



**BANDIRMA  
ONYEDİ EYLÜL  
ÜNİVERSİTESİ**

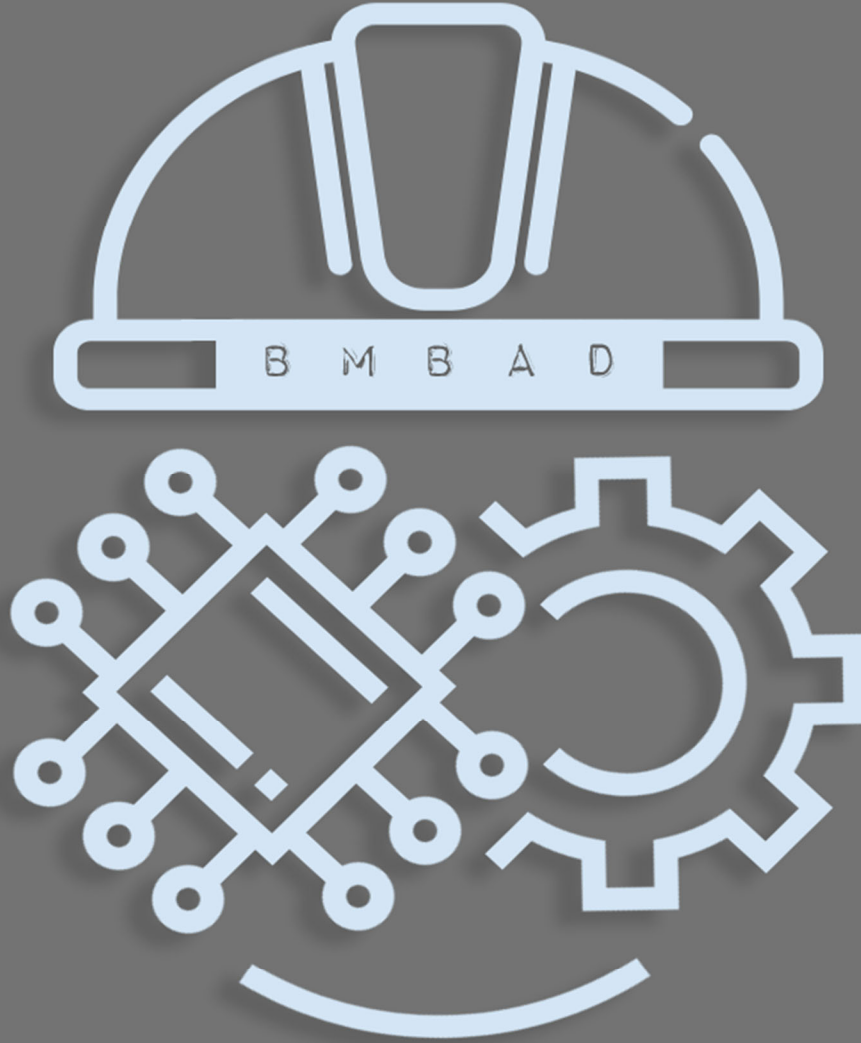
**BMBAD  
BJESR**

**Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi**  
Journal of Engineering Sciences and Researches

**Cilt/Volume : 5**

**Sayı/Issue : 2**

**Yıl/Year : 2023**





BMBAD  
BJESR

Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi  
Journal of Engineering Sciences and Researches



Müh.Bil.ve Araş.Dergisi

Cilt/Vol. 5

Sayı/Issue 2

2023

ISSN: 2687-4415

### Sahibi/Owner

Prof. Dr. Süleyman ÖZDEMİR *Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi Rektörü*

### Baş Editor /Editor in Chief

Prof. Dr. Muhammet Nuri SEYMAN *Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi*

### Yardımcı Editör/Associate Editor

Dr. Öğr. Üyesi Onursal ÇETİN *Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi*

### Alan Editörleri/Field Editors

Doç. Dr. Adem DALCALI (Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi) (Elektrik-Elektronik)

Doç. Dr. Bülent BÜYÜK (Bandırma Onyedi Eylül Üniversite) (Mühendislik Temel Bilimleri)

Doç. Dr. Onur ÜLKER (Eskişehir Teknik Üniversitesi) (Orman)

Dr. Öğr. Üyesi Aykut DİKER (Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi) (Bilgisayar)

Dr. Öğr. Üyesi Uğur Erdem DOKUZ (Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi) (Yer Bilimleri)

### Mizanpaj

Arş. Gör. F. Kebire BARDAK (Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi)

### Dil Editörü

Arş. Gör. Muhammed Şamil BALCI (Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi)

**Editörler Kurulu/Editorial Board**

Prof. Dr. Feyzullah TEMURTAŞ, ftemurtas@bandirma.edu.tr, Bandırma Onyediy Eylöl Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet KURBAN, mehmet.kurban@bilecik.edu.tr, Bilecik Şeyh Edibali Üniversitesi

Prof. Dr. Fırat KAÇAR, gkacar@istanbul.edu.tr, İstanbul Cerrahpaşa Üniversitesi

Prof. Dr. Cihan KARAKUZU, cihan.karakuzu@bilecik.edu.tr, Bilecik Şeyh Edibali Üniversitesi

Prof. Dr. Muhammet Nuri SEYMAN, mseyman@bandirma.edu.tr, Bandırma Onyediy Eylöl Üniversitesi

Doç. Dr. Gökçen NUR YILMAZ, gokceyilmaz@tedu.edu.tr, TED Üniversitesi

Doç. Dr. Abdullah YEŞİL, ayesil@bandirma.edu.tr, Bandırma Onyediy Eylöl Üniversitesi

Doç. Dr. Muharrem PUL, mpul@kku.edu.tr, Kırıkkale Üniversitesi

Doç. Dr. Ali DURMUŞ, adurmus@kayseri.edu.tr, Kayseri Üniversitesi

Doç. Dr. Hayri YAMAN, hyaman@kku.edu.tr, Kırıkkale Üniversitesi

Dr. Öğr. Üye. Onursal ÇETİN, ocerin@bandirma.edu.tr, Bandırma Onyediy Eylöl Üniversitesi

Dr. Öğr. Üye. Rahim DEHKHARGHANI, rdehkharghani@bonabu.ac.ir, Computer Eng., Natural Language Processing, and Sentiement Analysis

Behnaz HASSANSHAHİ, behnaz.hassanshahi@oracle.com, Oracle Lab Australia, Computer Eng. Dynamic Analysis and Fuzzing Techniques

**Yayın veya Danışma Kurulu/Advisory Board**

Prof. Dr. Hasan BAYINDIR, hasanbayindir@dicle.edu.tr, Dicle Üniversitesi

Prof. Dr. Hasan ERBAY, erbay@kku.edu.tr, Kırıkkale Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa GÜNAY, mgunay@karabuk.edu.tr, Karabük Üniversitesi

Prof. Dr. Fırat KAÇAR, gkacar@istanbul.edu.tr, İstanbul Cerrahpaşa Üniversitesi

Prof. Dr. Cihan KARAKUZU, cihan.karakuzu@bilecik.edu.tr, Bilecik Şeyh Edibali Üniversitesi

Prof. Dr. Uğur TEMİZ, ugur.temiz@bozok.edu.tr, Yozgat Bozok Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet KURBAN, mehmet.kurban@bilecik.edu.tr, Bilecik Şeyh Edibali Üniversitesi

Prof. Dr. Osman YILDIZ, osmanyildiz@kku.edu.tr, Kırıkkale Üniversitesi

Prof. Dr. Nejat YUMUŞAK, nyumusak@sakarya.edu.tr, Sakarya Üniversitesi

Prof. Dr. İbrahim DEVELİ, ideveli@erciyes.edu.tr, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Sertaç BAYHAN, sbayhan@hbku.edu.qa, Hamad Bin Khalifa University

Prof. Dr. Selim ÖNCÜ, soncu@karabuk.edu.tr, Karabük Üniversitesi

Prof. Dr. Hasan YAMIK, hasan.yamik@bilecik.edu.tr, Bilecik Şeyh Edebalı Üniversitesi

Doç. Dr. Adem DALCALI, adalcali@bandirma.edu.tr, Bandırma Onyediy Eylöl Üniversitesi

Doç. Dr. İlker TÜRKER, iturker@karabuk.edu.tr, Karabük Üniversitesi

Doç. Dr. Muharrem PUL, mpul@kku.edu.tr, Kırıkkale Üniversitesi

Doç. Dr. Ali DURMUŞ, adurmus@kayseri.edu.tr, Kayseri Üniversitesi

Doç. Dr. Serhat Berat EFE, Sefe@bandirma.edu.tr, Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi

Doç. Dr. Kenan HATİPOĞLU, kenan.hatipoglu@mail.vwu.edu, West Virginia Area University

Doç. Dr. Hayri YAMAN, hyaman@kku.edu.tr, Kırıkkale Üniversitesi

Dr. Öğr. Üye. Rahim DEHKHARGHANI, rdehkharghani@bonabu.ac.ir, Computer Eng., Natural Language Processing, and Sentiment Analysis

Behnaz HASSANSHAHİ, behnaz.hassanshahi@oracle.com, Oracle Lab Australia, Computer Eng. Dynamic Analysis and Fuzzing Techniques

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

Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, 10200 Bandırma/ Balıkesir, Türkiye

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

[bjesr@bandirma.edu.tr](mailto:bjesr@bandirma.edu.tr)

Tel: 0266 717 0117 (3512)

## İÇİNDEKİLER/CONTENTS

### (Araştırma Makalesi/Research Article)

Determining the Electromagnetic Power Density of GSM Base Stations by Using Lagrange Interpolation Approach

*GSM Baz İstasyonlarının Elektromanyetik Güç Yoğunluğu'nun Lagrange İnterpolasyon Yaklaşımı Kullanılarak Belirlenmesi* **178-185**

**Uğur SORGUCU**

### (Araştırma Makalesi/Research Article)

Ağ Sistemlerinin Güvenliği İçin Siber Saldırıların Ayrık Olaylı Sistem Tanımlama Tabanlı Modellenmesi ve Simülasyonu

*Discrete Event System Identification Based Modeling and Simulation of Cyber Attacks for the Security of Network Systems* **186-202**

**Şahin KARA, Ahmet ZENGİN, Selman HIZAL**

### (Araştırma Makalesi/Research Article)

Uygunluk Mesafe Dengesi Tabanlı Yapay Ekosistem Optimizasyon Algoritması ile Otomatik Gerilim Regülatörü Sistemi için Denetleyici Tasarımı

*Controller Design for Automatic Voltage Regulator System with Fitness Distance Balance Based Artificial Ecosystem Optimization Algorithm* **203-214**

**Muhammet DEMİRBAŞ, Serhat DUMAN, M. Kenan DÖŞOĞLU**

### (Araştırma Makalesi/Research Article)

Domates Yapraklarında Hastalık Tespiti İçin Transfer Öğrenme Metotlarının Kullanılması

*Use of Transfer Learning Methods for Disease Detection in Tomato Leaves* **215-222**

**Serhat KILIÇARSLAN, İshak PAÇAL**

### (Araştırma Makalesi/Research Article)

Modern Güç Sistemlerinde Tıkanıklık Yönetimi Probleminin Çözümü İçin Balçık Küfü Optimizasyon Algoritması

*Slime Mould Optimization Algorithm for Solving Congestion Management Problem in Modern Power Systems* **223-232**

**Mehmet UĞUR, Serhat DUMAN**

(Araştırma Makalesi/Research Article)

Trafikle İlgili Seslerin İşitsel Modeller ve Konvolüsyonel Sinir Ağları Kullanılarak Sınıflandırılması

*Classification of Traffic-Related Sounds Using Auditory Models and Convolutional Neural Networks* 233-242

**Mariem Mine Cheikh Mohamed FADEL, Zeynep ÖZER**

---

(Araştırma Makalesi/Research Article)

Solar Sulama Sistemleri için MPPT tabanlı Üç Fazlı Evirici Tasarımı

*MPPT Based Three Phase Inverter Design for Solar Irrigation Systems* 243-254

**Muzaffer ÇAYIR, Harun ÖZBAY**

---

(Araştırma Makalesi/Research Article)

A Reconfigurable 4<sup>th</sup> Order IIR Filter For The Low Frequency Applications

*Düşük Frekans Uygulamaları İçin Yeniden Yapılandırılabilir Bir IIR Süzgeç Yapısı* 255-263

**Deniz ÖZENLİ**

---

(Araştırma Makalesi/Research Article)

Design of High High-Power Density Spoke Spoke-Type Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for E E-Bikes

*Elektrik Destekli Bisikletler için Yüksek Güç Yoğunluğuna Sahip Çubuk Tipi Gömülü Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı* 264- 271

**Yusuf YASA**

---

(Araştırma Makalesi/Research Article)

Modifiye Edilmiş Inception Modülü Kullanılarak İnsan Periferik Kan Hücrelerinin Çoklu Sınıflandırılması

*Multiple Classification of Human Peripheral Blood Cells Using Modified Inception Module* 272-284

**Hüseyin FIRAT**

---

(Araştırma Makalesi/Research Article)

Makine Öğrenmesi ve Optimizasyon Yöntemleri ile Uzun Dönem Elektrik Enerjisi Tahmini: Türkiye Örneği

*Long-Term Electricity Demand Forecasting with Machine Learning and Optimization Methods: The Case of Turkey* 285-292

**Ömer Ali KARAMAN, Yasin BEKTAŞ**

---

Araştırma Makalesi/Research Article)

Bulanık TOPSIS Yöntemiyle Rüzgar Türbin Kanat Atıkları İçin En Uygun Bertaraf Yönteminin Belirlenmesi: Bandırma Örneği

*Determination of the Most Appropriate Disposal Method for Wind Turbine Blade Waste by Fuzzy TOPSIS Method: Bandırma Case* 293-303

**Samet ÖZTÜRK, Kübra ATALAY**

---

CEC 2019 Problemleri İçin Kendinden Uyarlamalı Bir Diferansiyel Gelişim Algoritması

*A Self-Adaptive Differential Evolution Algorithm for CEC 2019 Problems*

304-311

**Hatem DURLU, Gürçan YAVUZ**

---

Derin Öğrenme Kullanılarak Fundus Görüntülerinden Katarakt ve Diyabetik Retinopati Tespiti

*Detection of Cataract and Diabetic Retinopathy from Fundus Images Using Deep Learning*

312-324

**Şükrü AYKAT, Sibel SENAN**

---

Şizofreni Tanısında Beyin Dalgalarının Derin Öğrenme Yöntemleri ile İncelenmesi

*Analysis of the Brainwaves for the Diagnosis of Schizophrenia with Deep Learning Methods*

325-337

**Berkay SERİN, Sevcan EMEK**

---

Tedarik Esnekliği, Teslimat Esnekliği, Planlama Süreci ve Tedarik Süreci Arasındaki Doğrudan ve Dolaylı İlişkilerin İncelenmesi

*Examination of Direct and Indirect Relationships Between Supply Flexibility, Delivery Flexibility, Planning Process, and Procurement Process*

338-348

**Metin BAYRAM, Hasan ŞAHİN, Bayram TOPAL**

---

ADHD ve Sağlıklı Bireylerin Tanısında Boyut Azaltan Zamansal Karakteristik Özellik Çıkarma Yaklaşımı ve 1D-CNN

*Low Dimensionality Temporal Characteristic Feature Extraction Approach and 1D-CNN for Diagnosing ADHD and Healthy Individuals*

