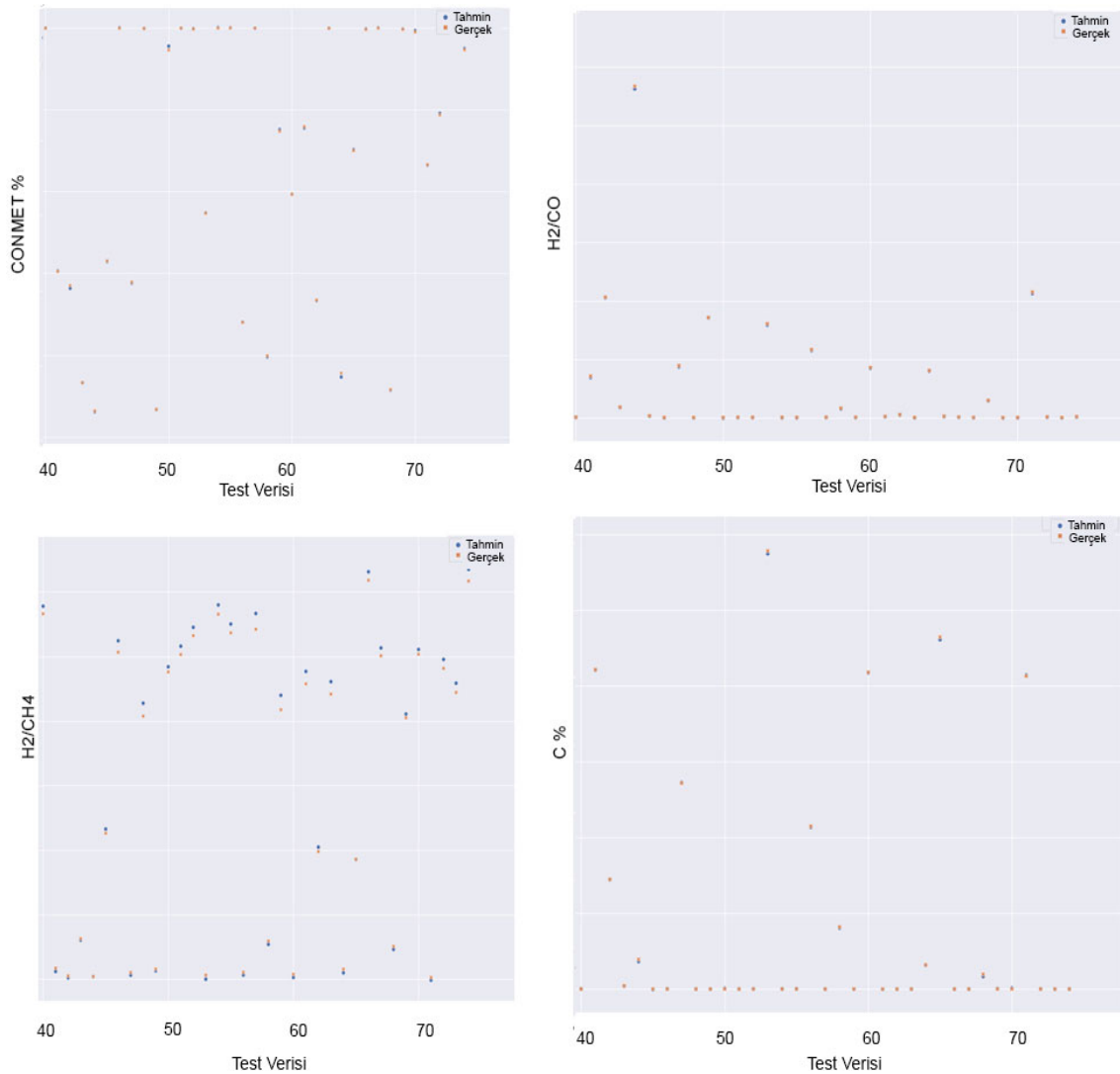
Şekil 4’te sunulan dört farklı grafik, LSTM modeli kullanılarak elde edilen tahmin sonuçlarının gerçek değerlerle karşılaştırılmasını göstermektedir. CONMET (%) için tahminlerin gerçek değerlerden önemli ölçüde sapmalar gösterdiği gözlemlenmektedir. H2/CO parametresi için de benzer bir durum söz konusudur. C (%) parametresinde ise tahminlerin genel olarak gerçek değerler ile örtüştüğü, daha düşük bir sapma ile yer aldığı görülmektedir. H2/CH4 grafiğinde, tahminlerin gerçek değerlere göre daha homojen bir dağılım gösterdiği ancak az miktarda da olsa sapmalar içerdiği belirlenmiştir.



**Şekil 4.** LSTM modeli ile tahmin edilen ve gerçek değerlerinin karşılaştırmalı analizi.

#### 4.4. CNN-LSTM Modeli ile CONMET (%), H2/CO, C(%), H2/CH4 Verilerinin Tahmini

Bu çalışmada geliştirilen CNN-LSTM modeli, belirli bir veri seti üzerinden CONMET (%), H2/CO, C (%), ve H2/CH4 değerlerinin tahmini için kullanılmıştır. Modelin test sürecinde, model eğitimi sırasında kullanılmamış olan veriler kullanılarak modelin genelleme kabiliyeti değerlendirilmiştir. Model 250, 500 ve 750 eğitim dönemi süresince eğitilmiş olup, kayıp (loss) değerleri bu eğitim dönemleri boyunca incelenmiştir. Analiz sonuçlarına göre model 250 eğitim döneminden sonrasında kayıp değerlerinde belirgin bir iyileşme göstermiş, bu da modelin bu noktadan itibaren daha iyi sonuçlar vermeye başladığını göstermektedir. Bu bulgular CNN-LSTM modelinin belirlenen parametreler altında nasıl performans gösterdiğine dair önemli bilgiler sunmakta ve modelin daha ileri düzeyde optimizasyonu için yol gösterici olmuştur. Şekil 5'te CNN-LSTM modelinin gerçek değerler ve tahmin edilen değerler arasındaki ilişkiyi gösteren grafik verilmiştir.



**Şekil 5.** CNN-LSTM modeli ile tahmin edilen ve gerçek değerlerinin karşılaştırmalı analizi.

Şekil 5'te CNN-LSTM modeli kullanılarak elde edilen tahmin sonuçlarının gerçek değerlerle karşılaştırılması gösterilmektedir. CONMET (%) grafiğinde, tahminlerin genel olarak gerçek değerlerden düşük olduğu ve özellikle daha yüksek değerlerde tahminlerin gerçek değerlerden uzaklaştığı görülmektedir. H2/CO parametresi için tahminler, gerçek değerlere nispeten daha düzgün bir dağılım sergilese de bazı noktalarda önemli sapmalar mevcuttur. C (%) için tahminlerin gerçek değerlere oldukça yakın olduğu gözlemlenmektedir, bu da modelin bu parametre üzerinde daha iyi performans gösterdiğini işaret etmektedir. H2/CH4 grafiğinde, tahminlerin genel olarak düşük olduğu ve gerçek değerlerin üzerine çıkmadığı görülmektedir.

Geliştirilen CNN-LSTM modelinin tahmin yeteneğinin hem klasik SVR modeline hem de tek başına LSTM modeline kıyasla daha üstün olduğu gözlemlenmiştir. Modelin kayıp (loss) değerleri üzerinde yapılan inceleme, 500 eğitim dönemine ulaştığında kayıpların önemli ölçüde azaldığını ortaya koymuştur. Bu azalma tahminlerin doğruluğunu artırmıştır. CNN'in karmaşık yapıları öğrenme yeteneği, LSTM'in zaman serisi verileri üzerindeki başarısı ile entegre edilerek güçlendirilmiştir. Katman sayısındaki optimizasyon çalışmalarının, modelin performansını önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. 48 katmanlı LSTM yapısına kıyasla 64 katmanlı modeller daha iyi sonuçlar elde etmiştir.

Katman sayısındaki bu artış, modelin karmaşık ilişkileri ezberlemesine olanak tanımaktadır. Ancak bu durumun olumsuz etkilerinden kaçınmak için büyük veri setleri ile çalışmak gereklidir. Yapılan çalışmalarda 500 ve sonrasındaki eğitim döneminden sonra modelin performansının stabil bir duruma geldiği belirlenmiştir.

#### 4.5. RMSE, MADE ve MAPE Sonuçları

Gerçekleştirilen tahminlerin doğruluğunu ölçmek için RMSE, MADE ve MAPE gibi istatistiksel hata metrikleri kullanılmıştır. Bu metrikler, modelin tahmin edilen değerlerinin gerçek değerlerden ne kadar sapma gösterdiğini niceliksel olarak ifade etmektedir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 3'te sunulmuştur.

**Çizelge 3.** CONMET (%), H2/CO, C (%) ve H2/CH4 Verilerindeki Hata Değerlerinin Karşılaştırılması.

| Veriler   | Metrikler | Regresyon Modelleri |                   |         |                   |          |                   |         |               |         |        |
|-----------|-----------|---------------------|-------------------|---------|-------------------|----------|-------------------|---------|---------------|---------|--------|
|           |           | SVR                 | LSTM              |         |                   | CNN-LSTM |                   |         |               |         |        |
|           |           |                     | 250 Eğitim Dönemi |         | 500 Eğitim Dönemi |          | 750 Eğitim Dönemi |         |               |         |        |
|           |           |                     | 1.Model           | 2.Model | 1.Model           | 2.Model  | 1.Model           | 2.Model |               |         |        |
| Conmet(%) | RMSE      | 2,1683              | 1,1371            | 0,8461  | 1,2299            | 0,8467   | <b>0,1905</b>     | 2,0022  | <b>0,1905</b> | 0,3581  | 0,2389 |
|           | MADE      | 1,8609              | 0,7834            | 0,5749  | 1,0994            | 0,6906   | <b>0,1311</b>     | 1,4904  | 0,1312        | 0,2384  | 0,1754 |
|           | MAPE      | 5,4385              | 0,0341            | 0,0281  | 0,0426            | 0,0208   | <b>0,0036</b>     | 0,0523  | <b>0,0036</b> | 0,0091  | 0,0048 |
| H2/CO     | RMSE      | 83,7562             | 12,3617           | 8,1898  | 9,3711            | 23,2664  | 3,4602            | 21,5748 | 3,0421        | 33,7274 | 4,6341 |
|           | MADE      | 32,0024             | 5,20623           | 3,7232  | 5,8658            | 19,8081  | 2,0192            | 9,8081  | 1,3465        | 11,6791 | 2,3651 |
|           | MAPE      | 444,5652            | 0,6861            | 0,4875  | 1,2395            | 5,4562   | 0,3479            | 1,9628  | 0,0914        | 2,2284  | 0,1515 |
| C (%)     | RMSE      | 0,8045              | 0,2418            | 0,3245  | 0,3319            | 0,7631   | 0,1282            | 0,1619  | 0,0866        | 0,3672  | 0,0747 |
|           | MADE      | 0,5811              | 0,1573            | 0,2098  | 0,2526            | 0,5632   | 0,0645            | 0,0831  | 0,0481        | 0,2011  | 0,0391 |
|           | MAPE      | 0*                  | 0*                | 0*      | 0*                | 0*       | 0*                | 0*      | 0*            | 0*      | 0*     |
| H2/CH4    | RMSE      | 0,0697              | 0,0174            | 0,0261  | 0,0448            | 0,0093   | 0,0083            | 0,0063  | 0,0132        | 0,0071  | 0,0054 |
|           | MADE      | 0,0613              | 0,0136            | 0,0227  | 0,0406            | 0,0062   | 0,0061            | 0,0045  | 0,0111        | 0,0053  | 0,0041 |
|           | MAPE      | 8,5456              | 0,0618            | 0,1823  | 0,2653            | 0,0172   | 0,0151            | 0,0123  | 0,0326        | 0,0132  | 0,0094 |

Çizelge 3, farklı modeller (SVR, LSTM, CNN-LSTM) için çeşitli eğitim dönemlerinde (250, 500, 750) ve farklı modeller (Model 1, Model 2) kullanılarak elde edilen tahmin sonuçlarını değerlendirmekte olan istatistiksel hata metrikleri (RMSE, MAE, MAPE) ile sunulmuştur. Değerlendirme, dört farklı veri türü (CONMET (%), H2/CO, C (%), H2/CH4) üzerinde yapılmıştır. CONMET (%) verileri için CNN-LSTM modelinin farklı eğitim dönemleri sonrasında elde edilen RMSE, MADE ve MAPE değerleri sırasıyla 0,1905, 0,1311 ve 0,0036 olarak kaydedilmiştir. Bu değerler, modelin veri seti üzerinde oldukça düşük hata oranları ile yüksek doğrulukta tahminler yapabildiğini göstermektedir. Benzer şekilde, veri setinde yer alan diğer özellikler ve modeller için de performans değerlendirilmiş ve genel olarak eğitim dönemi sayısı arttıkça modelin performansının iyileştiği gözlemlenmiştir. Ancak 500 eğitim döneminden sonra modelin başarısında negatif yönde bir etkinin olduğu gözlemlenmiştir. H2/CO verileri için ise LSTM ve CNN-LSTM modellerinin özellikle yüksek eğitim dönemi değerlerinde oldukça düşük RMSE, MAE ve MAPE değerleri elde ettiği

görülmektedir. Bu da zamanla modelin bu veri türünü daha iyi tahmin edebildiğini göstermektedir. C (%) ve H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> veri setlerinde de benzer iyileşmeler ve düşük hata oranları dikkat çekmektedir.

## 5. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, farklı regresyon modellerinin (SVR, LSTM, CNN-LSTM) performansları, CONMET (%), H<sub>2</sub>/CO, C (%), ve H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> gibi zaman serisi veriler üzerinde değerlendirilmiştir. Model performanslarını değerlendirmek için kullanılan RMSE, MADE ve MAPE metrikleriyle, CNN-LSTM modelinin özellikle 500 eğitim dönemi sonunda diğer modellere göre üstün performans sergilediği belirlenmiştir. Diğer modellere göre daha düşük performans gösteren SVR modelinin, özellikle karmaşık zaman serisi verileri gibi yüksek boyutlu ve karmaşık yapıya sahip veri setlerinde daha düşük performans gösterdiği bilinmektedir. Bu durumun çalışmada kullandığımız veri seti üzerinde düşük performans göstermesinin temel nedenleri arasında modelin doğrusal ve doğrusal olmayan ilişkileri modelleme kapasitesinin sınırlı olması yer almaktadır. SVR, veriler arasındaki ilişkileri yalnızca belirli bir çekirdek fonksiyonu aracılığıyla yakalamakta ve bu da modelin karmaşık ilişkileri öğrenme yeteneğini sınırlamaktadır.

CNN-LSTM modeli, CNN'in karmaşık özellikleri algılama yeteneği ve LSTM'in zaman serisi verilerdeki uzun süreli bağımlılıkları öğrenme kabiliyeti ile güçlendirilmiştir. CNN katmanları, verilerden çok düzeyli özellikler çıkarabilir ve bu özellikler LSTM katmanlarına beslenir. LSTM, bu özelliklerin zaman içinde nasıl değiştiğini anlamak için hafıza mekanizmasını kullanır. Böylece uzun vadeli bağımlılıklar ve ilişkiler model içinde korunur ve tahmin edilir. Bu bütünleşmiş yaklaşım, CNN-LSTM modelinin zaman serisi veriler üzerinde özellikle etkili olmasını sağlar ve SVR modeline göre daha dinamik ve karmaşık veri yapılarını daha başarılı bir şekilde modelleyebilmesine olanak tanır. CNN-LSTM modeli için 750 eğitim dönemi sonunda elde edilen RMSE, MADE ve MAPE değerleri eğitim dönemi süresinde farklılıklar göstermektedir. RMSE, MADE ve MAPE değerleri sırasıyla 0.1905, 0.1311 ve 0.0036 olarak ölçülmüştür. Bu değerler modelin farklı eğitim dönemlerinde modellerin tahmin doğruluğu hakkında bilgi vermektedir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, eğitim dönemlerinin artırılmasının model başarısı üzerinde her zaman pozitif etki yapmadığı görülmüştür.

Birçok çalışmada göz ardı edilen modelin hesaplama sürecine dair detaylar, bir makine öğrenmesi projesinin uygulanabilirliği ve sürdürülebilirliği açısından önem taşır. Bu bilgiler, modelin gerçek dünya koşullarında ne kadar etkin ve verimli çalışabileceğini gösterir. Özellikle, modelin eğitim ve test süreleri, kullanılan donanımın kapasitesi ve maliyeti, modelin farklı donanımlarda nasıl performans gösterdiği gibi faktörler, modelin son kullanıcılar tarafından kabul edilebilirliğini doğrudan etkiler. Bu nedenle modelin hesaplama sürecinin detayları, akademik araştırmaların yanı sıra endüstriyel uygulamalar için de büyük önem taşır. Çalışma kapsamında geliştirilen CNN-LSTM modeli, 750 eğitim dönemi sonucunda test kümesindeki verileri 83 saniyede tahmin edebilmiştir. Her bir veri noktasının işleme süresi ise yaklaşık 0,05 saniye olmuştur. İlgili modelin eğitim süreci NVIDIA Geforce RTX 3060 Ti ekran kartı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve bu süreç yaklaşık 2 saat 75 dakika sürmüştür. Modelin test işlemleri ise ekran kartı kullanılmadan, Intel i7 işlemci ve 16 GB RAM kapasitesine sahip bir bilgisayar ile yapılmıştır. Bu bilgiler, modelin gerçek dünya uygulamalarında kullanımının maliyet ve zaman açısından değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.

Gelecek çalışmalarda, modelin başarısını artırmak için farklı endüstrilerden ve farklı türde veri kümelerinden veriler kullanılabilir. Ayrıca modelin hesaplama verimliliğini artırmak için donanım optimizasyonları, paralel işleme teknikleri ve daha gelişmiş parametre ayarlama yöntemleri entegre edilebilir. Bu yaklaşım modelin daha geniş uygulama alanlarında etkin bir şekilde kullanılmasını sağlayarak, endüstriyel uygulamalar ve bilimsel araştırmalar için yenilikçi çözümler sunabilir. Modelin eğitim ve test süreçlerinde kullanılan donanımın detaylarını dikkate almak, modelin uygulama maliyetini ve erişilebilirliğini optimize edecektir. Bu çalışmanın sonuçları, karmaşık zaman serisi verilerinin modelleme ve tahmin yeteneklerini geliştirme potansiyeli taşıdığından, gelecekteki teknolojik ve bilimsel ilerlemeler için bir zemin hazırlamıştır.

**Kaynaklar**

- [1] Kougias PG, Angelidaki I. Biogas and its opportunities - A review Keywords. *Front. Environ. Sci.* 2018; 12(June):1-22.
- [2] Abanades S. A conceptual review of sustainable electrical power generation from biogas. *Energy Sci. Eng.* 2022; 10(2):630-655, doi: 10.1002/ese3.1030.
- [3] Phan TS. Hydrogen production from biogas: Process optimization using ASPEN Plus. *International Journal of Hydrogen Energy*; 47(100): 42027-42039. 2022. HAL Id: hal-03563223.
- [4] Vita A, Italiano C, Previtali D, Fabiano C, Paella A, Freni F, Bozzano G, Pino L, Manenti F. Methanol synthesis from biogas: A thermodynamic analysis. *Renew. Energy* 2018; 118: 673-684, doi: 10.1016/j.renene.2017.11.029.
- [5] da Silva Pinto RL, Vieira AC, Scarpetta A, Marques FS, Jorge RMM, Bail A, Jorge LMM, Corazza ML, Ramos LP. An overview on the production of synthetic fuels from biogas. *Bioresour. Technol. Reports*, 2022; 18(1): 101104. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101104>.
- [6] Minutillo M, Perna A, Sorce A. Green hydrogen production plants via biogas steam and autothermal reforming processes: energy and exergy analyses. *Appl. Energy*, 2020; 277: 115452. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115452>.
- [7] Chein RY, Chen WH, Chyuan Ong H, Loke Show P, Singh Y. Analysis of methanol synthesis using CO<sub>2</sub> hydrogenation and syngas produced from biogas-based reforming processes. *Chem. Eng. J.* 2021; 426:130835. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130835>.
- [8] Marchese M, Giglio E, Santarelli M, Lanzini A. Energy performance of Power-to-Liquid applications integrating biogas upgrading, reverse water gas shift, solid oxide electrolysis and Fischer-Tropsch technologies. *Energy Convers. Manag.* 2020; 6: 100041. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2020.100041>.
- [9] Al-Wahaibi A, Osman AI, Al-Muhtaseb AAH, Alqaisi O, Baawain M, Fawzy S, Rooney DW. Techno-economic evaluation of biogas production from food waste via anaerobic digestion. *Sci. Rep.* 2020; 10(1):1-16. doi: 10.1038/s41598-020-72897-5.
- [10] Roy PS, Song J, Kim K, Park CS, Raju ASK. NCO<sub>2</sub> conversion to syngas through the steam-biogas reforming process. *J. CO<sub>2</sub> Util.* 2018; 25:275-282. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2018.04.013>.
- [11] Zhao X, Joseph B, Kuhn J, Ozcan S. Biogas Reforming to Syngas: A Review. *iScience*, 2020; 23(5): 101082. doi: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101082>.
- [12] Lee J, Hong S, Cho H, Lyu B, Kim M, Kim J, Moon I. Machine learning-based energy optimization for on-site SMR hydrogen production. *Energy Convers. Manag.* 2021; 244: 114438. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114438>.
- [13] Byun M, Lee H, Choe C, Cheon S, Lim H. Machine learning based predictive model for methanol steam reforming with technical, environmental, and economic perspectives. *Chem. Eng. J.* 2021; 426: 131639. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131639>.
- [14] Abdelkareem MA, Soudan B, Mahmoud MS, Sayed ET, AlMallahi MN, Inayat A, Olabi AG. Progress of artificial neural networks applications in hydrogen production. *Chem. Eng. Res. Des.* 2022; 182: 66-86. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.03.030>.
- [15] Irie K, Tüske Z, Alkhoulî T, Schlüter R, Ney H. LSTM, GRU, highway and a bit of attention: An empirical overview for language modeling in speech recognition. *Annu. Conf. Int. Speech Commun. Assoc.* 08-12-Sept, pp. 3519–3523, 2016, doi: 10.21437/Interspeech.2016-491.
- [16] Chen Y, Fu Z. Multi-Step Ahead Forecasting of the Energy Consumed by the Residential and Commercial Sectors in the United States Based on a Hybrid CNN-BiLSTM Model. *Sustain.* 2023;15(3):1-15. doi: 10.3390/su15031895.
- [17] Chicco D, Warrens MJ, Jurman G, The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *PeerJ Comput. Sci.* 2021; 7:1-24. doi: 10.7717/PEERJ-CS.623.
- [18] Barupal DK, Fiehn O. Generating the blood exposome database using a comprehensive text

- mining and database fusion approach. *Environ. Health Perspect.* 2019; 127(9): 2825-2830. doi: 10.1289/EHP4713.
- [19] Khair U, Fahmi H, Al Hakim S, Rahim R. Forecasting Error Calculation with Mean Absolute Deviation and Mean Absolute Percentage Error. *J. Phys. Conf. Ser.* 2017; 930(1):1-9. doi: 10.1088/1742-6596/930/1/012002.
- [20] De Myttenaere A, Golden B, Le Grand B, Rossi F. Mean Absolute Percentage Error for regression models. *Neurocomputing* 2016; 192: 38-48. doi: 10.1016/j.neucom.2015.12.114.



## **BAMBU LİFİNİN TAKIM ELBİSELİK KUMAŞLARDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN VE PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI**

**Belkıs ZERVENT ÜNAL<sup>1</sup>, Mert KUTGI<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye.

<sup>2</sup> Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye.

Geliş Tarihi/Received Date: 31.01.2024 Kabul Tarihi/Accepted Date: 06.07.2024 DOI: 10.54365/adyumbd.1428849

### **ÖZET**

Çalışma kapsamında, takım elbiselik kumaşlarda doğal liflerle (pamuk, yün, keten, ipek vb.) karışım olarak kullanılan sentetik (polyester, Poliamid vb.) ve rejenere selülozik (viskon vb.) liflerin yerine alternatif olarak bambu lifinin kullanılabilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla aynı konstrüksiyona sahip viskon/yün/elastan, bambu/yün/elastan ve PES/yün/elastan karışımlı kumaşların seçilmiş parametrelere göre temel performans özellikleri (mukavemet, boncuklanma, haslıklar v.b) karşılaştırılmıştır. Elde edilen verilere göre bambu lifinin tek başına veya yün ile karışım halinde kullanıldığı kumaşların seçilmiş performans özelliklerinin klasik takım elbiselik kumaşlarla benzer değerler aldığı ve bambu kullanımının herhangi bir olumsuz duruma neden olmadığı sonucuna varılmıştır. Başka bir ifadeyle bambu lifinin takım elbiselik kumaşlarda kullanılabilir olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** *Bambu lifi, Takım elbiselik kumaş, Performans özellikleri, Sürdürülebilirlik, Kimyasal lif*

## **INVESTIGATION OF THE USABILITY AND PERFORMANCE OF BAMBOO FIBER IN SUIT FABRICS**

### **ABSTRACT**

Within the scope of the study, it was aimed to investigate the usability of bamboo fiber as an alternative to synthetic (polyester, polyamide, etc.) and regenerated cellulosic (viscose, etc.) fibers used as a mixture with natural fibers (cotton, wool, linen, silk, etc.) in suit fabrics. For this purpose, basic performance properties (strength, pilling, fastness etc.) of viscose/wool/elastane, bamboo/wool/elastane and PES/wool/elastane blended fabrics with the same construction were compared. According to the data obtained, it was concluded that the selected performance properties of the fabrics in which bamboo fiber is used alone or in a mixture with wool are similar to those of classical suit fabrics, and the use of bamboo does not cause any negative situation. In other words, it has been determined that bamboo fiber can be used in suit fabrics.

**Keywords:** *Bamboo fiber, Suiting fabric, Performance properties, Sustainability, Chemical fiber*

### **1. Giriş**

Türkiye ve dünyada ihracat rakamlarında oldukça büyük paya sahip olan tekstil sektöründe istek ve ihtiyaçların giderek artması, tüketici zevklerinin değişmesi, yaşam standartlarının yükselmesi, tüketici bilincinin ve rekabetin artması sektörde yeni hammadde ve üretim yöntemlerine ihtiyacı doğurmuştur.

\* e-posta<sup>1</sup> : [belzer@cu.edu.tr](mailto:belzer@cu.edu.tr)

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8591-2217> (Sorumlu Yazar)

e-posta<sup>2</sup> : [mertkutgi@gmail.com](mailto:mertkutgi@gmail.com)

ORCID ID: <http://orcid.org/0009-0003-2728-4066>

Kimyasal liflerin üretim sürecinde zararlı atıkların oluşabilmesi, tüketicilerin tekstil ürünlerinden yüksek konfor beklemesi ve sağlıklı yaşama giderek artan önem doğal liflere olan talebi arttırmıştır. Gelişen teknolojiyle ekolojik denge ve çevreci yaklaşımlar her alanda olduğu gibi tekstil sektöründe de önemli hale gelmiştir. Ayrıca ürünlerden beklenen özelliklerin giderek değişmesi ve artması üreticileri yeni hammadde arayışına yöneltmiş, tekstil ürünlerinde doğal liflerin kullanılması yönünde gelişme kaydedilmeye başlanmıştır.

Yeni hammadde ve ürünlere olan ihtiyacın hızla arttığı tekstil sektöründe son yıllarda kullanımı giderek yaygınlaşan liflerden olan bambu, üretiminde çevreye zarar vermemesi ve doğada kolayca parçalanabilmesi gibi olumlu çevreci etkileri, antibakteriyel ve antialerjik özelliği, dayanımı, UV koruyuculuk, parlaklık, yumuşaklık, nefes alabilirlik, vücutta oluşan terin hızla emilmesi ve bu şekilde serinlik hissi vermesi gibi konfor sağlayan özelliklerinden dolayı oldukça önemli bir elyaf haline gelmiştir [1, 2].

Bambu, tropikal iklim seven, 3 – 4 yıl gibi bir sürede olgunluğa erişen bir bitkidir. Kağıt, mobilya, gıda, kimya endüstrisi gibi bir çok alanda kullanılmaktadır. Bambu lifi ilk olarak 2002’de Çin’de bulunan Hebei Jigao Chemical Fiber Co. Ltd. adlı firma tarafından rejenere selülozik elyaf olarak üretilmiştir. Bambu bitkisinin gövdesinin ve yapraklarının hidroliz-alkalizasyon ve çok fazlı ağartma işlemleri ile inceltmesi ve arıtılması sonucu bambu hamuru oluşmaktadır. Ardından bambu hamuru, viskon lifine benzer lif üretim prosesleri ile bambu lifine dönüştürülmektedir.

Doğal bambu liflerinin mikroskopik görüntülerine bakıldığında boyuna kesitinde birçok küçük oyuk olduğu, enine kesitinin ise tam oval olmayan, böbrek şeklinde olduğu ve ortada açık şekilde bir lümen bulunduğu görülmektedir (Şekil 1). Doğal kanallı bu yapı lifin insan terini hızla emerek buharlaşmasını sağlamaktadır ve bu nedenle “nefes alan lifler” olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 1. Bambu lifinin boyuna ve enine kesiti [3].

Erkek ve bayan iç ve dış giyim ürünleri, çoraplar, hijyenik ürünler ve tıbbi tekstil ürünleri, havlu, yatak çarşafı, nevresim, battaniye gibi ev tekstili ürünleri bambu lifinin yaygın kullanım alanlarına örnek olarak verilebilmektedir [4].

Çalışma kapsamında bambu lifinin takım elbiselik kumaşlarda sentetik ve rejenere selülozik liflerin yerine kullanımı araştırılmış olup bambu elyafının tekstil endüstrisinde kullanımıyla ilgili daha önce yapılan çalışmalardan seçilmiş olanlar aşağıda özetlenmiştir.

Elibüyük ve arkadaşlarının 2018 yılında yapmış oldukları deneysel çalışmada, bambu ve pamuk elyafları karıştırılarak üretilen kumaş %100 pamuklu kumaş ile fiziksel özellikler, boyanma davranışı vb. açılardan karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda bambu-pamuk karışımı kumaşların hava geçirgenliğinin düşük, hidrofilitesinin yaklaşık 2 kat fazla olduğu, daha beyaz, aynı reaktif boyarmadde ile boyandığında daha koyu ve haslıklarının ise %100 pamuklu kumaş ile aynı değerde olduğu görülmüştür [5].

Türksoy ve arkadaşlarının 2017 yılında yapmış oldukları deneysel çalışmada bambu/pamuk karışımı ipliklerden örme yöntemiyle elde edilen kumaşların termal konfor özellikleri incelenmiştir. Çalışma sonucunda, %70/30 oranında bambu/pamuk karışımı kumaşların, diğer numune kumaşlara göre daha düşük su buharı ve termal dirence sahip olduğu tespit edilmiştir [6].

Okur'un yapmış olduğu deneysel çalışmasında bambu lifi ve bu liflerden üretilen ipliklerin özellikleri seçilmiş farklı lif ve ipliklerin performans özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, üretilen bambu ipliklerin özelliklerinin %100 viskondan üretilen ipliklerin özellikleri ile yakın olduğu belirlenmiştir. Ayrıca iplik düzgünlüğü ve kopma uzama değerlerinin diğer ipliklerden daha iyi düzeyde olduğu tespit edilmiştir [2].

Troynikov ve arkadaşlarının 2011 yılında yapmış oldukları çalışmada spor giyimde kullanılan yün/bambu ve yün/polyester örme kumaşların neme karşı davranış özellikleri incelenmiştir. Sonuç olarak yünün polyester veya yünün bambu ile karıştırılması, %100 yün ve %100 bambu kumaşlara kıyasla nem yönetimi özelliklerini iyileştirmiştir [7].

Chindambaram ve Govindan'ın 2012 yılında yapmış oldukları çalışmada bambu/pamuk karışımı dokuma kumaşlardaki karışım oranının termal özelliklere etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak yüksek bambu içeren kumaşlar aynı şartlarda üretilmiş pamuklu kumaşlara göre; daha fazla hava ve su geçirgenliğine sahip, daha emici, düşük termal dirence sahip, kısmen daha yüksek esneklik becerisi gösterir olduğu sonuçlarına varılmıştır [8].

Özşeker'in 2018 yılında yapmış olduğu deneysel çalışmada bambu, pamuk ve viskon lifinden üretilen kumaşların spor kıyafet üretiminde kullanımı araştırılmıştır. Sonuç olarak çalışmada kullanılan tüm lifler içerisinde konfor özellikleri açısından spor kıyafetlere en uygun hammaddenin bambu olduğu tespit edilmiştir [9].

Gökdal yapmış olduğu çalışmanın birinci bölümünde bambu ve pamuk liflerini farklı karışım oranlarında kullanarak farklı numaralarda iplikler üretmiş ve karışım oranlarının iplik özelliklerine etkisini araştırmıştır. İkinci bölümde ise üretilen ipliklerle örme yüzey elde etmiş ve bu kumaşlara pilling ve sürtünme testleri uygulamıştır. En yüksek mukavemet % 100 bambu iplikten örülen kumaşlarda, en iyi pilling değerleri ise % 50 bambu % 50 penye pamuk iplikten örülen kumaşa elde edilmiştir [10].

Özmen'in 2010 yılında yapmış olduğu tez çalışmasında %100 bambu ve %100 pamuk ipliğinden üretilmiş havlu kumaşların kullanım özellikleri açısından karşılaştırılması yapılmıştır. Araştırma sonucunda %100 bambu ipliğinden üretilmiş havlu kumaşların yumuşaklık, hidrofilite ve anti-bakteriyellik özelliklerinin daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca yıkamaya karşı renk haslığının ise pamuklu havlu kumaşlardan daha düşük olduğu görülmüştür [11].

Okubo ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmalarında bambu liflerinin temel fiziksel özellikleri yardımıyla ekokompozitlerin (ekolojik amaçlı kompozitlerin) geliştirilmesi amaçlanmıştır. Yapılan çalışmada bambu ağaçlarından bambu liflerinin ayrılması amacıyla buhar patlaması yöntemi kullanılmıştır [12].

Liu ve arkadaşları çalışmalarında öncelikle bambu lifinin üretim prosesini, boyanma davranışını ve lif özelliklerini incelemişlerdir. Ardından %100 bambu ipliklerden ve bambu lifini PET ile kaplayarak elde edilen ipliklerden örme kumaş üretimi gerçekleştirmişlerdir. Bununla birlikte, bambu lifinin yumuşaklık, antibakteriyellik, hava geçirgenlik, UV dayanımı gibi birçok olumlu özelliğinin yanı sıra düşük yaş mukavemetinin boyama işlemlerinde kısıtlayıcı bir rol oynayabildiği ifade edilmiştir [13].