349-359

**Kutlucan GÖRÜR**

---

Effect of Anodic Polarization and Sliding Wear on Pitting Corrosion Behavior of Shipbuilding Aluminum Alloy 5083

*Anodik Polarizasyon ve Kayma Aşınmasının Gemi İnşa Alüminyum Alaşım Alaşımı 5083'ün Çukurcuk Korozyonu Davranışına Etkisi*

360-370

**Sabri ALKAN**

---

(Araştırma Makalesi/Research Article)

Sarıcakaya (Eskişehir) Granitoidindeki Pegmatitlerin Kkenu ve Seramik Hammadde Potansiyelleri

*Nature and Ceramic Raw Material Potentials of Pegmatites within the Sarıcakaya (Eskişehir) Granitoid*

371-382

**Bahattin GLL, Hacer BİLGİLİOĞLU**

---

(Araştırma Makalesi/Research Article)

Cooperative Spectrum Sensing Using Reptile Search Algorithm in Cognitive Radio

*Bilişsel Radyoda Sürüngen Arama Algoritması Kullanarak İşbirliki Spektrum Algılama*

383-389

**Burcu KETENCİ, Necmi TAŞPINAR, Tareq M. SHAMİ**

---





## Determining the Electromagnetic Power Density of GSM Base Stations by Using Lagrange Interpolation Approach

### GSM Baz İstasyonlarının Elektromanyetik Güç Yoğunluğu'nun Lagrange İnterpolasyon Yaklaşımı Kullanılarak Belirlenmesi

<sup>1</sup>Uğur SORGUCU

<sup>1</sup>Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü NEVŞEHİR, Türkiye

<sup>1</sup>sorgucu@nevsehir.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 7 March 2023

Accepted : 5 May 2023

##### Keywords:

Lagrange interpolation,  
Electromagnetic Power,  
900MHz, GSM, Base  
Station

#### ABSTRACT

Mobile communication systems are playing an important role in human life, and the importance of this role depends on the increase in the number of people. Reports show that the number of base stations is increasing in parallel to the use of mobile communication systems and population growth. Determining the base station strength is very important, especially in crowded cities. Because of the possible medical effects of base stations, people have the right to know how much is affected. Therefore, the radiation level of 120 base stations has been measured at 20, 40 and 60 meters from base stations at a frequency of 900 MHz. In this study, the Lagrange interpolation method is applied to estimate the strength of electromagnetic level for random intermediate distances and, above 0.99 correlation was achieved for each distance.

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 7 Mart 2023

Kabul : 5 Mayıs 2023

##### Anahtar Kelimeler:

Lagrange Enterpolasyon,  
Elektromanyetik Güç,  
900MHz, GSM, Baz  
İstasyonu

#### ÖZET

Gezgin haberleşme sistemleri insan hayatında önemli bir rol oynamakta ve bu rolün önemi insan sayısındaki artışla ortantılı olmaktadır. Raporlar, gezgin haberleşme sistemlerinin kullanımına ve nüfus artışına paralel olarak baz istasyonu sayılarının da arttığını göstermektedir. Baz istasyonu gücünün belirlenmesi özellikle kalabalık şehirler için çok önemlidir. Baz istasyonlarının olası tıbbi etkilerinden dolayı insanların baz istasyonlarından ne kadar etkilendiğini bilme hakları vardır. Bu nedenle 120 baz istasyonunun radyasyon seviyesi baz istasyonlarından 20, 40 ve 60 metre mesafelerde 900 MHz frekansında ölçülmüştür. Bu çalışmada, rastgele ara mesafeler için elektromanyetik seviyenin gücünü tahmin etmek için lagrange interpolasyon yöntemi uygulanmış ve her mesafe için 0,99'un üzerinde korelasyon elde edilmiştir.

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

## **1. INTRODUCTION**

In the 21st century, in addition to the issues of environmental pollution and noise pollution where we live, "electromagnetic pollution" has been added [1-3]. In recent years, the rapid increase in the popularity of mobile phones has forced the planning and establishment of many new base transceiver stations each year. Although the public does not want it, the installation of base transceiver antennas on the roofs of houses, on the sides of buildings, and in the gardens of schools and hospitals causes discussions and complaints [4,5]. For instance, the study conducted in [4] investigates the exposure levels to electromagnetic radiation (EMR) from mobile phone base station tower settings in residential areas and provides recommendations for reducing the exposure levels. In another study [5], some research done by different institutions and organizations is reported and summarized. The authors stated that the motivation point of their study was public concern about base stations. Therefore, it is necessary to determine the strength of the electromagnetic field in the vicinity of a base station and to inform the public about the potential effects of electromagnetic fields and protection methods. In addition, the relevant authorities need to set up centers where complaints about the base station can be easily submitted and resolved [6, 7]. However, information technologies need electromagnetic waves to spread in space.

Electromagnetic radiation (EMR) is a form of energy that behaves like a wave as it travels through space. Sources of electromagnetic radiation can be divided into two types according to their ionizing properties. The first kind of radiation is called ionizing radiation, such as X-rays, T-rays, etc. This form of radiation converts atoms into charged ions. The other type is called non-ionizing radiation; when the radiated substance absorbs energy, its atoms do not change state [8, 9]. In this study, GSM900 communication systems, namely non-ionizing EMR, are investigated by the authors

Although the GSM900 communication system is older than Digital Cellular Systems 1800MHz (DCS1800) or third Generation (3G), it is still used in many countries effectively. Two frequency bands have been assigned to GSM 900 mobile systems, 890-915 MHz for the uplink (mobile to base station) and 935-960 MHz for the downlink (base station to mobile). The downlink of a given channel is 45 MHz higher than the uplink due to its duplex operation [10]. The number of base stations has increased in parallel to the development of communication technology, and it has become a threat to human health. There are numerous studies which are mentioned the hazardous effects of electromagnetic pollution [11-13].

Krause and colleagues researched the effect of electromagnetic pollution on human memory capacity. In their study, a 217 Hz modulated, 576 microseconds pulsed, and 902 MHz signal were used, and a small performance increase was observed in the memory works. Under the influence of EMF during the resting state, the electroencephalogram (EEG) has not shown any changes. However, as memory operations are carried out, a significant change is observed in brain responses [8].

The effect of GSM 900, DCS 1800, and UMTS, which use RF signals, on the ability to comprehend is investigated, and this study is conducted in the TNO physics and electronics laboratory in the Netherlands. Subjects were divided into two groups, and they were kept under an electromagnetic field (EMF) for a certain period, then specific tests and questionnaires were applied. As a result of these tests, the reaction rate of interaction was observed for the GSM 900, the memory, and when doing more than one job for interaction effects, it was observed for the GSM 1800, and disturbing effects were found for the UMTS in most of the subjects [15].

Chia and colleagues' epidemic study, 808 Singaporean people, who use cell phones, compared with a group of people who do not use cell phones. At the end of the research, it is concluded that the occurrence of headaches in mobile phone users is more often than in the control group. As a second result of the study, it is reported that the occurrence of headaches in mobile phone users who use the hands-free feature decreased by 20% [16].

One of the other study areas is related with the blood-brain barrier (BBB) and RF field. BBB is the name of the membrane that creates a barrier between brain tissues and blood circulation. The main task of BBB is to block the viruses from accessing the central nervous system and brain. Changes in the permeability or leakage of the BBB may cause diseases. In most of the studies about BBB, it is indicated that there is no relationship between RF fields and BBB [17, 18]. However, there can be found many studies in the literature that shows RF fields affect BBB proteins [19, 20].

As can be seen from the literature summary above, there is a very serious relationship between electromagnetic fields and the human body. There are numerous studies in the literature to investigate this relationship. In most of these studies, electromagnetic fields have been accepted as harmful. In other studies, it has been reported that electromagnetic fields can only be harmful in the long term. However, the result that emerged in almost all of these studies is that the intensity of the electromagnetic field and the distance exposed are very important. In this context, it is very important to determine the electromagnetic field intensity in a distance-dependent manner.

In this study, the power density of 120 base stations has been measured at 20, 40, and 60 meters distances from base stations at the frequency of 900 MHz. Even though, limit values are determined by international organizations such as IEEE, ICNIPR, and the FCC, the information technology institute published a report to customize the installation of base stations. Even if this report was created based on the ICNIRP values, a maximum of 10V / m has been determined as a limit value for each base station [21, 22]

While the measurements were being made, 120 different base stations were measured from 20-40-60 meters away at 120 different locations. However, when the measurements were made, it was noticed that some people's

living spaces were at intermediate distances, such as 25 or 35 meters. For this reason, in this study randomly determined intermediate distances (25, 30, 35, 45, 50, and 55 meters) have been calculated by using Lagrange interpolation.

As is known, base stations are established to expand the coverage area and meet the needs of the growing number of users. Antennas are placed on poles, towers, rooftops, and existing structures where there are no structures high enough to interrupt or prevent their broadcast. It is expected that each tower that is established in urban areas to cover an area of at least 20-30 kilometres [23, 24]. [25] contains information about the base stations that will broadcast on the carrier frequency of around 2GHz. Accordingly, micro and macro base station antenna heights are 10m and 25 m, respectively. Each channel of base stations can have 40–50 watts of output power and 20 dB of antenna gain to provide this coverage. At base stations, output power rises with the number of telephone conversations. The electric field is maximum at 30-250 m distances. Although the effects of the electromagnetic field are reduced depending on distance, no one can commit that the long-term effects of long-distance base stations are not as important as those of close-distance base stations. Since, there is no scientific evidence about the long-term effects of base stations at different distances. The strength of base stations is so important in each distance [26].

120 base stations are investigated in this study. All measurements have been carried out for three different distances from base stations. Since it is practically impossible to present all measurement results in this paper, some of the measurements are shown in Table 1. Base stations are numbered from 1 to 120, and the power density of each base station is measured at 20, 40, and 60 meters distances. All measurements are carried out with a directional antenna. A frequency-locked spectrum analyzer was used. The brand of the device is Spectran HF6080. All details about the device used during this study can be accessed from [27].

**Table 1.** Power Density of Some Measurements ( $\mu\text{W}/\text{m}^2$ ).

Base Station Number	Distance from Base Stations (meter)		
	20m	40m	60m
1	15.46 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	7.11	0.95
2	0.15 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	0.02	0.05
3	191.31 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	157.73	179.32
4	827.75 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	306.52	557.82
5	24.97 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	31.24	113.24
6	111.39 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	200.23	32.05
7	16.13 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	18.62	21.85
8	256.21 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	150.33	122.89
9	22.13 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	58.20	27.27
10	39.72 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	40.59	18.11

### 1.1. Lagrange Interpolation

Interpolation is one of the easiest approaches to solving problems where an approximating function is required and an unknown original function agrees perfectly with the interpolation function at the given measurement points [28]. Practical applications of interpolation consist of two phases. In the first phase, values are determined from a function or from measurements done for a finite set of independent variables. In the second step, some intermediate arguments are determined by using the values of the function or measurements [29]

Interpolation is a process of estimating an intermediate value of a (dependent) parameter that is a function of a second (independent,  $f(x_i)$ ) parameter when values of the dependent parameter correspond to several distinct values of the independent parameter [30]. The most commonly used interpolation methods are Lagrange interpolation (that is not mandatory the difference between values are equal), and Newton Interpolation (that is mandatory the difference between values is equal) methods. Lagrange interpolation which utilizes points obtained from  $n+1$ ; is based on obtaining the  $n$ -th order of the polynomial equation.  $n$ -th polynomial equation which is related to each defined as the following equations. In this study,  $y_i$  points show the distance from base stations and  $x_i$  points show the electromagnetic power density at points. In equation 1, general form of the 2nd degree Lagrange interpolation equation is presented.

$$f(x) = y = b_1(x - x_2)(x - x_3) + b_2(x - x_1)(x - x_3) + b_3(x - x_1)(x - x_2) \quad (1)$$

If the 2nd degree Lagrange interpolation equation given in equation 1 is arranged separately for the points  $x_1$ ,  $x_2$  and  $x_3$ , the equations 2, 3 and 4 are obtained.

$$f(x_1) = y_1 = b_1(x_1 - x_2)(x_1 - x_3) + b_2(x_1 - x_1)(x_1 - x_3) + b_3(x_1 - x_1)(x - x_2) \quad (2)$$

$$f(x_2) = y_2 = b_1(x_2 - x_2)(x_2 - x_3) + b_2(x_2 - x_1)(x_2 - x_3) + b_3(x_2 - x_1)(x_2 - x_2) \quad (3)$$

$$f(x_3) = y_3 = b_1(x_3 - x_2)(x_3 - x_3) + b_2(x_3 - x_1)(x_3 - x_3) + b_3(x_3 - x_1)(x_3 - x_2) \quad (4)$$

The coefficients,  $b_1$ ,  $b_2$  and  $b_3$  can be found by utilizing  $f(x_1)$ ,  $f(x_2)$  and  $f(x_3)$  which are in equations 2, 3 and 4, respectively. The coefficients obtained accordingly are presented below.

$$b_1 = \frac{y_1}{(x_1 - x_2)(x_1 - x_3)} \quad (5)$$

$$b_2 = \frac{y_2}{(x_2 - x_1)(x_2 - x_3)} \quad (6)$$

$$b_3 = \frac{y_3}{(x_3 - x_2)(x_3 - x_1)} \quad (7)$$

If the calculated  $b_1$ ,  $b_2$  and  $b_3$  values are replaced in equation 1, the 2nd degree Lagrange interpolation polynomial is obtained as follows.

$$f(x) = \frac{(x - x_2)(x - x_3)}{(x_1 - x_2)(x_1 - x_3)} y_1 + \frac{(x - x_1)(x - x_3)}{(x_2 - x_1)(x_2 - x_3)} y_2 + \frac{(x - x_1)(x - x_2)}{(x_3 - x_1)(x_3 - x_2)} y_3 \quad (8)$$

In equation 8, the actual measured values of 20, 40 and 60 are used, respectively, instead of the points  $x_1$ ,  $x_2$  and  $x_3$ . Afterwards, the electromagnetic power density value of the relevant base station is written. Instead of  $y_1$ ,  $y_2$  and  $y_3$ . Thus, the electromagnetic power density value for the distance to be determined is found. However, the compatibility between the interpolation value found as a result of the calculations and the actual measured value should be analyzed. Otherwise, it cannot be understood how reliable the interpolation result is. For this reason, error analysis was carried out to determine the error in the relevant distance.

### 1.2. Error Analysis

The interpolation models developed in this study were assessed according to three different statistical criteria. These are statistical parameters such as Root Mean Squared Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE) and Mean Absolute Percent Error (MAPE). The Root Mean Square Error (RMSE) is used to calculate the error rate between the measured values and the model predictions, and as the RMSE value approaches zero, it means that the predictive ability of the model is increasing. The RMSE is calculated as follows [31, 32].

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f(x) - f(x)_{approximation})^2}{n}} \quad (9)$$

Here,  $f(x)$  and  $f(x)$  represent measurement values and interpolation estimates, respectively.  $n$  represents the number of measurements.

To determine the absolute error between measurements and interpolation estimates, the Mean Absolute Error (MAE) is used. As the MAE value approaches zero, the predictive ability of the model increases. MAE can be calculated using the following equation [33].

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |f(x)_{approximation} - f(x)| \quad (10)$$

Another method used to determine the estimation success of the interpolation approach is the mean absolute percent error (MAPE), which is another expression of the mean absolute error (MAE). MAPE is a measure of accuracy in a fitted time series value in statistics. MAPE is found by the following equation.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|f(x)_{approximation} - f(x)|}{f(x)} \quad (11)$$

Table 2 was created by using the error functions expressed in Equations 9-10-11. The fact that the MAE, MAPE and RMSE values are quite small indicates that the interpolation method can be used to determine the electromagnetic power density.

Although Table 2 is clear enough, the author would like to present the correlation between measured values and Lagrange interpolation values on Figure 1. It can easily be noticed that, Lagrange values are in very good

**Table 2.** Lagrange Interpolation Success.

Distance From Base Stations	MAE	MAPE	RMSE
25 m	3.664	0.084	0.658
30 m	3.215	0.087	0.577
35 m	2.694	0.101	0.484
45 m	2.538	0.117	0.456
50 m	2.106	0.077	0.378
55m.	2.885	0.088	0.518

agreement with actual values.

In Figure 1, measured power densities from different distances and interpolation results can be seen at the same time. Figure 1-a shows measurement results from a distance of 25 meters as well as interpolation results from distances of 20, 40, and 60 meters. It can be observed in Figures 1-b, 1-c, 1-d, 1-e, and 1-f that measurement results which are carried out at 30, 35, 45, 50, and 55 meters, show a great agreement with the interpolation results. To express the relationship between measurement results and interpolation estimates, a correlation coefficient is used. For each distance, over 99 percent success is shown.

Lagrange interpolation is a powerful technique that is commonly used in various fields of engineering and science. In the context of electromagnetic field estimation, it is a successful method for determining the electromagnetic power density. Accurately estimating this parameter is crucial for ensuring the safety of individuals working in environments with high levels of electromagnetic radiation. However, estimating the electromagnetic power density can be a challenging task, especially in complex environments. From this point of view, the high accuracy results obtained in Figure 1 make this study more valuable.

Another advantage of using Lagrange interpolation for electromagnetic power density determination is its ability to handle non-uniformly spaced data points, which can be seen in Figure 1. As can be seen in Figure 1, estimates have been made for many different distances. These estimates can also be evaluated individually. In this case, successful results are also observed in the case of a non-uniform distribution. This is important because in real-world applications, the data points may not be uniformly distributed, and other interpolation methods may not be suitable, just like in this study.

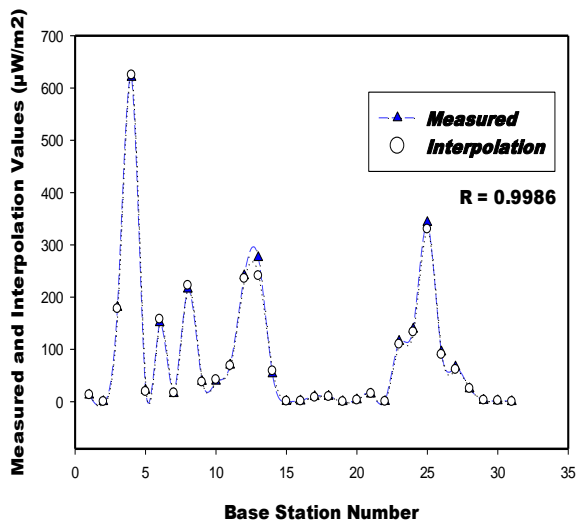
## 2. RESULT AND DISCUSSION

In this study, electromagnetic power density is determined by Lagrange interpolation technique. In literature, different types of interpolation are used to determine the power density [34-36] Since the measurement of power is usually done at discrete points in space. To obtain a continuous estimate of the power density at any point in the space, interpolation is necessary and useful. Also, interpolation is a mathematical technique that estimates the value of a function between two known values. In the context of electromagnetic field measurements, interpolation can be used to estimate the power density at a location between two measurement points, which has been tried for different locations before [36].

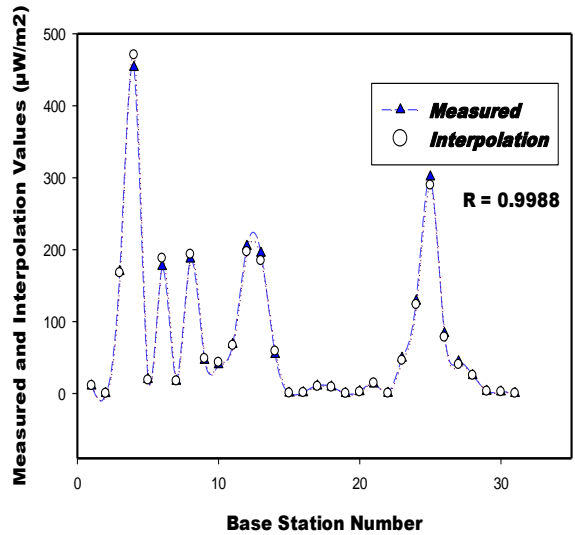
One of the main advantages of interpolation is its simplicity and ease of use. It is a straightforward technique that requires minimal computational resources, making it an attractive option for quick estimations in simpler environments. Additionally, interpolation can be used to estimate the power density at any point within a given range, regardless of whether or not data points are uniformly spaced. However, interpolation has some limitations that must be considered when comparing it with other methods. First, it assumes that the electromagnetic field varies smoothly between the known data points, which may not be the case in complex environments. In such cases, the accuracy of the interpolation may be reduced, leading to potential errors in the estimated power density. Additionally, interpolation may not be able to account for the effect of different materials or objects in the environment, which can have a significant impact on the electromagnetic field and the power density.

In contrast, other methods for estimating electromagnetic power density, such as numerical methods (e.g., FDTD, FEM) and analytical methods (e.g., MoM, UTD), can handle complex geometries and materials and are generally more accurate than interpolation. However, these methods can be computationally expensive and may require specialized expertise and software. Measurement-based methods, which involve measuring the electric and magnetic fields at various points in space and then using these measurements to estimate the power density, are also highly accurate but require specialized equipment and may not be practical in all situations. These methods are also very time-consuming and therefore generally difficult to implement in practice.

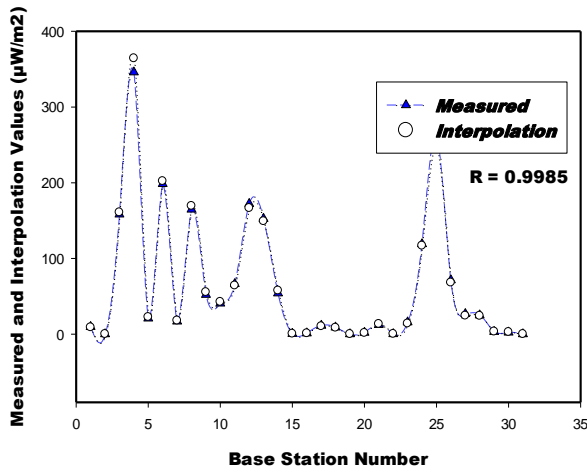
Electromagnetic power density is a key parameter for assessing potential health risks associated with exposure to electromagnetic fields [37]. It is important to have accurate estimates of power density in the areas where people live, work, and play to evaluate compliance with safety standards and to inform the public about the potential risks associated with electromagnetic fields. In this respect, this study has produced very useful results. As mentioned above, estimating the electromagnetic power density is an important aspect of understanding the potential health effects of electromagnetic radiation. For this purpose, there are several methods for estimating the electromagnetic power density, including measuring the surface power density of radio frequency or



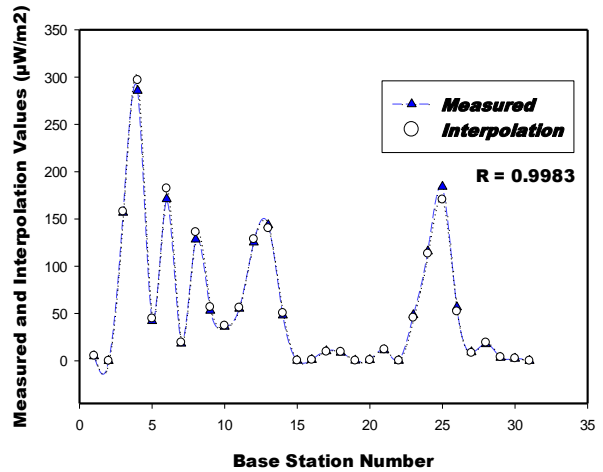
a) For 25m distance



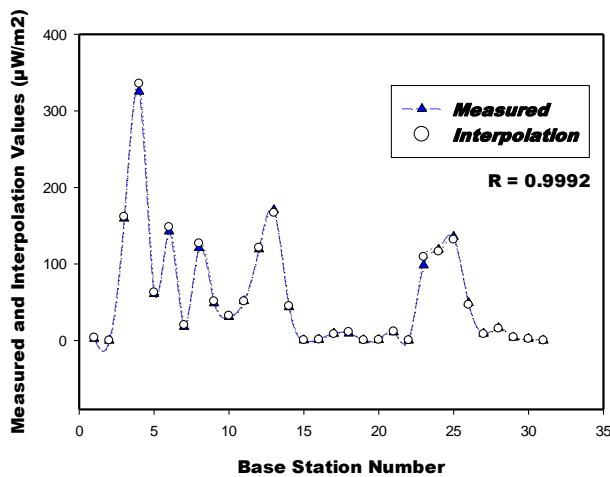
b) For 30m distance



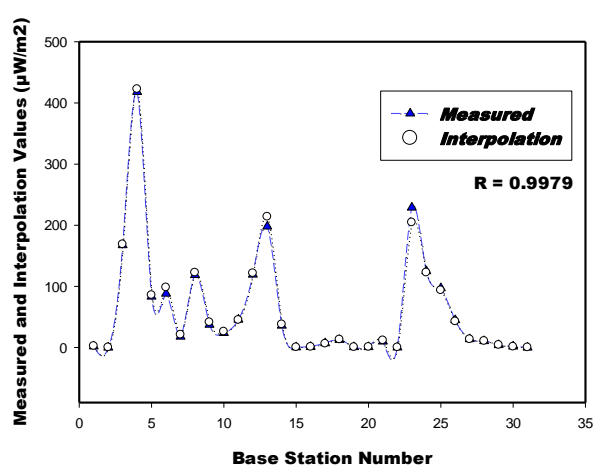
c) For 35m distance



d) For 45m distance



e) For 50m distance



f) For 55m distance

**Figure 1.** Correlation between measured values and Lagrange interpolation prediction.

microwave fields, using theoretical models of the mass-spring-damper system, calculating the electromagnetic energy density and flux, and predicting foul-weather electromagnetic interference from power lines [38,39]. In addition, the Lagrange interpolation method has been applied to estimate the strength of electromagnetic radiation for random intermediate distances. The results showed that the method achieved a correlation of above 0.99 for each distance. From this point of view, it can be said that these kinds of methods are important for determining the possible medical effects of electromagnetic radiation on human health, especially in crowded

cities where the number of base stations is increasing in parallel to the use of mobile communication systems and population growth. Lastly, it should be noted that base station establishment depends on many parameters. Therefore, important optimization processes are performed for the establishment of the base stations. Many parameters are considered, including the terrain of the area to be installed, the crowdedness, and the number of moving people [40]. Interpolation techniques can also be used to estimate power density in such places. This is particularly important in situations where measurements are sparse or unevenly distributed. This study, which was carried out for this purpose, contributed to the literature in this sense.

### 3. CONCLUSION

Within the scope of this study, electromagnetic field intensity measurements were made at 120 different base stations at different distances. However, measuring every base station from every distance is not suitable for working practice. The fact that the studies carried out for this purpose were completed over a very long time has been the main motivation for this study. To overcome the difficulties experienced, a method should be determined to estimate the electromagnetic power density on a mathematical basis. So, the power density ( $\mu\text{W}/\text{m}^2$ ) of 120 base stations was measured at 20, 40, and 60-meter distances from base stations, respectively. The intermediate distances (25m., 30 m, 35 m, 45 m, 50 m, and 55 m) were measured for randomly selected 35 different base stations, and the correlation between Lagrange interpolation results and measured values are investigated for 25 m, 30 m, 35 m, 45 m, 50 m, and 55m. Above 0.99 correlation values and very small errors (MAE, MAPE, and RMSE) have been achieved for each distance. For the first time in literature, an interpolation approach has been successfully applied to determine the power density at different distances. Based on the observations in the present study, the Lagrange interpolation method can be applied to any other province for different distances from the base stations.

#### Statement of Conflict of Interest:

Author has declared no conflict of interest.

#### Author's Contributions:

All processes were carried out by the Author.

### REFERENCES

- [1] N. Leitgeb, J. Schrötner, M. Böhm and W. "Does, Electromagnetic pollution cause illness?", *Medizinische Wochenschrift*, vol. 155, no. 9-10, pp. 237-241, 2005.
- [2] A. Balmori "Electromagnetic pollution from phone masts. Effects on wildlife", *Pathophysiology*, vol. 16, no. 2-3, pp. 191-199, 2009.
- [3] O. Uygunol, S.S. Durduran "Gsm Baz İstasyonlarında Elektromanyetik Kirlilik Haritalarının Coğrafi Bilgi Sistemi (Cbs) Yardımıyla Oluşturulması; Konya Örneği", *Tmmob Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 12. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, Ankara, 2009.
- [4] S. A. Meo, M. Almahmoud, Q. Alsultan, N. Alotaibi, I. Alnajashi, W. M. Hajjar "Mobile phone base station tower settings adjacent to school buildings: impact on students' cognitive health", *American journal of men's health*, vol. 13, no. 1, pp. 1-6, 2019.
- [5] J. Nadimikeri, M. P. Kumar, G. Sreenivasulu, T. L. Prasad, B. Lakshmana, K. Nagalaksmi, M. Madakka "Mobile phone and base stations Radiation and its effects on Human health and environment: A Review", *Sustainable Technology and Entrepreneurship*, vol. 2, no. 2, 2022.
- [6] E. van Rongen, E.W. Roubos, L.M. Aernsbergen, G. Brussaard, J. Havenaar, F.B. Kooops and A.P.M. Zwamborn "Mobile Phones and Children: Is Precaution Warranted", *Bioelectromagnetics*, vol. 25, no. 142-144, 2004.
- [7] O. Uygunol and S.S. Durduran "Elektromanyetik Kirlilik Haritalarının Coğrafi Bilgi Sistemi (Cbs) Yardımıyla Oluşturulması", *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası Ankara Şubesi I. CBS Günleri Sempozyumu 19-21 Kasım 2008*, Ankara.
- [8] B.S. Levy, D.H. Wegman, S.L. Baron, and R.K. Sokas "Occupational And Environmental Health: Recognizing And Preventing Disease And Injury", *Williams and Wilkins, Lippincott, USA*, 2006.
- [9] Ş.S Şeker and O. Çerezci "Çevremizdeki Radyasyon ve Korunma Yöntemleri", *Boğaziçi Üniversitesi Yayınları*, vol. 607, 1997.
- [10] G. Gu and G. Peng "The survey of GSM wireless communication system," *2010 International Conference on Computer and Information Application*, Tianjin, China, pp. 121-124, 2010
- [11] N.J Cherry "Evidence that electromagnetic fields from high voltage powerlines and in buildings, are hazardous to human health, especially to young children", *Lincoln University. Human Sciences Department*, 2001.
- [12] J. Czyz, K. Guan, Q. Zeng, T. Nikolova, A. Meister, F. Schönborn and A.M. Wobus "High Frequency Electromagnetic Fields (GSM Signals) Affect Gene Expression Levels in Tumor Suppressor p53 - Deficient Embryonic Stem Cells", *Bioelectromagnetics*, vol. 25, no. 4, pp. 296-307, 2004.
- [13] A. McKinlay "A European Research Initiative Dosimetry", *Radiotelephones and Human Health*, vol. 72/3-4, pp. 313-320, 1997.
- [14] C.M. Krause, I. Sillanmaki, M. Koivisto, and A. Haggqvist "Effects of Electromagnetic Field Emitted by Cellular Phones on the EEG During a Memory Task", *Neuroreport*, vol. 11, no. 4, pp. 761-764, 2000.