Yapılan literatür taraması sonucu ağırlıklı olarak bambu lifinin iç giyim, havlu, çorap vb. ürünlerde kullanımına yönelik çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Bunun yanı sıra parke, izolasyon malzemesi gibi ürünlerde de kullanımı tespit edilmiş olup bambunun takım elbiselik kumaş gibi dış giyim ürünlerinde kullanımının araştırıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Çalışma süresince yapılan piyasa araştırması sonucunda sadece bir firmanın bambu lifinin sentetiklerle karışım halinde kullanıldığı ceket üretimi gerçekleştirdiği görülmüştür. Bu karışımlar %49 bambu, %31 polyester, %20 keten ve %54 bambu, %27 yün, %19 polyester şeklinde olmuştur [14].

Ancak bambunun tek başına veya sürdürülebilir doğal bir lifle karışım halinde kullanıldığı ticarileşmiş bir ürüne rastlanmamıştır.

Çalışmanın amacı; takım elbiselerde doğal liflerle (pamuk, yün, keten, ipek vb.) karışım olarak kullanılan sentetik (polyester, poliamid vb.) ve rejener selülozik (viskon vb.) liflerin yerine doğal olarak elde edilen bambu lifinin kullanılabilirliğini araştırmaktır. Elde edilen veriler ışığında bambu lifinin özelliklerinin diğer liflerle karşılaştırmalı olarak incelenmesiyle, iplik performansları, hammadde maliyetleri de dikkate alınarak bambu lifinin takım elbiselik kumaşlardaki performansı seçilmiş parametrelere göre değerlendirilip kimyasal liflerin yerine kullanımı incelenmiştir. Böylece sentetik liflerin kumaşa verdiği olumsuz özelliklerden biri azaltılarak %100 doğal, geri dönüşümü mümkün olan ve üretimi sırasında çevreyi daha az kirleten takım elbiselik bir kumaş elde edilmesinin mümkün olacağı ve söz konusu kumaşın sentetik lif içeren muadilleriyle performans açısından karşılaştırılmış olacağı düşünülmektedir.

## 2. Materyal ve Metot

Takım elbiselik kumaşlarda genel olarak polyester, viskon, pamuk, keten ve yün lifleri kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında bu alanda ticari kullanımı çok sınırlı durumda olan bambu lifinin takım elbiselik kumaşlarda kullanılabilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Özellikle en yaygın kullanılan lif olan polyester yerine bambunun kullanımının irdelenmesi çalışmanın öncelikli amacı olmuştur.

Çalışma kapsamında takım elbiselik kumaş üretiminde yaygın kullanılan kumaşlar ve bambu içeren kumaş olmak üzere üç farklı kumaş ele alınmış ve numune olarak kullanılacak üç farklı kumaş için üç farklı iplik (bambu/yün/elastan, pes/yün/elastan ve viskon/yün/elastan) üretimi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra elyaf boyalı bu iplikler kullanılarak dokunan kumaşlar bitim işlemlerinden geçirilmiştir.

### 2.1. Materyal

#### 2.1.1. Numune iplik özellikleri

Numune dokuma kumaş üretiminde çözgüde pes/yün, viskon/yün ve bambu/yün iplikler kullanılmıştır. Atkıda ise bu elyaflara 44 dtex siyah elastan katılmış iplikler tercih edilmiştir. Numune ipliklerin üretiminde kullanılan bambu lifi 1,4 dtex\*38, PES lifi 1,6 dtex\*38, yün lifi 20,5 mikron ve viskon lifi ise 1,7 dtex\*39 inceliktedir.

#### 2.1.2. Kumaş konstrüksiyon bilgileri

Çalışma kapsamında kullanılan kumaşlar, karışıklığı önlemek ve yorumların daha anlaşılır olmasını sağlamak açısından kodlanmıştır. Söz konusu kodlama aşağıda verilmiştir.

- Bambu/Yün/Elastan: N1
- Viskon/Yün/Elastan: N2
- PES/Yün/Elastan: N3

N1, N2 ve N3 kodlu kumaşların ham konstrüksiyon özellikleri Çizelge 1'de detaylı olarak verilmiştir. Numune kumaşların dokuma işleminde tarak eni, tarak numarası, fonda tel adedi, kenar tel adedi, toplam tel adedi, desen – taharları ve çekilen çözgü sayıları sabit tutulmuştur.

Çizelge 1. Numune kumaşların ham konstrüksiyon özellikleri.

| Numune Kodu                       | N1                | N2                 | N3              |
|-----------------------------------|-------------------|--------------------|-----------------|
| Lif Cinsi ve Oranı                | % 54Bambu         | %54 Viskon         | % 54 Pes        |
|                                   | %44 Yün           | %44 Yün            | %44 Yün         |
|                                   | % 2 Elastan       | %2 Elastan         | %2 Elastan      |
| Kumaş Örgüsü                      | Fantazi           | Fantazi            | Fantazi         |
| Kumaş Gramajı (g/m <sup>2</sup> ) | 170               | 175                | 181             |
| Atkı Sıklığı (tel/cm)             | 27                | 27                 | 27              |
| Çözümlü Sıklığı (tel/cm)          | 30                | 30                 | 30              |
| Tarak Numarası                    | 135/2             | 135/2              | 135/2           |
| Tarak Eni (cm)                    | 200               | 200                | 200             |
| Atkı İplik Numarası (Ne)          | 44/2 Bambu/Yün    | 44/2 Viskon/Yün    | 44/2 Pes/Yün    |
| Çözümlü İplik Numarası (Ne)       | 44/2              | 44/2               | 44/2            |
|                                   | Bambu/Yün/Elastan | Viskon/Yün/Elastan | Pes/Yün/Elastan |

### 2.1.3. Numune kumaşların terbiye prosesi

N1, N2 ve N3 kodlu numune kumaşlara uygulanan terbiye aşamaları ve işlem şartları Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. N1, N2 ve N3 Kodlu numune kumaşlara uygulanan terbiye proses adımları.

| Proses Adımları   | N1 – N2 – N3 |               |                 |    |             |            |     |
|-------------------|--------------|---------------|-----------------|----|-------------|------------|-----|
|                   | Hız (m/dk)   | Sıcaklık (°C) | Besleme (Avans) | pH | Baskı (bar) | Program    | En  |
| Yıkama            | 20           | 95            | -               | 4  | -           | -          | 156 |
| Kurutma+<br>Fikse | 25           | 190           | 4               | -  | -           | -          | 155 |
| Yakma             | 100          | -             | -               | -  | -           | 3 çift yüz | 155 |
| Yıkama            | 17           | 95            | -               | 4  | -           | -          | 153 |
| Kurutma           | 20           | 120           | 4               | -  | -           | -          | 153 |
| Kade              | -            | -             | -               | -  | -           | 3          | 153 |
| Apri              | 15           | 120           | 3               | -  | -           | -          | 153 |
| Kade              | -            | -             | -               | -  | -           | 803        | 153 |
| Süper Fniş        | 15           | 100           | -               | -  | 40          | -          | 150 |

Apri işlemi ile kumaşın yüzeyini kaplamak, kayganlık sağlamak, yapı içerisindeki sürtünmeleri azaltmak, dökümlülüğü artırmak ve kumaş belirli bir kuvvette maruz kaldığında eski haline dönmesini sağlamak gibi özellikler kazandırmak için çalışma kapsamında numune kumaşlara apri işlemi uygulanmıştır.

**Sanforizasyon:** Selülozik liflerden yapılmış olan kumaşların çekmezlik işlemlerinde en etkili yöntem sanforizasyondur. Sanfor, kumaşı birçok yıkamadan sonra ulaşacağı boyutlara getirmektedir.

**Kade (dekatür):** Yünlü kumaşların boyut değişmezliğini geliştirmek, tutumlarını ve görünümünü istenen yönde etkilemek için kullanılır. Kumaşın dekatür makinesinde dekatür bezi arasında buharlandığı ya da sıcak su ile işleme sokulduğu, soğuk hava veya soğuk su ile soğutulduğu işlemidir [15].

**Islatma Airo Kurutma:** Kumaşı kimyasal ıslatıcılar ile ıslatmak ve daha sonra kuru sıcak hava ile çarptırma esasına dayanır. Kumaşa eski kullanılmış tuşesi vermek ve yumuşatmak için yapılmaktadır [15].

Çizelge 3'te verilen apre reçetesini kumaşa uygulama amaçları aşağıda özetlenmiştir.

- Makro silikon, apre kumaş yüzeyini kaplamak ve kayganlık sağlamak için kullanılmıştır.
- Mikro silikon, yapı içerisindeki sürtünmeleri azaltmak, dökümlülüğü artırmak ve kumaş belirli bir kuvvette maruz kaldığında eski haline dönmesini sağlamak için uygulanmıştır.
- Islatıcı, yapı içerisinde yüzey gerilimini arttırmak, aprenin yapı içerisine daha iyi nüfus etmesini sağlamak amacıyla kullanılmıştır.

**Çizelge 3.** N1, N2, ve N3 kodlu numune kumaşların apre reçetesi.

| G/L                      | APRE REÇETESİ | TOPLAM       |     |
|--------------------------|---------------|--------------|-----|
|                          |               | KG           | G   |
| 25                       | Makro silikon | 3            | 750 |
| 25                       | Mikro silikon | 3            | 750 |
| 1                        | Islatıcı      |              | 150 |
| <b>BANYO MİKTARI (L)</b> |               | <b>150 L</b> |     |

## 2.2. Metot

### 2.2.1. İpliklerin performans özelliklerinin belirlenmesi için uygulanan testler

Çalışmada numune kumaş üretiminde kullanılan ipliklerin Çizelge 4'te verilen seçilmiş performans özellikleri standart yöntemlerle test edilmiştir.

**Çizelge 4.** İpliklere uygulanan testler ve ilgili standartlar.

| Uygulanan Testin Adı | Standart No          |
|----------------------|----------------------|
| Düzensüzlük Tayini   | TS EN ISO 16549 [16] |
| Tüylülük Tayini      | TS EN ISO 12863 [17] |
| Mukavemet Tayini     | TS EN ISO 2062 [18]  |
| Elastikiyet Tayini   | TS EN ISO 2062 [18]  |

**Çizelge 5.** Kumaşlara uygulanan testler ve ilgili standartlar.

| Uygulanan Testin Adı                       | Standart No            |
|--|------------------------|
| Kopma Mukavemeti Tayini                    | TS EN ISO 13934-1 [19] |
| Yırtılma Mukavemeti Tayini                 | TS EN ISO 13937-2 [20] |
| Pilling Derecesi Tayini                    | TS EN ISO 12945-2 [21] |
| Tere Karşı Renk Haslığı Tayini             | TS EN ISO 105-E04 [22] |
| Sürtünmeye Karşı Renk Haslığı Tayini       | TS EN ISO 105-X12 [23] |
| Kuru Temizlemeye Karşı Renk Haslığı Tayini | BS EN ISO 105-D01 [24] |
| Spektrofotometre ile Renk Ölçümü           | -----                  |

### 2.2.2. Kumaşların performans özelliklerinin belirlenmesi için uygulanan testler

Yapılan çalışmada farklı hammaddelerden üretilmiş numune kumaşların seçilmiş fiziksel ve performans özellikleri değerlendirilerek bambu lifinin takım elbiselik kumaşlarda kullanılabilirliği araştırılmış olup bu amaçla numune kumaşlara Çizelge 5'te standart numaraları verilen testler uygulanmıştır.

## 3. Bulgular ve Tartışma

Çalışma kapsamında üretilen numune iplik ve kumaşların seçilmiş fiziksel ve performans özelliklerini belirlemek amacıyla materyal ve metot bölümünde verilen yöntemlerle uygulanan testlerin sonuçları aşağıda ayrı ayrı verilmiştir.

### 3.1. Numune ipliklere uygulanan test sonuçları

Çalışma kapsamında üretilen ipliklerin mukavemet, elastikiyet, düzgünlük ve tüylülük değerleri Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6. Numune ipliklerin test sonuçları.

| Numune Kodu | Numune İplik Harmanları              | Düzensizlik (%) | Tüylülük (S3) | Mukavemet (Rkm) | Elastikiyet (%) |
|-------------|--------------------------------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------|
| N11         | % 54 Bambu<br>%44 Yün<br>% 2 Elastan | 11,3            | 680           | 9,46            | 11,68           |
| N12         | %54 Viskon<br>%44 Yün<br>%2 Elastan  | 12,2            | 626           | 9,00            | 11,45           |
| N13         | % 54 Pes<br>%44 Yün<br>%2 Elastan    | 12,8            | 782           | 8,77            | 8,92            |

### 3.2. Numune kumaşlara uygulanan test sonuçları

DeneySEL çalışma kapsamında numune kumaşların seçilmiş performans özelliklerinden kopma mukavemeti, yırtılma mukavemeti ve pilling değerleri Çizelge 5'te verilmiş olan test yöntemleriyle tespit edilmiştir.

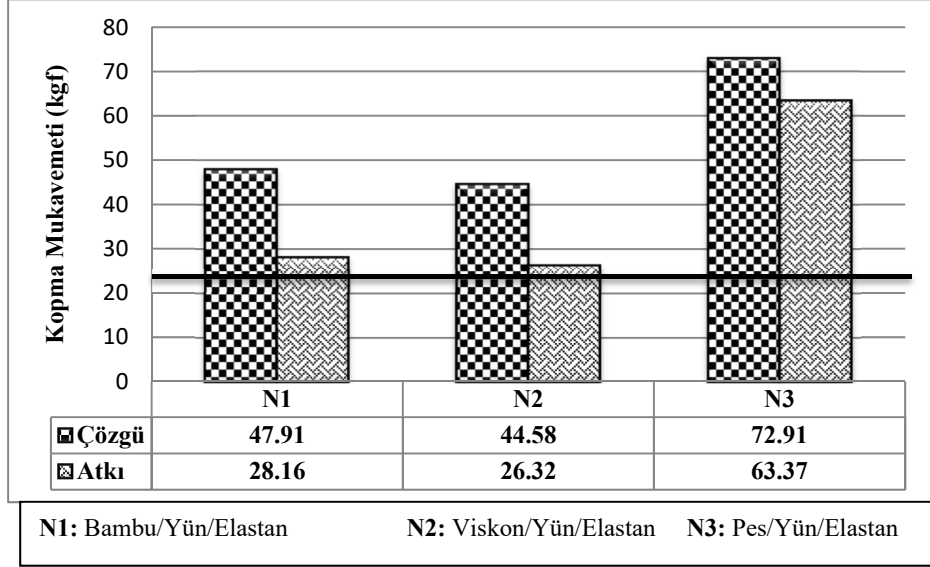
Ayrıca numune kumaşların terlemeye karşı, sürtünmeye karşı ve kuru temizlemeye karşı renk haslığı değerleri Çizelge 5'te verilmiş olan haslık test yöntemleriyle tespit edilmiştir. Söz konusu testler sonucu elde edilen değerler aşağıda ayrı ayrı verilmiş ve sonuçlar irdelenmiştir.

#### 3.2.1. Kopma mukavemeti tayini sonuçları

DeneySEL çalışma kapsamında numunelere uygulanan kopma mukavemeti tayini testi sonuçları Şekil 2'de grafiksel olarak irdelenmiştir.

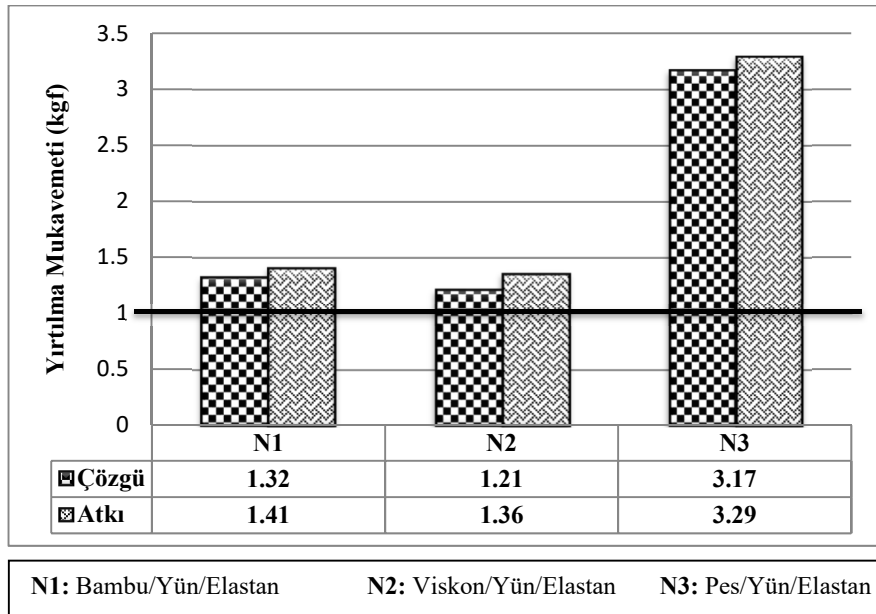
Takım elbiselik kumaş üretimi yapan işletmelerden müşteriler tarafından talep edilen kabul edilebilir kopma mukavemetinin atkı ve çözgü yönünde 25 kgf' ten büyük olduğu bilinmektedir [15]. Tüm numunelerin atkı ve çözgü kopma mukavemeti değerlerinin referans kabul edilen 25 kgf'den büyük olduğu tespit edilmiştir. Şekil 2'de görüldüğü gibi çözgü ve atkı kopma mukavemeti en yüksek çıkan

numune pes/yün/elastan karışımı N3 kodlu numune olmuştur. Bu numuneler dışında kalan bambu/yün/elastan karışımı N1 ve viskon/yün/elastan karışımı N2 kodlu numune kumaşların kopma mukavemeti değerlerinin de birbirine yakın olduğu görülmüştür.



Şekil 2. Numune kumaşların çözgü ve atkı kopma mukavemeti test sonuçları.

Takım elbise üretiminde yaygın kullanılan pes/yün/elastan karışımı N3 kodlu numune kumaşa göre bambu/yün karışımı N1 kodlu numune kumaşın kopma mukavemeti düşük gelse de yaygın kullanıma sahip olan viskon/yün/elastan karışımı N2 kodlu numune kumaşa göre yüksek olduğu görülmüştür. Sonuç olarak bambu lifinin tek başına veya yün lifi ile harmanlanarak kullanılmasıyla dokunan kumaşların kopma mukavemeti değerlerinin olumsuz etkilenmediği ve takım elbiselik olarak kullanıma uygun olduğu söylenebilmektedir.



Şekil 3. Numune kumaşların çözgü ve atkı yırtılma mukavemeti test sonuçları.



### 3.2.2. Yırtılma mukavemeti tayini sonuçları

Deneyisel çalışmada kapsamında numunelere uygulanan yırtılma mukavemeti tayini testi sonuçları Şekil 3'te grafiksel olarak irdelenmiştir.

Takım elbiselik kumaş üretimi yapan işletmelerden müşteriler tarafından talep edilen kabul edilebilir atkı ve çözgü yönündeki yırtılma mukavemeti değeri >1 kgf şeklindedir [15].

Şekil 3'te görüldüğü gibi çözgü ve atkı yırtılma mukavemeti en yüksek çıkan numune pes/yün/elastan karışımı N3 kodlu numune olmuştur. Bu durumun PES liflerinden dolayı ipliklerin kayarak grup oluşturmasından ve yırtılma mukavemetini yükseltmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu numuneler dışında kalan N1 ve N2 kodlu numune kumaşların yırtılma mukavemeti değerlerinin birbirine yakın çıktığı görülmüştür.

N1 ve N2 kodlu numunelerin yırtılma mukavemeti değerlerinin N3 kodlu numuneden düşük olsa da referans değer olarak kabul gören 1 kgf in üstünde geldiği görülmüştür. Bambu lifi ile üretilen N1 kodlu numune kumaşların yırtılma mukavemeti değerlerinin başka bir selüloz esaslı lif olan viskon lifi ile üretilen N2 kodlu numune kumaşa göre hem çözgü yönünde hem de atkı yönünde daha yüksek olduğu saptanmıştır. Buradan çıkacak olan sonuca göre bambu lifinin yırtılma mukavemetini olumsuz yönde etkilemediği ve takım elbiselik olarak kullanılabilceği söylenebilmektedir.

### 3.2.3. Boncuklanma (Pilling) tayini sonuçları

Deneyisel çalışma kapsamında numunelere uygulanan pilling tayini testi sonuçları toplu olarak Çizelge 7'de verilmiştir.

**Çizelge 7.** Numune kumaşların pilling tayini test sonuçları.

|                         | 2000 Devir |
|-------------------------|------------|
| N1 (Bambu/Yün/Elastan)  | 4          |
| N2 (Viskon/Yün/Elastan) | 4          |
| N3 (Pes/Yün/Elastan)    | 4-5        |

Takım elbiselik kumaş üretimi yapan işletmelerden talep edilen kabul edilebilir pilling değeri en az 4'tür. Ayrıca TS 2793'e göre de yünlü dış giyim ürünlerinin pilling değerlerinin minimum 4 düzeyinde olması istenmektedir [25]. Çizelge 7'deki sonuçlar incelendiğinde tüm numunelerin bu şartı sağladığı dolayısıyla sadece bambudan veya bambu karışımı olarak üretilen kumaşların takım elbise olarak kullanılmasının pilling değerleri açısından da bir problem yaratmadığı ve bambu kullanımının pilling özelliğini de olumsuz etkilemediği söylenebilmektedir.

### 3.2.5. Terlemeye karşı renk haslığı tayini sonuçları

Deneyisel çalışma kapsamında numunelere uygulanan terlemeye karşı renk haslığı tayini testi sonuçları toplu olarak Çizelge 8'de verilmiştir.

Takım elbiselik kumaş üretimi yapan işletmelerden müşteriler tarafından talep edilen tere, suya, yıkamaya, sürtünmeye ve kuru temizlemeye karşı renk haslığı değerleri koyu ve orta renkli numunelerde akma değeri için minimum 2-3 ve açık renkli kumaşlarda ise minimum 3 şeklindedir [15]. Bunun yanı sıra dış giyimde kullanılan yünlü dokuma kumaşlar için önemli performans özelliklerinin kullanım yerine göre sahip olması gereken minimum değerlerin verildiği TS 2793 numaralı standarda göre de yünlü dış giyim ürünlerinde tüm haslıkların akmada en az 4 olması istenmektedir [25]. Söz konusu

referans değerler, çalışma kapsamında ele alınan tüm renk haslığı değerleri için geçerlidir. Bu veriler doğrultusunda numunelerin test sonuçları incelendiğinde istenilen referans değerlerin üzerinde ve birbirine yakın olduğu görülmektedir.

**Çizelge 8.** Numune kumaşların terlemeye karşı renk haslığı test sonuçları.

|                            |          | Akma   |       |        |           |         | Solma |     |
|----------------------------|----------|--------|-------|--------|-----------|---------|-------|-----|
|                            |          | Asetat | Pamuk | Naylon | Polyester | Akrilik | Yün   |     |
| N1<br>(Bambu/Yün/Elastan)  | (Asidik) | 4-5    | 4-5   | 4-5    | 4-5       | 4-5     | 4-5   | 4   |
|                            | (Bazik)  | 4-5    | 4-5   | 4-5    | 4-5       | 4-5     | 4-5   | 4   |
| N2<br>(Viskon/Yün/Elastan) | (Asidik) | 4-5    | 4-5   | 4-5    | 4-5       | 4-5     | 4-5   | 4   |
|                            | (Bazik)  | 4-5    | 4-5   | 4-5    | 4-5       | 4-5     | 4-5   | 4   |
| N3<br>(Pes/Yün/Elastan)    | (Asidik) | 4-5    | 4-5   | 4-5    | 4-5       | 4-5     | 4-5   | 4-5 |
|                            | (Bazik)  | 4-5    | 4-5   | 4-5    | 4-5       | 4-5     | 4-5   | 4-5 |

Bu durumda bambu lifinin kullanımının takım elbiselik kumaş olarak değerlendirilmesinde, tere karşı renk haslığı açısından olumsuzluk yaratmadığı ve koyu renk olmasına rağmen oldukça iyi haslık değerleri elde edildiği görülmektedir.

### 3.2.6. Sürtünmeye karşı renk haslığı tayini sonuçları

DeneySEL çalışmada kapsamında numunelere uygulanan sürtünmeye karşı renk haslığı tayini testi sonuçları toplu olarak Çizelge 9'da verilmiştir.

**Çizelge 9.** Numune kumaşların sürtünmeye karşı renk haslığı tayini sonuçları

|                         | Kuru | Islak |
|-------------------------|------|-------|
| N1 (Bambu/Yün/Elastan)  | 4-5  | 2-3   |
| N2 (Viskon/Yün/Elastan) | 4    | 2-3   |
| N3 (Pes/Yün/Elastan)    | 4-5  | 3-4   |

Test sonuçları incelendiğinde sürtünmeye karşı kuru renk haslığının tüm numune kumaşlarda istenilen referans değerinde olduğu görülmüştür. Sürtünmeye karşı ıslak renk haslığı incelendiğinde N1 N2 ve N3 kodlu numune kumaşların test değerlerinin TS 2793'e göre istenilen referans değerinin altında olduğu tespit edilmiştir. Fakat takım elbiselik kumaş üretimi yapan işletmelerden talep edilen referans esas alındığında koyu renkli kumaşlar için kabul edilebilir bir değer olduğu söylenebilmektedir. Tüm numune kumaşların kuru ve ıslak sürtünmeye karşı renk haslığı test değerlerinin birbirine yakın olduğu saptanmıştır.

Sonuç olarak bambu lifinin kullanımı sürtünmeye karşı renk haslığına olumsuz bir etki yaratmamaktadır.

### 3.2.7. Kuru temizleme haslığı tayini sonuçları

DeneySEL çalışmada numune kumaşlara kuru temizleme haslığı tayini testi yapılmış olup test sonuçları Çizelge 10'da verilmiştir.

**Çizelge 10.** Numune kumaşların kuru temizleme haslığı tayini sonuçları.

|                         | Akma   |       |        |           |         | Solma |     |
|-------------------------|--------|-------|--------|-----------|---------|-------|-----|
|                         | Asetat | Pamuk | Naylon | Polyester | Akrilik |       | Yün |
| N1 (Bambu/Yün/Elastan)  | 4-5    | 4-5   | 4-5    | 4-5       | 4-5     | 4-5   | 4-5 |
| N2 (Viskon/Yün/Elastan) | 4-5    | 4-5   | 4-5    | 4-5       | 4-5     | 4-5   | 4-5 |
| N3 (Pes/Yün/Elastan)    | 4-5    | 4-5   | 4-5    | 4-5       | 4-5     | 4-5   | 4-5 |

Takım elbiselik kumaşların kuru temizleme yöntemi ile temizlenmesi önerilmektedir. Bu nedenle üretilen numune kumaşların kuru temizlemeye karşı renk haslığı test sonuçları büyük önem arz etmekte olup akma ve solma değerlerinin birbirine eşit ve istenilen referans düzeyinde olduğu tespit edilmiştir. Bambu lifinin takım elbiselik kumaşlarda kullanımının kuru temizleme haslığına olumsuz bir etkisi olmadığı görülmüştür.

### 3.2.8. Spektrofotometre ile renk ölçümü sonuçları

Deneyisel çalışmada numune kumaşlara spektrofotometre renk ölçüm cihazı kullanarak renk analizi yapılmıştır. Rengin sayısal olarak belirlenmesinde CIE LAB sistemi kullanılmış ve Standart Renk Değerleri (Tristimulus) olarak bilinen X,Y,Z ve bu değerlerden hesaplanan L\*, a\*, b\*, C\* ve h değerleri Çizelge 11’de verilmiştir.

**Çizelge 11.** Numune kumaşların CIE LAB. değerleri.

|                         | X    | Y    | Z    | L*    | a*   | b*    | C*   | h      |
|-------------------------|------|------|------|-------|------|-------|------|--------|
| N1 (Bambu/Yün/Elastan)  | 2.14 | 2.24 | 2.44 | 16,70 | 0,32 | -0,29 | 0,43 | 317,39 |
| N2 (Viskon/Yün/Elastan) | 2.29 | 2.40 | 2.60 | 17,46 | 0,37 | -0,19 | 0,42 | 332,5  |
| N3 (Pes/Yün/Elastan)    | 2.23 | 2.33 | 2.56 | 17,15 | 0,42 | -0,43 | 0,6  | 314,0  |

Takım elbise üretiminde en yaygın kullanılan kumaş, çalışmada N3 kodlu ile yer alan pes/yün/elastan kumaş olduğu için bu numune referans kumaş olarak seçilmiş ve diğer numunelerin renginin N3 kodlu numuneye göre D65 gün ışığında renk karşılaştırılması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 12’de verilmiştir.

**Çizelge 12.** Numune kumaşların ΔE renk farkı değerleri.

| Referans Numune       | Karşılaştırılan Numune | ΔL                     | Δa     | Δb                  | ΔC     | ΔH    | ΔE   |
|-----------------------|------------------------|------------------------|--------|---------------------|--------|-------|------|
| N3                    | N1                     | -0,453                 | -0,099 | 0,140               | -0,169 | 0,030 | 0,48 |
|                       | N2                     | 0,308                  | -0,045 | 0,239               | -0,182 | 0,162 | 0,39 |
| N1: Bambu/Yün/Elastan |                        | N2: Viskon/Yün/Elastan |        | N3: Pes/Yün/Elastan |        |       |      |

Bu doğrultuda Çizelge 12’de verilen değerler incelendiğinde N1 ve N2 karışimli kumaşlar ile N3 kodlu numune kumaş arasında oldukça az bir renk farklılığı olduğu söylenebilmektedir. N1 kodlu numune kumaşta kullanılan bambunun N2 kodlu numune kumaşta bulunan viskon lifine bazı özelliklerinin yakın olduğu bilinmektedir. Buradan yola çıkarak N2 kodlu numune kumaşı referans olarak N1 kodlu numune kumaş ile aralarındaki renk farklılıkları incelenmiş olup Çizelge 13’te verilmiş olup değerler incelendiğinde N1 ve N2 kodlu numune kumaşların renk farkı ( $\Delta E$ ) değerinin düşük olduğu görülmüştür.

**Çizelge 13.** N1 ve N2 numune kumaşların  $\Delta E$  renk farkı değerleri.

| Referans Numune       | Karşılaştırılan Numune | $\Delta L$             | $\Delta a$ | $\Delta b$ | $\Delta C$ | $\Delta H$ | $\Delta E$ |
|-----------------------|------------------------|------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| N2                    | N1                     | -0,761                 | -0,054     | -0,099     | 0,013      | 0,112      | 0,77       |
| N1: Bambu/Yün/Elastan |                        | N2: Viskon/Yün/Elastan |            |            |            |            |            |

### 3.2.9. Maliyet değerlendirmesi

#### 3.2.9.1. Numune kumaşların elyaf maliyetlerinin kıyaslama

Maliyet açısından viskon, pes, yün ve bambu liflerinin fiyatları değerlendirecek olursa aşağıdaki rakamlara ulaşılabilmektedir (Bambu: Filofibra Viskon: Filofibra Yün: Fuhrmann Polyester: SASA).

1. Polyester; 1,60 \$/Kg
2. Yün; 13,00 \$/Kg
3. Viskon; 2,90 \$/Kg
4. Bambu; 2,10 \$/Kg

Doğal liflerin sentetik liflere göre daha pahalı oldukları görülmektedir. Bu durum doğal liflerin doğadan alınıp işlenebilir hammadde haline gelene kadar gördüğü proseslerden kaynaklanmaktadır. Sentetik liflerin üretimi doğal liflere nazaran daha basit olup daha uygun maliyetlere elde edilmektedir.

Her ne kadar bambu lifinin polyestere göre daha maliyetli oluşu dezavantaj gibi gözükse de artık dünyada yenilenebilir, doğaya zarar vermeyen veya daha az zarar veren hammadde kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Ayrıca kullanılan lifler içerisinde en maliyetli lifin yün lifi olduğu görülmektedir. Fakat doğal liflerle üretilen kumaşların doğada sentetik liflere göre daha kısa sürede yok olması ve zarar vermemesi başlı başına doğal liflerin tercih edilmesine sebeptir.

#### 3.2.9.2. Numune mamul kumaşların maliyetlerinin kıyaslaması

Çalışma kapsamında üretilen numune kumaşların birim maliyetleri Çizelge 14’te verilmiştir. Bu hesaplamada; hammadde maliyetleri, işçilik, enerji tüketimi, su ve kimyasal tüketimi göz önünde bulundurulmuştur. Bambu içeren N1 kodlu numune kumaşın birim maliyetinin N2 ve N3 kodlu numunelerin maliyetlerine çok yakın olduğu ve bambu kullanımının maliyet açısından bir olumsuzluk yaratmadığı görülmüştür

**Çizelge 14.** Numune kumaşların maliyeti.

|                         | Maliyet (\$/m <sup>2</sup> ) |
|-------------------------|------------------------------|
| N1 (Bambu/Yün/Elastan)  | 8,22                         |
| N2 (Viskon/Yün/Elastan) | 8,72                         |
| N3 (Pes/Yün/Elastan)    | 8,17                         |

#### 4. Sonuç

Çalışma kapsamında bambu lifinin takım elbiselik kumaşlarda kullanılabilirliğinin araştırılması amaçlanmış olup bu kapsamda bambu lifinin tek başına veya karışım halinde kullanıldığı kumaşlar üretilmiş ve yaygın kullanılan takım elbiselik kumaşlarla performans açısından kıyaslanmıştır. Uygulanan deneysel çalışma sonucu elde edilen sonuçlardan seçilmiş olanlar aşağıda özetlenmiştir.

1. Genel anlamda N1, N2 ve N3 kodlu numune kumaşların konstrüksiyon özellikleri sabit tutulduğunda kopma mukavemeti değerlerinin istenilen referans değerlerin üstünde olduğu görülmüş, bambu elyafının kullanımının kumaş dayanımını olumsuz etkilemediği tespit edilmiştir.
2. N1, N2 ve N3 kodlu kumaşların yırtılma mukavemeti değerlerinin istenilen referans değerlerin üstünde olduğu görülmüş, bambu elyafının takım elbiselik kumaşlarda kullanımının yırtılma mukavemeti test sonuçlarına olumsuz etki etmediği tespit edilmiştir.
3. TS 2793'e göre yünlü dış giyim ürünlerinde istenilen minimum pilling değerinin tüm numuneler için sağlandığı dolayısıyla bambu karışımli olarak üretilen kumaşların takım elbise olarak kullanılmasında pilling değerleri açısından da bir sakınca olmadığı tespit edilmiştir.
4. Tere karşı renk haslığı, sürtünmeye (ıslak-kuru) karşı renk haslığı ve kuru temizlemeye karşı renk haslığı değerlerinin de tüm numune kumaşlarda birbirine yakın veya aynı değerlerde olduğu görülmüştür. Bambu elyafı kullanımı kumaş haslık özelliklerini olumsuz etkilemediği görülmüştür. Subjektif değerlendirme sonucu ise bambu içeren kumaşların duyuusal konfor özelliğinin daha iyi olduğu söylenebilmektedir.
5. Çalışmada kullanılan numune kumaşların spektrofotometre ile aralarındaki renk farklılıkları incelendiğinde ilk olarak takım elbiselik kumaş üretiminde yaygın kullanılan pes/yün/elastan kumaş olduğu için N3 kodlu numune referans alınarak D65 gün ışığında renk karşılaştırması yapılmıştır. Referans kumaşın N1 ve N2 kodlu numune kumaşlar ile arasındaki renk farkının ( $\Delta E$ ) oldukça düşük olduğu görülmüştür. Bambu lifinin takım elbiselik kumaşlarda kullanımını yaygın olan polyester ve viskon lifi yerine kullanımının renk açısından da olumsuz bir etkisi olmadığı görülmüştür.
6. Takım elbiselik kumaş üretiminde yaygın kullanılan N2 ve N3 kodlu numunelerin maliyetlerinin çalışma kapsamında alternatif olarak önerilen N1 kodlu bambu/yün/elastan kumaşa oldukça yakın olduğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak tüm numune kumaşların temel fiziksel ve performans özelliklerinin değerlendirilmesi sonucu; bambu lifinin kullanıldığı N1 kodlu numune kumaşların, takım elbiselik kumaşlarda kullanımını yaygın olan viskon/yün/elastan (N2) ve pes/yün/elastan (N3 kodlu) numune kumaşlara göre performans ve maliyet açısından benzer veya daha iyi durumda olduğu saptanmıştır. Ayrıca bambu elyafının vücutta oluşan teri hızla absorbe etme, serinlik hissi verme, parlaklık, yumuşaklık, dökümlülük, doğal anti-bakteriyel ve UV ışınlarını kırma özelliklerini de göz önünde bulunduracak olursak bambu lifinin takım elbiselik kumaşlarda kullanılabilir olduğu saptanmıştır.