- [15] TNO Report “Effects of Global Communication System Radio-Frequency Fields on Well Being and Cognitive Functions of Human Subjects with and without Subjective Complaints”, TNO Physics and Electronics Laboratory, FEL-03-C148, 2003.
- [16] S.E. Chia, H.P. Chia, and J.S. Tan “Prevalence of Headache among Handheld Cellular Telephones Users in Singapore: A community Study”, *Environmental Health Perspectives*, vol. 24, pp. 1059-1062, 2003.
- [17] G. Tsurita, H. Nagawa, S. Ueno, S. Watanabe, and M. Taki “Biological and Morphological Effects on the Brain After Exposure of Rats to a 1439 MHz TDMA Field”, *Bioelectromagnetics*, vol. 21, pp. 364-371, 2000.
- [18] J.W. Finnie, P.C. Blumbergs, J. Manavis and T.D. Utteridge “Effect of Global System for Mobile Communication (GSM)-like Radiofrequency Fields on Vascular Permeability in Mouse Brain”, *Pathology*, vol. 33, no. 3, pp. 338-340, 2001.
- [19] L.G. Salford, A.E. Brun, J.L. Eberhardth, L. Malmgren, and B.R.R. Persson “Nerve Cell Damage in Mammalian Brain After Exposure to Microwave Exposure to Microwaves from GSM mobile Phones”, *Environmental Health Perspective*, vol. 111, pp. 881-883, 2003.
- [20] A. Schirmacher, S. Winters, S. Fischer, and J. Goeke “Electromagnetic Fields (1,8 GHz) Increase the Permeability to Sucrose of the Blood-Brain Barrier in Vitro”, *Bioelectromagnetics*, vol. 21, pp. 338-345, 2000.
- [21] ICNIRP, “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)”, *Health Phys*, vol. 74, pp. 494-522, 1998.
- [22] IEEE Standart for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz ”Questions and Answers about Biological Effects and Potential Hazards of Radiofrequency Electromagnetic Fields”, Federal Communications Commission Office of Engineering and Technology, OET Bulletin 56, Fourth Edition, August 1999.
- [23] MOA. “Base Stations and Masts. Mobile Operators Association”,
- [24] Mobilemastinfo, URL: <http://www.mobilemastinfo.com/base-stations-and-masts/> Son Erişim Tarihi: 29.05.2017
- [25] A. Bibi “Baz İstasyonu Ölçümlerinin Gerçek Zamanlı Ve Konum Tabanlı Olarak Kaydedilmesine Yönelik Bir Arayüz Geliştirilmesi” Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 72s, Ankara, 2018,
- [26] F. Richter, G. Fettweis "Cellular Mobile Network Densification Utilizing Micro Base Stations," 2010 IEEE International Conference on Communications, Cape Town, South Africa, 2010, pp. 1-6.
- [27] M.A. Baldauf, S. Knörzer, J.A. Pontes, and W. Wiesbeck “Safety Distances Underneath Vertically Polarized Base Station Antennas”, *Proceedings, 18th Int. Zurich Symposium on EMC, Munich 2007*.
- [28] Spectran HF6080 User Manual, [www.aaronia.com](http://www.aaronia.com), Erişim Tarihi 13/04/2023.
- [29] E. Waring “Problems Concerning Interpolation”, *Philos. Trans. R. Soc. London*, vol. 69, pp. 59–67, 1779.
- [30] L.M. Milne-Thomson “The Calculus of Finite Differences”, Macmillan and Co., London, 1951.
- [31] A. Kovacs and L. I. Kovacs “The Lagrange Interpolation Formula in Determining the Fluid’s Velocity Potential through Profile Grids, Research Institute for Symbolic Computation”, *Bulletins for Applied Mathematics*, pp. 26-29 2005.
- [32] K.P. Singh, A. Basant, A. Malik, and G. Jain “Artificial neural network modeling of the river water quality-A case study”, *Ecological Modelling*, vol. 220, no. 6, pp. 888-895, 2009.
- [33] B. Eren, and V. Eyüpoğlu “Yapar Sinir Ağları ile Ni(II) İyonu Geri Kazanım Veriminin Modellenmesi”, 6. International Advanced Technologies Symposium, pp. 186-190, 2011.
- [34] N.S. Kaveh, S.N. Ashrafzadeh, and F. Mohammadi “Development of an artificial neural network model for prediction of cell voltage and current efficiency in a chlor-alkali membrane cell”, *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 86, no. 5, pp. 461-472, 2008.
- [35] L. Horowitz “The effects of spline interpolation on power spectral density”, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 22, no. 1, pp. 22-27. 1974.
- [36] S. Moreau, G. Plantier, J. Valière, H. Bailliet, L. Simon “Estimation of power spectral density from laser Doppler data via linear interpolation and deconvolution”. *Experiments in Fluids*, vol. 50, pp. 179-188, 2011.
- [37] U. Sorgucu, I. Develi, S.S. Durduran ”The Use Of Different Interpolation Methods In Estimating Electromagnetic Power Density”, *Sigma*, vol. 29, pp. 148-155, 2011.
- [38] A. Peyman, M. Khalid, C. Calderon, D. Addison, T. Mee, M. Maslanyj, S. Mann “Assessment of exposure to electromagnetic fields from wireless computer networks (wi-fi) in schools; results of laboratory measurements”. *Health physics*, vol. 100, no. 6, pp. 594-612, 2011.
- [39] H. Shirai, R. Sato, K. Otoi “Electromagnetic wave propagation estimation by 3-D SBR method”. *International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications*, pp. 129–132, 2007.
- [40] Y.A. Dama, S. Abd-Alhameed, R.A. Salazar-Quinonez, F. “MIMO indoor propagation prediction using 3D shoot-and-bounce ray (SBR) tracing technique for 2.4 GHz and 5 GHz”, *Fifth European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, pp. 1655–1658, 2017.
- [41] I.H. Cavdar, O. Akcay “The optimization of cell sizes and base stations power level in cell planning”, *IEEE VTS 53rd Vehicular Technology Conference, Spring 2001. Proceedings* vol. 4, pp. 2344-2348i 2001.





## Ağ Sistemlerinin Güvenliği İçin Siber Saldırıların Ayrık Olaylı Sistem Tanımlama Tabanlı Modellenmesi ve Simülasyonu

### Discrete Event System Identification Based Modeling and Simulation of Cyber Attacks for the Security of Network Systems

<sup>1</sup>Şahin KARA , <sup>2</sup>Ahmet ZENGİN , <sup>3</sup>Selman HIZAL 

<sup>1</sup>Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, KSSMYO, Kaynarca/Sakarya, Türkiye

<sup>2</sup>Sakarya Üniversitesi, Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi, Serdivan /Sakarya,

<sup>3</sup>Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Serdivan /Sakarya, Türkiye

<sup>1</sup>sahinkara@subu.edu.tr, <sup>2</sup>azengin@sakarya.edu.tr, <sup>3</sup>selmanhizal@subu.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 20 March 2023

Accepted : 21 April 2023

##### Keywords:

Cyber Attack Experiments,  
Cyber Security, Simulation  
And Modeling, DEVS.

#### ABSTRACT

The rapid progress in information and network technologies has made these technologies indispensable tools both for individuals and in all areas of corporate functioning. This obligatory situation created by this development has brought risks and threats. Although many attack detection and prevention systems have been developed against cyber-attacks, vulnerability violations are increasing. In this study, it is aimed to develop a software-based tool to identify security vulnerabilities and detect cyber-attacks. In order to reduce test time and costs, the effective results of performing attack simulation experiments on virtual networks instead of real systems have been achieved with sample applications. As a case study, a cyber-attack simulation model and application based on the DEVS formalism has been developed. This tool provides a suitable infrastructure for modeling and simulation of more different cyber-attack scenarios in future studies.

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 20 Mart 2023

Kabul : 21 Nisan 2023

##### Anahtar Kelimeler:

Siber Saldırı Deneyleri,  
Siber Güvenlik, Simülasyon  
Ve Modelleme, DEVS.

#### ÖZET

Bilişim ve ağ teknolojilerindeki hızlı ilerleme, hem bireyler için hem de kurumsal işleyişin her alanında bu teknolojileri vazgeçilmez birer araç haline getirmiştir. Bu gelişme ile oluşan bu zorunlu durum, beraberinde risk ve tehditleri de getirmiştir. Siber saldırılara karşı, pek çok saldırı tespit ve engelleme sistemleri geliştirilmesine rağmen zafiyet ihlalleri de artmaktadır. Bu çalışma ile güvenlik zafiyetlerinin belirlenmesi ve siber saldırıların tespit edilmesi için yazılım tabanlı bir araç geliştirilmesi amaçlanmıştır. Test zamanını ve maliyetleri düşürmek için gerçek sistemler yerine sanal ağlarda saldırı simülasyon deneyleri yapmanın etkili sonuçlarına örnek uygulamalarla ulaşılmıştır. Bir vaka çalışması olarak, belirli saldırı senaryoları için DEVS formalizmine dayalı bir siber saldırı simülasyon modeli ve uygulaması açık kaynak kodlu olarak geliştirilmiştir. Bu araç, sonraki çalışmalarda daha farklı siber-saldırı senaryolarının modellenmesi ve simülasyonu için uygun bir altyapı sağlamaktadır.

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

ORCID ID: <sup>1</sup>0000-0001-8736-2730

<sup>2</sup>0000-0003-0384-4148

<sup>3</sup>0000-0001-6345-0066

## 1. GİRİŞ

Bilgisayar ağı sistemlerinin güvenliği gün geçtikçe daha kritik bir güvenlik problemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Günümüzde bütün teknolojik donanımlar ve onları çalıştıran yazılımlar ile cihazları birbirine bağlayan iletişim ağlarından oluşan siber ortamın hemen hemen her alanda kullanılması siber ortam güvenliğini önemli ve yüksek öncelikli bir konu durumuna getirmiştir. Güvenliğe verilen önem artmış olsa bile, sistemler bugün artık daha açık ve saldırıya maruz kalma ihtimalleri de daha yüksektir. Bireyler, kurumlar ve devletler, yüksek miktarda önemli verilerini siber ortamda bulundurmaktadır. Bu durum kötü niyetli siber saldırganları farklı amaçlarla harekete geçiren bir motivasyon kaynağı olmaktadır. Siber saldırıları gerçekleştirmek için kullanılan uygulamalar kolaylıkla elde edilebilmektedir. Bu saldırıların zararlarından korunmak için pek çok saldırı tespit sistemi geliştirilmiştir. Bu çalışmalar, bilişim sistemlerine yönelik saldırı ve güvenlik ihlallerini tam engellemek için yeterli olamamaktadır [1]. Hedef alınan siber ortamlara yönelik siber saldırı gerçekleştirmek isteyen tarafların hedeflerine ulaşmak için başvurabilecekleri pek çok siber saldırı yöntemi mevcuttur. Bilgisayar ağlarındaki tüm güvenlik açıklarını bulmak ve çeşitli güvenlik önlemlerini güncel tutmak şirket ağ yöneticileri için zorlu bir süreçtir. Bu durum, ağa saldırıyı planlayanlar için bir avantaja dönüşmektedir [2].

Genel güvenlik politikaları her organizasyon için yeterli koruma sağlayamadığı için ek güvenlik önlemlerine ihtiyaç vardır. Bilgi veya mali kayıplara tahammülü olmayan kurumlar için en küçük bir risk bile çok hayati olabilmektedir. Olası tüm istisnar yollarını minimuma çekmek için sürekli güvenliği ihlal edilmiş varlıkları açığa çıkaran kapsamlı senaryolar çalıştırılmalıdır. Bu amaçla siber saldırı simülasyonlarından (benzetim araçları) faydalanmak önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Gerçek sisteme erişmek kolay olmayan durumlarda ve gerçek bir sistemde deney yapmak tehlike arz ediyorsa bununla birlikte gerçek sistemlerde deney yapmak ekonomik olmuyorsa, simülasyon en genel geçer model olmaktadır. Siber saldırı simülasyonunun sonucu, organizasyonun nerede risk altında olduğunu görmek ve düzeltmek amacıyla harekete geçmek için saldırganın bakış açısından olası her saldırı yolu ve saldırı vektörü türü kontrol edilebilmektir.

Mevcut siber saldırı simülasyonlarının bir kısmı iyi tasarlanmadığı için bilgisayar ağı benzetiminde ağ ve ağ bileşenleri çok az ve sınırlı bilgi içermesinin yanı sıra saldırıya özgü uygun IDS uyarı çıktılarını üretmemektedir ve bazı saldırı adımları tamamen göz ardı edilmektedir. Bir kısım simülasyonlar saldırı projeksiyonunu daha büyük bir sistemin parçası olarak kullanmakta ve araştırma çalışmaları siber saldırılara tam olarak odaklanmamaktadır. Bazı siber saldırı modelleme sistemleri yalnızca yazılım korumasını test etmek için geliştirilmiştir, bağımsız sistem saldırılarını modellemede eksik kalmıştır. Literatür incelemesinde ilgili simülasyonlar tanıtılıp zayıf yönleri analiz edilmiştir.

Bu çalışmanın amacı, bilgisayar ağlarında veri güvenliğini sağlamak için siber saldırıların ve güvenlik tehditlerinin değerlendirilmesi ve yeni yöntemler geliştirilmesine olanak sağlayan bir simülasyon aracını geliştirmektir. Aynı zamanda siber saldırı verilerini elde ederek saldırı tespit sistemlerinin performans ve doğruluğunu arttırmak için bir simülasyon modelin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada siber güvenliğinin sağlanması için en önemli aşama olarak güvenlik zafiyetlerinin ve açıklıkların kötü niyetli siber saldırganlardan önce bulunup önlem alınması amacıyla modelleme ve simülasyon araçlarının kullanıldığı bir uygulama geliştirilmiştir. Bu simülasyon aracını geliştirmek için Java, DEVS modelleme yaklaşımı ve DEVS-Suite yazılımı kullanılmıştır. DEVS, yaygın olarak kullanılan kapsamlı bir simülasyon alanıdır. DEVS, fiziksel sistemlerin davranışını, bilgisayar ağlarında olduğu gibi durumları zamanla değişen, zaman içinde etkileşime giren varlık koleksiyonlarını temsil etmeye ve incelemeye izin vermektedir. DEVS-Suite kullanılarak geliştirilen siber saldırı uygulaması, DEVS-Suite çekirdeğinin üzerine inşa edilmiştir. DEVS formalizmi ve ileri yazılım mühendisliği teknikleri kullanılarak üst düzey performans, ölçeklenebilirlik, teorik sistem tasarımı ve kullanım kolaylığı sağlanmaktadır.