**Teşekkür:** Çalışmada kullanılan numunelerin üretimi aşamasında desteklerinden dolayı Kıvanç Tekstil İşletmelerine teşekkür ederiz.

#### Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir kurum, kuruluş, kişi ile kişisel ve finansal çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedirler.

## Kaynaklar

- [1] Yüksek İ.Ö. Bambu iplik özelliklerinde etkili faktörler üzerine bir araştırma. Yüksek lisans tezi. Bursa: Uludağ Üniversitesi; 2008.
- [2] Okur N. Bambu lifi ve iplik özelliklerinin diğer lif ve ipliklerin performans özellikleri ile karşılaştırılması olarak incelenmesi. Yüksek lisans tezi. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi; 2006.
- [3] Karahan HA, Öktem T, Seventekin N. Doğal bambu lifleri, *Tekstil ve Konfeksiyon Dergisi* 2006; 4: 236-240.
- [4] Kutgi M. Bambu lifinin takım elbiselik kumaşlarda kullanılabilirliğinin ve performansının araştırılması, Yüksek lisans tezi. Adana: Çukurova Üniversitesi; 2021.
- [5] Elibüyük U, Bulut MO, Üçgül İ. Bambu-pamuk ve %100 pamuklu kumaşların bazı fiziksel ve boyama özelliklerinin karşılaştırılması, *Teknik Bilimleri Dergisi* 2018; 8 (2): 11-16.
- [6] Türksoy HG, Üstütağ S, Çarkıt G. Bambu/pamuk karışımı ipliklerden örülen kumaşların termal konfor özellikleri. *Dokuz Eylül Üniversitesi-Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi* 2017; 19 (56).
- [7] Troynikov O, Wardingsih W. Moisture management properties of wool/polyester and wool/bamboo knitted fabrics for the sportswear base layer. *Textile Research Journal* 2011; 81(6): 621-631.
- [8] Chidambaram P, Govindan R, Karışım oranının bambu / pamuk karışımı dokuma kumaşların ısı özelliklerine etkisi. *Silpakorn U Science & Tech J* 2012; 6 (2).
- [9] Özşeker M. Bambu, pamuk ve viskon lifinden üretilen kumaşların spor kıyafetlerinde kullanımının araştırılması. Yüksek lisans tezi. Isparta: Süleyman Demirel Üniversitesi; 2018.
- [10] Gökdal H. Bambu-pamuk elyaf karışımı ipliklerin çeşitli özelliklerinin incelenmesi. Yüksek lisans tezi. İstanbul: Marmara Üniversitesi; 2007.
- [11] Özmen B. Bambu ve pamuk elyafından üretilen havlu kumaşların kullanım özellikleri açısından karşılaştırılması. Yüksek lisans tezi. Ankara: Gazi Üniversitesi; 2010.
- [12] Okubo K, Fujii T, Yamamoto Y. Development of bamboo-based polymer composites and their mechanical properties. *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing* 2004; 35 (3): 377-383.
- [13] Liu G., Zhang H., Hu X. The dyeing behaviours of bamboo fiber with reactive dyes and the product development. *Proceedings of the Textile Institute 83rd World Conference 2004*; May 23-27, 696-699, Shanghai, China.
- [14] [www.kigili.com/lacivert-bambu-ceket-8y2xlx1345b60/](http://www.kigili.com/lacivert-bambu-ceket-8y2xlx1345b60/) (Erişim tarihi; Ocak 2023).
- [15] Kıvanç Tekstil İşletmesi Notları (2016).
- [16] TS ISO 16549 Tekstil - Tekstil şeritlerinin eşitsizliği - Kapasitans yöntemi, Türk Standartlar Enstitüsü, Ankara.
- [17] TS 12863 Tekstil- İplikler- Tüylülük tayini- Foto- Elektrik metot, Türk Standartlar Enstitüsü, Ankara.
- [18] TS EN ISO 2062 Tekstil - Paketlerden alınan iplikler - Tek ipliğin kopma kuvvetinin ve kopma anındaki uzamasının sabit hızlı uzama cihazı (CRE) kullanılarak tayini, Türk Standartlar Enstitüsü, Ankara.
- [19] TS EN ISO 13934-1, Kumaşların gerilme özellikleri- Bölüm1: En büyük kuvvet altında boyca uzamanın şerit yöntemiyle tayini, Türk Standartlar Enstitüsü, Ankara.
- [20] TS EN ISO 13937-2, Kumaşların gerilme özellikleri- Bölüm2: Pantolon biçimindeki deney numunelerinin yırtılma kuvvetinin tayini, Türk Standartlar Enstitüsü, Ankara.
- [21] TS EN ISO 12945-2 Geliştirilmiş Martindale Metodu- Bölüm 2: Kumaşlarda yüzey boncuklanması, tüylenmesi ve matlaşması yatınlığının tayini, Türk Standartlar Enstitüsü, Ankara.
- [22] TS EN ISO 105-E04 Renk Haslığı Deneyleri- Bölüm E04: Terlemeye karşı renk haslığı tayini, Türk Standartlar Enstitüsü, Ankara.
- [23] TS EN ISO 105-X12 Renk Haslığı Deneyleri- Bölüm X12: Sürtünmeye karşı renk haslığı tayini, Türk Standartlar Enstitüsü, Ankara.

- [24] TS 473 EN ISO 105-D01 Tekstil mamulleri-Renk haslığı deneyleri bölüm d01-Kuru temizlemeye karşı renk haslığı tayini, Türk Standartlar Enstitüsü, Ankara.
- [25] TSE 2793 Yünlü Dokuma Kumaşlar - Dış giyimde kullanılan - Özellikleri, Türk Standartlar Enstitüsü, Ankara.

## EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF JET IMPINGING SOLAR AIR COLLECTOR WITH HEMISPHERICAL RIBS AND CIRCULAR TAPERED NOZZLE

İbrahim SANCAR<sup>1\*</sup>, Hüsamettin BULUT<sup>2</sup>, Refet KARADAĞ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Adiyaman Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Makine Bölümü, Adiyaman, 02040, Türkiye

<sup>2</sup>Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa, 63290, Türkiye

<sup>3</sup>Adiyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Adiyaman, 02040, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 27.05.2024 Kabul Tarihi/Accepted Date: 11.06.2024 DOI: 10.54365/adyumbd.1490486

### ABSTRACT

Studies are generally carried out on collector geometry and flow models in order to increase the thermal efficiency of solar air collectors (SACs), which are utilized in hot air production for various industrial and domestic applications. In jet impinging air collectors (JIPSAC), the geometric shape of the absorber plate and nozzle significantly affects the thermal performance. In this study, the plate with hemispherical ribs (HAP) and circular tapered nozzle (CTN) are proposed to increase the thermal efficiency of the jet impinging solar air collector. An experimental study was carried out to examine the effect of the jet flow air passing through the circular tapered nozzle hitting the hemispherical absorber plate on the thermal efficiency. CFD analysis of the created model was performed using Ansys Fluent 19.2 version. CFD results are compared with that of the experimental results. The contours of pressure and velocity streamlines are presented and discussed in order to help visualize the flow physics. From experimental and numerical analysis, it has been observed that the thermal efficiency of the jet impingement solar air collector using the plate with hemispherical ribs and circular tapered nozzle pair (HAP-CTN) provides a 12.33% increase on the average outlet temperature compared to the jet impinging solar air collector with flat absorber plate. In JIPSAC where HAP-CTN pair is used, in the experimental study conducted for the same combinations, the highest average efficiency of the collector was determined as 24.5% and the highest average collector outlet temperature 47.8 °C at a mass flow rate of 0.0185 kg/s

**Keywords:** CFD, circular tapered nozzle, jet impinging, hemispherical absorber plate, solar air collector.

## YARIM KÜRESEL PÜRÜZLÜ YUTUCU PLAKALI VE DAİRESEL KONİK NOZULLU JET ÇARPMALI HAVALI GÜNEŞ KOLLEKTÖRÜNÜN DENEYSEL VE SAYISAL ANALİZİ

### ÖZET

Çeşitli endüstriyel ve evsel uygulamalar için sıcak hava üretiminde kullanılan havalı güneş kollektörlerinin (SAC) termal verimliliğini artırmak için genellikle kollektör geometrisi ve akış modelleri üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Jet çarpmalı hava kollektörlerinde (JIPSAC) yutucu plaka ve nozulun geometrik şekli, ısı performansını önemli bir ölçüde etkilemektedir. Bu çalışmada jet çarpmalı havalı güneş kollektöründe ısı verimliliğini artırmak için yarı küresel yüzeyli emici plaka (HAP) ve dairesel konik nozul (CTN) çifti önerilmiştir. Dairesel konik nozuldaki geçen jet akışlı havanın yarı küre şekilli absorber plakaya çarpmasının ısı verime etkisini incelemek için deneysel çalışma yapılmıştır. Modelin Ansys Fluent 19.2 versiyonu kullanılarak CFD analizi yapılmıştır. CFD sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Akış fiziklerini görselleştirmeye yardımcı olmak için basınç ve hız akım çizgilerinin konturları sunulmuş ve tartışılmıştır. Deneysel ve sayısal analizlerden, yarı küresel emici plaka ve dairesel konik nozul çifti (HAP-CTN) kullanılan jet çarpmalı havalı güneş kollektörünün ısı verimliliğinin, düz yutucu plakalı jet çarpmalı havalı güneş kollektörüne kıyasla ortalama çıkış sıcaklığı üzerinde % 12.33 lük bir artış sağladığı görülmüştür. HAP-CTN çifti kullanılan JIPSAC' da aynı kombinasyonlar için yapılan deneysel çalışmada kollektörün en yüksek ortalama verimi, 0.0185 kg/s kütleli debide % 24.5 ve en yüksek ortalama kollektör çıkış sıcaklığı 47.8 °C olarak tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Hesaplamalı akışkan dinamiği, dairesel konik jet, jet çarpma plakası, yarı küre yutucu plaka, havalı güneş kollektörü

e-posta1 : [isancar@adiyaman.edu.tr](mailto:isancar@adiyaman.edu.tr) ORCID ID : <https://orcid.org/0000-0003-0282-6562> (Corresponding Author)

e-posta2 : [hbulut@harran.edu.tr](mailto:hbulut@harran.edu.tr) ORCID ID : <https://orcid.org/0000-0001-7123-1648>

e-posta3 : [rkaradag@adiyaman.edu.tr](mailto:rkaradag@adiyaman.edu.tr) ORCID ID : <https://orcid.org/0000-0001-9120-2764>



## 1. Introduction

Efficient renewable energy technologies are started to be investigated in academic studies due to the growing worldwide energy demand, the quick depletion of fossil fuel resources, and the rise in environmental pollutants caused by combustion. Solar energy is the most readily available, least expensive, practical, safe, sustainable, and clean energy source among the renewable energy sources. To benefit from solar energy, SAC have industrial and non-industrial application areas such as space heating, greenhouse heating, industrial plant drying.

Since SACs generally have low efficiency, some geometric studies have been carried out in order to regularize the flow and increase heat transfer by eliminating flow-baring geometries in the flow channel.

There is sufficient research on the absorber plate on SAC, roughness, fins and flow pattern in the air duct. To improve solar irradiance and increase collector efficiency, numerous researchers have investigated changing the absorber channel/plate shape to increase the rate of heat transfer by convection. Due to the increased convective SAC efficiency and heat transfer coefficient, jet impact plate solar air collectors (JIPSAC) have recently begun to be used in hot air production, and academic research has been concentrated in this direction.

There are many valuable studies that performance analysis using fins, deflection plates, corrugated absorber plates, grooved plates, rough, smooth plates and jet impinging in solar air collectors [1-10]. Dong et al. [11] Simulations stated that the use of grooved absorber plate increased the convective heat transfer coefficient by 1.8 to 2.3 times. Tuncer et al. [12] experimental studies using plate shahs with perforated partitions were carried out. According to numerical findings, the use of perforated screens in vertical SAC increased thermal efficiency. According to experimental research, a modified v-groove SAC has a higher efficiency than a flat SAC, and a v-groove perforated jet absorber SAC has a higher efficiency than SACs with a regular v-groove absorber surface. [13]. By Farzan et al. [14] designed and experimentally analyzed a new type of SAC consisting of perforated metal plate and asphalt for building heating applications.

Experimental studies have revealed that cross-grooved channels outperform straight SACs by a large margin. In study to examine how the groove angle affects heat transport, the temperature rise is larger when using corrugated absorber plates [15-16]. A group of researchers conducted an experimental study on how V-shaped ribs with angles of 30°, 45°, and 60° in a rectangular channel affect the results. It was found that the efficiency index for the 45° ribbed channel was maximum for widely spaced ribs [17-19]. Elshafei et al. [20] Experimentally investigated the heat transfer and pressure loss in a channel with V-type corrugated top and bottom plates for various tilt angles. It was determined that an increase in wavy angle leads to more fluid recirculation, greater swirl flow intensity, and a larger surface area in the corrugation troughs, and as a result, the Nusselt number also rises.

In the experimental research conducted by Pehlivan et al. [21] the effect of forced convection on heat transfer for various inclined corrugated channels was examined. The impact of variables like groove height and slope angle on thermal efficiency has been the subject of several experimental investigations [22-26]. They suggested that the inclination angle and channel height of the V-groove channel have a significant effect on the friction coefficient and heat transfer [27-28]. According to analysis by Salman et al. [29] 74% and 70% of the thermal and effective efficiencies were attained when air jet impingement was performed on a heated surface with a roughness of dimple shape. Zhu et al. [30] conducted an experimental investigation to examine the decrease in pressure and thermal characteristics of a SAC that uses evacuated tubes and flat micro-heat pipe arrays under different airflow rates and seasons. According to reports, pressure drop in a SAC was achieved in the range of 16-24 Pa. Experimentally examined the effect of Nusselt number and friction factor on jet impingement solar air heater performance and the relationship between Nusselt number and friction factor [31].

Numerical and experimental study was conducted to study the effect of slot jet impingement on concave plates with varying surface curvature of the target distance of the nozzle in turbulent flow

environment [32-35]. They carried out experimental studies to analyze jet impingement cooling depending on Reynolds number, surface roughness, jet-plate separation, and jet geometry [36-39]. Culun et al.[40] examined the effect of design factors such as the shape and arrangement of jet holes, the density of jets moving in both aperture and flow direction, and jet-to-jet spacing and jet-to-target plate distance on SAC. It is concluded that square jet impingement has better performance than circular jet impingement. Cross-grooved absorber plate and jet impact factor Aboghrara et al.[41] It was put forward by. A significant improvement in thermal performance was discovered when comparing jet impacted corrugated SAC with flat plate SAC. The practical and theoretical examination of unglazed corrugated solar collectors with jet impingement were carried out by Belusko et al. [42]. It was shown that adding jet impingement can boost thermal efficiency by up to 21% while just slightly increasing pressure drop.

In experimental studies studied the effect of jet impingement on different profiles of corrugated plates over a range of Reynolds numbers and jet-to-target plate distances. A thermal performance of 11.4 was achieved as compared to the base case [43-44]. On the other hand it was observed that the friction factor increased by approximately 9 times, resulting in a 7% improvement in efficiency. With the fintype geometry jet plate, an improvement of 6-16% was achieved. With the conical protruding jet impact plate, efficiency increased by 13.53% [45-46].

In experiments conducted by some researchers on SAC with jet impact plates to increase heat transfer, the effect of structural modifications such as inter-plate distances, jet hole diameters, and locations of jet holes were investigated. It has been reported collector efficiency in the range of 55.79 - 78% in modifications such as Multiple protrusions on a corrugated absorber plate spring barriers dimples on the absorber surface, transverse ribs on the absorber plate, etc.[47-53]. Metzger et al. [54] investigated the heat transfer parameters for two-dimensional jet arrays impinging in a plane parallel to the jet orifice plate.

Recent academic studies have focused on CFD analysis of jet impact plate SACs. The most obvious changes in these studies are the jet nozzle geometry and the surface geometry of the absorber plate hit by the jet flow.

Song et al. [56] looked into how the perforation plate affected the efficiency of PV SAC with baffles using a CFD technique. Furthermore, they discovered that M-SAC has a greater pressure drop than S-SAC. To assess the effectiveness of aluminum cans as absorber plates, Tan et al. [57] conducted an empirical and computer study. In the study conducted by Kumar et al. [58], the normal double pass SAC was modeled using a variety of CFD simulation tools. CFD and conducted an empirical analysis of a SAC with a ribbed and dimpled surface. Through CFD research, developed a new hybrid SAC design that combines triple depth v-groove SAC with parallel flow v-groove SAC. They have compared the numerical results with the experimental results of the parallel-flow v-grooved SAC (PFVSAC) and triple-flow v-grooved SAC (TFVSAC). [59-61]

Because of its increased convective SAC's efficiency and coefficient of heat transfer, jet impingement plate solar air collectors (JIPSAC) have become increasingly popular in hot air supply recently.

Considering that the V-shaped rib performance study demonstrated a greater pressure drop, Kumar et al. [62] changed the V-shape's sharp trailing edge to a flat arc shape and performed a computational analysis for different Re values between 6000 and 18000 while maintaining a constant heat flux condition of 1000 W/m<sup>2</sup>. From 0.0299 to 0.0426 and from 0.333 to 0.666, respectively, the relative height of the roughened surface and relative angle (angle/90) were changing. The simulation made use of the RNG k-ε turbulent model. Because only conduction transfers heat, the CFD findings showed that Nu values were comparatively lower near the ribs. The introduction of recirculation zones, which encouraged fluid mixing and subsequently raised the heat transfer rate, is what caused these values to be higher immediately upstream and downstream of each rib. It was determined that the greatest effective thermal performance improvement over the bare plate was around 1.7 times.

Using a roughened absorber plate with rib grit, it was discovered that ribs with a 58-degree inclination transport 30% more heat than smooth SAC. Boulemtafes-Boukadoum et al. performed numerical analysis of SAC with transverse rectangular ribs absorber plate. CFD (computational fluid dynamics) research was carried out to compare sawtooth-shaped non-uniform rib roughness with circular, square and trapezoid-shaped uniform cross-section transverse ribs. Maximum nusselt number enhancements for sawtooth and trapezoidal rib-roughened ducts were 1.78 and 1.50, respectively [63-65].

Gawande and associates [66] Utilizing right-angled triangular ribs and synthetic roughness on the absorber plate, a discrete, two-dimensional programmed fluid dynamics (CFD) analysis of the Solar air chamber was carried out. Singh et al. [67] investigated the friction factor and Nusselt number of a solar air heater channel that was roughened with sawtooth ribs of non-uniform cross-section numerically.

A 2D CFD analysis was conducted using Ansys Fluent to assess the thermal performance of a novel hyperbolic ribbed SAC and carried out numerical simulations on their SAC and compared 3D results with 2D results and not found any considerable differences [68]. Kumar et al. [69] calculated the exergetic efficiency of a SAC using analytical methods on JIPSAC. A studie carried out computational modelling for cases of different geometric on flat plate and phase change material [70].

In the study conducted by Yadav et al.[71] similar to our present study, the heat transfer behavior of a solar air heater with a multiplying jet absorber plate was examined with a 3D-Computational fluid dynamics (CFD) simulation RNG  $k\epsilon$  turbulence model using ANSYS-18.1. A flat cylindrical jet nozzle was used in the study. The study's findings showed that, in comparison to standard solar air heaters, there was a maximum heat transfer increase of 7.58 and a friction factor penalty of 9.01 times. A numerical analysis is carried out on the heat transfer characteristics of a special SAC design with jet impinging plate through circular tapered nozzles using CFD simulations [72]. Re values of 14300 and 2900 yield the best thermal efficiency (91.25%) and energy efficiency (3.55%). Reynolds number (Re) was changed from 3500–17500 while keeping solar radiation at 1000 W/m<sup>2</sup> in a 3D CFD model with a cylindrical jet through that was built and simulated with a mass flow rate range of 0.0104–0.0524 kg/s [73].

Parameters and configurations such as using inclined jet impingement [74-78], microjet impingement for Re variation from 3000 to 16000 in a solar air collector with jet impingement compared to flat absorber plate collectors [79] have been tested.

In the same parallel flow jet impingement air solar collector, an increase in the outlet temperature of up to 15.5 °C was observed depending on pitch-hole diameter of jets. In studies where the Nusselt number and friction factor were improved, it was observed that there were 37-48% improvements in maximum thermo-hydraulic performance. Collector efficiency in the range of 55.79 - 78% has been reported in modifications such as absorber plates with different geometries [80-84]

**This study focuses on the experimental and numerical analysis of Solar Air Collectors Using Hemispherical Absorber Plate and Circular Tapered Nozzle Pair (HAP-CTN-JIPSAC), unlike Solar Air Collectors using only Circular Conical Nozzle (CTN-JIPSAC).**

## 2. CFD modelling of HAP-CTN-JIPSAC

Computational fluid dynamics (CFD) simulation of the 3D-model using a circular tapered nozzle was performed using the ANSYS-19.2 version with RNG  $k\epsilon$  turbulence model.

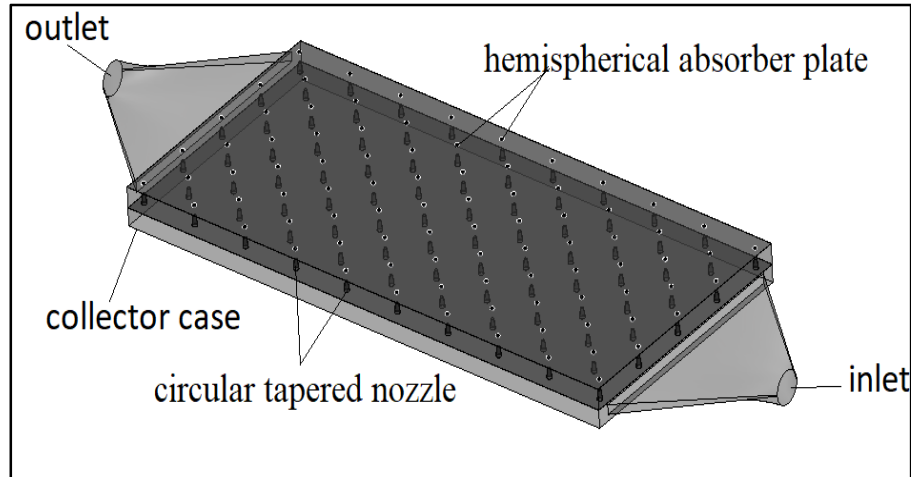


Fig. 1. Section views of HAP-CTN-JIPSAC

### 2.1. CFD domain of HAP-CTN-JIPSAC.

The sectional view of the solar air collector using hemispherical absorber plate and circular tapered nozzle pair and the isometric view of the hemispherical rib and circular tapered nozzle are given in fig. 1 and 2. It consists of two parallel flow regions with a jet impinging plate placed between them. Fig. 3 shows the schematic view of HAP-CTN-JIPSAC. The flow passing through the lower channel passes through nozzles placed at right angles and hits the hemispherical absorber plate. Here, the heated air leaves the collector parallel to the lower channel and in the same direction. Absorber plate, jet plate material and used as working fluid air characteristics are given in Table 2. Conical tapered nozzles are glued concentrically at the points drilled in the given dimensions on the rectangular cross-section sheet metal plate measuring 1860x980x1 mm. The hemispherical ribs are shaped with the help of a press on the absorber plate, exactly corresponding to the jet nozzles.

### 2.2. Assumptions

Several presumptions are established in order to establish the framework for the model's CFD analysis. These presumptions are:

1. JIPSAC has a constant heating effectiveness.
2. It was considered that the sky was a matte, black, dull object.
3. Collector case assumed to be fully insulated.
4. It is assumed that all working air temperatures in the air ducts are uniform.
5. It was thought that the air's temperature merely varied according to the direction of movement.
6. The holes of jet plate are tapered nozzle.
7. There is very little temperature loss in the bottom plate, absorber plate, and glass cover.

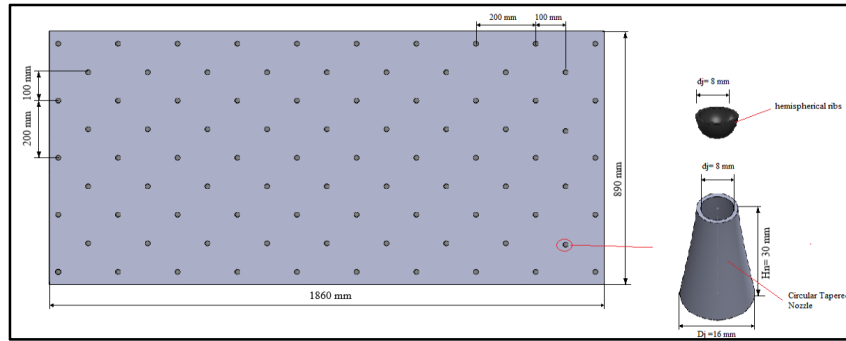


Fig. 2 Isometric view of the hemispherical ribs and circular tapered nozzle

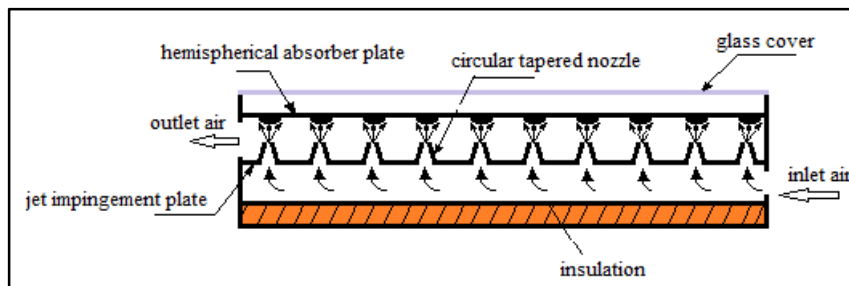


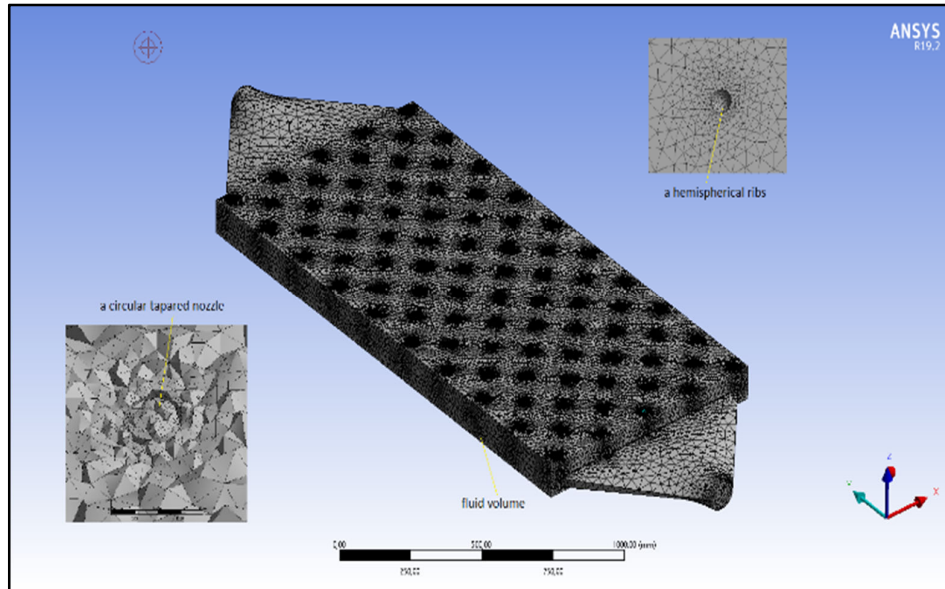
Fig. 3 Schematic view of HAP-CTN-JIPSAC

Table 1. Properties of HAP-CTN-JIPSAC and CFD domains.

| Part                         | Material   | Dimension (mm) | Thermal Properties   |
|------------------------------|--|----------------|--|
| collector case               | double wall galvanized sheet insulated with elastomeric rubber foam      | 1860x890x400   | $\epsilon: 0.7, \lambda: 2.11 \times 10^{-5} \text{ W/cm-K}$   |
| glass cover                  | glass  | 1860x890x2     | $\epsilon: 0.92, \lambda: 0.0078 \text{ W/cm-K},$<br>$C_p: 0.84 \text{ J/g K}$   |
| hemispherical absorber plate | mat black painted sheet  | 1860x890x0.6   | $\epsilon: 0.9, \lambda: 52 \text{ W/m-K},$<br>$C_p: 0.470 \text{ J/g K}$  |
| jet impinging plate          | galvanized sheet   | 1860x890x1     | $\epsilon: 0.54, \lambda: 0.52 \text{ W/cm-K},$<br>$C_p: 0.47 \text{ J/g K}$   |
| intermediate sheet           | galvanized sheet with one surface insulated with elastomeric rubber foam | 1860x890x0.6   | $\epsilon: 0.7, \lambda: 2.11 \times 10^{-5} \text{ W/cm-K},$<br>$C_p: 0.84 \text{ J/g K}$                                 |
| bottom insulation            | glass wool   | 1860x890x186   | $\lambda: 38 \times 10^{-5} \text{ W/cm-K},$<br>$\rho: 0.024 \text{ g/cm}^3, C_p: 0.7 \text{ J/g K}$                       |
| air                          | atmospheric air  |                | $\epsilon: 0.3, \lambda: 25.63 \times 10^{-5} \text{ W/cm-K},$<br>$\rho: 0.00120 \text{ g/cm}^3, C_p: 1.004 \text{ J/g K}$ |

### 2.3. Meshing of HAP-CTN-JIPSACs fluent volume

Simulations to obtain accurate results in CFD analysis it depends on the correct size and regular distribution of finite elements in the network. In the current mesh formation, the best mesh was formed with a average skewness of 0.25017 and aspect ratio of 1.8774 with a total number of 3779062 elements. The meshing of the current design of HAP-CTN-JIPSAC can be seen in fig. 4. In network improvement studies, the difference between two consecutive results is less than 1%.



**Fig. 4.** The meshing of the current design of HAP-CTN-JIPSAC

**2.4. Governing equations and applied boundary conditions and solution method**

In this study, the flow form was accepted as incompressible turbulent flow because the speed range was <0.3 Mach and the density change depending on speed was less than 5% [85]

The 3D continuity equation, Navier-Stokes and energy equation solved in Ansys Fluent are given in eq.(1-3).

Continuity equation;

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

Navier-stokes equation;

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho u_i u_j) \tag{2}$$

Energy conservation equation;

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu}{Pr_r} \right) \right] \left( \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \tag{3}$$

The convection, pressure gradient, and viscous factors, respectively, in all three directions are represented by the first, second, and third terms in eq. (2). [86]. This study was carried out at boundary conditions of in flow 0.0046, 0.0092, 0.0139 and 0.0185 kg/s (1, 2, 3 and 4 m/s air inlet velocities), respectively, and at an outdoor air inlet temperature of 17.7 °C in parallel with the experimental study. The simulation was run with the Rosseland radiation model at 38.21854 longitude and 37.74748 latitude.

The physics of flow and boundary conditions applied in CFD simulation determine the choice of solver model.

Model selection depends upon the physics of flow and boundary conditions used in CFD simulation. Accordingly, the governing equations in this study are solved using the pressure-based solver and the finite volume approach in the steady-state domain.

### 3. Experimental Setup

#### 3.1. performance parameters of HAP-CTN-JIPSAC.

The thermal efficiency of the HAP- CTN-JIPSAC was computed with eq. (4-5).

The useful heat gain of air is calculated as [87]:

$$Q_u = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_o - T_i) \quad (4)$$

where,  $\dot{m}$  is the mass flow rate of air (kg/s),  $C_p$  specific heat property of air at constant pressure (kJ/kg.K),  $T_i$  and  $T_o$  are the inlet and outlet air temperatures respectively. The heat transfer coefficient of solar aircollector was computed with eq. (5) [92].

$$h = \frac{Q_u}{A_a (T_p - T_a)} \quad (5)$$

Where;  $T_p$  and  $T_a$  are the mean plate and working air temperatures, respectively, and  $A_a$  is the absorber surface area.

#### 3.2. Description of the experimental setup

A schematic representation of the experimental apparatus used in this work is shown in fig. 5. The photographic view of the circular tapered nozzle and hemispherical absorber plate used in the experimental study is shown in fig.6-7. The properties of the SAC with hemispherical absorber plate and circular tapered nozzle pair (HAP- CTN-JIPSAC) used in the experimental study are given in Table 1. To guarantee that the input air is distributed evenly and to gather and move the heated air to the consumption area, two hoods are installed case- material.

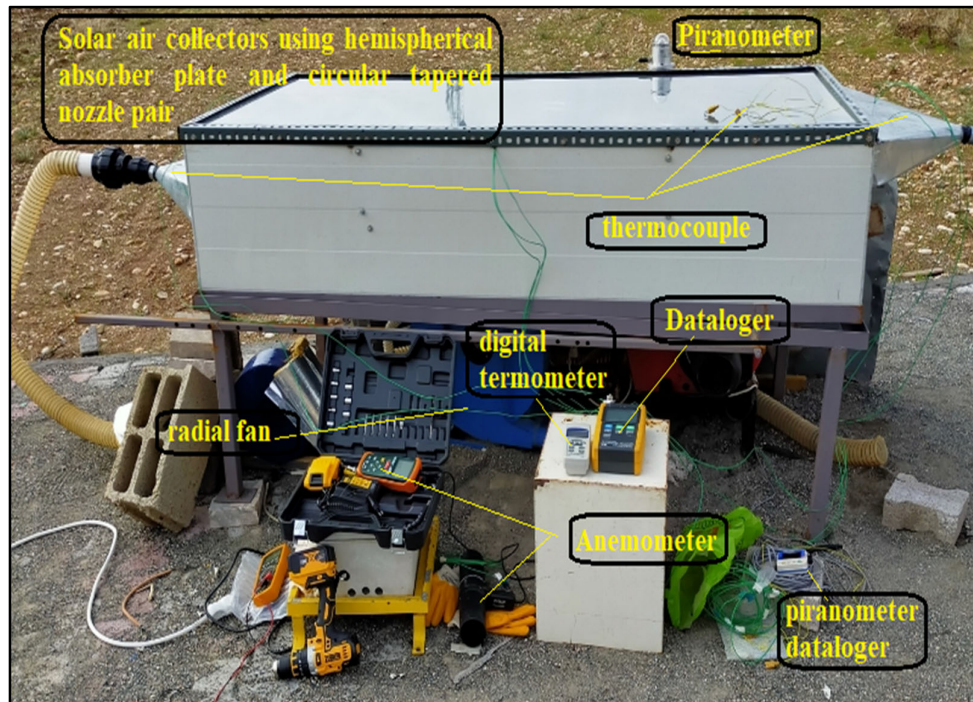
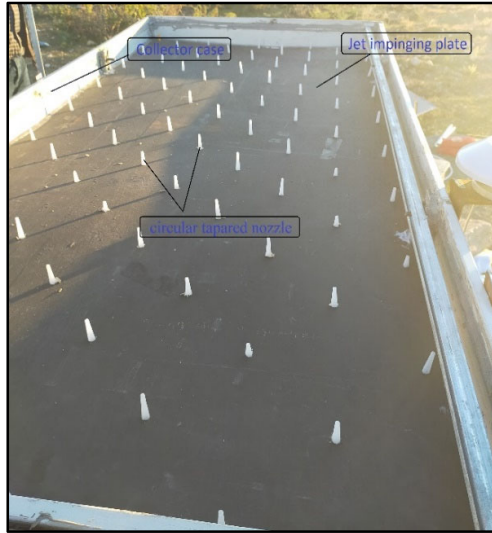


Fig. 5. Image of the HAP-CTN-JIPSAC experimental setup



**Fig. 6.** Image of the jet impinging plate with circular tapered nozzle



**Fig. 7.** Image of the the hemispherical absorber plate

**3.3. Error Analysis**

An error analysis was carried out to assess the accuracy of the model and the anticipated outcomes for the air temperature at various HAP- CTN-JIPSAC locations, air inlet velocity and were compared with the corresponding experimental data. The Holman JP technique is used to determine the percentage of absolute error values [88].

$$U_F = \left[ \left( \frac{\partial F}{\partial z_1} u_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial F}{\partial z_2} u_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial F}{\partial z_n} u_n \right)^2 \right]^{1/2} \tag{6}$$

In table 2. is presented full breakdown of the uncertainty values resulting from the measurement of several parameters during the current experimental examination.

**Table 2.** Total uncertainties of HAP- CTN-JIPSAC

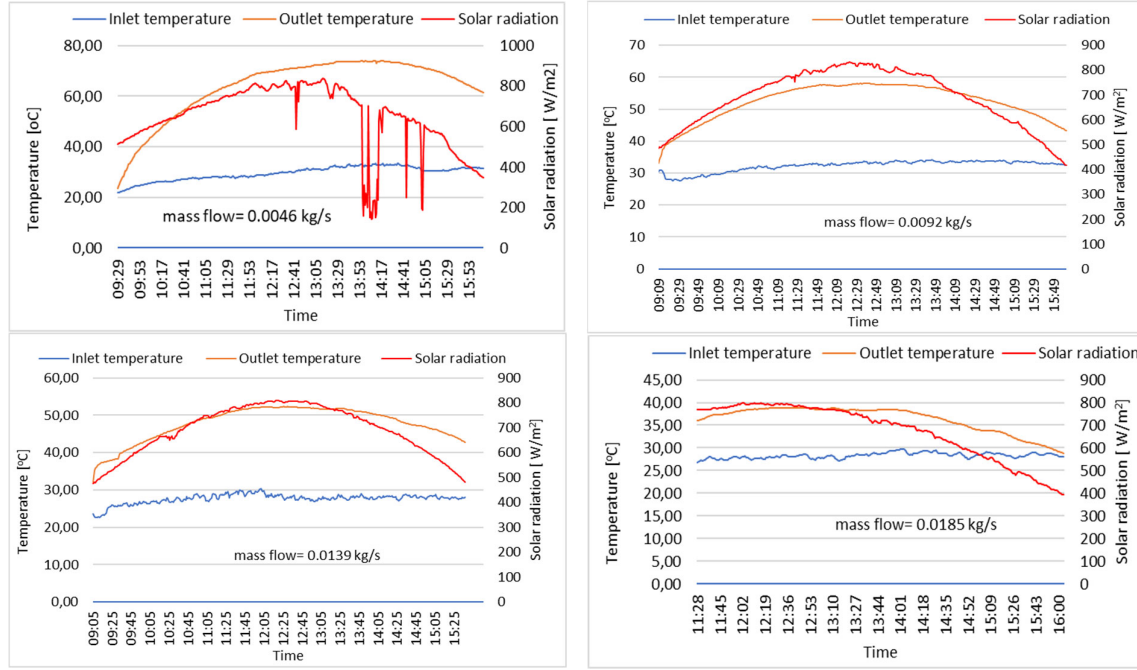
| The evaluation of the uncertainty in CTN-JIPSAC | Symbol    | Unit               | Accuracy   | Total uncertainty (%) |
|---|-----------|--------------------|------------|-----------------------|
| Collector inlet air temperature                 | $T_o$     | $^{\circ}\text{C}$ | $\pm 0.5$  | 0.287                 |
| Collector outlet air temperature                | $T_i$     | $^{\circ}\text{C}$ | $\pm 0.1$  | 0.424                 |
| Collector inlet air velocity                    | $v$       | $\text{m/s}$       | $\pm 0.01$ | 0.104                 |
| Solar radiation                                 | $I$       | $\text{W/m}^2$     | $\pm 0.03$ | 0.0316                |
| <b>Calculated parameters</b>                    |           |                    |            |                       |
| Mass flow rate of air                           | $\dot{m}$ | $\text{kg/s}$      |            | 0.06                  |
| Thermal efficiency of collector                 | $\eta$    | $\%$               |            | 0.202                 |

**4. Experimental Analysis of HAP- CTN-JIPSAC**

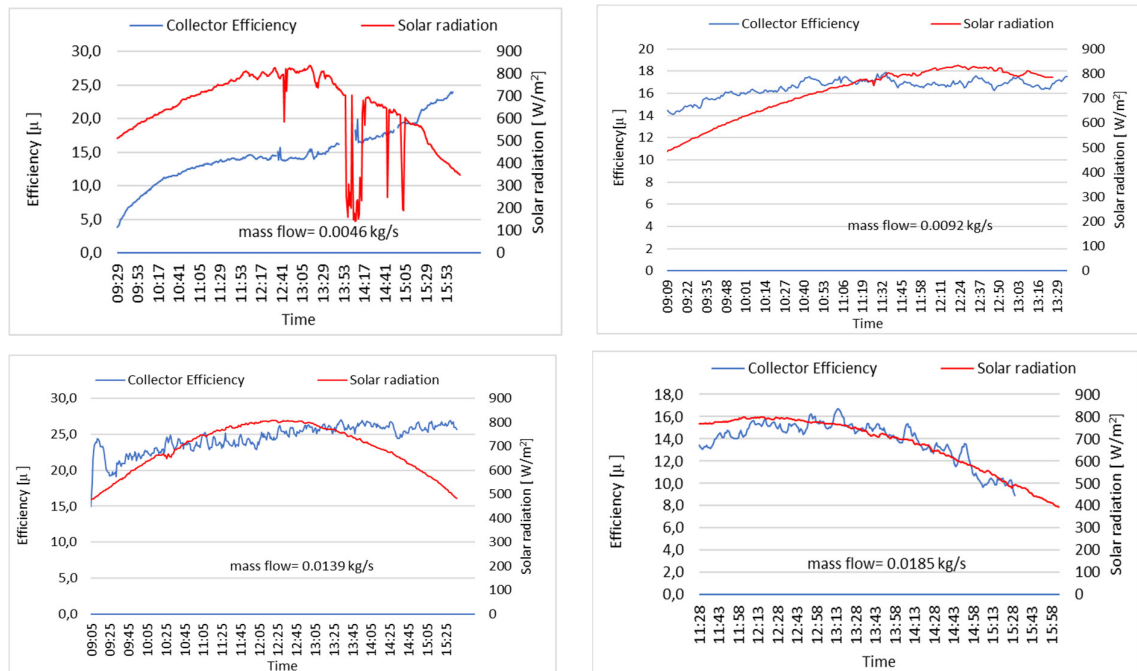
Inlet and outlet temperature variation with solar radiation at different air flow rates for HAP- CTN-JIPSAC is given in Fig.8 and collector efficiency at different flow rates is given in Fig.9. It has been observed that as solar radiation increases, the collector exit temperature increases and a significant



temperature difference occurs between the collector inlet and outlet. It is seen in the figures that the difference between the average  $T_i$  and  $T_o$  varies between 8.02-34,38 °C depending on solar radiation. It has been also observed that transfers the energy stored in the collector's absorber plate to the working air when the sun is clouded for a short time and ensures continuity in collector efficiency during these moments.



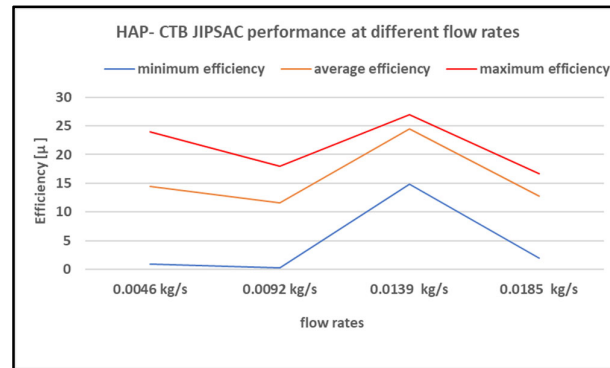
**Fig. 8.** Inlet and outlet temperature variation by solar radiation at different flow rates



**Fig. 9.** Collector efficiency at different flow rates

In experimental previous studies on FPSAC, higher outlet temperatures have been noted at low flow rates, and as flow rates rise, outlet temperatures have been shown to drop. Although the difference between the maximum outlet temperature ( $T_{o \max}$ ) and the minimum outlet temperature ( $T_{o \min}$ )  $\Delta T_o = 29.8 \text{ }^\circ\text{C}$  at FPSAC, it was seen to  $\Delta T_o = 37,3 \text{ }^\circ\text{C}$  in JIPSAC. With the use of the hemispherical absorber plate (HAP- CTN-JIPSAC), this difference increased up to  $41.9 \text{ }^\circ\text{C}$ .

In HAP- CTN-JIPSAC, it has been observed that the average highest efficiency of the collector was observed as  $\eta_{av} = 24.5\%$ ,  $T_{o \text{ av}} = 47.8 \text{ }^\circ\text{C}$  when  $\dot{m} = 0.0139 \text{ kg/s}$ . Variation of collector minimum, average and maximum efficiency with mass flow rate is given in Fig.10.



**Fig 10.** Variation of collector minimum, average and maximum efficiency with mass flow rate

### 5. Numerical Analysis of HAP- CTN-JIPSAC

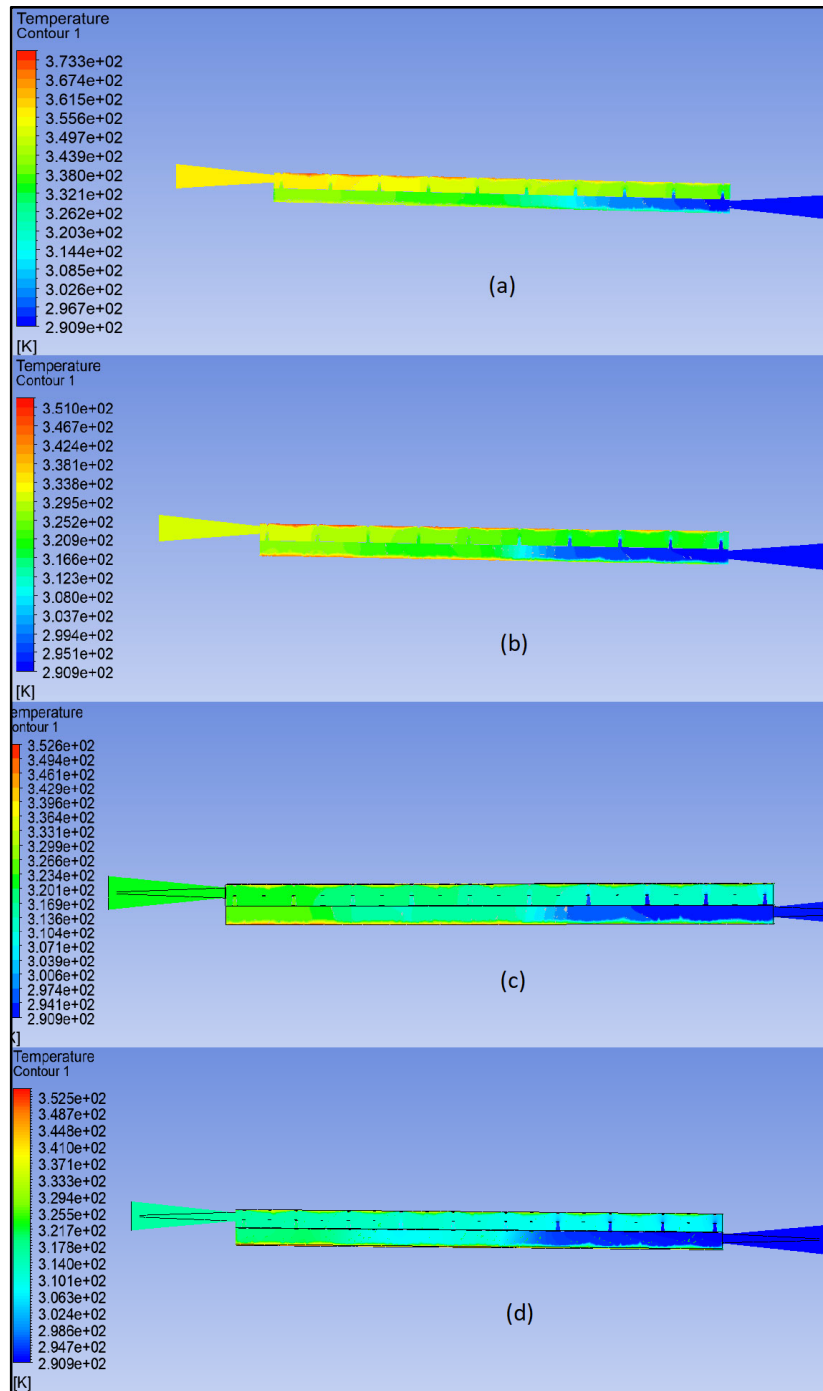
This section provides a detailed discussion of the findings from the CFD analysis of the current HAP-CTN-JIPSAC design. The jet impinging region's contours of temperature, pressure, and velocity are represented by the thermo-hydraulic performance enhancement.

In order to compare the experimental studies carried out to investigate the effect of solar radiation on the collector outlet temperature and thermal efficiency in Adiyaman/Turkey climatic conditions, at  $17.7 \text{ }^\circ\text{C}$  air inlet temperature and of in flow 0.0046, 0.0092, 0.0139 and 0.0185 kg/s (1, 2, 3 and 4 m/s air inlet velocities), CFD analyzes were performed. The inlet air temperature was taken as  $17.7 \text{ }^\circ\text{C}$  in order to provide the same boundary conditions as the CFD analysis results in the experimental study conducted at a flow rate of 0.0046 kg/s. The data obtained from the simulation largely confirm the measurements obtained from the experimental study. In other numerical analyses, since the inlet temperature changes depending on daily solar radiation and outside air temperature, only the flow rate is changed by keeping the inlet air temperature constant. The calculation results are in agreement with the experimental values of collector outlet temperatures with a margin of error of  $\pm 3\%$ .

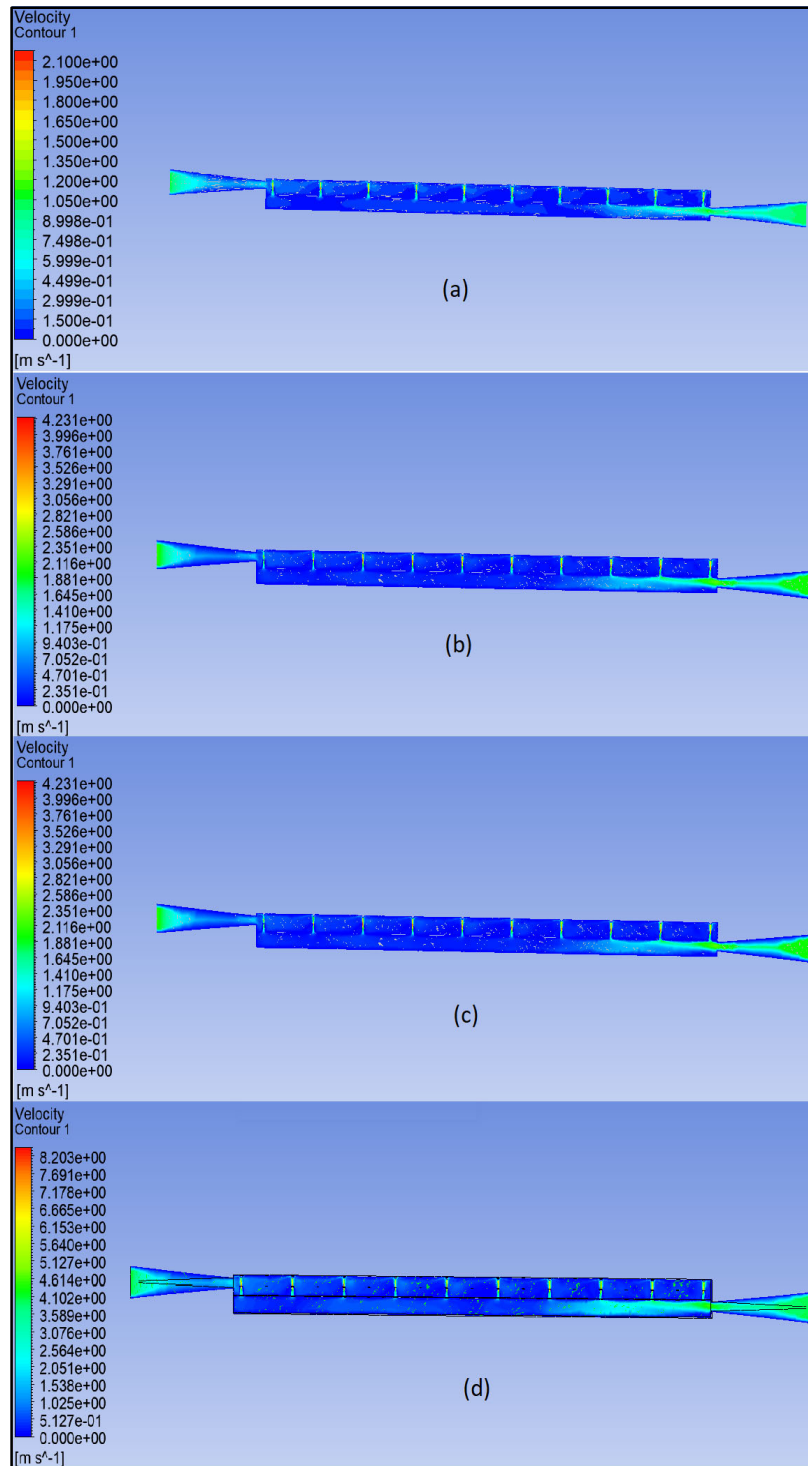
The temperature distributions and velocity contours of HAP- CTN-JIPSAC are given in fig. 11-12. From the simulation results, it was revealed that the mass flow rate was 0.0139 kg/s and occurred at a linear speed. CFD analyses showed volumes where the air distribution inside the duct was not balanced due to the design geometry. In cases where the flow rate is lower, it has been observed that ineffective volumes are formed in the lower channel near the inlet of the collector internal volume. Since the speed was insufficient, no flow occurred in the jet nozzles close to the exit. It has been observed that when the flow rate is greater than 0.0139 kg/s, the pressure losses increase and the time for the air to gain energy decreases, thus the outlet temperature is low and the collector efficiency decreases.

Fig. 13 show the pressure contours in the HAP- CTN-JIPSAC at different flow rates. The formation of the flow volume is given in Fig. 14 volume formation varies depending on the flow rate at the collector inlet. It is evident that as air velocity gradually decreases approaching the exit, the pressure drop grows significantly larger in a longitudinal direction. Furthermore, when the air flow rate increases,

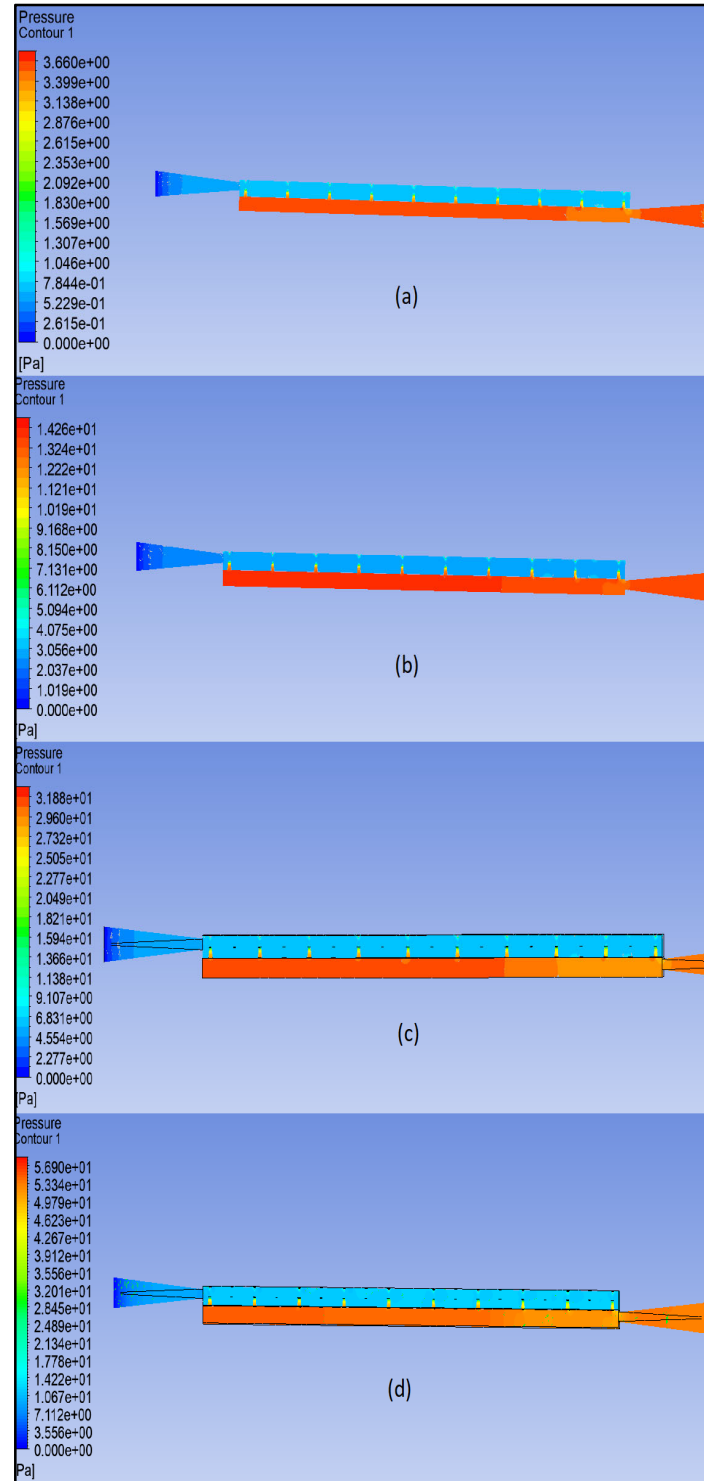
so does the pressure loss. Bunun nedeni, çapraz akış durumlarının ve jet akışı girişimlerinin daha yüksek pompalama ihtiyacına yol açan sürtünme kayıpları oluşturmaktadır.



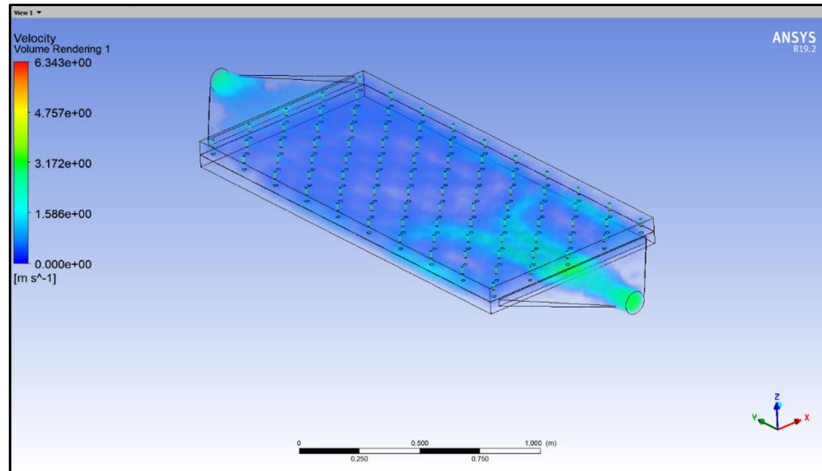
**Fig. 11.** Temperature contours of HAP- CTN-JIPSAC for in flow at (a) 0.0046 (b) 0.0092, (c) 0.0139 and (d) 0.0185 kg/s



**Fig. 12.** Velocity contours of HAP- CTN-JIPSAC for in flow at (a) 0.0046 (b) 0.0092, (c)0.0139 and (d)0.0185 kg/s



**Fig. 13.** Pressure contours of HAP- CTN-JIPSAC for in flow at (a) 0.0046 (b) 0.0092, (c)0.0139 and (d)0.0185 kg/s



**Fig. 14.** Volume rendering of HAP- CTN-JIPSAC

## 6. Conclusions and Recommendations

The purpose of the experimental study was to investigate the impact of hemispherical absorber plate on the collector efficiency used in the HAP- CTN- JIPSAC at mass flow rates of 0.0046, 0.0092, 0.0139, and 0.0185 kg/s (air inlet velocities of 1, 2, 3, and 4 m/s). According to the measured data, the highest air outlet temperature was measured at 73.9 °C at low flow rate  $\dot{m} = 0.0046$  kg/s. In experimental and numerical analyzes on the HAP- CTN- JIPSAC it was noted that when there was less air flow, the collector outlet temperature was higher. on the contrary as the flow rate increased, a reduction in exit temperature was noted. The best average collector outlet temperature was measured as 63.9 °C when the mass flow rate is 0.0046 kg/s. The best average thermal efficiency in the collector was calculated as 24.5 % when the mass flow rate is 0.0139 kg/s.

When the flow rate is low, the outlet temperature is higher because enough time has passed for the fluid air to heat up sufficiently. However, when the flow rate increases, the collector efficiency increases as there is more useful energy gain. At very high flow rates, the outlet temperature decreases because there is less time for the air to receive enough energy.

The results of the CFD analysis showed that as the collector size increases and the jet effect in the outlet direction decreases and that the jet flow coming out of the conical nozzle on the absorber plate should be slow and regular over the rib surface area for higher thermal efficiency

More industrial models should be developed and more powerful fans should be used for experimental studies with different configurations and flow rates. In addition, the compatibility of the jet nozzle geometry and the absorber plate rib geometry should be improved.

## Acknowledgements

This study was supported by Harran University Scientific Research Project Unit within the scope of project no. 19249.

## Conflict Of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest

## Reference

- [1] Sureandhar, G., Srinivasan, G., Muthukumar, P., Senthilmurugan, S., 2021. Performance analysis of arc rib fin embedded in a solar air heater. *Therm. Sci. Eng. Prog.* 23 <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.100891>.
- [2] Rahmani, E., Moradi, T., Fattahi, A., Delpisheh, M., Karimi, N., Ommi, F., et al., 2021. Numerical simulation of a solar air heater equipped with wavy and raccoon-shaped fins: The effect of fins' height. *Sustain Energy Technol. Assess.* 45, 101227 <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101227>.
- [3] Parsa, H., Saffar-Avval, M., Hajmohammadi, M.R., 2021. 3D simulation and parametric optimization of a solar air heater with a novel staggered cuboid baffles. *Int J. Mech. Sci.* 205, 106607 <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106607>.
- [4] Amara, W.B., Bouabidi, A., 2023. Experimental studies and 3D simulations for the investigation of thermal performances of a solar air heater with different spiral-shaped baffles heights. *J. Build. Eng.* 65, 105662.
- [5] Khanlari, A., Tuncer, A.D., Sözen, A., Aytaç, İ., Çiftçi, E., Variyenli, H. İ., 2022. Energy and exergy analysis of a vertical solar air heater with nano-enhanced absorber coating and perforated baffles. *Renew. Energy* 187, 586–602.
- [6] Selimefendigil, F., Şirin, C., Ghachem, K., Kolsi, L., Alqahtani, T., Algarni, S., 2022b. Enhancing the performance of a greenhouse drying system by using triple-flow solar air collector with nano-enhanced absorber coating. *Case Stud. Therm. Eng.* 34, 102011.
- [7] Öztürk, M., Yüksel, C., Çiftçi, E., 2024. Investigation of a Photovoltaic–Thermal Solar Dryer System with Double-Pass Solar Air Collectors and Absorber Surfaces Enhanced with Graphene Nanoparticles. *Arab. J. Sci. Eng.* <https://doi.org/10.1007/s13369-024-08717-z>.
- [8] Jasyal, N.K., Sharma, S.L., Debbarma, A., 2023. Performance analysis of solar air heater using triangular corrugated absorber under jet impingement. *Energy Sources, Part A: Recovery, Util., Environ. Eff.* 45 (3), 9063–9080.
- [9] Ho, C.D., Lin, C.S., Chuang, Y.C., Chao, C.C., 2013. Performance improvement of wire mesh packed double-pass solar air heaters with external recycle. *Renew. Energy* 57, 479–489.
- [10] Gürbüz, E.Y., Sahinkesen, İ., Kusun, B., Tuncer, A.D., Keçebas, A., 2023. Enhancing the performance of an unglazed solar air collector using mesh tubes and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nano-enhanced absorber coating. *Energy* 277, 127704.
- [11] Dong, Z., Du, Q., Liu, P., Liu, Z., Liu, W., 2023. A numerical investigation and irreversibility optimization of constantly grooved solar air heaters. *Renew. Energy* 207, 629–646.
- [12] Tuncer, A.D., Amini, A., Khanlari, A., 2023. Developing an infrared-assisted solar drying system using a vertical solar air heater with perforated baffles and nano-enhanced black paint. *Sol. Energy* 263, 111958.
- [13] Alomar, O.R., Abd, H.M., Salih, M.M.M., 2022. Efficiency enhancement of solar air heater collector by modifying jet impingement with v-corrugated absorber plate. *J. Energy Storage* 55, 105535.
- [14] Farzan, H., Hasan Zaim, E., 2023. Study on thermal performance of a new combined perforated Metallic/Asphalt solar air heater for heating Applications: An experimental study. *Sol. Energy* 249, 485–494. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.12.008>.
- [15] W. Gao, W. Lin, T. Liu, and C. Xia, “Analytical and experimental studies on the thermal performance of cross-corrugated and flat-plate solar air heaters,” *Appl. Energy*, vol. 84, no. 4, pp. 425–441, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2006.02.005>.
- [16] T. A. Yassen, N. D. Mokhlif, and M. Asmail, “Performance investigation of an integrated solar water heater with corrugated absorber surface for domestic use,” *Renew. Energy*, vol. 138, pp. 852–860, 2019, doi: [10.1016/j.renene.2019.01.114](https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.114).
- [17] S.A. Abdel-Moneim Atwan, E.F. Atwan, and A.R. El-Shamy, “Heat Transfer and Flow Friction in a Rectangular Duct with Repeated Multiple v-ribs Mounted on the Bottom Wall,” in 12th International Mechanical Power Engineering Conference (IMPEC12), 2001, pp. 11–25.

- [18] C.-O. Olsson and B. Sunden, "Thermal and Hydraulic Performance of a Rectangular Duct With Multiple V-Shaped Ribs," *J. Heat Transfer*, vol. 120, no. 4, pp. 1072–1077, Nov. 1998, doi: 10.1115/1.2825892.
- [19] J. C. Han, Y. M. Zhang, and C. P. Lee, "Augmented Heat Transfer in Square Channels With Parallel, Crossed, and V-Shaped Angled Ribs," *J. Heat Transfer*, vol. 113, no. 3, pp. 590–596, Aug. 1991, doi: 10.1115/1.2910606.
- [20] E. A. M. Elshafei, M. M. Awad, E. El-Negiry, and A. G. Ali, "Heat transfer and pressure drop in corrugated channels," *Energy*, vol. 35, no. 1, pp. 101–110, Jan. 2010, doi: 10.1016/J.ENERGY.2009.08.031.
- [21] H. Pehlivan, I. Taymaz, and Y. İ, "Experimental study of forced convective heat transfer in a different arranged corrugated channel," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 46, pp. 106–111, 2013, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.05.016.
- [22] M. A. Mehrabian and R. Poulter, "Hydrodynamics and thermal characteristics of corrugated channels: computational approach," *Appl. Math. Model.*, vol. 24, no. 5, pp. 343–364, 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S0307-904X\(99\)00039-6](https://doi.org/10.1016/S0307-904X(99)00039-6).
- [23] K. Sarraf, S. Launay, and L. Tadrist, "Complex 3D-flow analysis and corrugation angle effect in plate heat exchangers," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 94, pp. 126–138, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2015.03.002>.
- [24] Y. Qin, X. Guan, Z. Dun, and H. Liu, "Numerical simulation on fluid flow and heat transfer in a corrugated plate air preheater," *Dongli Gongcheng Xuebao/Journal Chinese Soc. Power Eng.*, vol. 35, pp. 213–218, Mar. 2015.
- [25] C. Zimmerer, P. Gschwind, G. Gaiser, and V. Kottke, "Comparison of heat and mass transfer in different heat exchanger geometries with corrugated walls," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 26, no. 2, pp. 269–273, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0894-1777\(02\)00136-X](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(02)00136-X).
- [26] J. E. O'Brien and E. M. Sparrow, "Corrugated-Duct Heat Transfer, Pressure Drop, and Flow Visualization," *J. Heat Transfer*, vol. 104, no. 3, p. 410, Aug. 1982, doi: 10.1115/1.3245108.
- [27] Y. Islamoglu and C. Parmaksizoglu, "The effect of channel height on the enhanced heat transfer characteristics in a corrugated heat exchanger channel," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 23, no. 8, pp. 979–987, Jun. 2003, doi: 10.1016/S1359-4311(03)00029-2.
- [28] A. Hamza, H. Ali, and Y. Hanaoka, "Experimental study on laminar flow forced-convection in a channel with upper V-corrugated plate heated by radiation," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 45, no. 10, pp. 2107–2117, 2002.
- [29] Salman, M., Chauhan, R., Poongavanam, G. K., & Kim, S. C., 2022. Analytical investigation of jet impingement solar air heater with dimple-roughened absorber surface via thermal and effective analysis. *Renewable Energy*, 199, 1248-1257.
- [30] Zhu, T. T., Diao, Y. H., Zhao, Y. H., & Deng, Y. C., 2015. Experimental study on the thermal performance and pressure drop of a solar air collector based on flat micro-heat pipe arrays. *Energy conversion and management*, 94, 447-457.
- [31] R. Chauhan and N. S. Thakur, "Heat transfer and friction factor correlations for impinging jet solar air heater," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 44, pp. 760–767, 2013, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2012.09.019.
- [32] M. A. R. Sharif and A. Banerjee, "Numerical analysis of heat transfer due to confined slot-jet impingement on a moving plate," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 29, no. 2–3, pp. 532–540, Feb. 2009, doi: 10.1016/J.APPL THERMA LENG. 2008.03.011.
- [33] M. Imbriale, A. Ianiro, C. Meola, and G. Cardone, "Convective heat transfer by a row of jets impinging on a concave surface," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 75, pp. 153–163, Jan. 2014, doi: 10.1016/J.IJ THERMAL SCI. 2013.07.017.
- [34] E. Öztekin, O. Aydın, and M. Avci, "Heat transfer in a turbulent slot jet flow impinging on concave surfaces," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 44, pp. 77–82, May 2013, doi: 10.1016/J.ICHEATMASSTRANSFER.2013.03.006.
- [35] M. Kilic, T. Calisir, and S. Baskaya, "Experimental and numerical study of heat transfer from a heated flat plate in a rectangular channel with an impinging air jet," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 39, no. 1, pp. 329–344, 2017, doi: 10.1007/s40430-016-0521-y.