Saldırı simülasyonunun geliştirilmesi süreci belirli aşamalardan oluşmaktadır. Sistem tasarımı ve analizi için modelleme ve simülasyon hedeflerinin belirlenmesi kavramsal modelleme aşamasında gerçekleştirilmektedir. Temel ağ sentezi aşamasında geliştirilen varlıklar ve düğümler bağlanarak değişik topolojiler ve ağ konfigürasyonları oluşturulmuştur. Saldırı modelleme aşamasında saldırı modelleri kendi karakteristiklerine göre geliştirilerek deneysel çerçeveye eklenmiştir. Geliştirilen modellerin simülasyon deneyleri için DEVS deneysel çerçeve kavramı kullanılmıştır. Saldırı simülasyonu sürecinde saldırı simülasyon testleri yapıp, sonuçlar gözlemlenip analizleri yapılmış ve grafikler oluşturulmuştur.

Çalışmanın giriş bölümünün ardından ilgili literatür incelemesi; ikinci bölüm siber saldırı türleri ve sınıflandırma yöntemlerini içermektedir. Üçüncü bölüm siber saldırıların modellenmesini ve saldırı simülasyonunun geliştirilmesi sürecini içermektedir. Dördüncü bölüm simülasyon deneylerini, son bölümde ise sonuçlar, değerlendirme ve gelecek çalışmalar yer almaktadır.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Cohen'in siber saldırı simülatörü referans alınarak geliştirilen SECUSIM siber saldırı aracı, ilk siber saldırı simülasyonlarından biridir [3,4]. Bu simülasyonların her ikisi de saldırgan davranışı uygulamıştır. Ancak sonuçları önceden tanımlanmış saldırı adımlarına dayanmaktadır ve simülasyonlar belirli güvenlik açıklarını hesaba katmamakta ve uyarı çıktılarını üretmemektedir. Kotenko ve Man'kov tarafından geliştirilen "Attack Simulator" siber saldırı aracında bilgisayar ağı benzetiminde ağ ve ağ bileşenleri çok az ve sınırlı bilgi içermektedir [5]. Kim

ve arkadaşları ağ güvenliği simülasyonu için bir DEVS modelleme yöntemi önermiştir. Ancak ağ modeli düğüm sayısı az (100) tutulmuştur, saldırı modeli olarak sadece solucan simülasyon modeli geliştirilmiştir [6]. Dougherty ve Gonslaves [7], yazılım korumasının test edilmesine yardımcı olmak için uyarlanabilir bir siber saldırı sistemi geliştirilmiştir. Bu araştırma yoluyla yapılan modelleme, yalnızca yazılım korumasını test etmek için geliştirilmiştir, bağımsız sistem saldırılarını modellemede eksik kalmıştır. Cheung ve ark. [8], saldırı senaryolarının gerçek IDS uyarılarını gözleyerek modellendiği "İlişkili Saldırı Modelleme" adlı bir projeyi geliştirmiştir. Birçok IDS uyarısı yanlış pozitif olabilmesi ve bazı saldırı adımları tamamen atlanmış olma ihtimali modelleme sürecini olumsuz etkileyebilmektedir. Holdender ve ark. [9], grafik teori tekniklerinden yararlanarak, diğer bazı saldırı türlerinin yapılabilmesi için hangi saldırı eylemlerinin veya istismarın gerekli olduğunu belirleyen bir grafik tabanlı şablon geliştirmiştir. Garg ve ark. [10], saldırıları tespit etmek amacıyla güvenlik mekanizmalarının yeteneklerini ölçmek için bir çerçeve geliştirmiştir. IDS'ler ve diğer güvenlik sistemleri, özellikle uyarı verileri gerektiren bir simülasyon için gerekli olandan çok daha karmaşık bir şekilde modellenmiştir. DeLooze ve ark. [11], siber saldırıların ve güvenlik sistemlerinin kombinasyonunu modellemek için bir simülasyon metodolojisi geliştirmiştir. Bu sistem, bir eğitim aracı olarak kurulduğundan, saldırılar ve IDS uyarılarıyla ilişkili veri üretimi için yeterli derecede iyi tasarlanmamıştır. Kistner [12], ağ aygıtları için daha ayrıntılı nitelikler geliştirmek ve bir dizi parametre temelinde saldırıları otomatik olarak üretmek için bir yöntem sağlamak için bu çalışmayı daha da genişletmiştir. Cohen [3] tarafından geliştirilen simülatör ilk simülatörlerden biri olup sonraki bazı çalışmalar bunun üzerine kurulmuştur. Kotenko ve Man'kov [5], tasarım ve dağıtım aşamalarında bilgisayar ağlarının güvenlik açığının aktif olarak değerlendirilmesi için tasarlanan "Attack Simulator" yazılım aracıyla ilgili uygulama sorunlarını ve deneylerini anlatmaktadır. Önerilen model varlıklara dayalı saldırı yapılandırması ve saldırı senaryolarının durum makinelerinin tanımlamalarına dayanmaktadır. Bu çalışmada bilgisayar ağı benzetiminde ağ ve ağ bileşenleri çok az ve sınırlı bilgi içermektedir. Ulanov ve Kotenko [13] internette yazılımsal ajanlardan oluşan ekiplerin ve aralarındaki siber savaş senaryolarının modelleme ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Kuhl ve Sudit [14], siber güvenlik yöntemlerinin test edilmesi için uzun zaman gerektiren ve oldukça maliyetli olan fiziksel ağlara alternatif olarak sanal bir simülasyon modelleme yaklaşımı sunmaktadır. Bu simülatör, bir ağdaki paket akışının ayrıntılarını modelleyemez, ancak kötü niyetli siber saldırıları ve kötü amaçlı olmayan ağ etkinliğini temsil eden simüle edilmiş uyarılar üretmek için giriş tespit sisteminin davranışını simüle edebilir. Van Leeuwen ve ark. [15], ağ bilgi sistemleri ve iletişim ağlarının incelenmesi için bir siber güvenlik analiz ve deney ortamı geliştirmiştir. Bu simülasyon ortamı donanım destekli sanallaştırma gerektiren bir altyapı satın almayı ve kurmayı gerektirdiği için yüksek başlangıç maliyetlerine ve sınırlı büyüme esnekliğine sahiptir. Torres ve ark. [16], kablolu ve kablosuz tam ölçekli taktiksel sanal ağlarda siber saldırı ve güvenlik yöntemlerinin test ve analizini yapabilen, önceden yapılmış ilgili bazı çalışmalar üzerine kurulu yeni bir simülasyon ortamı modeli sunmaktadır. Geliştirilen model ile bir dizi siber saldırı yapılarak belli bir sanal ağ mimarisinin esneklik ve sağlamlığı test edilebilmektedir. Norman ve ark. [17], siber alanda ağ sistemlerinin test ve deneylerinin geliştirilmesi için bir simülasyon modeli tasarlamıştır. Bu modelde karmaşık ağlarda hızlı ve düşük maliyetli analiz, siber saldırı/faaliyet etkilerini değerlendirmek, silah sistemleri üzerindeki siber etkinin değerlendirilmesi ve çeşitli tehdit ve hedef sistemlerin temsil edildiği simülasyon ortamı sunulmaktadır. Kotenko ve Chechulin [18], saldırganların tespiti ve bunlara karşı gerçek zamanlı önlemlerin belirlenmesi için siber saldırı grafikleri kullanarak güvenlik değerlendirmesi ve etki analizi sağlayan bir sistem olan CAMIAC'ı sunmuşlardır. Ancak sistem, saldırı projeksiyonunu daha büyük bir sistemin parçası olarak kullanmaktadır ve araştırma çalışmaları siber saldırılara odaklanmamaktadır. Ekelhart ve ark. [19], güvenlik analizi neticesinde ortaya çıkan ve çeşitli düşmanlara karşı sistemin direncini deneysel olarak değerlendirmede nasıl kullanılabileceğini gösteren bir prototip uygulamayı tanımlamıştır. Bu çalışmada saldırı modelleri yeterince iyi modellenmemiştir, sosyal mühendislik, ağ oluşturma gibi ek davranış modelleri ve saldırı kalıpları eksik kalmıştır. Bergin [20], otonom araç sistemlerinde siber güvenliğinin modellenmesi ve simülasyon desteği için bir siber saldırı ve savunma simülasyon yapısına olan ihtiyacı belirtmiştir. Bu otonom araç sistemleri insansız hava ve kara araçlarını kapsamaktadır. Örnek bir siber saldırı simülatör sistemi ile bu tip modelleri destekleyen bir yapı tanıtılmıştır. Park ve ark.[4], siber saldırı simülasyon aracı SECUSIM, saldırı mekanizmalarını belirlemek, savunma mekanizmalarını doğrulamak ve sonuçlarını değerlendirmek için Cohen'in siber saldırı simülatörünü referans alarak yeni bir araç geliştirmiştir. Bu simülatörlerin her ikisine de saldırgan davranışları uygulanmıştır. Ancak sonuçları önceden tanımlanmış saldırı adımlarına dayanmaktadır ve simülatörler belirli güvenlik açıklarını hesaba katmamış ve uyarı çıktıları üretmemiştir.

Ağ simülasyon araçlarının karşılaştırılması üzerine yapılan çalışmalar, siber saldırı simülatörlerine nispeten daha fazladır. Bu konuda yapılan literatür araştırmasında farklı siber saldırı simülasyon araçlarının senaryo sayıları, modellenen düğüm sayıları ve ağ türleri genel olarak karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, DEVS tabanlı siber saldırı simülatörü (DEVS-CAS) tanıtılmaktadır. Ayrıca yapmış olduğumuz performans analizlerinde bir bilgisayardaki diğer simülatörler ile 1500 düğüme ulaşmak mümkünken, DEVS-CAS ile yaklaşık 3000 - 3500 düğüme çıkarılabilmektedir. DEVS-CAS'ın daha iyi bir ölçeklenebilirliğe sahip olduğu söylenebilir. Bu tez çalışmasında geliştirilen siber saldırı simülatörünün diğer simülatörlerden daha iyi yönleri DEVS-Suite simülasyon yazılımının sağladığı esnek özelliklere dayanmaktadır.

### 3. SİBER SALDIRI TÜRLERİ

Literatüre baktığımızda, siber saldırı türlerini açıklamak ve tanımlamak için farklı metodolojiler ve sınıflandırmalar sunmuştur ve siber güvenlik uzmanlarının gelecekteki siber saldırıları tespit etme çalışmalarını önem kazanarak devam etmektedir. Bu kapsamda bazı araştırmacılar, ağ ve bilgisayar saldırıları arasındaki ilişkiyi açıklamış ve araştırmalarında ek olarak siber saldırıları; saldırı türü, saldırının hedefi, zararlı güvenlik açıkları teknikleri ve faydalı yük saldırı türleri gibi dört boyuta ayırmıştır [21]. Burada faydalı yük, paketin, mesajın veya kodun verileri taşıyan kısmıdır. Bilgi güvenliğinde, faydalı yük terimi genellikle kötü amaçlı kodun yıkıcı işlemi gerçekleştiren kısmını ifade eder. Bazı araştırmacılar, saldırı türlerini, gelecek hedeflerini, sınıflandırmanın ölçümünü ve açıklamalarını anlatmak amacıyla siber saldırıların risk değerlendirmesine vurgu yaparak siber saldırıların bir sınıflandırmasını vermiş ve bilgisayar sistemlerindeki kusur ve zafiyetlerin kapsamlı bir analizini yapmışlardır [22]. Farklı araştırmacılar mobil bilgi işlem için güvenlik açıkları ve tehditlerin bir sınıflandırmasını, saldırının alt tipleri, işletim sistemi aygıtı üzerindeki etkisini, özel savunma tekniklerini ve verilen hasarları tanımlayan birçok farklı saldırı türünü açıklamıştır [23-26].

**Tablo 1.** Siber saldırı türleri.

Saldırı türü
Bilgi toplama ve keşif saldırısı
Virüs saldırıları
Truva atı ve arka kapı saldırıları
Solucan saldırıları
Port/bilgi tarama saldırısı
Sniffer (koklama) saldırıları
Numaralandırma saldırıları
Bilgi sistemi saldırıları
Tampon (arabellek) taşması saldırıları
Web sunucusu güvenlik açıkları saldırıları
İzinsiz giriş tespiti, ids, güvenlik duvarları ve honeypot saldırıları, arabellek taşması saldırıları
Sosyal mühendislik saldırıları
Hizmet reddi saldırıları
Oturum çalma saldırıları
Web tabanlı uygulama saldırıları
Kablosuz ağ saldırıları

Virüsler, kötü amaçlı yazılımlar, tuş kaydediciler (keylogger), arka planda çalışan gizli programlar (rootkit), casus yazılımlar, solucanlar, truva atları, hizmet reddi (DoS), dağıtılmış hizmet reddi (DDoS), ağ açıkları, uygulama saldırıları, kablosuz saldırılar, sosyal mühendislik, arabellek taşması ve ağ dinleme (sniffing) dahil olmak üzere farklı siber saldırı türlerini ayrıntılı olarak sunan ve öneren daha önceki çalışmalar da vardır [27-38]. Tablo 2.'de saldırı türleri gösterilmektedir.

### 4. SİBER SALDIRI YÖNTEMLERİNİN MODELLENMESİ

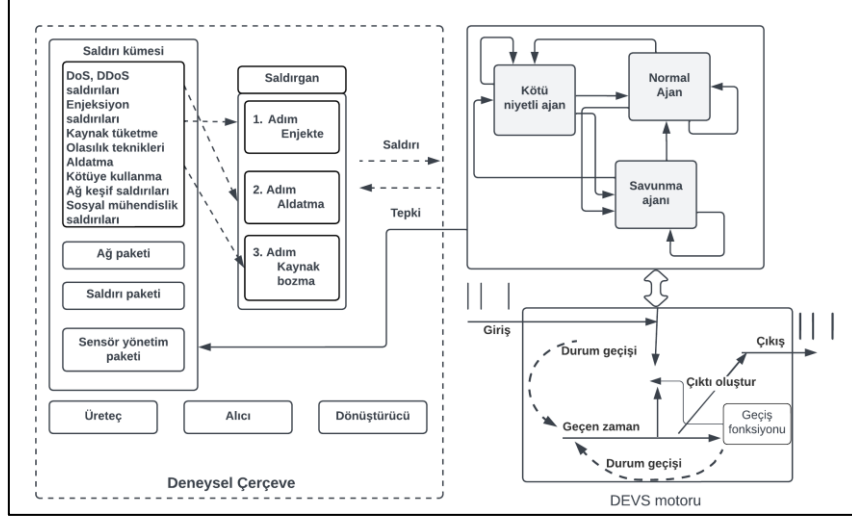
Saldırı simülasyonunun geliştirilmesi süreci belirli aşamalardan oluşmaktadır. Sistem tasarımı ve analizi için modelleme ve simülasyon hedeflerinin belirlenmesi kavramsal modelleme aşamasında gerçekleştirilmektedir. Temel ağ sentezi aşamasında geliştirilen varlıklar ve düğümler bağlanarak değişik topolojiler ve ağ konfigürasyonları oluşturulmuştur. Saldırı modelleme aşamasında saldırı modelleri kendi karakteristiklerine göre geliştirilerek deneysel çerçeveye eklenmiştir. Geliştirilen modellerin simülasyon deneyleri için DEVS deneysel çerçeve kavramı kullanılmıştır. Saldırı simülasyonu sürecinde saldırı simülasyon testleri yapıp, sonuçlar gözlemlenip analizleri yapılmış ve grafikler oluşturulmuştur. Bu çalışmada, DEVS-Suite altında topolojik olarak yapılandırılmış ve tasarlanmış sanal büyük ölçekli ağ sistemine karşı siber saldırı gerçekleştirmek için yaygın olarak kullanılan siber saldırı türleri modellenmiştir. Geliştirilen saldırı simülatörü, birçok saldırı türünü simüle edebilecek bir altyapı sağlayacak şekilde yapılandırılmıştır. Daha fazla saldırı simülasyonu, gelecekteki tehditlere karşı daha etkili önlem alınmasına neden olacaktır ve atakları daha kısa sürede tespit etme olasılığı ortaya çıkmaktadır. Bu saldırılara ait yapılandırma girişi, simülatör açıldığında yapılandırma formları kullanılarak yüklenmektedir.