- [36] N. Celik and E. Turgut, "Design analysis of an experimental jet impingement study by using Taguchi method," *Heat Mass Transf.*, vol. 48, no. 8, pp. 1407–1413, 2012, doi: 10.1007/s00231-012-0989-7.
- [37] A. J. Onstad, T. B. Hoberg, C. J. Elkins, J. K. Eaton, and E. Mall, "Sixth International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena flow and heat transfer for jet impingement arrays with local extraction," no. June, pp. 22–24, 2009.
- [38] R. Chauhan and S. C. Kim, "Effective efficiency distribution characteristics in protruded/dimpled-arc plate solar thermal collector," *Renew. Energy*, vol. 138, pp. 955–963, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.050>.
- [39] G. Yang, M. Choi, and J. S. Lee, "An experimental study of slot jet impingement cooling on concave surface: Effects of nozzle configuration and curvature," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 42, no. 12, pp. 2199–2209, 1999, doi: 10.1016/S0017-9310(98)00337-8.
- [40] P. Culun, N. Celik, and K. Pihtili, "Effects of design parameters on a multi jet impinging heat transfer," *Alexandria Eng. J.*, vol. 57, no. 4, pp. 4255–4266, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.01.022>.
- [41] A. M. Aboghrara et al., "Parametric study on the thermal performance and optimal design elements of solar air heater enhanced with jet impingement on a corrugated absorber plate," *Int. J. Photoenergy*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/1469385.
- [42] M. Belusko, W. Saman, and F. Bruno, "Performance of jet impingement in unglazed air collectors," vol. 82, pp. 389–398, 2008, doi: 10.1016/j.solener.2007.10.005.
- [43] R. Ekiciler, M. S. A. Çetinkaya, and K. Arslan, "Convective Heat Transfer Investigation of a Confined Air Slot-Jet Impingement Cooling on Corrugated Surfaces With Different Wave Shapes," *J. Heat Transfer*, vol. 141, no. 2, p. 022202, 2018, doi: 10.1115/1.4041954.
- [44] N. K. Chougule, G. V. Parishwad, and C. M. Sewatkar, "Numerical Analysis of Pin Fin Heat Sink with a Single and Multi Air Jet Impingement Condition," vol. 1, no. 3, pp. 44–50, 2012.
- [45] A. kumar Goel, S. N. Singh, and B. N. Prasad, "Experimental investigation of thermo-hydraulic efficiency and performance characteristics of an impinging jet-finned type solar air heater," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 52, Aug. 2022.
- [46] R.K. Nayak, S.N. Singh, Effect of geometrical aspects on the performance of jet plate solar air heater, *Sol. Energy*. 137 (2016) 434–440, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.08.024>.
- [47] Kercher DM, Tabakoff W, Heat Transfer by a square array of round air jets impinging perpendicular to a flat surface including the effect of spent air, ASME- Paper 69-GT-4. (1969). <https://asmedigitalcollection.asme.org/gasturbinespower>
- [48] J.E. Ferrari, N. Lior, J. Slycke, An evaluation of gas quenching of steel rings by multiple-jet impingement, *J. Mater. Process. Technol.* 136 (2003) 190–201, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00158-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00158-4).
- [49] L.W. Florschuetz, C.R. Truman, D.E. Metzger, Streamwise flow and heat transfer distributions for jet array impingement with crossflow., *Am. Soc. Mech. Eng.* (1981) 1–10. <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/>.
- [50] L.F.G. Geers, M.J. Tummers, T.J. Bueninck, K. Hanjali' c, Heat transfer correlation for hexagonal and in-line arrays of impinging jets, *Int. J. Heat Mass Transf.* 51 (2008) 5389–5399, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.01.035>.
- [51] M. Goodro, J. Park, P. Ligrani, M. Fox, H.K. Moon, Effects of hole spacing on spatially-resolved jet array impingement heat transfer, *Int. J. Heat Mass Transf.* 51 (2008) 6243–6253, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.05.004>.
- [52] J. Lee, Z. Ren, P. Ligrani, D.H. Lee, M.D. Fox, H.K. Moon, Cross-flow effects on impingement array heat transfer with varying jet-to-target plate distance and hole spacing, *Int. J. Heat Mass Transf.* 75 (2014) 534–544, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.03.040>.
- [53] C. Choudhury, H.P. Garg, Evaluation of a jet plate solar air heater, *Sol. Energy*. 46 (1991) 199–209, [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(91\)90064-4](https://doi.org/10.1016/0038-092X(91)90064-4).
- [54] Metzger, D. E., Florschuetz, L. W., Takeuchi, D. I., Behee, R. D., & Berry, R. A., 1979. Heat transfer characteristics for inline and staggered arrays of circular jets with crossflow of spent air. *ASME Journal of Heat Transfer*, 101 (3), 526–531 <https://doi.org/10.1115/1.3451022>.

- [55] R. Moshery, T.Y. Chai, K. Sopian, A. Fudholi, A.H.A. Al-Waeli, Thermal performance of jet-impingement solar air heater with transverse ribs absorber plate, *Sol. Energy*. 214 (2021) 355–366, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.11.059>.
- [56] Song, Z., Xue, Y., Jia, B., He, Y., 2023. Introduction of the rectangular hole plate in favor the performance of photovoltaic thermal solar air heaters with baffles. *Appl. Therm. Eng.* 220, 119774.
- [57] Tan, A.S.T., Janaun, J., Tham, H.J., Siambun, N.J., Abdullah, A., 2022. Performance analysis of a solar heat collector through experimental and CFD investigation. *Mater. Today.: Proc.* 57, 1338–1344.
- [58] S. Kumar et al., “CFD analysis of the influence of distinct thermal enhancement techniques on the efficiency of double pass solar air heater (DP-SAH),” *Materials Today: Proceedings*, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.05.454.
- [59] Arya, N., Goel, V., Sunden, B., 2023. Solar air heater performance enhancement with differently shaped miniature combined with dimple shaped roughness: CFD and experimental analysis. *Sol. Energy* 250, 33–50.
- [60] Potgieter, M.S.W., Bester, C.R., Bhamjee, M., 2020. Experimental and CFD investigation of a hybrid solar air heater. *Sol. Energy* 195, 413–428.
- [61] Tuncer, A.D., Khanlari, A., Sözen, A., Gürbüz, E.Y., Şirin, C., Gungor, A., 2020. Energy-exergy and enviro-economic survey of solar air heaters with various air channel modifications. *Renew. Energy* 160, 67–85.
- [62] Kumar, S., & Saini, R. P., 2009. CFD based performance analysis of a solar air heater duct provided with artificial roughness. *Renewable energy*, 34(5), 1285-1291.
- [63] Karmare, S. V., & Tikekar, A. N., 2010. Analysis of fluid flow and heat transfer in a rib grit roughened surface solar air heater using CFD. *Solar Energy*, 84(3), 409-417.
- [64] Boulemtafes-Boukadoum, A., & Benzaoui, A. J. E. P., 2014. CFD based analysis of heat transfer enhancement in solar air heater provided with transverse rectangular ribs. *Energy Procedia*, 50, 761-772.
- [65] Singh, S., Singh, B., Hans, V. S., & Gill, R. S., 2015. CFD (computational fluid dynamics) investigation on Nusselt number and friction factor of solar air heater duct roughened with non-uniform cross-section transverse rib. *Energy*, 84, 509-517.
- [66] Gawande, V.B., Dhoble, A.S., Zodpe, D.B., Chamoli, S., 2015b. Experimental and CFD based thermal performance prediction of solar air heater provided with right-angle triangular rib as artificial roughness. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 38, 551–579.
- [67] Singh, A., & Singh, S., 2017. CFD investigation on roughness pitch variation in non-uniform cross-section transverse rib roughness on Nusselt number and friction factor characteristics of solar air heater duct. *Energy*, 128, 109-127.
- [68] Thakur, D. S., Khan, M. K., & Pathak, M., 2017. Performance evaluation of solar air heater with novel hyperbolic rib geometry. *Renewable Energy*, 105, 786-797.
- [69] Kumar, A., Kumar, N., Kumar, S., & Maithani, R., 2023. Exergetic efficiency analysis of impingement jets integrated with internal conical ring roughened solar heat collector. *Experimental Heat Transfer*, 36(1), 75-95.
- [70] A.M. Fadhil, J.M. Jalil, G.A. Bilal, Experimental and numerical investigation of solar air collector with phase change material in column obstruction, *J. Energy Storage* 79 (2024) 110066, <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.110066>.
- [71] S. Yadav and R. P. Saini, “Numerical investigation on the performance of a solar air heater using jet impingement with absorber plate,” *Solar Energy*, vol. 208, pp. 236–248, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.07.088.
- [72] Das, S., Biswas, A., & Das, B., 2023. Parametric investigation on the thermo-hydraulic performance of a novel solar air heater design with conical protruded nozzle jet impingement. *Applied Thermal Engineering*, 219, 119583.
- [73] J. Pal and S. K. Singal, “Numerical Analysis of Influence of Angle of Attack on the Performance of Solar Air Heater Having Cylindrical Jet Impingement Plate,” in *2023 10th International Conference on Power and Energy Systems Engineering (CPESE)*, IEEE, Sep. 2023, pp. 346–351. doi: 10.1109/CPESE59653.2023.10303058.

- [74] T. Rajaseenivasan, S. Ravi Prasanth, M. Salamon Antony, K. Srithar, Experimental investigation on the performance of an impinging jet solar air heater, *Alexandria Eng. J.* 56 (2017) 63–69, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.09.004>.
- [75] A. Soni, S.N. Singh, Experimental analysis of geometrical parameters on the performance of an inline jet plate solar air heater, *Sol. Energy.* 148 (2017) 149–156, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.03.081>.
- [76] R. Nadda, A. Kumar, R. Maithani, Developing heat transfer and friction loss in an impingement jets solar air heater with multiple arc protrusion obstacles, *Sol. Energy.* 158 (2017) 117–131, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.09.042>.
- [77] R. Nadda, R. Kumar, A. Kumar, R. Maithani, Optimization of single arc protrusion ribs parameters in solar air heater with impinging air jets based upon PSI approach, *Therm. Sci. Eng. Prog.* 7 (2018) 146–154, <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.05.008>.
- [78] R. Maithani, S. Sharma, A. Kumar, Thermo-hydraulic and exergy analysis of inclined impinging jets on absorber plate of solar air heater, *Renew. Energy.* 179 (2021) 84–95, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.013>.
- [79] M. Zukowski, Experimental investigations of thermal and flow characteristics of a novel microjet air solar heater, *Appl. Energy.* 142 (2015) 10–20, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.052>.
- [80] R. Chauhan, N.S. Thakur, Investigation of the thermohydraulic performance of impinging jet solar air heater, *Energy.* 68 (2014) 255–261, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.059>.
- [81] R. Chauhan, T. Singh, N.S. Thakur, A. Patnaik, Optimization of parameters in solar thermal collector provided with impinging air jets based upon preference selection index method, *Renew. Energy.* 99 (2016) 118–126, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.06.046>.
- [82] R. Chauhan, T. Singh, N. Kumar, A. Patnaik, N.S. Thakur, Experimental investigation and optimization of impinging jet solar thermal collector by Taguchi method, *Appl. Therm. Eng.* 116 (2017) 100–109, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.01.025>.
- [83] A.M. Aboghrara, B.T.H.T. Baharudin, M.A. Alghoul, N.M. Adam, A.A. Hairuddin, H.A. Hasan, Performance analysis of solar air heater with jet impingement on corrugated absorber plate, *Case Stud. Therm. Eng.* 10 (2017) 111–120, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2017.04.002>.
- [84] D. Singh, B. Premachandran, S. Kohli, Numerical Simulation of the Jet Impingement Cooling of a Circular Cylinder, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications* 64 (2) (2013) 153–185, <https://doi.org/10.1080/10407782.2013.772869>.
- [85] Tobergte D.R. and Curtis, S. (2013) Detection, Estimation, and Modulation Theory. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53, 1689-1699.
- [86] Thakur, D.S., Khan, M.K., Pathak, M., 2017. Solar air heater with hyperbolic ribs: 3D simulation with experimental validation. *Renewable Energy* 113, 357–368. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.096>.
- [87] Singh S, Chaurasiya SK, Negi BS, Chander S, Nem' s M, Negi S. Utilizing circular jet impingement to enhance thermal performance of solar air heater. *Renew Energy* 2020;154:1327–45. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.095>.
- [88] Holman, J.P., 2001. Analysis of experimental data. In *Experimental Methods for Engineers*, 7th ed.; McGraw Hill: Singapore, pp. 48–143.

## FARKLI ORANLARDA İZOOKTAN-DİZEL YAKITI İLE BESLENEN BİR RCCI MOTORUNUN MOTOR PERFORMANSI VE EMİSYONLARI ÜZERİNE DENEYSEL BİR ÇALIŞMA

**Müjdat FIRAT<sup>1</sup>, Mutlu OKCU<sup>2\*</sup>, Yasin VAROL<sup>3</sup>**

<sup>1,3</sup>Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Elazığ, 23000, Türkiye

<sup>2</sup>Ardahan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ardahan, 75002, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 27.03.2024 Kabul Tarihi/Accepted Date: 31.08.2024 DOI: 10.54365/adyumbd.1459930

### ÖZET

Yapılan çalışmada deney motoru, modifiye edilerek RCCI konseptine göre çalışır hale getirilmiş tek silindirli dizel motordur. Yüksek reaktiviteli yakıt (HRF) olarak dizel ve düşük reaktiviteli yakıt (LRF) olarak da izooktan (%15, %30, %45 ve %60 karışım oranlarında) kullanılmıştır. Deneyler üç farklı yükte (%20, %40 ve %60) ve 2400 (d/d) sabit motor devrinde gerçekleştirilmiştir. %20 yükte basınç pik değerinde LRF kullanımı ile önemli bir değişim olmamakla birlikte, motor yükü ve LRF karışım oranı arttıkça basınç ve HRR pik değeri artmış, bu değerlerin oluştuğu krank açısı ilerlemiştir. Motor performansı için önemli olan ortalama indike basınçta (OİB) LRF oranına bağlı olarak kısmi azalmalar görülmesine rağmen, %15 LRF oranı kullanımının tüm yüklerde OİB'nin dizel yakıtlı deneyde oluşan değerle hemen hemen aynı seviyede oluştuğu belirlenmiştir. LRF kullanımı ile düşük yükte NOx emisyonu, yüksek yükte CO emisyonu başarılı bir şekilde azaltılırken, HC emisyonu tüm deneylerde artış göstermiştir. Duman opaklığı tüm yük deneylerinde LRF ile azaltılırken, en büyük azalma %60 yükte yaklaşık olarak %97 oranında gerçekleşmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** RCCI, İzooktan, Dizel motor, Emisyon, Yüksek oktanlı yakıt

## AN EXPERIMENTAL STUDY ON ENGINE PERFORMANCE AND EMISSIONS OF A RCCI ENGINE FUELLED WITH DIFFERENT RATIOS OF ISOCTANE-DIESEL FUEL

### ABSTRACT

In the conducted study, a single-cylinder diesel engine was modified to operate according to the RCCI concept. Diesel was used as HRF and iso-octane (in mixture ratios of 15%, 30%, 45%, and 60%) as LRF. Experiments were conducted at three different loads (20%, 40%, and 60%) and at a constant engine speed of 2400 rpm. While there was no significant change in the peak pressure value with the use of LRF at 20% load, as the engine load and LRF mixture ratio increased, both pressure and HRR peak value increased, and these values occurred at an advanced crank angle. Although partial decreases depending on the LRF ratio were observed in the IMEP, which is important for engine performance, it was determined that the use of 15% LRF ratio resulted in IMEP levels almost similar to those obtained in diesel-fueled experiments at all loads. With the use of LRF, NOx emissions were successfully reduced at low loads, and CO emissions were reduced at high loads, while HC emissions increased in all experiments. Smoke opacity was reduced with LRF at all load experiments, with the greatest reduction occurring at 60% load, approximately by 97%.

**Keywords:** RCCI, Iso-octane, Diesel engine, Emissions, High octane fuel

e-posta<sup>1</sup> : [mujdatfirat@gmail.com](mailto:mujdatfirat@gmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6978-9044>,

e-posta<sup>3</sup> : [yvarol@gmail.com](mailto:yvarol@gmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2989-7125>

\* e-posta<sup>2</sup> : [mutluokcu@gmail.com](mailto:mutluokcu@gmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8226-0994> (Sorumlu Yazar)

## 1. Giriş

Dizel motorlar yüksek verim ve düşük yakıt tüketimlerinden dolayı birbirinden farklı birçok çalışma alanında kullanılmaktadırlar [1,2]. Dizel motorların araştırıldığı birçok çalışmada, bu motorların genel olarak önemli avantajlara sahip olmasının vurgulanmasının yanında, özellikle zararlı emisyon üretim problemlerinin devam ettiğinden sıklıkla bahsedilmekte olduğu görülmüştür [3,4]. Emisyon üretim problemlerinin yanında, azalan fosil yakıt kaynakları da dizel motorların baş etmesi gereken başka bir problemdir. Son yıllarda literatürde dizel motor üzerine yapılan çalışmalarda, aynı anda hem emisyon problemlerinin çözümü hem de motor performansının iyileştirilmesini incelemek için enjeksiyon yöntemleri, egzoz sonrası sistemler ve alternatif yakıt kullanımı gibi parametrelerin incelendiği birçok çalışma görülmektedir [5–9]. Ayrıca, yapılan çalışmalarda araştırmacıların dizel motorlarda özellikle NO<sub>x</sub> ve is emisyonlarının aynı anda azaltılabildiği ve motor performansında azalmaya sebep olmayan düşük sıcaklıklı yanma (LTC) konseptlerinin oldukça yaygın bir şekilde kullandığı tespit edilmiştir [10–12]. Bu konseptlerden biri olan reaktivite kontrollü sıkıştırma ateşleme (RCCI) modu, birçok araştırmacı tarafından dizel motorlarda yanmayı iyileştirmek ve emisyonların kontrol altında tutulmasını sağlamak için kullanılmaktadır. Bu çalışmalardan biri Poorghasemi ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, RCCI konseptine göre çalıştırılan hafif hizmet tip ve doğal gaz/dizel yakıtlı dizel bir motorda, dizel enjeksiyon strateji değişiminin RCCI yanma özelliklerine etkisini Converge CFD simülasyon programı kullanımı ile sayısal olarak incelemişlerdir. Karşımdaki doğalgaz oranının artmasının yanmayı kötüleştirdiği ve %95 oranında kullanılan doğal gazın, tutuşma gecikmesini oldukça uzattığı ve sonucunda yanmanın gerçekleşmediği bildirilmiştir. Yanma reaksiyonunda meydana gelen bu değişimde doğal gazın tutuşma gecikmesi üzerindeki etkisinin (oktan sayısı, setan sayısı gibi özelliklerden dolayı) önemli olduğu görülmüştür. Tüm bu değişimlerin NO<sub>x</sub> emisyonunu azaltmasına rağmen, HC ve CO emisyonunda artışa sebep olduğu vurgulanmıştır [6]. Deb ve arkadaşları, dizel bir motorda LRF olarak asetilenin kullanıldığı bir çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmada asetilen ön karışım oranları ve gelişmiş dizel enjeksiyon zamanlamasının RCCI motor performansının etkisinin incelenmesi analiz edilmiştir. Çalışmada sunulan bulgulara göre, aynı deney koşullarında, RCCI konsepti kullanımı ile geleneksel dizel yanmaya göre NO<sub>x</sub> emisyonlarının yaklaşık olarak %280, HC emisyonlarının %65 arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, CO emisyonlarının yaklaşık olarak %42 azaldığı ve duman opaklığının da %79,6'dan %35,1 seviyesine düştüğü vurgulanmıştır. Yapılan bu çalışmada yanma reaksiyonlarının kullanılan asetilen karışım oranına göre üst ölü noktaya (ÜÖN) yakınlığının hem emisyon hem de motor performansı üzerindeki etkisinin önemli olduğu sonucuna varılmıştır [13]. Elbanna ve arkadaşları RCCI modunda çalışan bir motorda, etanol-dizel yakıtlarının kullanıldığı bir çalışma yapmışlardır. Yapılan bu çalışmada, kullanılan yakıtın üç farklı oranda oktan sağlayacak şekilde oranları belirlenmiş ve deneylerde kullanılarak bunların motor performansına etkisi analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kullanılan yakıtların oktan sayısının motor performansı ve emisyonları üzerinde olumlu etkileri olduğu vurgulanmıştır [14]. Zou ve arkadaşları, RCCI konseptli bir dizel motorda metanol, etanol, n-bütanol ve dizel yakıtlarının kullanımı ile motor performansı üzerindeki etkilerini inceledikleri sayısal bir çalışma yapmışlardır. Sayısal çalışma KIVA-3vr2 CFD kodu ile yürütülmüştür. Metanol-dizel (MD) ve etanol-dizel (ED) yakıtlarının kullanımı ile is ve NO<sub>x</sub> emisyonlarının benzin-dizel (GD) ve n-bütanol-dizel (nBD) kullanımlarına kıyasla daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Bu durumun düşük ısı değerinden dolayı MD ve ED yakıtlarının kullanımında daha fazla yakıt kullanımına bağlı olduğu vurgulanmıştır. Daha fazla kullanılan yakıtın, yanma başlamadan önce yanma odasında daha fazla zengin karışım bölgeleri oluşturduğu ve dolayısıyla daha yüksek NO<sub>x</sub> ve is oluştuğu ifade edilmiştir. Ayrıca yakıtların tutuşma gecikmesinin de motor performansı ve emisyonu üzerindeki etkisinin önemli olduğu gözlenmiştir [15].

Yapılan incelemelerde RCCI konseptinin dizel motorlarda kullanımı ile motor performans ve emisyonların kullanılan yakıtların türü ve oranına bağlı olarak kontrol altında tutulabileceği görülmüştür. Ayrıca, literatürde yapılan araştırmalarda, yakıtların oktan sayısının, alt ısı değerinin ve viskozitesi başta olmak üzere, yakıt termofiziksel özelliklerinin motor performansının ve emisyonlarının üzerine etkisinin oldukça önemli olduğu belirlenmiştir. Son olarak, yapılan bir çalışmada, motorlarda

kullanılan yakıtların oktan sayısının, silindi içi dolguların alev hızının artmasına katkıda bulunduğu vurgulanmaktadır [16]. Bu bağlamda, RCCI motorlarda LRF olarak kullanılan yakıtların alt ısı değer ve oktan sayısının arzu edilen emisyon kontrolü ve motor performansı değerlerinin elde edilmesinde önemli bir rol oynadığı kanısına varılmıştır ve yapılan çalışmada, hem alt ısı değeri hem de oktan sayısı bakımından avantajları olduğu değerlendirilen izooktan yakıtı LRF olarak kullanılmıştır. Yapılan çalışmada temel amaç, LRF olarak kullanılan izooktan ile RCCI konseptli dizel bir motorda motor performansında her hangi bir azalma olmadan (yüksek ısı değerinden dolayı) motor emisyonlarının kontrolünü sağlamaktır. Literatürde dizel motorlarda izooktanın yakıt olarak kullanımı mevcuttur. Ancak, yapılan çalışmada izooktanın dört farklı oranda (%15, %30, %45 ve %60) ve üç farklı motor yükünde kullanımı ile RCCI konseptli motorlarda izooktanın kullanımının motor performans ve emisyonlarına etkisinin geniş bir çerçevede ele alınması sağlanmış ve bu açıdan literatüre katkı vermesi hedeflenmiştir. Son olarak, LRF olarak izooktan kullanımının bir diğer sebebi de izooktanın 100 oktan sayısına sahip olması ve bu anlamda RCCI konseptli motorlarda referans bir yakıt olarak önemli katkılar vereceği beklentisidir.

## 2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada RCCI konseptine göre çalışmaya uygun hale getirilen tek silindirli dizel bir motorda LRF olarak izooktan ve HRF olarak dizel kullanımının motor performansı ve emisyonları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Kullanılan dizel yakıtı EN590 standartlarına uygun ve hali hazırda kullanımı olan dizel yakıtıdır. Çalışmada kullanılan izooktan (%99.5 saflıkta) ise Isolab firmasından temin edilmiştir. Bu çalışma için kullanılan yakıtların özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir [17].

Çizelge 1. Deneylede kullanılan yakıtların özellikleri

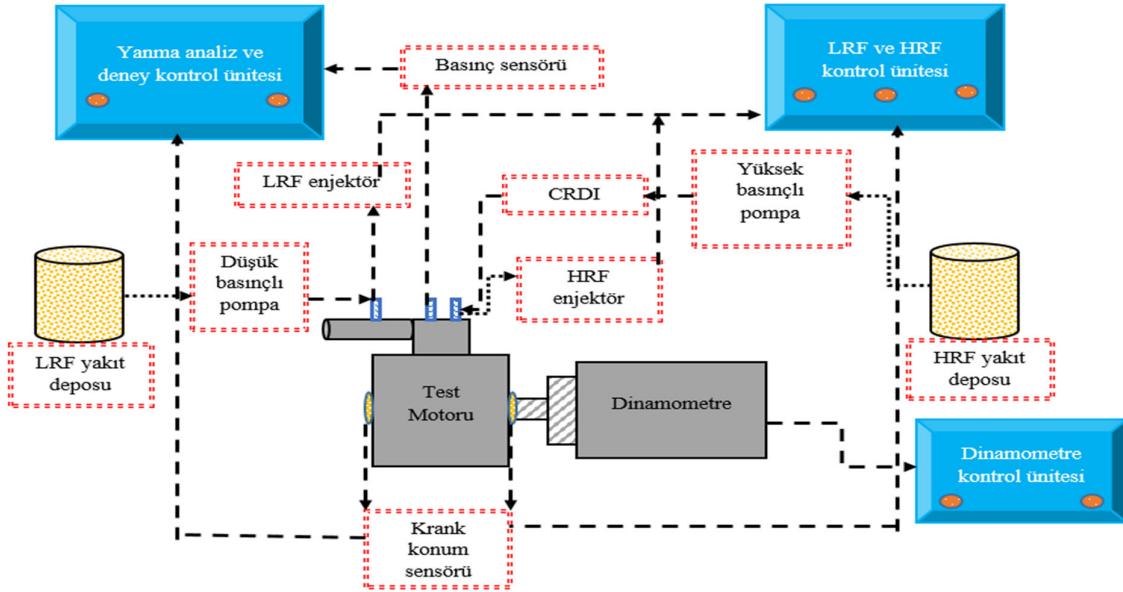
| Özellikler                           | Dizel   | İzooktan           |
|--------------------------------------|---------|--------------------|
| Moleküler Formül                     | --      | C8H18              |
| Saflık                               | --      | ≥ 99.5 %           |
| Moleküler Ağırlık(g/mol)             | --      | 114.23             |
| Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )        | 829.4   | 690                |
| Kaynama Noktası (°C)                 | 180-350 | 99                 |
| Parlama noktası (°C)                 | 67      | -12                |
| Viskozite mm <sup>2</sup> /s         | 2.889   | 0.72               |
| Alt Isıl Değer (MJ/kg)               | 43.14   | 44.31[18]-44.8[19] |
| Buharlaştırma Gizli Isısı (kJ/kg )   | 358     | 283                |
| Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı (°C) | 210-250 | 415                |
| Karbon İçeriği (%)                   | 80.13   | -                  |
| Hidrojen İçeriği (%)                 | 12.86   | -                  |
| Oksijen İçeriği (%)                  | 6.35    | -                  |
| Oktan Sayısı                         | -       | 100[18]            |
| Setan Sayısı                         | 56      | 11-17              |

Deneyle maksimum tork devri olan 2400 d/d motor devrinde ve %20, %40 ve %60 sabit motor yükleri aralığında yürütülmüştür. Her deney şartında geleneksel dizel yanmasında motora verilen yakıtın çevrim başına toplam enerjisi sabit tutulmak üzere RCCI modunda kullanılacak LRF oranı bu enerji

miktarı üzerinden %15,%30,%45 ve %60 olarak tüm deneylerde uygulanmıştır. Örneğin, %20 yükte dizel deneyinde motora 310 J/çevrim enerji verildiği tespit edilmiştir. RCCI deneyinde, %20 yükte dizelin sağladığı enerji olan 310 J/çevrimin değerine göre izooktan oranı belirlenmiştir. Yani %20 yükte RCCI deneyi için 310 J/çevrim enerji içeriğinin sırasıyla %15, %30, %45 ve %60'ı izooktan ile verilirken, %85, %70, %55 ve %40'ı da dizel yakıtı ile verilmiştir. Bu değer %40 yük için 440 J/çevrim ve %60 yük için 590 J/çevrim olarak ölçülmüş ve RCCI deneylerinde de yukarıda bahsedilen yöntemle göre LRF ve HRF oranları için yakıt miktarı belirlenmiştir. İzooktan referans alınarak isimlendirilen yakıt oranları için kısaca ön karışım oranı (KO) ifadesi tüm çalışmada kullanılmıştır. KO Aşağıdaki denkleme göre KO belirlenmiştir.

$$KO = \frac{m_{izooktan} * LHV_{izooktan}}{m_{dizel} * LHV_{dizel} + m_{izooktan} * LHV_{izooktan}} \quad (1)$$

Burada,  $m_{izooktan}$  ve  $m_{dizel}$  izooktan ve dizelin yakıt kütleleridir.  $LHV_{izooktan}$  ve  $LHV_{dizel}$  ise izooktan ve dizelin alt ısı değerini temsil etmektedir. Çalışmada tek silindirli dizel bir motor kullanılmıştır. Motora ait özellikler Çizelge 2'de, deney şeması ise Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Deney seti şeması

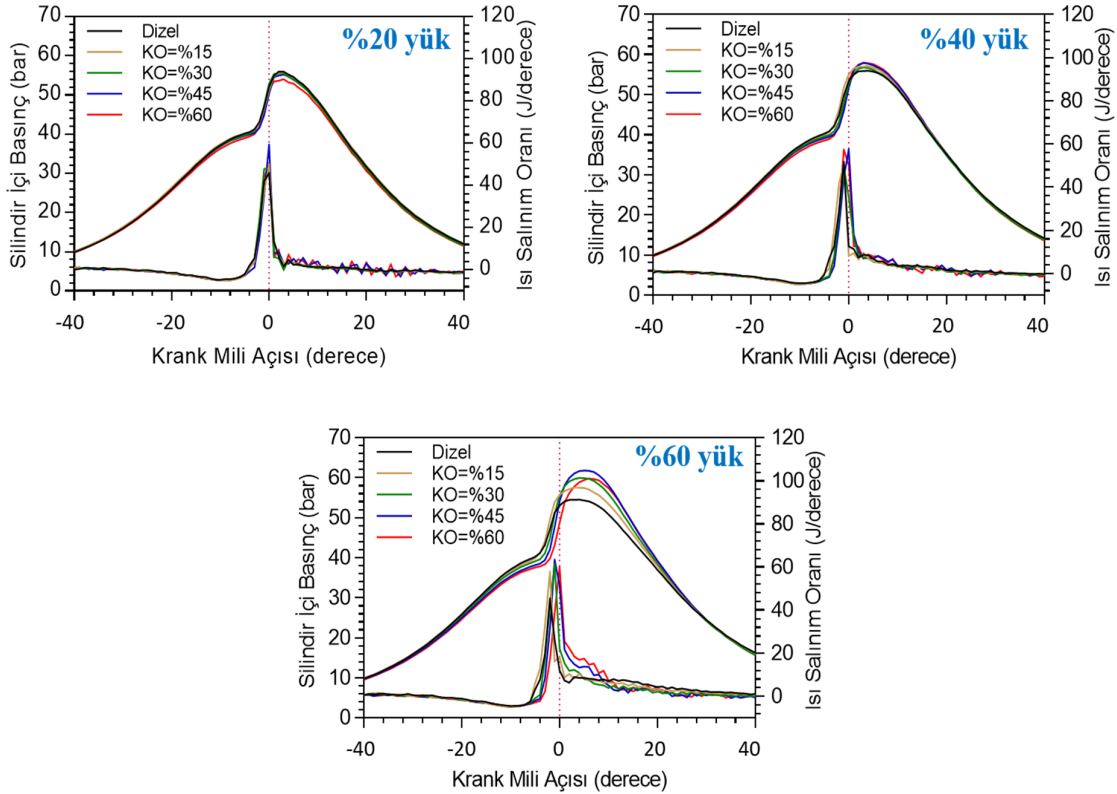
Çizelge 2. Deney motorunun özellikleri.

|                          |   |
|--------------------------|---|
| Motor enjeksiyon tipi    | Common rail direkt enjeksiyon (CRDI) hava soğutmalı |
| Silindir sayısı          | 1   |
| Sıkıştırma oranı         | 18.1:1  |
| Silindir çap*strok       | 86 x 70 (mm)  |
| Silindir hacmi           | 0,406 (L)   |
| Çıkış gücü (3000 d/d)    | 7.4 kW  |
| Maksimum tork (2400 d/d) | 25.7 Nm   |

Deneylerde dizel 300 bar basınçla silindir kapağına yerleştirilen bir enjektör vasıtasıyla doğrudan yanma odasına sıkıştırma zamanı sonunda  $21^\circ$  krank mili açısında (sÜÖN) enjekte edilmektedir. LRF olarak kullanılan izooktan ise, emme zamanı başlangıcında  $15^\circ$  krank mili açısında (sÜÖN) 5 bar basınçla port tipi enjektör (PFI) yardımıyla emme portuna enjekte edilmektedir. Yapılan çalışmada duman opaklığı ve egzoz emisyonu değerlerini belirlemek için Bosch RT430 ve BEA 350 cihazları kullanılarak ölçümler yapılmıştır. Şekil 1'de deney setine ait genel görünüm gösterilmiştir. Sonuçlar anlık olarak bilgisayara aktararak kaydedilmiş ve analizlerin yapılacağı bulgular oluşturulmuştur. Motor performansını analiz etmek için silindir gaz basıncı bir basınç transdüseri (Optrand D33288-GPA) tarafından  $1^\circ$  krank mili açısında (KMA) aralıklarla ve ortalama 200 ardışık döngü ile kayıt altına alınmıştır. Ayrıca, krank mili açısının konumu, 360 sinyal frekansına sahip bir Kübler kodlayıcı tarafından tespit edilerek silindir basıncı verileriyle birlikte veri toplama sistemi kullanılarak kaydedilmiştir. Tüm bu veriler bir şarj amplifikatörü aracılığıyla NEL presto'nun Febris Yazılımı tarafından işlenerek anlamlı grafiklerle haline getirilmiştir. Bu bilgiler daha sonra grafiklere aktararak analiz edilmiş ve çalışmada sunulmuştur.