Geliştirilen saldırı simülasyon modelinin uygulama aşamaları Şekil 1'de gösterilmiştir. Saldırı modellerinin çalıştırılacağı bir ağ modeli oluşturulmuştur. Gerekli ağ yapısı için bir ağ topolojisi üretici kullanılmıştır. Bu kapsamda, Şekil 2.'de kavramsal modelde görüldüğü gibi DEVS tabanlı dağıtık büyük ölçekli ağ simülasyon modeline saldırı modelleri entegre edilmiştir.

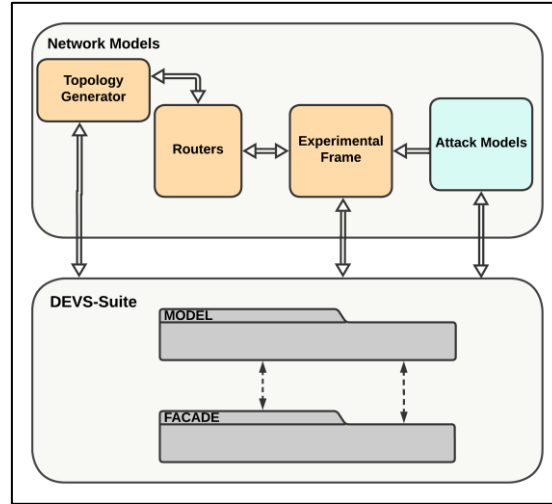
#### 4.1. DoS Saldırıları

Bir DoS saldırısının temel amacı, ağ bağlantılı bir hizmeti aşırı yükleyerek kullanılamaz hale getirmektir. Servis sağlayıcıya gönderilen bu kadar çok sayıda kötü niyetli istek, sunucuyu bir noktadan sonra yanıt veremez

duruma getirir [39]. DoS saldırılarının hedefi genellikle finans kurumları olduğu için hizmet kesintisi, ilgili ağ sistemine zarar vermenin yanı sıra önemli mali kayıplara da neden olabilmektedir [40]. Günümüzde DoS saldırılarını önlemek için pek çok yazılım ve donanım çözümleri geliştirmesine rağmen güvenlik zafiyetleri bulunan cihaz veya web siteleri DoS saldırılarından etkilenmektedirler [41]. Bunun sebeplerinin başında güncellenmemiş ağ cihazları, tecrübesiz güvenlik veya IT çalışanları ve yanlış güvenlik politikaları olarak görülebilir.



Şekil 1. Siber saldırı modelleme aşamaları ve bileşenleri.



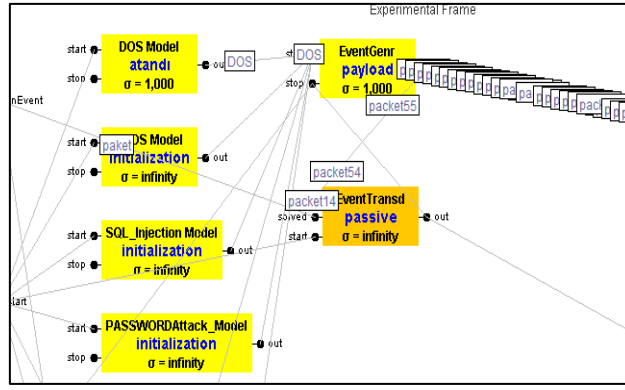
Şekil 2. Kavramsal modeller.

DoS saldırısı ayarlarının yapıldığı formda kurban bilgisayarın ve saldırıyı gerçekleştirecek bilgisayarın IP numaraları ile saldırı kodu ve her adımda gönderilecek paket sayısı bilgisi ayarlanmaktadır. Bu verilerle simüle edilen DoS saldırı modeli tetiklenmiş olur. Deneysel çerçevedeki olay üretici atomik modelinde olaylar otomatik olarak veya giriş bağlantı noktalarına manuel olarak bir giriş olayı oluşturulabilir. Bir girdi olayı, bir bağlantı noktası adını (port adı), veri değerini (paket) ve geçen süreyi içerir. Geçen zaman, ilişkili olayın bir zaman damgasıdır ve belirli bir olayı belirli bir sonlu, gelecek zaman örneğinde planlamak ve enjekte etmek için kullanılır. Geçen zaman, simülatör saati ile ilişkili zaman birimleri cinsinden sağlanır.

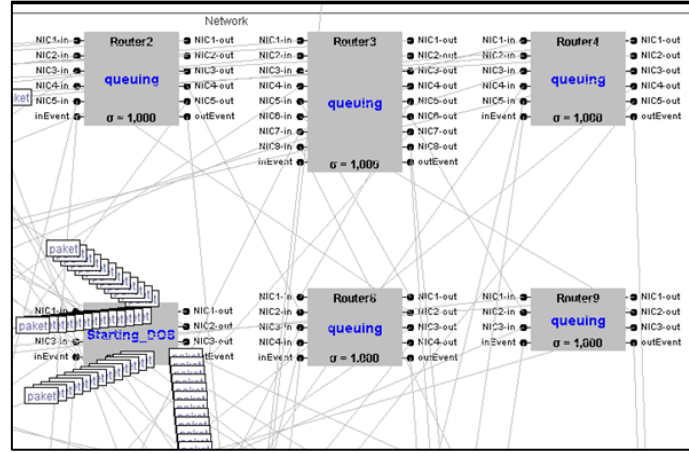
Bütün saldırı modelleri gibi DoS saldırı modelinin çıkışları da Şekil 3.'teki deneyisel çerçeve bağlantı görünümü gösterildiği gibi olay üretici (event generator) atomik modelinin giriş bağlantı noktasına bağlanarak giriş olayı otomatik oluşturulmuştur. Her adımda saldırgan olan cihazın çıkış portlarından hedefi kurban bilgisayar olan ve sayısı saldırı başlangıcında ayarlanan paketler gönderilir.

Geliştirilen uygulamaların test edilmesi için Kanada Siber Güvenlik Enstitüsü (CIC) tarafından paylaşılan CSE-CIC-IDS2018 veri seti kullanılmıştır. Saldırı paketleri oluşturulurken paketlere eklenen saldırı kodları aracılığıyla saldırgan bilgisayarın durumu Şekil 4.'te görüldüğü gibi Starting\_DOS olarak değişmekte böylece saldırgan cihaz simülasyon ortamında gözlemlenebilmektedir.

DoS saldırısını başlatan düğümde oluşturulan ve çıkış portlarından gönderilen paketler Şekil 4.'te görüldüğü üzere yoğun bir paket çıkışı şeklinde görülebilmektedir. İlk DoS saldırı uyarısı yapıldığı zaman cihaz tamamen



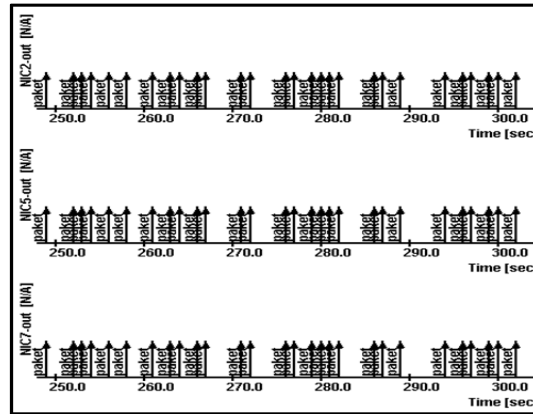
Şekil 3. Deneysel çerçeve bağlantı görünümü.



Şekil 4. Saldırgan bilgisayardan hedefe yönelik saldırı görüntüsü.

servis dışı kaldığı anlamına gelmez, saldırı devam ettiği süre içerisinde hedefe ulaşan paket sayısına bağlı olarak bu uyarı belirli aralıklarla tekrar etmektedir.

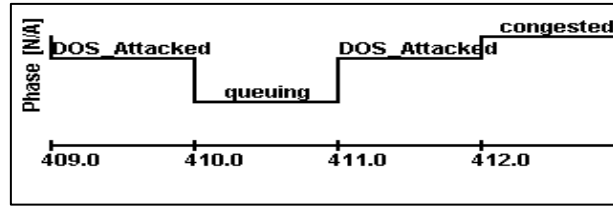
Şekil 5.'te kayıt izleme penceresinden de saldırıyı başlatan cihazın çıkış portlarında görülen paket yoğunluğu zamana bağlı bir grafik ile izlenebilmektedir. Saldırı devam ettirildikten belli bir süre sonra saldırı kesilmezse tamamen tıkanma gerçekleşecek ve Şekil 6.'da grafikten anlaşıldığı üzere kırmızı seviye olan "congested" durumuna geçilecektir ve servis engellenmiş olacaktır.



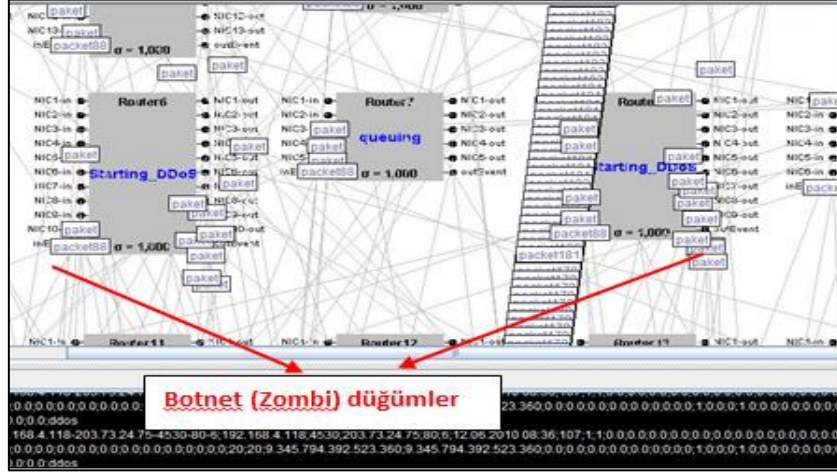
Şekil 5. Çıkış portları izleme penceresi.

## 4.2. DDoS Saldırısı

DDoS saldırısı, en az bir hedefe karşı bir DoS saldırısı başlatmak amacıyla birçok bilgisayarın kullanıldığı koordineli bir DoS saldırısıdır. Saldırgan, birden fazla bilgisayarın farkında olmadan kaynaklarını kullanarak saldırı başlatır. İstemci/sunucu teknolojisi kullanılırsa artırabilir. Bir DDoS saldırısı, saldırıyı başlatan gerçek saldırı, zombi bilgisayarları kontrol edebilen güvenliği istismar edilmiş ana bilgisayarlar, zombi bilgisayarlar ve hedef bilgisayar olmak üzere dört kısımdan oluşmaktadır.

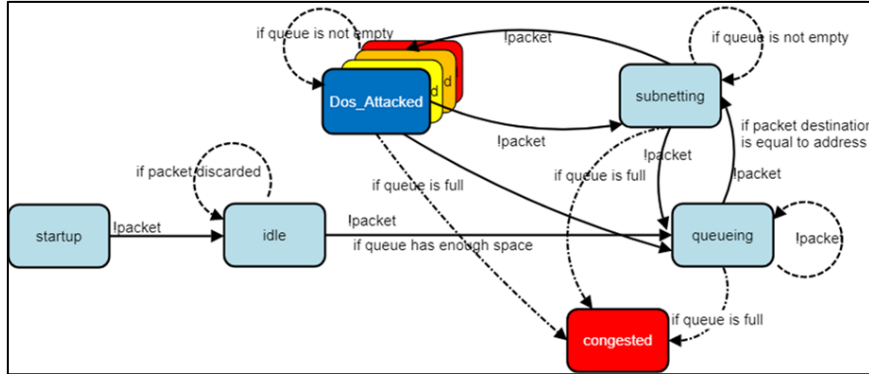


Şekil 6. DoS saldırısı durum geçiş grafiği.



Şekil 7. DDoS saldırı aşamasındaki Botnetler.

Saldırı paketleri oluşturulurken pakete eklenen saldırı kodları aracılığıyla saldırgan bilgisayarların durumu Şekil 7.'de görüldüğü gibi "Starting\_DDoS" olarak değişmekte ve gözlemlenebilmektedir.

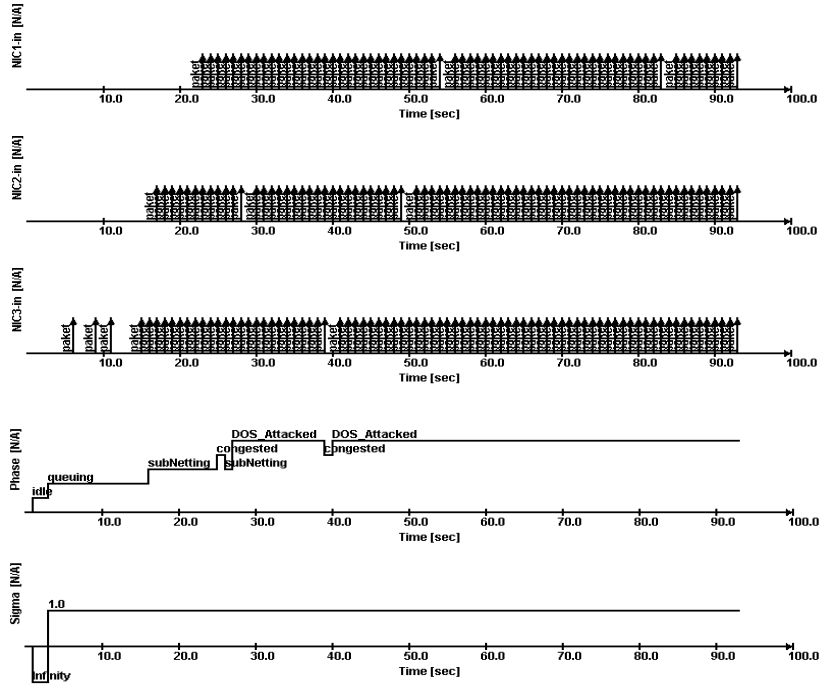


Şekil 8. Hizmet reddi saldırısında hedef düğüm durumları, durum geçişleri.

Bu çalışmada simüle edilen DDoS saldırı modeli başlangıçta belirli parametre verileriyle yapılandırılır. Bu veriler deneysel çerçevedeki jeneratör atomik modelinin giriş portlarına otomatik olarak bir giriş olayı oluşturmaktadır. Bir girdi olayı, bir bağlantı noktası adını (port adı), veri değerini (paket) ve geçen süreyi içerir. DEVS-Suite siber saldırı uygulaması (DEVS-CAS), DEVS-Suite çekirdeğinin üzerine inşa edilmiştir. Düğümler tarafından işlenen olaylar, Şekil 7.'de gösterildiği gibi durum diyagramları şeklinde tanımlanabilir. Sistemdeki olaylar, seçilen saldırı tipine göre seçilir. Saldırı mantığını anlamak için yeterli sayıda vaka kullanılır. Şekil 8.'de DoS ve DDoS saldırılarına ait saldırı altındaki düğümün durum geçişlerini göstermektedir.