### 3. Sonuçlar ve Tartışma

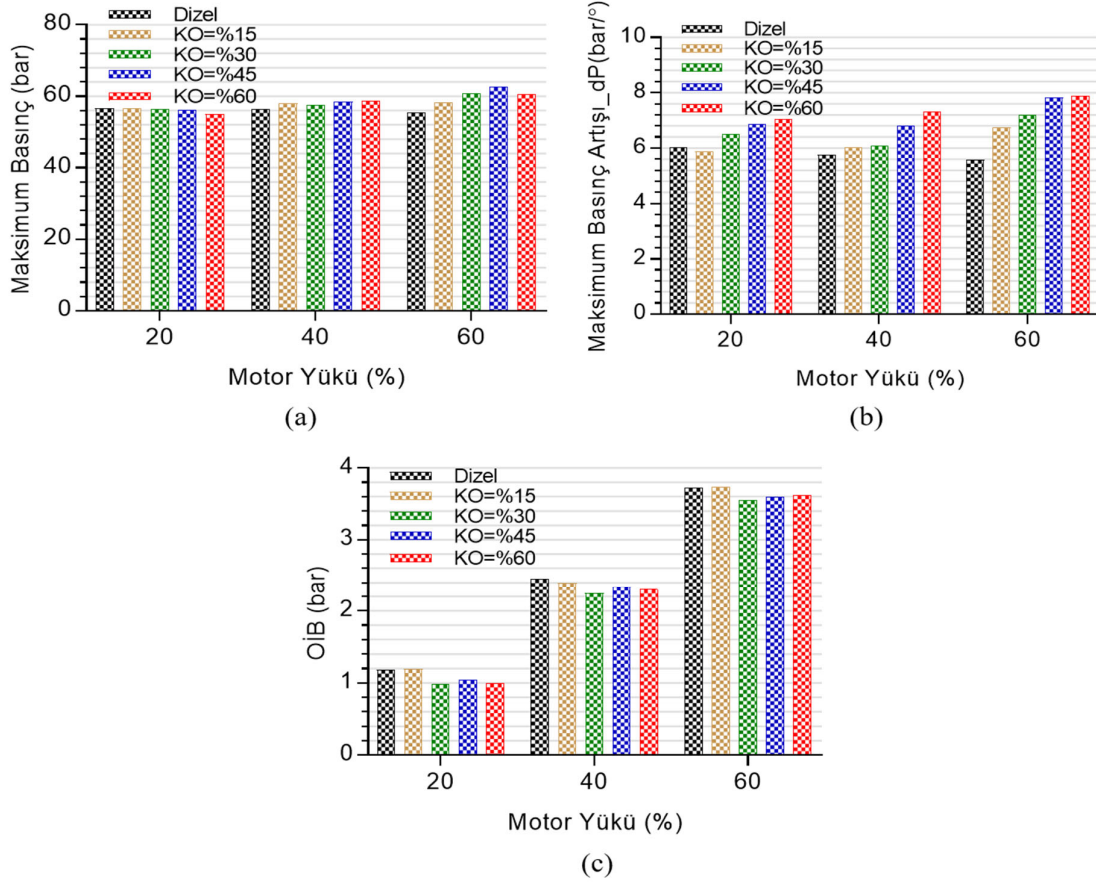
Deneyler iki aşamadan oluşmuştur. İlk aşamada deney motorunda dizel yakıtı %100 oranda ve %20, 40 ve 60 olmak üzere üç farklı yükte 2400 d/d sabit devirde kullanılmıştır. Ardından izooktan %15, %30, %45 ve %60 oranında aynı deney şartları altında LRF olarak kullanarak RCCI deneyleri yapılmıştır. Deneylerde sadece dizelin yakıt olarak kullanıldığı deneylere geleneksel dizel deneyleri ifadesi kullanılırken, izooktanlı yani LRF'nin kullanıldığı deneyler için ise RCCI modu deneyleri ifadesi kullanılmıştır. Elde edilen veriler motor performans (silindir içi basınç, HRR, OİB, maksimum basınç, maksimum basınç artışı ve toplam ısı salınımı) ve emisyonları (CO, CO<sub>2</sub>, HC, NO<sub>x</sub> ve duman opaklığı) olmak üzere iki bölümde sunulmuştur. İlk olarak motor performansına ait veriler aşağıda sunulmuştur.



Şekil 2. Silindir içi basınç ve ısı salınım oranının (HRR) karışım oranı ve motor yüküne bağlı değişimi



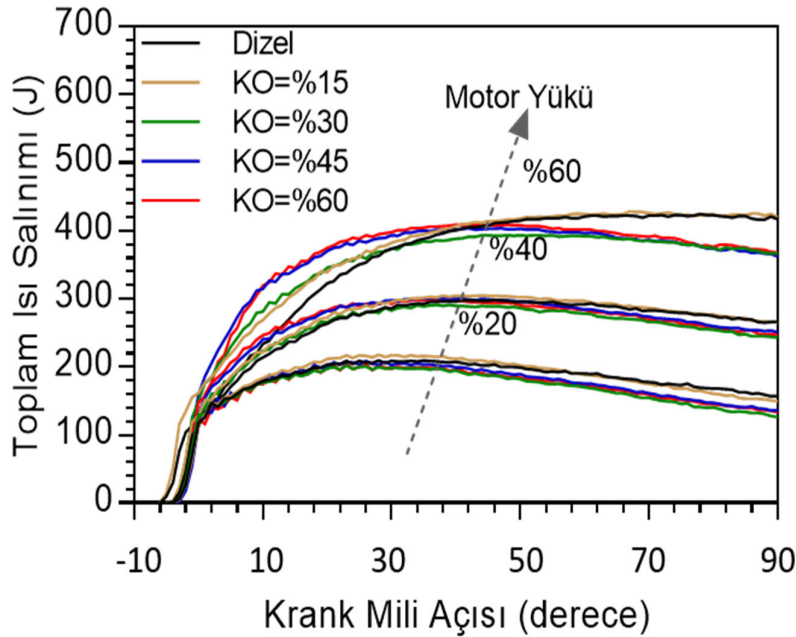
Şekil 2'deki grafikler, izooktanın çeşitli karışım oranlarının ve motor yükünün silindir içi basınç ve ısı yayılımına etkisini göstermektedir. Bulgulara göre, %20 motor yükünde LRF kullanımıyla silindir içi basınçta dikkate değer bir değişiklik gözlenmemektedir. Ancak, motor yükü %40 ve %60'a yükseldiğinde, LRF'nin tesiri artmakta ve buna paralel olarak silindir basıncı yükselmektedir. Özellikle %60 motor yükü deneylerinde, LRF'nin basınç ve ısı yayılımını önemli ölçüde artırdığı gözlenmektedir. %20 yükte azalan dizel oranı dolgunun alt ısı değerinde bir azalmaya sebep olmasına rağmen, RCCI konsepti etkisinin daha homojen bir dolgu oluşturması ve sonucunda basınçta azalma meydana gelmediği değerlendirilmiştir. Ayrıca, %20 motor yükünde LRF oranına bağlı olarak değişen tutuşma gecikmesinin silindirdeki yerel zengin karışım bölgelerinin azalmasına ve sonuç olarak basınç değişiminin kısmen kontrol altında olmasına neden olduğu düşünülmektedir. Bu şekilde, yanma tepkimelerinin daha kontrollü bir şekilde gerçekleştiği düşünülmektedir. Düşük yükte, özellikle %60 motor yükünde LRF bileşim oranının artmasının silindir içi basınç değerini aniden yükselttiği gözlemlenmiştir. Yüksek yükte, LRF bileşim oranının artmasıyla birlikte, silindir içinde zengin karışım bölgelerinin oluştuğu, tutuşma gecikmesinin uzadığı ve yanma tepkimelerinin hızlandığı düşünülmektedir. Sonuç olarak, geleneksel dizel motora göre RCCI konsepti uygulamasıyla %60 motor yükünde basınç pik değerinin HRF'ye göre yaklaşık olarak %11 oranında arttığı ve bu yükteki basınç ve ısı yayılımı üzerindeki etkisinin %20 ve %40 motor yüklerinden daha fazla olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3. Maksimum basınç (a), maksimum basınç artışı (b) ve OİB'nin (a) karışım oranı ve motor yüküne bağlı değişimi

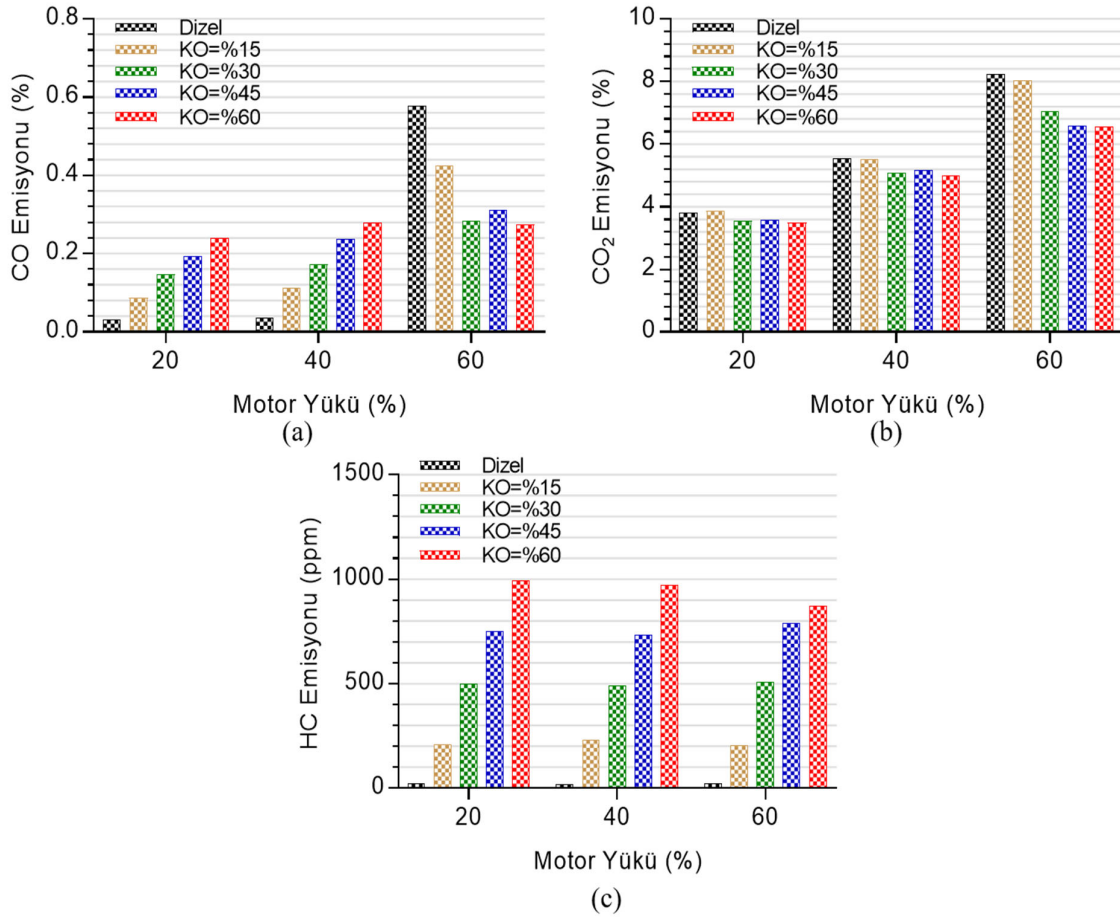
Şekil 3, RCCI konseptli bir dizel motorda çeşitli motor yükü koşullarında LRF karışım oranının değişiminin OİB, maksimum basınç ve maksimum basınç artışı üzerindeki etkisini grafiksel olarak göstermektedir. Bu grafiklerin detaylı analizi yapıldığında, motor yükü ile birlikte içeri alınan dolgunun artışının, OİB değerini artırdığı görülmektedir. Ancak, LRF karışım oranındaki artışın OİB üzerindeki

etkisi, %15 KO kullanımı dışında diğer oranlarda belirgin bir azalmaya neden olmuştur. %15 KO kullanımında ise OİB değerinde hemen hemen bir değişiklik olmamış ve dizel ile benzer seviyede bir OİB değeri elde edilmiştir. Bu bulgular, OİB değerinin artması veya azalmasında en önemli belirleyicilerin maksimum basınç değeri ve bu basıncın olduğu krank açısı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, pozitif işin artışının aynı zamanda OİB değerini artırdığını göstermektedir. Tüm deneylerde, %15 karışım oranı dışında diğer LRF karışım oranlarının OİB'yi azaltıcı bir etki yarattığı belirlenmiştir. LRF karışım oranındaki artışın özellikle %40 ve %60 motor yüklerinde silindir içindeki basınç değerini artırdığı belirlenmiştir. Ancak, bu artışa rağmen, LRF oranındaki artışın OİB'yi azaltıcı bir etkide bulunduğu görülmüştür. Bu durumun, basınç pik değerinin olduğu krank açısının silindirde oluşan negatif işi artırıcı etkide bulunmasıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Bu durum, maksimum basınç ve maksimum basınç artışı grafiklerinde de açıkça görülmektedir. Bu sonuçlar, LRF'nin artan oranlarda kullanılmasının genel olarak OİB'yi azaltıcı bir etkiye sahip olduğunu, ancak %15 KO kullanımında elde edilen değerlerin dizel ile benzer olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4. Toplam ısı salınımının karışım oranı ve motor yüküne bağlı değişimi

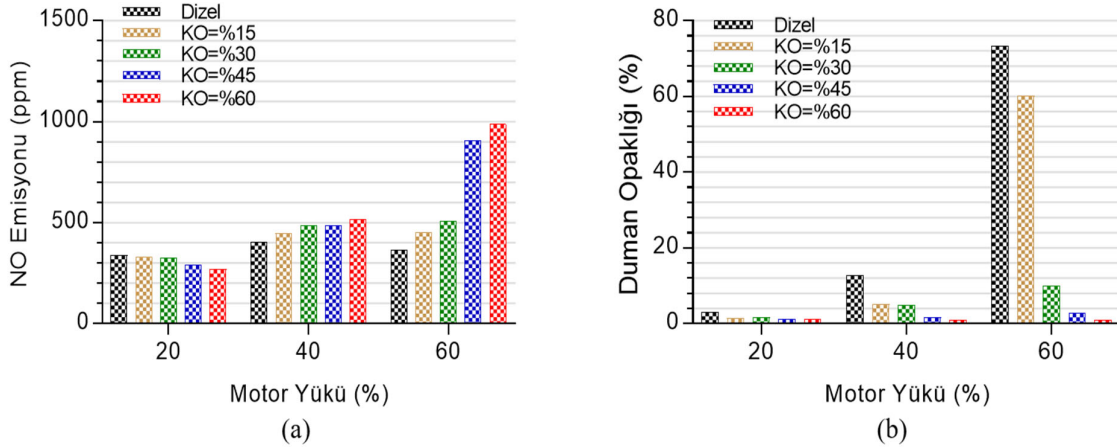
Şekil 4, motor yükünün %20'den %60'a değiştiği deneylerde, LRF karışım oranındaki değişimin toplam ısı salınımı verilerine olan etkilerini grafiksel olarak göstermektedir. Motor yükünün artmasıyla birlikte yakıt miktarında artış görülmekte ve bu da toplam ısı salınımının artmasına neden olmaktadır. Genel olarak, farklı motor yükü durumlarında kullanılan LRF'lerin toplam ısı salınım oranında farklı etkiler oluşturduğu gözlenmiştir. %20 yükte, LRF kullanımının yanma reaksiyonlarını daha kontrollü bir şekilde yönettiği ve ısı salınımının yanma süreci boyunca daha geniş krank açıları meydana geldiği ve ani yükselmeler olmadığı belirlenmiştir. %40 ve %60 yük durumlarında ise tutuşma gecikmesinin uzamasıyla birlikte dolgu enerjisinin arttığı ve yanma reaksiyonlarının aniden başlayarak %20 yüke kıyasla daha erken krank açıları daha büyük bir kısmını oluşturduğu görülmüştür. Ayrıca, tüm deneylerde, dizel ve %15 oranında izooktan kullanımında oluşan toplam ısı salınımının diğer karışım oranlarına göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum, silindir içinde homojen dolgunun daha iyi yanmasından kaynaklanmakta olup, neredeyse tamamının yanarak enerjisini açığa çıkarmasından kaynaklanmaktadır. Özetle, motor yükü ve LRF karışım oranındaki artışlarla birlikte dolgu enerjisinin daha hızlı ortaya çıktığı ve toplam ısı salınımının daha erken krank açıları olduğu gözlenirken, %15 oranında kullanılan izooktanın ısı salınımının dizel benzeri bir gelişim gösterdiği belirlenmiştir.



**Şekil 5.** CO (a), CO<sub>2</sub> (b) ve HC (c) emisyonlarının karışım oranı ve motor yüküne bağlı değişimi

Şekil 5, farklı yük seviyelerinde LRF karışım oranının CO, CO<sub>2</sub> ve HC emisyonları üzerindeki etkisini gösteren grafikleri içermektedir. CO verileri, %20 ve %40 yüklerde LRF karışım oranının artmasıyla CO emisyonunun yükseldiğini, ancak %60 yükte ise azaldığını göstermektedir. Genel olarak, CO emisyonunun eksik yanma ürünü olduğu bilinse de, %20 ve %40 yüklerde daha verimli bir yanma süreci gözlemlenmiştir. Bu durum, CO emisyonunun düşük ve orta yüklerde azalması ancak yüksek yükte artmasıyla çelişmektedir, bu da CO emisyonunun sadece verimli yanma sürecine bağlı olmadığını göstermektedir. Düşük ve orta yüklerdeki CO emisyonunun artışı, yanma reaksiyon sıcaklığının LRF kullanımıyla azalmasından kaynaklanmaktadır. %60 yükteki azalmanın sebebi ise artan reaksiyon sıcaklığıdır. Bu durum, CO<sub>2</sub> emisyonundaki değişimle de uyumlu bir şekilde gözlenmektedir. CO<sub>2</sub> emisyonu, LRF kullanımıyla tüm yüklerde azalmıştır, özellikle %60 yükte belirgin bir azalma görülmüştür. HC emisyonları ise artan LRF miktarıyla tüm yük seviyelerinde artmıştır, özellikle %20 ve %40 yüklerinde daha yüksek emisyonlar gözlemlenmiştir. HC oluşumunu etkileyen faktörler arasında yanma sürecindeki sıcaklık değişimi ve LRF'nin emme zamanında emme portuna enjekte edilmesi yer almaktadır. Düşük ve orta yüklerdeki düşük yanma sıcaklığı nedeniyle daha fazla HC emisyonu oluşurken, %60 yükte artan sıcaklıkla HC emisyon seviyesinin azaldığı gözlemlenmiştir. Tüm veriler incelendiğinde, emme zamanında porta düşük basınçla enjekte edilen izooktanın, sıkıştırma zamanı sonuna kadar cidarlarda birikmesi ve bu bölgelerde sıcaklığın azalmasından dolayı tüm yüklerde HC ve CO emisyonlarını artırdığı saptanmıştır. Ayrıca, bu durum özellikle %20 yükte silindir sıcaklığını önemli oranda azaltmış ve NO<sub>x</sub> emisyonunda azalmaya sebep olmuştur (Şekil 6). CO<sub>2</sub> emisyonunun %20 ve %40 yüklerde azalmasının, azalan silindir sıcaklığı ve artan CO emisyonuna bağlı olmasına karşın, %60 yükte, özellikle NO<sub>x</sub> emisyonunda meydana gelen ani artışlardan dolayı azaldığı

değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, benzer sebeplerden dolayı tüm yüklerde LRF karışım oranının yanma reaksiyon sıcaklığını önemli ölçüde etkilediği ve bu durumun CO, CO<sub>2</sub> ve HC emisyonları üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Özellikle %60 yükte CO emisyonundaki azalış ve tüm yüklerde CO<sub>2</sub> emisyonundaki azalış, LRF olarak izooktan kullanımı açısından önemlidir.



Şekil 6. NO emisyonu (a) ve duman opaklığının (b) karışım oranı ve motor yüküne bağlı değişimi

Şekil 6'da, LRF kullanımının değişen motor yükü koşullarında NO emisyonu ve duman opaklığı üzerindeki etkileriyle ilgili veriler sunulmaktadır. NO emisyonu verilerine göre, %20 yükte LRF kullanımının azaltıcı etkisi olduğu, ancak %40 ve %60 yüklerde LRF kullanımının artırıcı etkisi olduğu gözlenmiştir. NO emisyonu genellikle çeşitli faktörlere bağlı olarak oluşur, bunlar arasında silindir içi sıcaklık, oksijen yoğunluğu, ısı salınım hızı ve karışım zenginliği yer alır. %20 yük deneylerinde LRF'nin kullanımı, silindir içi sıcaklığın düşmesine ve daha homojen bir dolgunun oluşmasına neden olmuştur, bu da NO emisyonunda azalmaya yol açmıştır. Orta ve yüksek yüklerde ise, yanma reaksiyonlarının daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleştiği ve bunun da NO emisyonunda artışa neden olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, bu yüklerde LRF ile birlikte basınç artışının ısı salınım hızını artırdığı ve bu durumun NO emisyonunu artırdığı düşünülmektedir. Duman opaklığına gelince, tüm yük deneylerinde LRF kullanımının duman opaklığını azalttığı görülmüştür. Özellikle %60 motor yükünde dahi, LRF kullanımının ve karışım oranı artışının duman opaklığını önemli ölçüde azalttığı gözlenmiştir. Duman opaklığının büyük bir kısmı yanmamış karbon atomlarından kaynaklanır. LRF kullanımıyla, yanma sürecindeki karbon atomlarının farklı reaksiyonlarla dönüştürüldüğü ve bu nedenle duman opaklığında belirgin bir azalma olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, özellikle %60 yükte LRF kullanımının NO emisyonu ve duman opaklığı üzerinde etkili olduğu ve artan LRF karışım oranıyla bu etkinin arttığı belirlenmiştir. RCCI konsepti kullanılarak %20 yükte NO emisyonunun kontrol altında tutulduğu ve duman opaklığının tüm yüklerde azaldığı, özellikle %60 yükte yaklaşık olarak %97 oranında bir azalma olduğu gözlemlenmiştir.

#### 4. Sonuçlar

Yapılan çalışmada, modifiye edilmiş tek silindirli, dört zamanlı, direkt enjeksiyonlu RCCI konseptli dizel bir motorda deneyler yapılmıştır. Deneylerde, LRF ve HRF'nin farklı oranlarda kullanımının motor yanma, performans ve egzoz emisyonları üzerindeki etkilerinin belirlenmesi %20, %40 ve %60 yükte ve 2400 d/d'de şartları altında gerçekleştirilmiştir. Aşağıda deneylerde öne çıkan bazı önemli sonuçlar şöyledir:

- Motor yükü arttıkça LRF kullanımının hem basınç hem de HRR üzerindeki etkisi daha belirgin bir hal almıştır. Tüm deneyler arasında basınç ve HRR de en büyük artış %60 yükte %45 LRF kullanımında meydana gelmiştir.

- LRF kullanımı ile OİB genelde azalma eğilimi göstermiştir. Ancak tüm yüklerde %15 LRF KO kullanımı ile dizele en yakın OİB değerleri elde edilmiştir. Benzer durum toplam ısı salınımı verilerinde gerçekleşmiştir. %15 LRF KO kullanımı ile dolgunun enerjisinin daha fazla ortaya çıktığı tespit edilmiştir.

- CO emisyonu düşük ve orta yükte LRF kullanımı ile artarken %60 yükte önemli derecede azalmıştır. Buna karşın tüm deneylerde LRF kullanımı CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltmıştır. HC emisyonu ise tüm yüklerde RCCI konsepti uygulanması ile artış göstermiştir. %20 yükte NO<sub>x</sub> emisyonu önemli orada RCCI konsepti ile azaltılmıştır. Ancak orta ve yüksek yükte LRF kullanımı NO<sub>x</sub> emisyonunu artırmıştır. Tüm deneylerde LRF'nin en etkili olduğu sonuç duman opaklığı olmuştur. Tüm yüklerde LRF kullanımında duman opaklığının azaldığı görülmüştür. Özellikle %60 yükte %97 ye varan oranlarda azalmalar meydana gelmiştir.

Tüm veriler incelendiğinde, dizel motora RCCI konsepti ile uygulanan izooktanın duman opaklığını azalmada oldukça etkin olmakla birlikte, %15 LRF KO kullanımının motor performans, yanma ve emisyonları üzerindeki etkisinin optimum seviyede önemli kazanımları olduğu tespit edilmiştir.

## Teşekkür

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) (proje no.118M650) tarafından desteklenmiştir.

## Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir kurum, kuruluş, kişi ile kişisel ve finansal çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedirler.

## Kaynaklar

- [1] Feng H, Chen X, Sun L, Ma R, Zhang X, Zhu L, et al. The effect of methanol/diesel fuel blends with co-solvent on diesel engine combustion based on experiment and exergy analysis. *Energy* 2023;282:128792. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128792>.
- [2] Fırat M, Altun Ş, Okcu M, Varol Y. Experimental investigation on combustion and emission characteristics of reactivity controlled compression ignition engine powered with iso-propanol/biodiesel blends. *Propuls Power Res* 2022;11:224–39.
- [3] Yin X, Li W, Duan H, Duan Q, Kou H, Wang Y, et al. A comparative study on operating range and combustion characteristics of methanol/diesel dual direct injection engine with different methanol injection timings. *Fuel* 2023;334:126646. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126646>.
- [4] Fırat M, Altun Ş, Okcu M, Varol Y. Comparison of ethanol/diesel fuel dual direct injection (DI2) strategy with reactivity controlled compression ignition (RCCI) in a diesel research engine. *Energy* 2022;255:124556.
- [5] Öztürk G, Tanyeri B, Öner C. Investigation of effects on fuel consumption and exhaust emissions by using bioethanol gasoline mixture in an engine with ultrasonic fuel system. *Therm Sci* 2023:163–163.
- [6] Poorghasemi K, Saray RK, Ansari E, Irdmoussa BK, Shahbakhti M, Naber JD. Effect of diesel injection strategies on natural gas/diesel RCCI combustion characteristics in a light duty diesel engine. *Appl Energy* 2017;199:430–46. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.011>.

- [7] Ouchikh S, Lounici MS, Loubar K, Tarabet L, Tazerout M. Effect of diesel injection strategy on performance and emissions of CH<sub>4</sub>/diesel dual-fuel engine. *Fuel* 2022;308:121911.
- [8] Firat M, Coşkun N, Okcu M, Varol Y. Numerical investigation of regeneration process of diesel particulate filter (DPF) made of different constitutive materials. *J Fac Eng Archit Gazi Univ* 2019;34.
- [9] Xu L, Xu S, Bai X-S, Repo JA, Hautala S, Hyvönen J. Performance and emission characteristics of an ammonia/diesel dual-fuel marine engine. *Renew Sustain Energy Rev* 2023;185:113631. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113631>.
- [10] Duan H, Jia M, Chang Y, Liu H. Experimental study on the influence of low-temperature combustion (LTC) mode and fuel properties on cyclic variations in a compression-ignition engine. *Fuel* 2019;256:115907.
- [11] Chaudhari VD, Deshmukh D. Diesel and diesel-gasoline fuelled premixed low temperature combustion (LTC) engine mode for clean combustion. *Fuel* 2020;266:116982.
- [12] Okcu M, Varol Y, Altun Ş, Firat M. Effects of isopropanol-butanol-ethanol (IBE) on combustion characteristics of a RCCI engine fueled by biodiesel fuel. *Sustain Energy Technol Assess* 2021;47:101443. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101443>.
- [13] Deb P, Paul A. Advancing RCCI engine performance via optimal acetylene premix ratios and advanced diesel injection timing: An experimental investigation. *Environ Prog Sustain Energy n.d.;n/a:e14375*. <https://doi.org/10.1002/ep.14375>.
- [14] Elbanna AM, Cheng X, Yang C, Elkelay M, Bastawissi HA-E, Xu H. Statistical analysis of ethanol/diesel dual-fuel combustion of compression ignition engines in RCCI mode using multi-injection strategies. *Sustain Energy Fuels* 2023;7:2749–63. <https://doi.org/10.1039/D3SE00299C>.
- [15] Zou X, Wang H, Zheng Z, Reitz R, Yao M. Numerical Study of the RCCI Combustion Processes Fuelled with Methanol, Ethanol, n-Butanol and Diesel. Warrendale, PA: SAE International; 2016. <https://doi.org/10.4271/2016-01-0777>.
- [16] Pan S, Li X, Han W, Huang Y. An experimental investigation on multi-cylinder RCCI engine fueled with 2-butanol/diesel. *Energy Convers Manag* 2017;154:92–101. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.10.047>.
- [17] Mutlu Okcu. Experimentally and Numerically Investigation of Combustion Characteristics and Pollutant Emissions at Low Temperature Combustion in RCCI Engine. PhD. Firat University, 2021.
- [18] Tang Q, Liu H, Ran X, Li M, Yao M. Effects of direct-injection fuel types and proportion on late-injection reactivity controlled compression ignition. *Combust Flame* 2020;211:445–55. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.10.018>.
- [19] Cinar C, Uyumaz A, Solmaz H, Sahin F, Polat S, Yilmaz E. Effects of intake air temperature on combustion, performance and emission characteristics of a HCCI engine fueled with the blends of 20% n-heptane and 80% isooctane fuels. *Fuel Process Technol* 2015;130:275–81. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.10.026>.

## EFFICIENT BUSBAR SLIP DEFECTS DETECTION IN PHOTOVOLTAIC CELL ELECTROLUMINESCENCE IMAGES

Sahra ŞİMŞEK KAYA<sup>1\*</sup>, Abdülkadir GÜMÜŞÇÜ<sup>2</sup>, Nurettin BEŞLİ<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa, 63000, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 03.06.2024 Kabul Tarihi/Accepted Date: 20.08.2024 DOI: 10.54365/adyumbd.1494765

### ABSTRACT

PV panel quality control is crucial for their efficient and long-lasting operation. Detecting defects in PV panels during production is essential. Electroluminescence imaging is a commonly used method for fault detection in PV panels. This study focuses on detecting busbar slippage, a specific PV panel malfunction. Automatic error detection was researched using machine learning methods on a dataset of 500 EL images taken from the production line. Feature extraction was performed using two pre-trained deep learning architectures: ResNet and SqueezeNet. Additionally, the study aimed to observe the impact of combining features from different deep learning architectures on success parameters. The highest accuracy rate of 0.9920 was achieved using deep features extracted by Relu34 and Relu25+Conv10 layers.

**Anahtar Kelimeler:** Deep Learning, Busbar Slip, Defect Detection, Electroluminescence, Solar cell classification.

## FOTOVOLTAİK HÜCRE ELEKTROLÜMİNESANS GÖRÜNTÜLERİNDE VERİMLİ BARA KAYMA KUSURLARININ TESPİTİ

### ÖZET

PV panellerin kalite kontrolü, verimli ve uzun ömürlü çalışmaları için çok önemlidir. PV panellerdeki kusurların üretim sırasında tespit edilmesi de ayrıca önem arz etmektedir. Elektrolüminesans görüntüleme, PV panellerde arıza tespiti için yaygın olarak kullanılan bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışma, spesifik bir PV panel arızası olan bara kaymasının tespitine odaklanmaktadır. Üretim hattından alınan 500 EL görüntüsünden oluşan bir veri seti üzerinde makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak otomatik hata tespiti araştırılmıştır. Özellik çıkarma, önceden eğitilmiş ResNet ve SqueezeNet derin öğrenme mimarileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çalışmada, farklı derin öğrenme mimarilerindeki özellikleri birleştirmenin başarı parametreleri üzerindeki etkisini gözlemlenmiştir. En yüksek doğruluk oranı olan 0,9920, Relu34 ve Relu25+Conv10 katmanları tarafından çıkarılan derin özellikler kullanılarak elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Derin Öğrenme, Bara Kayması, Elektrolüminesans, Güneş Hücreleri Sınıflandırma

### 1. Introduction

One of the most important problems of the world is the need for energy, which is largely met by carbon-based energy sources. In addition, the negative effects of carbon-based energy systems on the environment are more evident today. Recently, there has been intense use of energy due to the increase in industrial production, the increase in consumption, the rapid increase in the population and the advancement of technology. In addition, with the growing environmental awareness and the more pronounced damage to the environment, all countries have started to make investments, projects and

\* e-posta<sup>1</sup> : [sahrasimsek.207@gmail.com](mailto:sahrasimsek.207@gmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-3797-8324> (Corresponding Author)

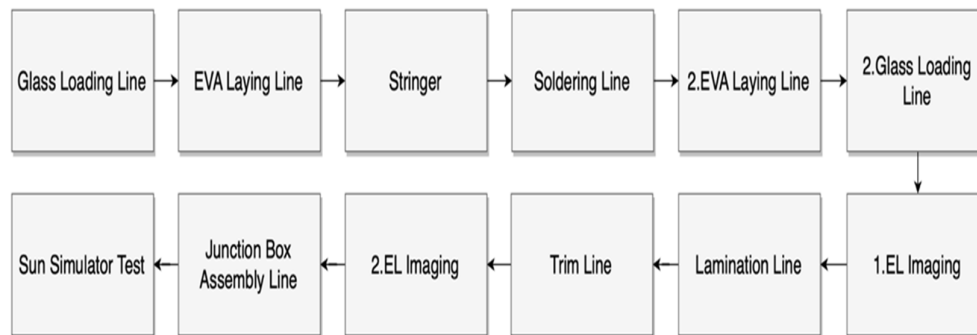
e-posta<sup>2</sup> : [agumuscu@harran.edu.tr](mailto:agumuscu@harran.edu.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5948-595X>

e-posta<sup>3</sup> : [nbesli@harran.edu.tr](mailto:nbesli@harran.edu.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3657-1393>

cooperation to find solutions and to strive to reduce the carbon impact in all fields. These developments have led to a serious increase in interest in renewable energy sources with the aim of reducing carbon emissions.

The demand for renewable energy has also led to an increase in the demand for PV solar panels [1]. Today, the PV panel production sector is among the fastest growing sectors in the world. Advancement in the technologies, decrease in the cost and increase in the productivity are among the most important reasons for this. The installed power in the world has increased 30 times even between 2009-2019 [2]. Thus, PV panel production gains more attractions. As seen in Figure 1, PV panel production stages are a complex process. In order for the production of the PV panels to be flawless, all of the process steps must be completed accurately. EL imaging is performed to find some cell defects especially during the production phase. These images are reviewed and labeled by experts. Thus, the PV panels produced can be partitioned into different quality classes.

Quality control in the production process of panels, which is the most basic building component of a PV system, is very important. PV panels are exposed to thermal and mechanical stresses during production and later life stages. These stresses cause cracks and other defects in modules that can affect power output [3]. To understand the effect of a defective cell in PV panels, M. Köntges et al. analyzed the effects of microcracks experimentally after artificial aging. With an accelerated aging test, it is observed that the crack resistance between cracked cells increased, and the number of cracked cells was linearly time dependent and associated with the power drop after the accelerated aging test. They concluded that inspection is critical to prevent the inclusion of defective cells in the panel, thereby ensuring high efficiency and reliable performance of the panels produced [4]



**Fig.1** PV Panel Production Stages

When the panels, which come out of production as defective, are passed to the operation stage in the field, they do not work at the desired quality and efficiency. For this reason, in order to achieve maximum output, modules should be monitored in the production line and the subsequent stages, and defect detection should be performed by checking each cell one by one [5].

Defects seen on PV cells at the production stage may or may not be visible to the naked eye. Visible defects are dirt, active fractures, etc. And another group of defect types is invisible defects. Some methods have been developed for the detection of these invisible defect types. Today, one of the most used techniques to detect these defects is Electroluminescence imaging, which provides high resolution images in which the defects are highlighted. In this way, these defective cells can be removed from production line before reaching the final product. EL images are grayscale images acquired in the dark. Although EL imaging is an advanced method, its interpretation is a time-consuming process that requires expertise. In order to improve this challenging inspection process, work is being done on a model that



automatically analyzes EL images and detects defects. In addition, very successful results have been obtained in many areas with artificial intelligence methods [6-8].

In this study, we focused on busbar slip defect on PV cell. Busbar slippage is the defect of the conductive paths (busbars) that carry the direct current produced on the PV cells from the solder pads on the cell. PV cells have solder pads for the busbars to be soldered, depending on the technology of the cell. These pads are ways that facilitate the adhesion of the conductive busbar and also determine its positioning on the cell by collecting better current.

The current that occurs in all active areas where electricity is generated on the cell is carried to the busbars first by the finger lines, which are carrier paths thinner than the busbars. The current is carried from the fingers to the busbars, which are the main collector. Fingers and busbars on the cell have a standardized design, taking into account the cell size and the number of busbars, in order to keep the losses at the lowest level while carrying the current. The reason why the position of the busbars on the cell is important is that there are power losses in non-standard busbar positions. Because the increase in the distance of the fingers to the busbars means the length of the path where the current is carried and therefore the decrease in its power. In this case, the first solution that can come to mind would be to shorten the busbar distance. However, shortening these distances in cells with standard dimensions means increasing the number of busbars on this fixed area. The increase in the number of busbars causes resistance losses and power losses as there will be more shadowing on the cell. In this context, there are some studies of leading companies in the PV production sector, and modules produced with multibusbar technology consisting of twelve busbars are one of these studies. Studies that include the idea of increasing the number of bars like this support the importance of finger-bar distance. It should be noted that as the number of busbars increases, the cross-sections should decrease. Otherwise, when the number of busbars increases with the same cross-sections, the resistance losses will increase and the power of the cell will decrease contrary to what is desired, since the areas on the cell that produce active current will be occupied. It can be said that two concepts such as the area covered by the busbar on the cell and the location of the busbar are very important. The need to detect the type of defect, which we call busbar slip, is also very important from these two issues.

- In a switchgear with busbar slippage, the current will not be collected as well as it should, as the busbar will deviate from the solder pad. For this reason, there will be losses in the transmission of the generated power.
- With the busbar slip, there will be a decrease in the power production due to the busbar occupying the active area on the cell.

Since the cells in PV panels are connected in series with each other, the importance of detecting these defects is clearly seen when it is considered that the power loss in a single cell will reduce the entire current. In addition, it is not preferred in terms of visibility, since the busbar slides create an image that breaks the symmetry on the cell. In addition, since a single cell affects the entire panel power, a faulty installed panel will affect all the modules to which it is connected in series within the panel array, and the effect of a single defective cell can be quite serious. For these reasons, automatic detection of busbar slippage defects on the cell is very important during module manufacturing.

Since controlling each module individually in a PV panel production line would be a somewhat difficult and time-consuming process, the necessity of an automatic defect detection system emerges. In EL images of PV panels, the scarcity of defective cell samples and the very similarity of images of successive industrial products make deep learning algorithms more prone to application. Deep learning is one of the applications where image analysis shows its full potential, and it has proven to greatly improve the results of solutions using traditional vision techniques regarding precision, robustness and flexibility [9-11]. In this context, in this study, studies were carried out with deep learning algorithms, which have been shown to be effective among different methodologies developed when the literature is examined, in order to detect busbar slips.

In this study, it is aimed to classify busbar slippage, which is one of the PV panel manufacturing defects, from EL images by feature extraction with pre-trained deep learning networks. For this purpose, an image dataset consisting of EL images was created and features were obtained by sending these images to pre-trained deep learning networks. Obtained features were classified by k-NN and Bayes classification methods. The classification results showed that busbar slip defects can be found in the EL imaging step, which is a processing step in the production phase.

The remainder of this article is organized as follows: In Chapter 2, the literature review on the subject is given. In Chapter 3, the methods and materials used in the study are explained. In Chapter 4, the experimental results for the study are presented. In Chapter 5, the results obtained in the study are discussed. In the last section, the contributions obtained in the study are emphasized.

## 2. Literature Review

There have been many studies investigating the automatic detection of PV manufacturing defects. When the studies are considered in general, it is possible to say that they are divided into two main groups: methods that find the defect rate and methods that find the defect type.

When we consider the studies aiming to classify the defect rate, we come across two-class (defective, flawless) [12] or multi-class studies [13]. It was noticed that in most of the models examined, binary classification was used to determine whether cells were defective or flawless, and models examining multiclass classification were less common than binary classification. Multiscale detection of defects in electroluminescence images of PV cells is difficult. Many researchers have developed various hybrid models to solve this problem [14-16]. Demirci et al. in their study, they divided PV cell images from a general EL image dataset containing 2624 individual cell images into two classes (defective, flawless) using deep convolutional neural networks. They used the AlexNet, GoogleNet, MobileNetv2 and SqueezeNet architectures for transfer learning in their studies in which they chose the transfer learning method due to the limited data. The results showed that convolutional neural networks and transfer learning can be successfully used for PV cell defect detection [12].

In addition, M. Demirci et al. proposed a new classification model for multiclass defect detection. Here classification means the effect of defects as a percentage (4 classes: perfect (0 percent), possibly faultless (33 percent), possibly faulty (66 percent), faulty (100 percent) 2 classes: faultless (0 percent), faulty (100 percent). By determining the best features obtained from different layers of deep neural networks, results were obtained for both 4-class and 2-class datasets. Classification success rates were taken as 0.9057 and 0.9452 for the 4-class and 2-class dataset, respectively [13].

Studies aiming to find defect types vary greatly. In this context, many methods and methodologies have been developed in the literature for the detection of many different types of defects. Some studies focused on only one type of defect, while other studies identified more than one type of defect. It is seen that studies are mostly carried out for the detection of cell breaks in studies with uniform defect detection [17-19]. In studies with multiple defect detection, it is seen that mostly fractures, microcracks and finger cuts are tried to be detected [19-21]. However, there are studies in which different cell defects such as soldering problems are detected using EL images [23],[24].

There are many types of defects that can occur in a production line. Yang Zhao et al. They conducted a study using deep learning-based automatic detection of multi-type defects to meet the inspection requirements of a production line. First, they created a dataset of 5983 labeled EL images of defective PV modules, introducing 19 types of defects and dividing them into four groups according to their degree of influence. The performance of the best model in the test set was measured and a value of 0.702 was reached. They noted that scratches and finger cuts were the two most difficult flaws for CNN to learn. They also stated that they are one of the rare studies examining the busbar slip problem in the cell, and they have difficulty in detecting these defects due to the lack of data. For this reason, in our

study, a higher success rate was obtained by creating a data set with a more balanced and sufficient number of samples for busbar slip [24].

In addition, if we evaluate the studies according to the methods they use, we come across studies using machine learning methods and deep learning methods. Natasha Mathias et al. detected microcracks in PV cells using EL images. The classification accuracy obtained using SVM and BPNN is 0.9267 and 0.9367, respectively. Here, it has been seen that Back Propagation Neural Network (BPNN) outperforms SVM for classification by making binary classification, and it is one of the sample studies showing that deep learning will give better results than classical machine learning methods [25].

In addition to this study, Sergiu Deitsch et al. used a Support Vector Machine (SVM) and an end-to-end deep Convolutional Neural Network (CNN). Both approaches were trained on 1968 cells extracted from EL images. The CNN-based methodology achieved a higher success rate, with an average accuracy of 0.8842. The SVM-based methodology, on the other hand, achieved a slightly lower average accuracy of 0.8244 [20]. Examining Convolutional Neural Network (CNN) for classifying EL images, Z. Luo et al. presented a method to augment the existing dataset of EL images and proposed a model named Generative Adversarial Network (GAN) that targets this. Three CNN models (AlexNet, SqueezeNet, ResNet) were used to examine the effectiveness of the proposed GAN model. The models were used to detect four different types of defects (finger defect, material defect, microcrack, active cracks). In the augmented data set created with the proposed model, it was observed that the classification accuracy improved and the maximum improvement was up to 0.14. In the CNN models used, SqueezeNet had the worst performance and ResNet had the best classification results in all categories with the highest accuracy [21].

It has been confirmed that training the developed models can be improved by applying data augmentation procedures for the recognition of PV cell defects [26][3]. With data augmentation, it is possible to create or modify completely new images by capturing the required features from the image and expanding the training set. In addition, applying different transformations can greatly expand the initial training set [27]. In the studies examined, it was seen that the most frequently used procedures for data augmentation were translation and rotation operations. Fawzi et al. confirms the importance of data augmentation in deep learning (DL) methods for two purposes; The first is lack of data: in training DL models, especially in multilevel classifications. Another is because the images are in different formats from the trained images (not visible to the model) because new images affect the model and lead to incorrect results.

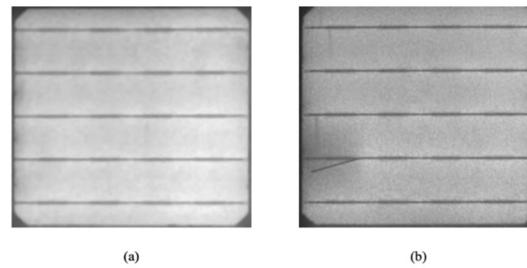
In conclusion; it was observed that most of the studies examined focused on deep learning models. Although the application of deep learning methods in detecting PV cell defects is relatively new, it has been observed that deep learning methods are more successful [28]. In most of the deep learning approach models, classification results with an accuracy exceeding 0.90 are seen [3],[10],[28]. However, the performance of other models [9],[25] is lower due to the inappropriate nature of the models or their ability to separate input features. It should be noted that the results of the hybrid models outperform the standard models and this depends on the methods included [16],[22],[29]. In this study, machine learning methods will be run by using the features obtained with the deep learning model in order to find the busbar slip defect.

### 3. Materials and Methods

#### 3.1. Dataset

The data set used in the study was created with PV panel electroluminescence images with and without busbar-slip defect. In the study, due to the fact that the busbar slip was tried to be determined from the Electroluminescence images, the Electroluminescence images were examined one by one by the expert and labeled as busbar slip present or absent. A total of 500 EL images were studied on the

dataset. These images consist of 300 flawless EL images and 200 EL images with busbar slip defects. Figure 2 shows one EL image that is flawless and the other has a busbar slip defect.



**Fig 2.** Two Sample Images from the Image Set (a) Normal PV Cell (b) PV Cell with Busbar Slip Defect

As can be seen in Figure 2, in cells with busbar slippage defect, the current will not be collected as well as it should, since the busbar will deviate from the solder pad. In addition, the transmission line with the slip defect will cause a decrease in power since it will occupy the active area on the cell. Considering that this powerful dream is in series connected cells, it can be said that all cells and all panel arrays in macro dimension can be relatively affected. Therefore, the busbar slip defect is important for PV panel production and it will be possible to automatically find it in the production phase with this data set.

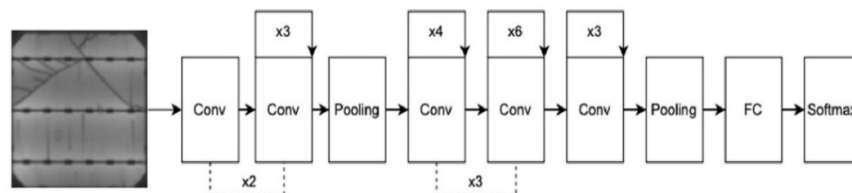
### 3.2. Deep Learning Models

Today, Artificial Neural Network (ANN)-based machine learning approaches have made remarkable contributions in many different research areas [30],[31]. With the increase in the developments in GPU technologies and the significant improvement of the processing capacities of the processors, the use of deep learning algorithms has intensified instead of ANN-based systems.

DL models are instantaneous object recognition from images, person recognition, etc. can be a solution to problems. The simplest deep learning model architecture can be built with convolution, pooling, dropout, fully connected layers. In this study, deep features will be obtained from EL images by using Res-Net, Squeeze.Net, which are pre-trained deep learning architectures.

#### 3.2.1. ResNet Architecture

ResNet Deep learning architecture won the ILSVRC 2015 competition by providing the lowest error rate [32]. There are many different types of ResNet DL architecture. In this study, the most widely used ResNet50 architecture will be used. The ResNet50 architecture consists of 72 sub-layers. The general structure of the ResNet50 architecture is shown in Figure 3.



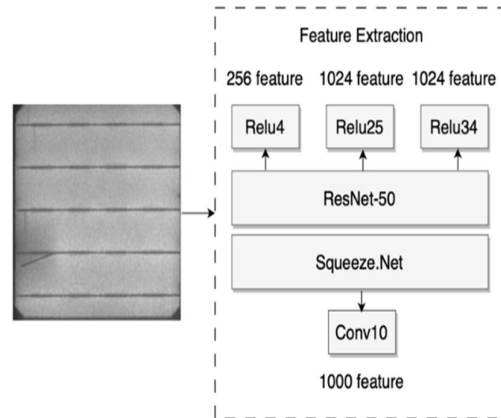
**Fig 3.** ResNet50 Deep Learning Architecture

### 3.1.2. SqueezeNet Architecture

Another popular architecture among deep learning architectures is SqueezeNet architecture. The SqueezeNet architecture was developed in 2016 by researchers at DeepScale, University of California, Berkeley, and Stanford University. The aim of this architecture is to create a neural network with fewer parameters and to provide accuracy at the level of other architectures with 50 times fewer parameters [33]. The advantage of the SqueezeNet architecture is that thanks to more effectively distributed layers, the processing load in the neural network is reduced and thus it works faster. It generally differs from other architectures by reducing filter sizes and subsampling in deeper layers.

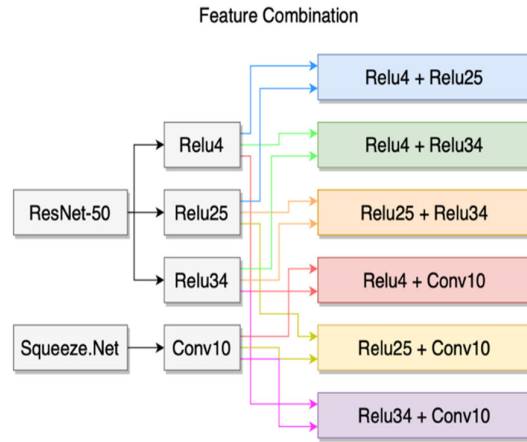
### 3.3. Deep Feature Extraction with Deep Learning Models

Deep learning has been used frequently in many different fields recently and successful results have been obtained. Deep learning methods are used in decision-making in many areas, especially due to successful results. In addition, in order to obtain successful results from deep learning models, a very high amount of examples is needed for training. These dependencies limit the use of deep learning methods in areas where many examples cannot be produced. In order to overcome this limitation, pre-trained deep learning architectures have been used frequently recently. In this study, due to the scarcity of EL image samples containing busbar slip, features were extracted using pre-trained deep learning methods and classification was made. Thus, the feature extraction feature of deep learning architectures and the simplicity of machine learning methods are combined. In the study, different features were taken from the ResNet50 pre-trained deep learning model from 3 different layers. These three different layers were chosen from ReLU4, ReLU25 and ReLU34 layers as little deep, deep and very deep. The feature extraction process from different layers is used to observe how the success parameters will change with the features at different depth levels in the EL image classification problem.



**Fig 4.** Deep Feature Extraction Steps

In Figure 4, the feature extraction procedure from pre-trained deep learning architectures is summarized. In addition, feature extraction was performed from the Squeeze.net pre-trained deep learning architecture. In order to observe how the success rates of EL image classification will be affected by combining the features obtained from these architectures, the classification was made by combining the features obtained from different layers.



**Fig 5.** Combined Features Workflow

In Figure 5, new feature sets obtained by combining features extracted from different layers of pre-trained deep learning architectures are shown. With this merging process, the effect of different pre-trained deep learning architectures on the EL image bus slip classification problem can be measured.

### 3.4. Machine Learning Methods

Machine learning is a sub-application of artificial intelligence. It focuses on predictions made from learned data based on known features. They are models obtained by the development of algorithms that can learn structurally and make predictions on data. Such algorithms work by constructing statistical models to make inferences and decisions with sample input data instead of explicit instructions, and they can predict the results. Machine learning algorithms are basically designed to classify events, find examples, and predict results.

#### 3.4.1. *k*-NN Classification Method

The *k*-NN classification algorithm is one of the most frequently used classification methods in many fields, thanks to its simplicity and ease of use [34]. In the *k*-NN classification algorithm, the distances between the test sample and the training samples are calculated. According to the calculated distances, the classes of the *k* training samples closest to the test sample are considered and it is estimated that whichever class is the closest neighbor, the test sample belongs to that class. In this study, the Euclidean distance criterion was chosen as the distance criterion. Euclidean distance criterion is formulated in a *D*-dimensional space in formula 1.

$$d(A, B) = (\sum_{i=1}^D |a_i(x) - a_i(y)|^2)^{1/2} \quad (1)$$

In Equation 1,  $a_i(x)$  represents the numerical value in the *i*th dimension of the *x* point determined for each attribute.  $a_i(y)$  represents the numerical value in the *i*th dimension of the *y* point determined for each attribute. In addition, the *k* value was taken as 1 in the study.

### 3.4.2. Naive Bayes Classification Method

Classification with the Naive Bayes method is one of the probability-based classification methods. This method is used to determine the probability that a particular set of attributes belongs to a particular class. The classification references Bayes' theorem [35]. The probability of finding the tested sample based on all classes and training samples is calculated and it is estimated that the test sample belongs to the class with the highest probability value. While calculating probability, probabilities are calculated according to formula 2.

$$P(C_i|X) = \frac{P(X|C_i)P(C_i)}{P(X)} \quad (2)$$

In formula 1, the probability that the sample  $P(C_i|X)$   $X$  belongs to class  $i$  is given.  $P(C_i)$  represents the probability that class  $i$  is found among all classes,  $P(X)$  represents the probability of finding  $X$  in all samples, and  $P(X|C_i)$  represents the probability that a sample belonging to class  $i$  is  $X$ . Thus, according to the probability of being found in the training data set, it is estimated to which class the test sample, which has not been seen before, belongs.

## 4. Experimental Results

In this study, it is aimed to find the busbar drift defects in PV panels with deep features extracted from EL images. Studies carried out for this purpose are shown in Figure 6. In the study, firstly, EL image set was created with EL images taken from PV panel production facilities. The EL image set was composed of a total of 500 EL images, consisting of 300 flawless and 200 busbar shift EL images. Deep features were extracted from 500 EL images using Resnet-50 and Squeeze.Net pre-trained deep learning networks. The obtained deep features were combined to observe the effects of features in different depth layers and different pre-trained deep learning models on classification success parameters, and success parameters were calculated with different combinations.

Probability and distance-based methods were chosen for classification, so that the effect of different classification methods could be observed. Naïve Bayes was chosen as the probability-based classification method, and k-NN methods were chosen as the distance-based classification method. While using these methods, 125 images (75 flawless - 50 busbar shift flawed) were used for testing. The remaining images were used for training. In addition, accuracy, precision, sensitivity and f-score values were calculated for the evaluation of classification methods.

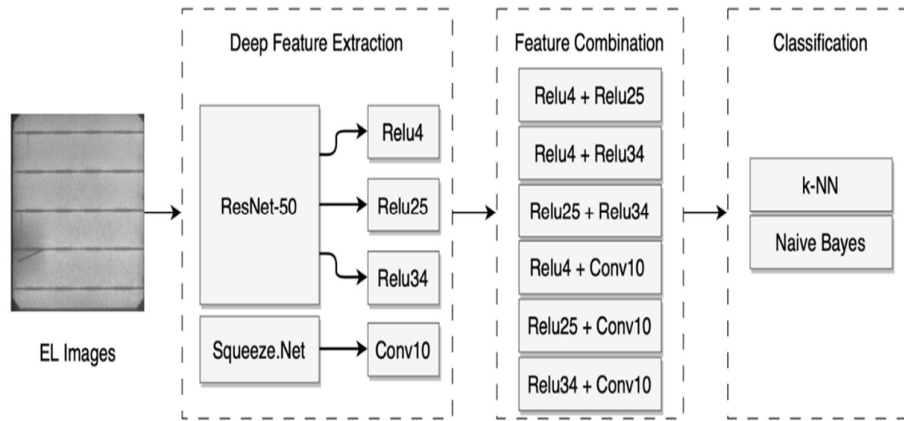
$$\text{Recall} = \text{TP}/(\text{TP}+\text{FN}) \quad (3)$$

$$\text{Accuracy} = (\text{TP}+\text{TN})/(\text{TP}+\text{TN}+\text{FP}+\text{FN}) \quad (4)$$

$$\text{Precision} = \text{TP}/(\text{TP}+\text{FP}) \quad (5)$$

$$\text{f-score} = 2*((\text{Precision} * \text{Recall})/(\text{Precision} + \text{Recall})) \quad (6)$$

Given in equations 3,4,5 and 6, (TP) is the number of EL images with busbar slip imperfection estimated as busbar slip imperfection ; (FP) is the number of flawless EL images classified as busbar slip defective; (FN) number of EL images with flawless estimated as busbar slip imperfectly; (TN) is the number of EL images with flawless estimated as flawlessly. Calculations were made on a computer with a 2.8 GHz Intel Core i7 processor and 8 GB of RAM.



**Fig 6.** Applied Method Diagram

**Table 1.** Pre-trained deep learning networks k-nn classification results

| Obtained feature vectors | Dimension | Accuracy | Precision | Recall | F-Score |
|--------------------------|-----------|----------|-----------|--------|---------|
| Relu4                    | 256       | 0.9760   | 0.9796    | 0.9600 | 0.9697  |
| Relu25                   | 1024      | 0.9840   | 0.9800    | 0.9800 | 0.9800  |
| Relu34                   | 1024      | 0.9920   | 0.9804    | 1.0000 | 0.9901  |
| Conv10                   | 1000      | 0.8720   | 1.0000    | 0.6800 | 0.8095  |

The results obtained with pre-trained deep learning networks using the k-NN classification method are given in Table 1.

**Table 2.** Combined pre-trained deep learning networks k-nn classification results

| Obtained feature vectors | Dimension | Accuracy | Precision | Recall | F-Score |
|--------------------------|-----------|----------|-----------|--------|---------|
| Relu4 + Relu25           | 1280      | 0.9840   | 0.9800    | 0.9800 | 0.9800  |
| Relu4 + Relu34           | 1280      | 0.9840   | 0.9800    | 0.9800 | 0.9800  |
| Relu25 + Relu34          | 2048      | 0.9760   | 0.9796    | 0.9600 | 0.9697  |
| Relu4 + Conv10           | 1256      | 0.9360   | 1.0000    | 0.8400 | 0.9130  |
| Relu25 + Conv10          | 2024      | 0.9920   | 0.9804    | 1.0000 | 0.9901  |
| Relu34 + Conv10          | 2024      | 0.9840   | 1.0000    | 0.9600 | 0.9796  |

The results obtained by combining the attributes obtained from pre-trained deep learning networks using the k-NN classification method are given in Table-2.



**Table 3.** Pre-trained deep learning networks bayes classification results

| Obtained feature vectors | Dimension | Accuracy | Precision | Recall | F-Score |
|--------------------------|-----------|----------|-----------|--------|---------|
| Relu4                    | 256       | 0.8480   | 0.9429    | 0.6600 | 0.7765  |
| Relu25                   | 1024      | 0.9600   | 0.9787    | 0.9200 | 0.9485  |
| Relu34                   | 1024      | 0.9600   | 0.9592    | 0.9400 | 0.9495  |
| Conv10                   | 1000      | 0.9360   | 0.8750    | 0.9800 | 0.9245  |

The results obtained with deep learning networks pre-trained with the Naïve Bayes classification method are given in Table 3.

**Table 4.** Combined pre-trained deep learning networks bayes classification results

| Obtained feature vectors | Dimension | Accuracy | Precision | Recall | F-Score |
|--------------------------|-----------|----------|-----------|--------|---------|
| Relu4 + Relu25           | 1280      | 0.8560   | 0.9706    | 0.6600 | 0.7857  |
| Relu4 + Relu34           | 1280      | 0.8400   | 1.0000    | 0.6000 | 0.7500  |
| Relu25 + Relu34          | 2048      | 0.9360   | 0.9773    | 0.8600 | 0.9149  |
| Relu4 + Conv10           | 1256      | 0.8480   | 0.9429    | 0.6600 | 0.7765  |
| Relu25 + Conv10          | 2024      | 0.9600   | 0.9787    | 0.9200 | 0.9485  |
| Relu34 + Conv10          | 2024      | 0.9600   | 0.9592    | 0.9400 | 0.9495  |

The results obtained by combining the attributes obtained from pre-trained deep learning networks using the Naïve Bayes classification method are given in Table-4.

## 5. Discussions

In this study, the problem of detecting the busbar shift defect from PV Panel EL images using deep features is addressed. In this study, in order to solve the problem of detecting bus slip defect from PV Panel El images at the production stage, deep features were extracted from EL images with two different pre-trained deep learning architectures and EL images were classified in terms of bus slip defect using three different classification methods with the obtained features. In addition, in order to examine the effects of features at different depths of pre-trained deep learning architectures on classification performance, tests were conducted with features at different depths and results were obtained. Distance-based and probability-based classification methods were tested in order to examine the performance of classification methods in terms of bus-shift defect in EL images. When the results obtained in terms of deep learning architectures were examined, the results in Table 5 were obtained.

As can be seen in Table 5, the most successful classification results were obtained with the ResNet architecture. In addition, when the features at different depths are considered, acceptable classification results have been obtained with the features at the medium and high depth levels. In Table 6, the results of distance-based and probability-based classification methods are compared.

**Table 5.** The most successful results from deep learning architectures

| Obtained feature vectors | Dimension | Accuracy      | Precision     | Recall        | F-Score       |
|--------------------------|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Relu4                    | 256       | 0.9760        | 0.9796        | 0.9600        | 0.9697        |
| Relu25                   | 1024      | 0.9840        | 0.9800        | 0.9800        | 0.9800        |
| Relu34                   | 1024      | <b>0.9920</b> | 0.9804        | <b>1.0000</b> | <b>0.9901</b> |
| Conv10                   | 1000      | 0.9360        | <b>1.0000</b> | 0.9800        | 0.9245        |
| Relu4 + Relu25           | 1280      | 0.9840        | 0.9800        | 0.9800        | 0.9800        |
| Relu4 + Relu34           | 1280      | 0.9840        | <b>1.0000</b> | 0.9800        | 0.9800        |
| Relu25 + Relu34          | 2048      | 0.9760        | 0.9796        | 0.9600        | 0.9697        |
| Relu4 + Conv10           | 1256      | 0.9360        | <b>1.0000</b> | 0.8400        | 0.9130        |
| Relu25 + Conv10          | 2024      | 0.9920        | 0.9804        | <b>1.0000</b> | <b>0.9901</b> |
| Relu34 + Conv10          | 2024      | 0.9840        | <b>1.0000</b> | 0.9600        | 0.9796        |

**Table 6.** The most successful results of distance-based and probability-based classification methods

| Classification Method | Accuracy      | Precision     | Recall        | F-Score       |
|-----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| k-NN                  | <b>0.9920</b> | <b>1.0000</b> | <b>1.0000</b> | <b>0.9901</b> |
| Bayes                 | 0.9600        | <b>1.0000</b> | 0.9800        | 0.9495        |

As can be seen in Table 6, distance-based classification methods have been more successful in terms of bus-shift defect of EL images in the PV panel production stage. In the results obtained in this study, F-score gives more significant results.

## 6. Conclusion

In this study, automatic determination of busbar slip defect from EL images taken in PV panel production facilities with pre-trained deep learning methods is discussed. In the study, two different pre-trained deep learning methods and two different machine learning methods were tested for the classification of busbar slip defect of EL images. Considering the results obtained, it was concluded that the results obtained with single and deep features in determining the busbar slip error, which is one of the PV panel production defects, by machine learning methods, are more successful than the results obtained by combining features at different depths and different architectures. Although the Relu 34 and Relu25 + Conv10 classification results provided equal success rates, it was observed that more successful results could be obtained with the deep features obtained in the Relu34 layer when other success parameters were taken into account. In addition, the classification results made with the features obtained from the Relu4, Relu25 and Relu34 layers, which are different layers of the same architecture, it is understood that the deeper the features are taken, the more successfully it can detect the busbar slip from the PV panel EL images.

In terms of classification methods, when the busbar slip detection in PV panel EL images is considered, it has been concluded that the distance-based classification method, k-NN, is more successful. In particular, the k-NN classification method adapted to the combination of features in different architectures and different layers much more successfully than the Bayesian classification method and significantly increased the classification success parameters. Thus, it has been concluded that it is possible to predict the busbar slip defect from EL images in PV panel production facilities with

machine learning methods. In addition to the study, investigating the success parameters of feature selection methods will be a guide for researchers who plan to work on this subject in the future.

### Acknowledgment

We would like to thank to Harran University Scientific Research Projects Commission for supporting our study (Project No:22256).

### Conflict Of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

### References

- [1] Anwar, S. A., and Abdullah, M. Z. (2014). Micro-crack detection of multicrystalline solar cells featuring an improved anisotropic diffusion filter and image segmentation technique. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2014(1). <https://doi.org/10.1186/1687-5281-2014-15>
- [2] Benda, V., and Cerna, L. (2020). PV cells and modules state of the art, limits and Trends. *Heliyon*, 6(12). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05666>
- [3] Akram, M. W., Li, G., Jin, Y., Chen, X., Zhu, C., Zhao, X., Khaliq, A., Faheem, M., and Ahmad, A. (2019). CNN based automatic detection of photovoltaic cell defects in electroluminescence images. *Energy*, 189,116319. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116319>
- [4] Köntges, M., Kunze, I., Kajari-Schröder, S., Breitenmoser, X., and Bjrneklett, B. (2011). Quantifying the risk of power loss in PV modules due to micro cracks. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 95, no. 4, pp. 1131- 1137.
- [5] Santhakumari, M., Sagar, N. (2019). A review of the environmental factors degrading the performance of silicon wafer-based photovoltaic modules: Failure detection methods and essential mitigation techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,110, pp. 83-100.
- [6] Gerger M, Gümüşçü A (2022) Diagnosis of Parkinson’s disease using spiral test based on pattern recognition. *Romanian J Information Sci Technol* 25(1):100–113
- [7] Gümüşçü, A., Taşaltın, R. ve Aydilek, İ.B. (2016) C4.5 Karar ağaçlarında genetik algoritma ile budama, *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(2): 77-80.
- [8] Gümüşçü A, Karadağ K, Tenekeci ME et al (2017) Genetic algorithm based feature selection on diagnosis of Parkinson disease via vocal analysis. In: 2017 25th Signal processing and communications applications conference (SIU). IEEE, pp 1–4
- [9] Deitsch, S., et al. (2019). Automatic classification of defective photovoltaic module cells in electroluminescence images. *Sol. Energy*,185, pp. 455–468.
- [10] Karimi, A. M., Fada, J. S., Parrilla, N. A., Pierce, B. G., Koyutürk, M., French, R. H., Braid, J. L. (2020). Generalized and Mechanistic PV Module Performance Prediction From Computer Vision and Machine Learning on Electroluminescence Images. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 10(3), 878–887.
- [11] Demirci, M.Y., Beşli, N., Gümüşçü, A., 2019. Defective PV cell detection using deep transfer learning and EL imaging. In: *Proceedings Book*, p. 311.
- [12] Demirci, M.Y., Beşli, N., and Gümüşçü, A. (2019). Defective PV Cell Detection Using Deep Transfer Learning and EL Imaging. In *Proceedings of the International Conference on Data Science, Machine Learning and Statistics -2019* pp. 311-314.
- [13] Demirci, M.Y., Beşli, N., and Gümüşçü, A. (2021). Efficient deep feature extraction and classification for identifying defective photovoltaic module cells in Electroluminescence images. *Expert Systems with Applications*, vol. 175, 114810.