Simülasyondaki saldırgan ve kurban düğümlerin durumlarını ve çıktılarının değişimini görmek ve değerlendirmek için uygulama penceresi kontrol bölümündeki panel yardımıyla saldırı sürdürülür. Her adımda saldırgan olan cihazın çıkış portlarından, hedefi kurban bilgisayar olan ve sayısı saldırı başlangıcında ayarlanan paketler gönderilir. Saldırı emri alan botnetler hedefe yönelik yoğun bir paket trafiği başlatmaktadır. Her adımda üretilecek/gönderilecek paket sayısı saldırı başlamadan önce parametre ayarlarının yapıldığı formda belirtilmektedir. Hedef düğüm yoğun paket akışına hedef oluşunu, düğüme gelen paket sayısı belli bir sayıyı geçtiğinde bunu "DoS\_Attacked" durumuna geçerek göstermektedir. Hedef makinenin tampon alanı kısa sürede dolacaktır. Saldırı devam ettiği müddetçe tıkanıklığı sürecektir ve bu cihaz servis dışı kalmaktadır, böylece DDoS saldırısı amacına ulaşmış olacaktır.

Ağ trafiği normal akışını sürdürürken saldırı başladıktan yaklaşık 20 saniye sonra hedef bilgisayarın giriş portlarında sıra dışı bir paket yoğunluğu olduğu görülmektedir. Hedef düğüm, giriş portlarındaki yoğun paket



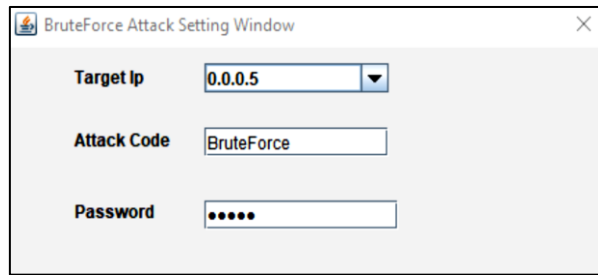
Şekil 9. DDoS saldırısına ait hedef düğümün giriş portlarının durumu ve durum değişim grafiği.

akışına hedef oluşunu, düğüme gelen paket sayısı belli bir sayıyı geçtiğinde “DoS Attacked” durumuna geçtiği Şekil 9.’daki grafikte görülmektedir. Hedef makinanın tampon alanı kısa sürede dolmakta ve tıkanma durumuna (congested) geçtiği görülmektedir. Saldırı devam ettiği bu cihaz servis dışı kalmaktadır ve bu DDoS saldırısı amacına ulaşmış olduğunu göstermektedir.

### 4.3. Kaba Kuvvet Saldırısı

Kaba kuvvet saldırısında saldırganlar, kimlik bilgilerini kırmaya çalışırken, bir şifreyi tahmin etmek için olası her sayı, harf ve karakter kombinasyonunu deneyen bir uygulama veya komut dosyası başlatılır. Bazı durumlarda, başarı şansını artırmak için yaygın olarak kullanılan kimlik bilgilerinin veya sızdırılmış kimlik bilgilerinin listeleri kullanılabilir.

BruteForce yapılandırma penceresinde hedef bilgisayarın IP numarası ve saldırı kodu ile birlikte hedef bilgisayarın oturum açma şifresi Şekil 10.’daki pencereden girilebilmektedir. Şifreyi saldırı simülasyonunda yapılandırma penceresinden belirlemek sadece sistemin doğru sonuç ürettiğini doğrulamak maksadıyladır.

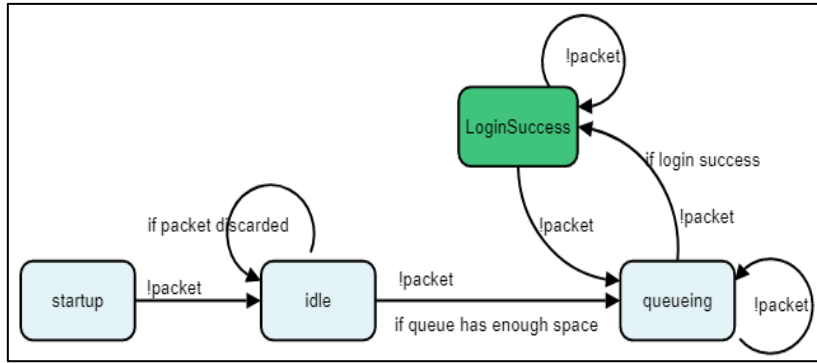


Şekil 10. BruteForce saldırısı yapılandırma penceresi.

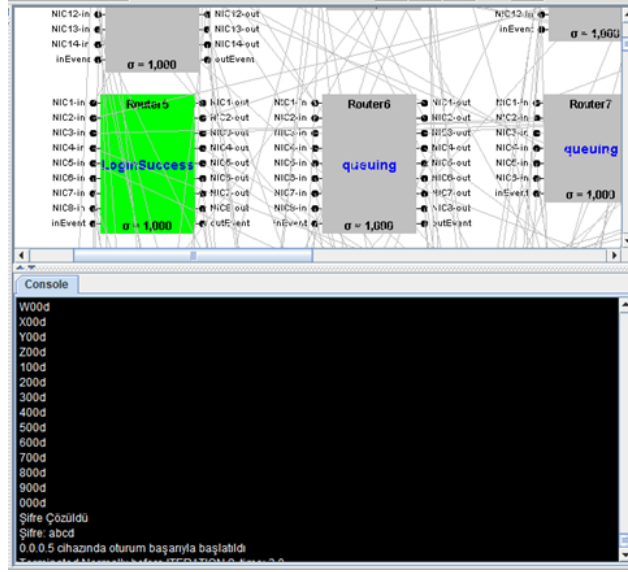
Bu çalışmada kaba kuvvet saldırısını simülasyonunda şifre ihtimallerini denemek için ilgili java sınıfında İngiliz alfabesi büyük ve küçük harfler (a-z, A-Z) ile 0-9 arasındaki sayılar kullanılmıştır. Uzun ve karmaşık şifrelerin bulunması uzun sürmektedir. Özel karakterlerin bulunmadığı bu karakter setinde bile 5 haneli bir şifre için 50 milyondan fazla kombinasyon denemek gerekmektedir. Hedef düğümün durum geçişleri Şekil 11.’de gösterilmiştir.

Hedef düğümde BruteForce nesnesi oluşturulup şifre çözüldükten sonra cihazın durum bilgisi Şekil 12.’deki gibi “LoginSuccess” olarak değişmektedir. Bu da saldırının başarıya ulaştığını gösterecektir. Yapılandırma girişinde seçilecek uzun ve karmaşık bir şifre bu süreyi oldukça uzatacaktır. Sonucu hızlı test edebilmek açısından kısa şifreler kullanmak bekleme süresini azaltacaktır. Hedef düğümün durum değişim grafiği Şekil 13.’te gösterilmiştir.

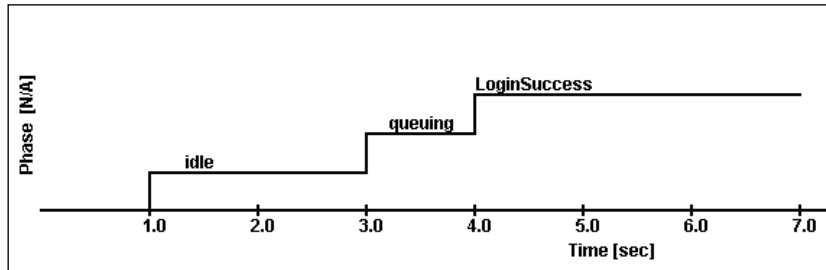




Şekil 11. Brute Force saldırısında hedef düğüm durumları, durum geçişleri.



Şekil 12. Brute Force saldırısı başarılı olma durumu.

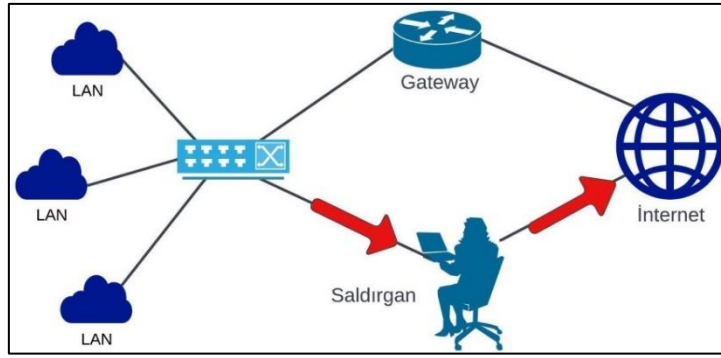


Şekil 13. Brute Force saldırısında hedef düğümüne ait durum değişim grafiği.

#### 4.4. Paket Koklama Saldırısı

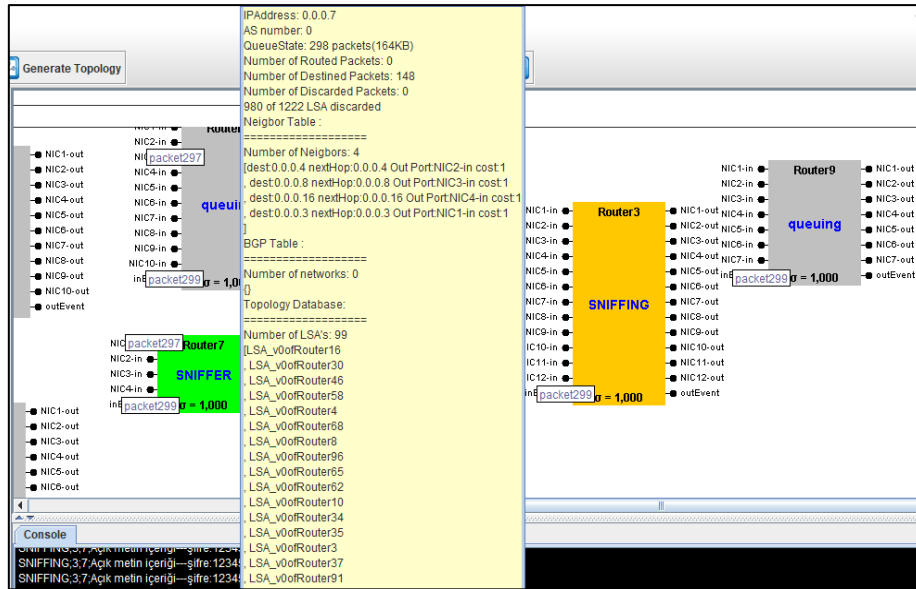
Bilgi güvenliği perspektifinden bakıldığında, paket koklama (sniffing), trafiği yakalanabileceği, analiz edileceği ve izlenebileceği bir hedefe yönlendirmek anlamına gelmektedir.

Ağ trafiğinin dinlenmesinde temel mantık Şekil 14.'te gösterildiği gibi ağ geçidi cihazına gelen her paket kabul edildiği için iki bilgisayar arasındaki tüm verilerin yakalanarak saklanması olarak tanımlanabilir. Düz metin olarak bilgi içeren herhangi bir ağ paketi, saldırganlar tarafından ele geçirilebilir ve okunabilir. Bu bilgiler, kullanıcı adları, şifreler, gizli kodlar, bankacılık detayları veya saldırgan için değerli olan herhangi bir bilgi olabilir. Bilgisayarlar arasındaki bağlantıların şifreli olması bu saldırıya karşı alınabilecek en önemli önlemdir. Şifreli paketler yakalanabilse bile içeriği anlaşılacaktır. Şifreleme algoritmasının da saldırılara karşı dayanıklı ve uygun performans sağlayan yapıda olmalıdır. Genel olarak pasif ve aktif olarak nitelenen iki koklama türü vardır. Koklama yapan cihazın ağ kartının "promiscuous" moda çalışması sağlanmalıdır. Böylece portlarına gelen her paketi kabul edebilecektir. Saldırgan düğüm tüm paketleri yani farklı IP adreslerine sahip paketleri de kabul edecek şekilde yapılandırılmaktadır. Şekil 15.'deki örnekte test amacıyla sadece belirli bir hedef düğüm dinlenmiştir.



Şekil 14. Ağ trafiğinin dinlenmesi.

Simülasyonda kablolu saldırı modelini çalıştırdığımızda bir süre sonra kablolu yapılan düğümün durumu “SNIFFING” olarak değişmektedir, saldırgan konumundaki paket koklayıcı düğümün durumu “SNIFFER” olarak izlenebilmektedir ve fare işaretçisini düğümün üzerine getirdiğimizde anlık istatistik listesi görülmektedir. Bu listede bu düğümüne o ana kadar gelen paket sayısı görülmektedir. Test amacıyla hedef düğümüne gönderilen paketlerin içerisinde şifrelenmemiş açık metin içeriğine örnek olacak bir metin yerleştirilmiştir. Dinlenen düğümde elde edilen paketlerin içeriği okunarak konsol penceresinde yazdırılmıştır ve konsolda pakette bulunan saklı metin görülebilmektedir. Paket koklayıcılar ancak açık metinleri okuyabilirler, şifrelenmiş mesajlar yakalansa bile içeriği okunamaz kabul edilmektedir.



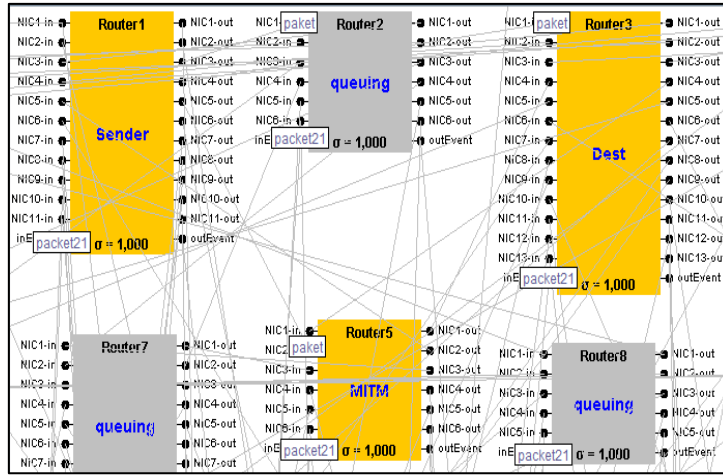
Şekil 15. Paket koklayıcı cihazın durumu ve paket istatistiği.