- [14] Li, X., Li, W., Yang, Q., Yan, W., and Zomaya, A. Y. (2019). Building an Online Defect Detection System for Large scale Photovoltaic Plants. in Proceedings of the 6th ACM International Conference on Systems for Energy-Efficient Buildings, Cities, and Transportation, pp. 253–262.
- [15] Li, X., Yang, Q., Wang, J., Chen, Z., and Yan, W. (2018). Intelligent fault pattern recognition of aerial photovoltaic module images based on deep learning technique. *J. Syst. Cybern. Inf.*, 16, pp. 67–71
- [16] Balzategui, J., Eciolaza, L., Arana-Arexolaleiba, N., Altube, J., Aquerre, J.P., Legarda-Erẽno, I., Apraiz, A. (2019). Semi-automatic quality inspection of solar cell based on convolutional neural networks. in 2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), pp. 529–535.
- [17] Bartler, A., Mauch, L., Yang, B., Reuter, M., Stoicescu, L. (2018). Automated detection of solar cell defects with deep learning. *European Signal Processing Conference*, 2035–2039, 10.23919/EUSIPCO.2018.8553025.
- [18] Chen, H., Zhao, H., Han, D., and Liu, K. (2019). Accurate and robust crack detection using steerable evidence filtering in electroluminescence images of solar cells. *Opt. Lasers Eng.*, 118, pp. 22–33.
- [19] Qian, X., Li, J., Cao, J., Wu, Y., and Wang, W. (2020). Micro-cracks detection of solar cells surface via combing short-term and long-term deep features. *Neural Networks*, 127, pp. 132–140.
- [20] Deitsch, S., et al. (2019). Automatic classification of defective photovoltaic module cells in electroluminescence images. *Sol. Energy*, 185, pp. 455–468.
- [21] Luo, Z., Cheng, S.Y., and Zheng, Q.Y. (2019). GAN-Based Augmentation for Improving CNN Performance of Classification of Defective Photovoltaic Module Cells in Electroluminescence Images. 2019 International Conference on New Energy and Future Energy System, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 354 01210
- [22] Du, B., He, Y., Duan, J., and Zhang, Y. (2019). Intelligent classification of silicon photovoltaic cell defects based on eddy current thermography and convolution neural network. *IEEE Trans. Ind. Informatics*, 16(10), pp. 6242–6251.
- [23] Akram, M.W., Li, G., Jin, Y., Chen, X., Zhu, C., Zhao, X., Khaliq, A., Faheem, M., Ahmad, A. (2019). CNN based automatic detection of photovoltaic cell defects in electroluminescence images. *Energy*, 189, pp.116319.
- [24] Zhang, X., Hao, Y., Shangguan, H., Zhang, P., and Wang, A. (2020). Detection of surface defects on solar cells by fusing Multi-channel convolution neural networks. *Infrared Phys. Technol*, 108, pp. 103334.
- [25] Mathias, N., Shaikh, F., Thakur, C., Shetty, S., Dumane P., and Chavan, S. (2020). Detection of Micro-Cracks in Electroluminescence Images of Photovoltaic Modules. Proceedings of the 3rd International Conference on Advances in Science and Technology (ICAST), Available at: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3563821>
- [26] Koziarski, M., and Cyganek, B. (2017). Image recognition with deep neural networks in presence of noise – Dealing with and taking advantage of distortions. *Integr. Comput. Aided. Eng.*, 24, pp. 337–349.
- [27] Fawzi, A., Samulowitz, H., Turaga, D., And Frossard, P. (2016). Adaptive data augmentation for image classification. in 2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), pp. 3688–3692.
- [28] Banda, P., and Barnard, L. (2018). A deep learning approach to photovoltaic cell defect classification. in Proceedings of the Annual Conference of the South African Institute of Computer Scientists and Information Technologists, pp. 215–221.
- [29] Sun, M., Lv, S., Zhao, X., Li, R., Zhang, W., and Zhang, X. (2017). Defect detection of photovoltaic modules based on convolutional neural network. in International Conference on Machine Learning and Intelligent Communications, pp. 122–132.
- [30] Su, B., Chen, H., and Zhou, Z. (2020). BAF-Detector: An Efficient CNN- Based Detector for Photovoltaic Solar Cell Defect Detection. *arXiv Prepr. arXiv2012.10631*.
- [31] Sarker, I.H. *Machine Learning: Algorithms, Real-World Applications and Research Directions*. SN COMPUT. SCI. 2, 160 (2021). <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00592-x>

- [32] He, K., Zhang, X., Ren, S., Sun, J. 2016, Deep residual learning for image recognition , InProceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition pp. 770-778.
- [33] Iandola, F.N, Han S., Moskewicz M.W., Ashraf K., Dally W.J., Keutzer, K. SqueezeNet: AlexNet-level accuracy with 50x fewer parameters. 3th International Conference on Learning Representations. Toulon: ICLR;2016. p.1-13.
- [34] Cover T. , Hart P., 1967. Nearest Neighbor Pattern Classification, IEEE Transactions On Information Theory 13:21–27.
- [35] Ben-Bassat, M., Klove, K. L., & Weil, M. H. (1980). Sensitivity analysis in Bayesian classification models: Multiplicative deviations. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2, 261–266.

## VERMİKÜLİTİN ÇİMENTODA PUZOLANİK KATKI MADDESİ OLARAK KULLANILMASI

**Sabit OYMAEL** <sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> İstanbul Arel Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, İstanbul, 34540, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 31.01.2024 Kabul Tarihi/Accepted Date: 06.07.2024 DOI: 10.54365/adyumbd.1428849

### ÖZET

Vermikülit, genleşebilen mika sınıfından bir malzeme olup magnezyum alümina silikat kil esaslı bir malzemedir. Vermikülit mika mineralleri ve kloritin değişikliğe uğramış halidir. Vermikülitin bu özelliği çimento üretiminde puzolanik katkı maddesi olarak kullanım için umut vermektedir. Nitekim vermiculitin hafif beton üretiminde agrega ve çimentolarda puzolanik katkı maddesi olarak kullanıldığı da görülmektedir. Bu çalışmada, 1200 °C’de pişirilerek elde edilen vermiculitin öğütülerek PÇ42.5 R çimentolarında puzolanik katkı maddesi olarak kullanılması durumunda özellikleri araştırılmıştır. Sonuç olarak, %0, %10, %15 ve %20 oranlarında pişirilerek öğütülen vermiculitin %20 oranında katılmasıyla 28 günlük basınç dayanımı 50,6 N/mm2 çıkmıştır ki, bu değer CEM I 42.5R çimentolarının 42,5 N/mm2 lik limit değerinin üzerindedir..

**Anahtar Kelimeler:** *Portland Çimentosu, Vermikülit, Puzolan, Basınç Dayanımı*

## USAGE OF VERMICULITE IN CEMENT AS A POZZOLANIC ADDITIVE

### ABSTRACT

Vermiculite is a magnesium alumina silicate clay-based material with the property of expansion. Vermiculite is a stratified silicate mineral formed as a result of the exchange of mica minerals and chlorite. This property of vermiculite gives hope for use as a pozzolanic additive in cement production. As a matter of fact, it is also observed that vermiculite is used as a pozzolanic additive in aggregates and cements in the production of lightweight concrete. In this study, the properties of vermiculite obtained by cooking at 1200 °C were investigated if it is used as a pozzolanic additive in OP42.5 R cements by grinding. As a result, with the addition of 0%, 10%, 15% and 20% of the vermiculite cooked and ground at 20%, the 28-day compressive strength increased to 50.6 N/mm2, which is above the limit value of 42.5 N/mm2 of CEM I 42.5R cements.

**Keywords:** *Portland Cement, vermiculite, pozzolan, physical and chemical properties*

### 1. Giriş

Türkiye’de vermiculit üretimine 2014 yılında başlanmış olup yıllar itibariyle sistematik üretim yapılamamıştır. 2014 yılında 716 bin ton olan üretim 2020 yılına kadar dalgalı bir seyir izlemiştir. 2020 yılında ise hiç üretim olmamıştır (Çizelge 1) [1]. Yapılan çalışmalarda, vermiculitin mika mineralleri ve kloritin değişmesi sonucu oluşan tabakalı silikat esaslı minerallerden oluşması ve ayrıca dört çeşit oluşumu söz konusudur. Vermiculitin, makroskopik trioktahedral yapısı ve izomorfik iyon değişimine uğrayarak pozitif yük noksanlığının tabakalar arasında yüklerle dengelendiği literatürde yer almaktadır [2]. Ham vermiculit cevherinden veya konsantrelerinden kalsinasyonla elde edilen genleştirilmiş vermiculit düşük kütle yoğunluğu, düşük ısı iletkenliği ve nispeten yüksek erime noktası gibi özellikler yanında kimyasal inertlik, dayanıklılık ve çevre güvenliği gibi özelliklere de sahiptir. Bu özellikler, vermiculiti çimento üretiminde puzolanik katkı maddesi olarak kullanımına uygun bir hale getirmektedir.

## 2. Literatür Taraması

Türkiye zengin vermikülit rezervlerine sahiptir. Ancak malzemenin iyi bilinmemesi, çalışmaların yetersizliği, alana yeterli yatırım yapılmayarak dikkate değer pazar oluşturulmamıştır. Bulunan rezervler ise henüz değerlendirilme sürecindedir. Türkiye’de genişleme özelliği iyi olan Sivas-Yıldızeli Karakoç vermikülit rezervi 2.750.000 ton kadardır. Eskişehir-Sarıcakaya, Malatya-Darende-Kuluncak (genleşme oranı düşük, miktarı 6-7 milyon ton) ve Elazığ-Harpur Arduçluk’ta bulunmaktadır [3]. Dünya üzerindeki vermikülit üretiminin %55’inin tarım malzemesi, %16’sının hafif agrega, %23’ünün yalıtım malzemesi olarak üretildiği, %16’sının da diğer alanlarda kullanıldığı görülmüştür [4].

İşletme ruhsat sahiplerinin çalışmalarla rezerv genişletmesi sonucu, 2020 yılı itibarıyla MAPEG’e (Maden Petrol İşleri Genel Müdürlüğü) beyan edilen görünür rezerv miktarı yaklaşık 35 milyon tondur [1]. Türkiye’de MTA tarafından yapılan çalışmalar neticesinde genişleme özelliği iyi olan ve olmayan 2.750.000+2.475.000 ton vermikülit cevheri belirlenmiştir [5]. Hesaplamalar göstermektedir ki, 6-7 milyon ton vermikülit rezervi vardır [6]. Ülkelere göre vermikülit üretim miktarları Çizelge 1’de verilmiştir.

**Çizelge 1.** Ülkelere göre vermikülit üretim miktarları (Ton) [1].

| Ülkeler  | YILLAR         |                |                |                |                |                |                |                |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|  | 2013           | 2014           | 2015           | 2016           | 2017           | 2018           | 2019           | 2020           |
| Arjantin   | 1.000          | 90             | 90             | 60             | -              | -              | -              | -              |
| Brezilya,<br>Konsantre                                       | 68.014         | 56.444         | 70.000         | 58.000         | 55.000         | 50.000         | 50.000         | 50.000         |
| Bulgaristan<br>(Tahmini)                                     | 18.600         | 10.000         | 10.000         | 10.000         | 10.000         | 10.000         | 11.000         | 10.000         |
| Çin(Tahmini)   | -              | -              | -              | -              | -              | -              | -              | -              |
| Mısır  | 3.000          | 3.000          | 8.190          | 8.000          | 8.000          | 8.000          | 8.000          | 8.000          |
| Hindistan  | 9.574          | 16.384         | 13.250         | 8.058          | 5.000          | 10.000         | 2.000          | 2.000          |
| Japonya<br>(Tahmini)   | 6.200          | 6.000          | -              | -              | -              | -              | -              | -              |
| Kenya  | 460            | 440            | 410            | -              | -              | -              | -              | -              |
| Rusya<br>(Tahmini)   | -              | 21.000         | 8.282          | 12.363         | 13.000         | 10.000         | 25.000         | 25.000         |
| Güney Afrika   | 127.658        | 143.007        | 138.290        | 166.483        | 176.000        | 180.000        | 158.000        | 140.000        |
| Uganda   | 243            | 2.620          | 1.118          | 3.294          | 5.000          | 20.000         | 7.000          | 7.000          |
| ABD konsantre,<br>satış ve üretici<br>kullanımı,<br>tahmini) | 100.000        | 100.000        | 100.000        | 100.000        | 100.000        | 100.000        | 100.000        | 100.000        |
| Zimbabve<br>(Tahmini)  | 28.808         | 29.767         | 30.868         | 29.020         | 30.000         | 30.000         | 30.000         | 30.000         |
| İran   | -              | 1.200          | 1.000          | 1.000          | 1.000          | 1.000          | -              | -              |
| Meksika  | -              | 226            | 299            | 310            | -              | -              | -              | -              |
| Türkiye  | -              | 716            | 425            | 1.050          | 1.618          | 18.183         | 1.370          | -              |
| Diğer Ülkeler  |                |                |                |                |                | 9.500          | 3.000          | 3.000          |
| <b>Toplam</b>  | <b>363.557</b> | <b>390.894</b> | <b>382.222</b> | <b>397.638</b> | <b>404.000</b> | <b>430.000</b> | <b>394.000</b> | <b>375.000</b> |

Türkiye’de özellikle ponza taşı ve volkanik tüf / cüruf kullanılarak hafif beton üretimi yaygın olmakla beraber, geliştirilmiş vermikülit kullanımı henüz yeterli seviyede değildir. Ancak ısıyla geliştirilen vermikülitin gerek ısı ve gerekse yüksek sıcaklığa dayanabilen hafif beton üretimi konusunda çalışmalar yapılmıştır [7].

Yapılar yüksek sıcaklık altında durabilite bakımından olumsuz etkilenir. Sonuçta yapıların hasara uğraması, insanları için tehlike yaratması söz konusudur [2]. Özellikle yapımında beton kullanılan, yüksek ısıya maruz kalan yerlerde betonun zarar görmesi mümkündür. Yangın etkisinde kalan bir beton bünyesindeki suyu kaybeder ve çimentonun agregadan ayrılmasına neden olur. Betonarme yapılarda sıcaklığın ani yükselerek 600 °C'lere ulaşması betonda %50'lik bir mukavemet kaybına uğramaktadır. Sıcaklığın 800 °C'lere çıkması durumunda ise dayanımının yaklaşık %80'ini kaybederek yıkılma tehlikesiyle karşı karşıya kalır.

Kaya (2011) yaptığı bir tez çalışmasında, vermikülit ile değişik oranlarda puzolanik silis dumanı eklenen çimentolu harçların yüksek sıcaklığa maruz kalması durumunda basınç dayanımlarındaki değişimleri araştırmıştır. Hacimce üç değişik vermikülit / çimento oranına sahip karışımlar üzerinde deneysel çalışmalar yapılmıştır. Çimentoya ağırlığının %5, %10 ve %15'i kadar silis dumanı ikame edilmiş, 40×40×160 mm'lik prizmatik numuneler üretilmiştir. Söz konusu numuneler; fırında, 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklıklarda bırakıldıktan sonra basınç ve eğilmede çekme dayanımı ile ultrasonik ses hızı testlerine tabi tutulmuştur. Sonuçlar, oda sıcaklığındaki numunelerin mekanik dayanımları ve ultrasonik ses hızları ile karşılaştırılmıştır. Karışımlarda genleştirilmiş vermikülit kullanımı ile numunelerin kuru birim ağırlık değerlerinin azaldığı görülmüştür. Harçlara silis dumanı ilave edilmesiyle elde edilen numunelerin eğilmede çekme dayanımı, kontrol numunesine göre %26,9-62,31 azalmıştır. Eğilmede çekme dayanım değerlerine bakıldığında maksimum düşüş vermikülit/çimento oranı 6 olan %15 puzolanik silis dumanlı harçlarda (%62,31) olmuştur. 900°C sıcaklıktaki numunelerin eğilmede çekme dayanımındaki en az kayıp vermikülit/çimento oranı 4 olan puzolan katkısız numunelerde gözlenmiştir. Basınç kaybı ise % 4,3 olmuştur. Buna karşılık, 900°C sıcaklıktaki numunelerde maksimum eğilmede çekme dayanımı kaybı, en fazla vermikülit / çimento oranı 8 olan silis dumanı içeriği %10 olan numunelerde gerçekleşmiştir. Basınç dayanımı kaybı ise %34 olarak tespit edilmiştir. Vermikülit / çimento oranı 6 olan %15 puzolan katkılı numunelerin basınç kaybı ise %75 gerçekleşmiştir. Buna karşılık, 900°C sıcaklıkta bekletilen numunelerde en az basınç dayanımı kaybı vermikülit / çimento oranı 8 olan %15 puzolanik silis dumanı içeren numunelerde olmuştur (%38) [7].

Ehsani (2015), vermikülitin yüksek sıcaklıkta refrakter yalıtım malzemesi olarak kullanımına ilişkin çalışma yapmıştır. Söz konusu çalışmada, vermikülitin, laminar (yaprak halinde katmanlı) yapıda hidrasyona uğramış Mg / Al / Fe silikatlı mikaya benzer bir kil esaslı bir mineral olduğunu, 300 °C üzerinde ısıtılınca orijinal hacminin birçok katına kadar genişleme yaptığını tespit etmiştir. Söz konusu mineral aynı zamanda düşük yoğunluğa ve ısıl iletkenliğe ve yangına karşı dayanıma sahiptir. Bu demektir ki, endüstride 1100-1150 °C gibi yüksek sıcaklıklarda refrakter malzeme olarak kullanılabilir. Hem bu sıcaklığı arttırmak hem de çeşitli vermikülit esaslı yangın yalıtım malzemeleri üretebilmek için, alümina çimento, ateş kili gibi dolgu maddeleri ilâve edilebilmektedir [4].

Kılıç (2020), "yüksek sıcaklığın genleştirilmiş vermikülit kullanılarak üretilen çimento esaslı hafif harçların özelliklerine etkisi" konulu lisansüstü tez çalışmasında, hafif agrega olarak genleştirilmiş vermikülit kullanılmıştır. Amaca yönelik olarak vermikülit/çimento oranı 3, 4, 5 ve 6 olan numuneler üretilmiştir. Karışımlarda Portland ve alüminatlı çimentolar kullanılmıştır. 28 günlük kürden sonra, laboratuvar ortamındaki referans numunelerle 300, 600, 900 ve 1100 °C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinden olmak üzere birim ağırlık, su emme, poroz boşluğun oranı, ultrasonik test yanında basınç ve eğilme çekme deneyleri yapılmıştır. Genleştirilmiş vermikülitin kullanılması ile yangına dayanıklı olan çimentolu kompozit bir kaplama malzemesi üretilebileceği sonucuna varılmıştır [8].

Vermikülitler 1200 °C gibi yüksek sıcaklıklarda ısıtıldıklarında, tabakalarının arasındaki suyun ani buharlaşması ile hacimce 8 ila 20 kata kata kadar genişlebilmektedir, Birim ağırlığı ise 56-192 kg/m3 olabilmektedir. (Bir başka veriye göre, genişleme oranı ortam koşullarının da etkisi ile 13-18 kat aralığındadır [3]. Ham haliyle kullanımı oldukça zor olan vermikülitin endüstride genellikle genleştirilmiş yapısı tercih edilmektedir. Kimyasal yapısındaki iyon değişim özelliğinden dolayı inşaatlarda (boya, kompozit ve seramik-refrakter malzeme bileşimlerinde) ve tarım endüstrisinde kullanılabilir [2].



Yapılan bir araştırmada da, atık vermikülitin beton içerisinde agrega yerine kullanımı da düşünölmüştür. Bu kapsamda kum ile atık vermikülit yer değiştirilmiş olup elde edilen beton örneklelerinin kimyasal yapısı ile mineralojik bileşimleri SEM-EDS, FTIR ve XRD analizleriyle tespit edilmiştir. Sonuçta, betonun yapısında meydana gelebilecek kimyasal ve mineral yapı değişimleri betonun basınç dayanımı ile ilişkilidir. Elde edilen veriler, atık vermikülit miktarının artışı ile beton basınç dayanımında azalmalara yol açtığını, beton karışımina giren su ihtiyacının fazla olduğunu göstermektedir. Böylece, düşük miktarlarda atık vermikülit içeren betonların, basınç dayanımlarının önemli olmadığı yapılarda kullanılabileceği görölmüştür [6].

### 3. Deneysel Çalışma

Genleştirilmiş vermikülitin 1200 °C sıcaklıkta pişirilmesi sonucu ne gibi fiziksel ve kimyasal yapıya sahip olacağı ve Portland (CEM I 42,5 R) çimentolarında puzolanik katkı maddesi olarak kullanılıp kullanılmayacağı araştırılmıştır. Deneysel çalışmaların %90'ı AKÇANSA Çimento Fabrikası, %10'u İstanbul Arel Üniversitesi laboratuvarlarında yapılmıştır. Söz konusu sıcaklıkta pişirilerek öğütölen puzolanik vermikülit Portland CEM I 42.5R'ye %0, %10 %15 ve %20 oranlarında ikame edilerek, 40x40x160 mm'lik üçer adet prizmatik hamur numuneleri elde edilmiştir. Tüm hamur karışımlarda (Su / vermikülit külü) Su / VK = 0,40 sabit alınmıştır. Deneye esas olan numuneler 20°C'lik oda sıcaklığında kalıplandıktan 24 saat sonra 1, 2, 7 ve 28 gün süreyle (yüksekliğinin ½ sine kadar su doldurulmuş kaplar içinde) kür edilerek basınç dayanımları bulunmuştur.

#### 3.1. Kullanılan Malzemeler

##### 3.1.1. Çimento

Deneylerde kullanılan CEM I 42.5 R çimentosu, Akçansa Çimento fabrikası tarafından üretilmiştir. Söz konusu çimentoya ait fiziksel ve kimyasal bulgular ile kimyasal reaksiyonla oluşan bileşikleri Çizelge: 2, 3 ve 4'te verilmiştir.

**Çizelge 2.** CEM I 42.5R Çimento'sunun fiziksel analizi.

| Fiziksel Analiz       |          | Literatür değerleri [7]                              | Deneysel bulgular [9] |
|-----------------------|----------|--|-----------------------|
| Priz başlama/Bitim dk |          | ≥ 60/-   | 140/196               |
| Genleşme mm           |          | ≤ % 10   | 1                     |
| Özg. Ağr.             |          |  | 3.12                  |
| Basınç Dayanımı       | 1 Günlük |  | 19.4                  |
|                       | 2 Günlük | ≥ 20,0 MPa   | 33.8                  |
|                       | 7 Günlük |  | 48                    |
|                       | 28günlük | ≥ 42,5 N/mm <sup>2</sup><br>≤ 62.5 N/mm <sup>2</sup> | 58.7                  |
| Özgöl yüzey (Bleine)  |          | 3400 – 3900 cm <sup>2</sup> /g                       | 3960                  |

**Çizelge 3.** CEM I 42.5R Çimentosunun kimyasal analizi.

| Özellikler                     | Literatür değerleri % [7] | Deneysel bulgular (Dökme) % [9] | Standart limit [10] |
|--------------------------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------|
| Çözünmeyen Kalıntı             | 0.4-0.6                   | -                               | 5.0                 |
| SiO <sub>2</sub>               | 19.0-20.0                 | 19.17                           | -                   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4.0-5.0                   | 4.21                            | -                   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2.50-3.5                  | 3.55                            | -                   |
| CaO                            | 62.0-64.0                 | 62.88                           | -                   |
| MgO                            | 1.7-2.9                   | 0.99                            | -                   |
| SO <sub>3</sub>                | 2.9-3.6                   | 0.65                            | 4.0                 |
| Kızdırma Kaybı                 | 2.0-3.5                   | 3.73                            | 5.0                 |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.2-0.4                   | 0.26                            | 1.0                 |
| K <sub>2</sub> O               | 0.6-1.00                  | 0.65                            |                     |
| Klorür (Cl)                    | 0.01-0.05                 | 0.03                            | 0.10                |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |                           | 35.08                           |                     |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  |                           | 0.26                            |                     |
| KST                            |                           | 103.15                          |                     |
| SM                             |                           | 2.47                            |                     |
| TM                             |                           | 1.19                            |                     |
| TOPLAM                         |                           | 95.75                           |                     |
| CaO (Free)                     |                           | 1.21                            |                     |

**Çizelge 4.** CEM I 42,5 R Çimentosunda kimyasal bileşikler [9].

| Bileşikler | % değerler |
|------------|------------|
| C3S        | 61.35      |
| C2S        | 8.69       |
| C3A        | 5.15       |
| C4AF       | 10.81      |

### 3.1.2. Vermikülit

Deneylerde kullanılan vermikülit İstanbul-Bülbüller madencilik Firmasından (2022) [11] temin edilmiştir. Doğadan çıkarılarak ve işlem görerek elde edilmiş olan vermikülit fırında pişirilirken 1200 °C sıcaklığa eriştikten sonra 15 dk. daha bekletilmiştir. Pişirme Protherm marka maksimum 1400 °C ısıtma kapasiteli fırında gerçekleştirildi. Pişirmede 20 °C/dk hız ve 60 dakika süre uygulandı. Fırından çıkarılan malzeme havada soğumaya bırakılmış olup kırıcıdan geçirildikten sonra 0,76 mm'lik elekten elenerek puzolana dönüştürülmüştür. Vermikülitin çeşitli safhaları Şekil 1'de, pişirilmiş vermikülitin fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 5'te verilmiştir.



a. Doğadan çıkarılan vermicülit kayacı



b. İşlenmemiş ham vermicülit



c. 1200 °C'de pişirilmiş vermicülit



ç. Pişirilerek kırıcıdan geçirilmiş vermicülit

Şekil 1. Pişirilmemiş ve pişirilmiş vermicülitlerin resimleri.

#### 4. Bulgular

DeneySEL çalışmalarında kullanılmak üzere pişirilmiş (genleştirilmiş) vermicülitin fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 5'te verilmiştir. Burada MgO'in yüksekliği dikkat çekmektedir. Zira, MgO çimentoda hacim genleştirme özelliğine sahiptir.

**Çizelge 5.** Pişirilmiş (Genleştirilmiş) vermikülitin fiziksel ve kimyasal özellikleri.

| Fiziksel Özellikler                          | Literatür değerleri [7] | Deneyisel bulgular [9] |
|--|-------------------------|------------------------|
| Renk   | Altın                   |                        |
| Şekil  | Akordeon                |                        |
|  | % 240 (ağırlıkça)       |                        |
| Su Tutma Kapasitesi                          | % 28 (hacimsel)         |                        |
| Katyon Değişim Oranı                         | 50 - 150 meq/100 g      |                        |
| Isı İletkenliği                              | 0.065 - 0.062 W/m.K     |                        |
| Geçirgenlik                                  | 95%                     |                        |
| Sinterlenme Noktası                          | 1150 °C - 1250 °C       |                        |
| Ateşe Dayanıklılık                           | Yanmaz                  |                        |
| Spesifik Isı                                 | 0.20 - 0.26Kcal /Kg°C   |                        |
| Sıkışık Birim Hacim Ağırlığı                 | 0.147 gr/cm3            |                        |
| <b>Kimyasal Özellikler %</b>                 |                         |                        |
| Silisyum (SiO <sub>2</sub> )                 | 35.4                    | 40.98                  |
| Alüminyum (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )  | 17.8                    | 13.36                  |
| Potasyumoksit (K <sub>2</sub> O)             | 4.68                    | 4.25                   |
| Na <sub>2</sub> O(Sodyumoksit)               | -                       | 0.26                   |
| Kalsiyumoksit (CaO)                          | 6.9                     | 0.54                   |
| Magnezyumoksit (MgO)                         | 17.3                    | 24.05                  |
| Demiroksit (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | 16.7                    | 12.90                  |
| SO <sub>3</sub>                              | -                       | 0.21                   |
| H <sub>2</sub> O                             | 4.00                    | -                      |
| Cl   |                         | 0.0323                 |
| pH   | 8.1                     | -                      |
| Diğer  | 0.2-1.2                 | -                      |
| Kızdırma kaybı(Loss on)                      | -                       | 0.0                    |

1200 °C'de pişirildikten sonra 3960 cm<sup>2</sup>/g bleine inceliğine kadar öğütülen vermikülit puzolanı, Portland CEM I 42,5 çimentosuna %, 10, 15 ve 20 oranlarında katılmış ve fiziksel analizi yapılmıştır. Priz başlama ve bitim süreleri ile Le-Chatelier (genleşme) değerleri limitlerin altındadır. %0 katkılı (Kontrol numunesi) CEM I 42.5R çimentosunun bleine inceliği, bu çimentolar için ön görülen standart 2900 cm<sup>2</sup>/g'dan oldukça fazladır (3960 cm<sup>2</sup>/g). İncelik katkı oranına bağlı olarak daha da artmakta, %20 katkı oranında 4480 cm<sup>2</sup> ye ulaşmaktadır. Bu özellik, çimentoda hidrasyon ısısının yükselmesine neden olabilecektir. Pişirilmiş puzolanik vermikülit katkılı CEM I 42,5 R çimentosunun fiziksel analizi Çizelge 6'da, basınç dayanımları ise Çizelge 7'de verilmiştir.

**Çizelge 6.** Pişirilmiş puzolanik vermikülit katkılı CEM I 42.5R çimentosunun fiziksel analizi [9].

| CEM I 42,5 R Çimentosuna vermikülit katkı oranı | Harca Verilen su (ml) | Priz Baş. (dk) | Priz Bit. (dk) | Le Chat. (mm) | Elek Analizi 32 µ | Elek Analizi 45 µ | Elek Analizi 90 µ | Özg. Ağırlık | Blaine Özgül Yüzey |
|---|-----------------------|----------------|----------------|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|--------------------|
| Vermikülit %0 Kontrol Num.                      | 225                   | 140            | 196            | 1             | 8.2               | 2.7               | 0.1               | 3.12         | 3960               |
| Vermikülit %10                                  | 225                   | 169            | 237            | 1             | 8                 | 21.4              | 0                 | 3.1          | 4210               |
| Vermikülit %15                                  | 225                   | 156            | 220            | 1             | 8.1               | 2.5               | 0                 | 3.11         | 4300               |
| Vermikülit %20                                  | 225                   | 158            | 261            | 0             | 8.1               | 2.5               | 0                 | 3.13         | 4480               |

**Çizelge 7.** Pişirilmiş vermikülit katkı CEM 42,5 R çimentolarının basınç dayanımları [9].

| CEM I 42,5 R Çimentosuna<br>vermikülit katkı oranı | Günler |        |        |         |
|--|--------|--------|--------|---------|
|  | 1. gün | 2. gün | 7. gün | 28. gün |
| Vermikülit %0<br>Kont. Num.                        | 19.4   | 33.8   | 48     | 58.7    |
| Vermikülit %10                                     | 16.7   | 28.5   | 42.8   | 55.9    |
| Vermikülit %15                                     | 15.5   | 27.4   | 39.7   | 51.3    |
| Vermikülit %20                                     | 14.1   | 26.6   | 38.3   | 50.6    |

Çizelge 7’de görüleceği üzere, %10, 15 ve 20 vermikülit katkı çimentoların tümü KÇ 32,5 çimentosu dayanımını fazlasıyla karşılamaktadır. Öyle ki, PÇ 42,5 dayanımlarını da sağlamaktadır. Basınç dayanımlarının yüksek olmasında Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O (alkali) değerlerinin (%0,91≤%1), MgO miktarının (%0,99) ve SO<sub>3</sub> miktarının (%0,65) limitlerden çok düşük olmasının etkin olduğu ifade edilebilir. Keza, kızdırma kaybı da (3,75≤Limit 5,0) in altındadır.

Deneye esas olan CEM I 42,5 R çimentosunun bileşiklerinden C3S’nin %61,35 olması (C2S=%8,69), ilk mukavemetinin yüksek, priz alma süresinin kısa, hidratasyon ısısının yüksek olduğunun kanıtıdır. Nitekim Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarının (%4,21) düşüklüğü hidratasyon ısısını düşürmektedir.

1200 °C’de pişirilmiş vermikülitin Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O miktarı (%4,21) çimentonunki ile birleştiğinde toplamda (%0,91+%4,21) miktara erişen alkalinin, alkali agrega reaksiyonuna neden olabileceği, bu olumsuzluğun MgO miktarının (%24,05) gibi yüksekliği ile daha da artabileceği anlaşılmaktadır.

PÇ’li çimentolar için genelde %19 civarında olan (hücrel) su miktarının vermikülit katkılılarda %27’lere çıkmış olması, alınan çimento numunesinin bleine inceliğinin 3960 cm<sup>2</sup>/g üzerinde olması ile izah edilebilir (Çizelge 6).

## 5. Sonuçlar

Sonuç olarak, %0, %10, %15 ve %20 oranlarında pişirilmiş vermikülit katkı çimentolarda %20 katkı oranında 28 günlük basınç dayanımı 50.6 N/mm<sup>2</sup> çıkmıştır ki, bu değer CEM I 42.5R çimentolarının 42.5 N/mm<sup>2</sup> lik limit değerinin üzerindedir. MgO miktarının yüksekliğine rağmen bu değere ulaşması, bileşimde MgO değerinin indirgenliği anlamına gelir. Yine de, genleşme yapabileceği unutulmamalıdır. Bu özellik, çimentonun genleşen çimento özelliğine yakın olduğuna, delik tıkama vb. işlerde kullanılabilmesine işaret eder. CEM I 42.5 R çimentosunun kimyasal bileşiklerin incelenmesinde (Çizelge 4) C3S değerinin yüksekliği, vermikülit katkılı numunelerin bleine inceliğinin yüksekliği ile birlikte incelendiğinde; priz süresi kısa, hidratasyon ısısı yüksek, kalıp alma süreleri kısmen kısa olan bir katkı çimento özelliği taşımaktadır.

## Teşekkür

Bu çalışmada laboratuvar deneylerini yapılmasında kısmen yardımcı olan yüksek lisans öğrencim Dilfuza Tuxanova’ya, deneylerin bütünüünün yapılmasını sağlayan Akçansa Çimento Sn. ve Ticaret A.Ş. Kalite Proses Kontrol Yöneticisi Teoman Erenoğlu’na teşekkür ederim.

## Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir kurum, kuruluş, kişi ile kişisel ve finansal çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedirler.

**Kaynaklar**

- [1] Arıkan, F., Dünyada ve Türkiye’de Vermikülit, MTA Genel Müdürlüğü Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı, 12, Ankara, 2021.
- [2] Toksoy, F., Vermikülit: Mineraloji, jeolojik oluşum, endüstriyel kullanım ve Türkiye’deki durumu, 2. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 123-139, İzmir, 1997.
- [3] Ekinci C. E., Yeğinobalı, A., Silis Dumanlı Betonlarda Sürtünme Yolu ile Aşınma Kaybı, İnşaat Mühendisliğindeki gelişmeler 2. Tek. Kongre Bildiriler Kitabı, 359–368, İstanbul, 1995.
- [4] Ehsani, İ., Bir Vermikülitin Fiziksel, Kimyasal ve Isıl Özellikleri Üzerine Sülfürik Asit Liçinin Etkileri, Yüksek lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2015.
- [5] DPT, II. Pomza-Perlit-Vermikülit-Flogobit-Genleşen Killer çalışma grubu raporu, Devlet Planlama Teşkilatı, DPT: 2617-ÖİK: 628, 64, Ankara, 2001.
- [6] Kalem, M., Harmancı, F. N., Betonda atık vermikülit kullanımının betonun mineralojik ve kimyasal yapısına olan etkisinin incelenmesi (Investigation of the effect of using waste vermiculite in concrete on the mineralogical and chemical structure of concrete), GUFBD / GUJS, 12(3): 848-863, 2022.
- [7] Kaya, M., Genleştirilmiş vermikülit kullanılarak üretilen silis dumanı katkılı-çimento esaslı kompozitlerin yüksek sıcaklık dirençleri, Yüksek Lisans Tezi, 2011.
- [8] Kılıç, K., Yüksek sıcaklığın genleştirilmiş vermikülit kullanılarak üretilen çimento esaslı hafif harçların özelliklerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Bozok Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 114, 2020.
- [9] Rapor, Akçansa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş, Büyükçekmece/İstanbul, 4.1.2023.
- [10] TS EN 197/1, Çimentolar, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2012.
- [11] Bülbüller Madencilik, B.O.S.B Mermere Sanayi Sitesi 14. Cad. No: 22/1 Beylikdüzü/ İstanbul, 2022.