#### 4.5. Ortadaki Adam Saldırısı

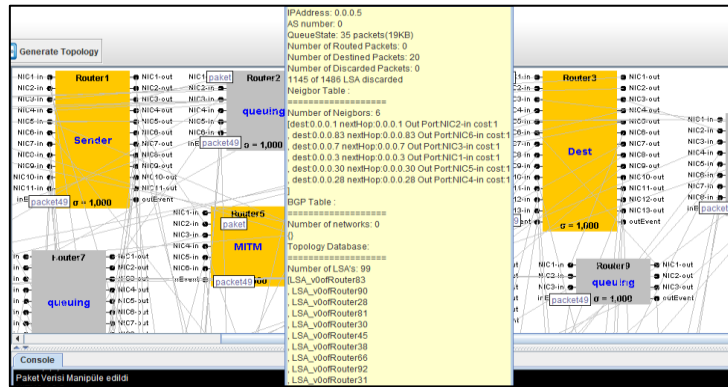
Ortadaki adam (MITM) saldırısında, saldırgan iki hedef arasındaki iletişimi gizlice dinler ve ardından birbirleriyle doğrudan iletişim kurduklarına inanan iki taraf arasındaki mesajları gizlice aktarır veya değiştirir. Ortadaki adam saldırılarının bir örneği, saldırganın kurbanlarla bağımsız ilişkiler kurduğu ve kurbanların birbirleriyle özel bir ilişki üzerinden doğrudan konuştuklarına güvenmelerini sağlamak için aralarında mesajlar aktardığı dinamik gizli dinlemedir. Tüm iletişim saldırgan tarafından kontrol edilir. Saldırgan, iki taraf arasında geçen her önemli mesajı engelleme ve yenilerini enjekte etme kapasitesine sahip olmalıdır.

Araya girilerek dinlenecek kurban seçilen cihazlar ile saldırgan düğümün IP numarası saldırı yapılandırma arayüzünde tanımlanmaktadır. Saldırı kodları her saldırı için saldırı imzası niteliğindedir, atomik düğümlerde saldırılara ait durum geçişleri bu saldırı kodları kullanılarak yapılmaktadır. Simülasyon başladığında iletişimde olan kurban düğümlerden olan mesaj gönderen kaynak düğümün durumu “Sender”, mesajı alan hedefin durumu “Dest” ve araya girip paketleri üzerinden geçiren saldırgan düğümün durumu “MITM” olarak Şekil 16.’da gösterilmektedir.

Kurban olarak seçilen cihazlar arasındaki bütün paket trafiği araya girip paketleri almak suretiyle dinlenmektedir. Bu duruma ait istatistikler ve elde edilen paketlere ait port izleme ekranı görüntüsü Şekil 19.’da görülmektedir. Saldırgan durumundaki düğümün üzerine fare işaretçisi odaklandığı zaman görünen yardımcı ileti penceresinden süzülen paket miktarı ve kuyruksuz bekleyen paketler Şekil 17.’de görülmektedir.

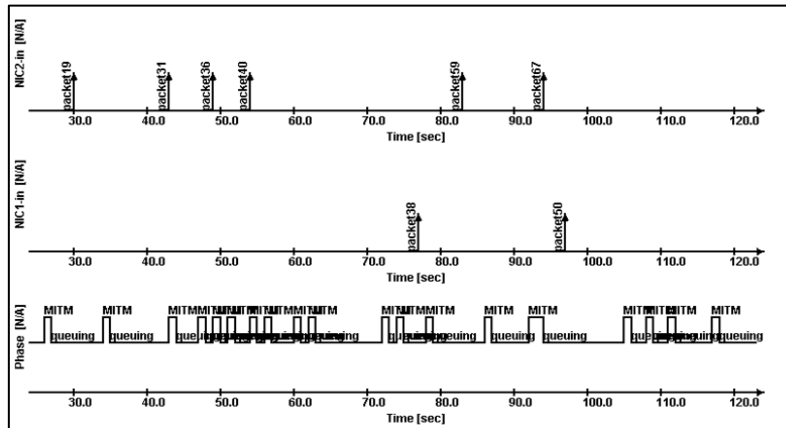


Şekil 16. Hedef, kaynak ve saldırgan düğümlerin durumu.



Şekil 17. Araya girip dinleme yapan düğümün durumu ve verileri.

Saldırgan düğüm yakaladığı paketleri istediği gibi manipüle ederek alıcı düğüme iletebilmektedir. Bu testi doğrulamak için pakete “Paket verisi manipüle edildi” datası eklenerek konsol penceresinde paket içeriğindeki mesaj gösterilmiştir. Ortadaki adam saldırısına ait paket ve durum değişim grafikleri Şekil 18.’de gösterilmiştir.

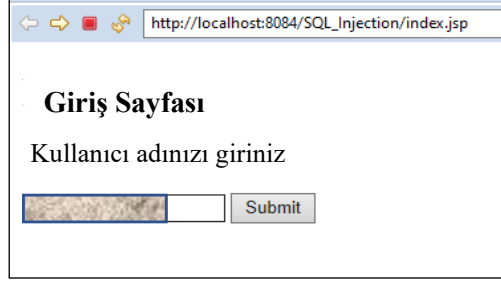


Şekil 18. Ortadaki adam saldırısına ait paket ve durum değişim grafikleri.

#### 4.6. SQL Enjeksiyonu (SQL Injection)

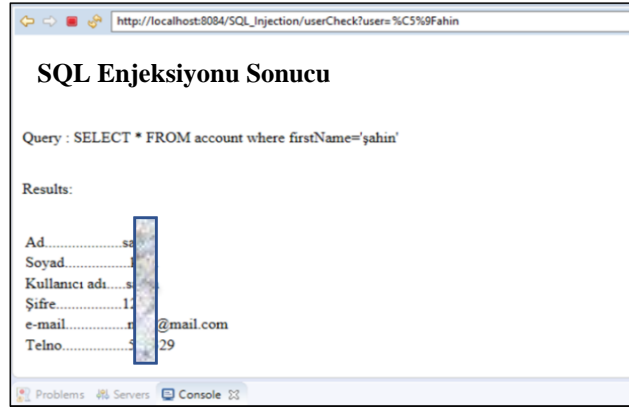
SQL, bir veri tabanına bağlanmak ve iletişim kurmak için kullanılır. İlişkisel veri tabanı yönetim sistemleri için standart dildir. SQL sorguları, veri girişi, güncellemeler ve kayıt silme gibi komutları yürütmek için kullanılır. SQLI olarak da bilinen SQL enjeksiyonu, görüntülenmesi amaçlanmayan bilgilere erişmek için veri tabanına yönelik bir saldırı türüdür. Bu bilgiler, kişisel veriler, hassas şirket verileri, müşteri bilgileri veya kullanıcı listeleri dahil olmak üzere pek çok öğeyi içerebilir. SQLI, web uygulamalarından elde edilen kullanıcı girdileri ile oluşturulan SQL sorgularının kötü niyetle kullanılmaları olarak da tanımlanabilir [42] SQL enjeksiyonunun bir kurum veya organizasyona yönelik etkisi geniş kapsamlıdır. Başarılı bir SQL enjeksiyonu saldırısı, kullanıcı verilerinin izinsiz görüntülenmesine, saldırganın bir veri tabanında yönetici yetkilerini kazanmasına ve tüm tabloların silinmesine sebep olabilir ve bunların tümü bir işletmeye büyük zarar verir. Bu çalışmada, bir Java

teknolojisi olan Jsp- MySql tabanlı bir web uygulamasına yönelik, bir SQL enjeksiyonu saldırısı ve analizi gösterilmiştir.



Şekil 19. Login sayfası.

Sql sorgularının manipülasyonunu göstermek için login sayfası olan index.jsp basit tutulmuştur. Şekil 19.'da "Giriş Sayfası" sayfasından girilen kullanıcı adına göre önceden Mysql Workbench ile hazırladığımız veritabanına erişebilmek için gerekli sürücüler çalıştırılıp bağlantı kurulduktan sonra bu kullanıcıya ait kayıt varsa Şekil 20.'deki "SQL Enjeksiyonu Sonucu" sayfasında listelenecektir.



Şekil 20. SQL sorgu sonucu.

Burada sorgulama kullanıcı adına göre yapılmakta ve sadece girilen kullanıcı adına ait kayıt listelenmektedir. Yukarıda yapılan işlemler normal kullanıcı davranışındır ve nizami kullanıcı girişi yapılmaktadır .

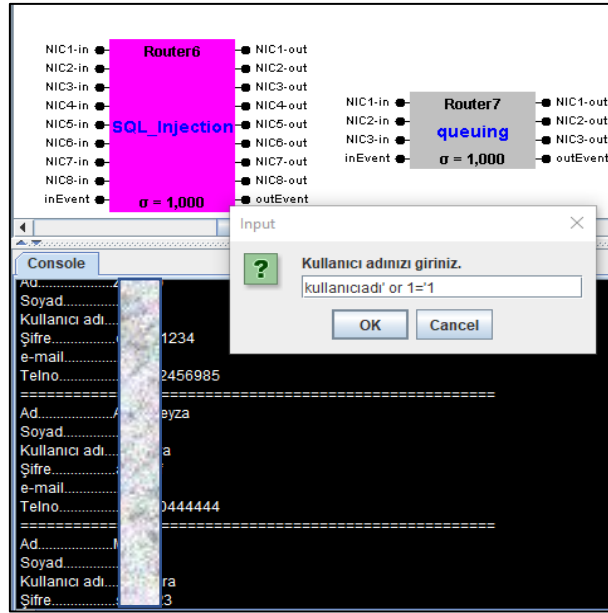
Jsp-MySQL tabanlı web uygulaması üzerinde saldırı örneği ve analizi sunulan SQL enjeksiyonu saldırısını DEVS-CAS saldırı simülatöründe gerçekleştirmek için ilgili saldırı modelinin yapılandırma penceresi kullanarak saldırı başlatılır. Kullanıcı adı girişi Şekil 21.'deki gibi yaparken kullanıcı adı yerine basit bir SQL enjeksiyonu ifadesi yazıyoruz. Bu yazılan ifade sorguyu manipüle edecektir ve bütün kullanıcılara ait kayıtları listeleyecektir. SQL enjeksiyonunu yürütmek isteyen bir saldırgan, bir veritabanındaki doğrulanmamış giriş güvenlik açıklarından yararlanmak için standart bir SQL sorgusunu manipüle eder. SQL enjeksiyonu ifadesi girilip çalıştırıldığında veritabanında bulunan bütün kullanıcılara ait kayıtlar listelenmektedir. SQL enjeksiyonu yöntemleri çoktur, burada sadece basit bir yöntem gösterilmiştir.

SQLi saldırı simülasyonu başlangıcında hedef düğümüne gelen paketin adresi doğrulandıktan sonra paket içeriğinde SQL sorgusu varsa düğüm "Sql\_injection" durumuna geçmektedir. SQL enjeksiyonu sonucunda hedef düğümde veritabanına bağlantı yapılarak başarılı bir oturum gerçekleşirse düğüm "connected" durumuna geçmektedir. Hedef düğümün durum geçişleri Şekil 22.'de ve durum değişim grafiği Şekil 23.'de gösterilmiştir.

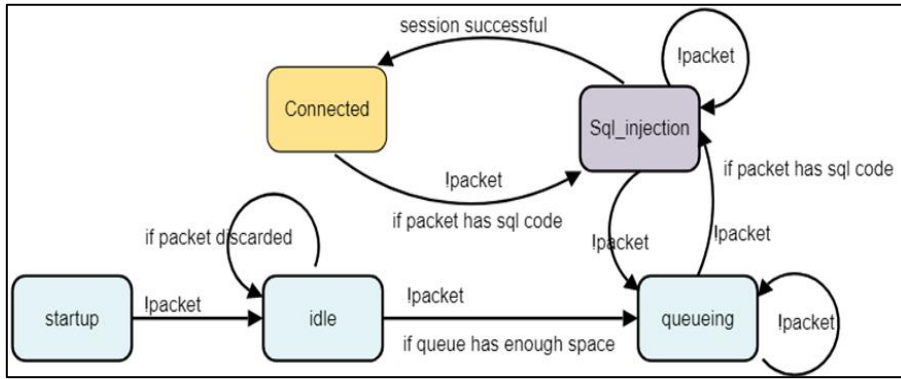
## 5. SİMÜLASYON DENEY SONUÇLARI

Bu bölümde saldırı hedefindeki cihazda gerçekleşen olaylar, durum değişimleri, saldırı uyarıları ve portlarındaki trafik yoğunluğu grafiksel olarak gösterilerek elde edilen sonuçlara göre saldırının başarımı değerlendirilmiştir. Saldırı uygulama bölümünde belirli saldırılara ait deney çıktıları gösterilmiştir, deney çıktıları verilmeyen DoS ve DDoS saldırılarına ait deney çıktıları bu bölümde gösterilecektir.

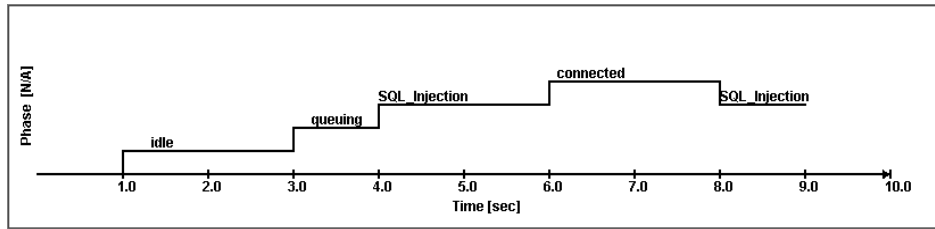
Ağ simülasyonu bir DoS saldırısı ile başlasa bile ağ trafiği belirli bir yoğunluğa kadar bir süre normal şekilde işlemeye devam edecektir. Normal ağ trafiği devam ederken ve hizmet reddi saldırısı olmadığında bile düğüm tıkanıklığı oluşabilir. Ancak bu, bunun bir DoS saldırısı olduğu anlamına gelmez. Belirli bir düğümüne ulaşan paketler incelendiğinde, aynı kaynaktan gelen paketlerin fark edilebileceği şekilde yapılandırılır. Aynı kaynaktan gelen paket sayısı belirli bir değeri aştığında anormal bir durum olduğuna karar verilir ve DoS saldırı uyarısı verilir. Zamana bağlı olarak artan paket sayısına göre farklı güvenlik risk seviyeleri Şekil 24.'te belirlenmiştir.



Şekil 21. SQL enjeksiyonu sonucu elde edilen kayıtlar.



Şekil 22. SQLi saldırısında hedef düğüm durumları, durum geçişleri.



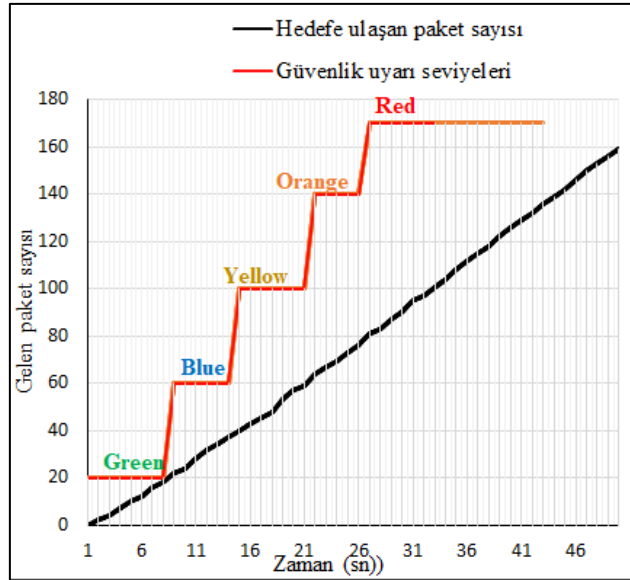
Şekil 23. SQLi saldırısında hedef düğümüne ait durum değişim grafiği.

Simülasyon ortamındaki hedef cihazın rengi de grafikteki renklere göre renk değiştirmektedir. Bu da tehlikeyi fark etmek için gözlemciye kolaylık sağlamaktadır.

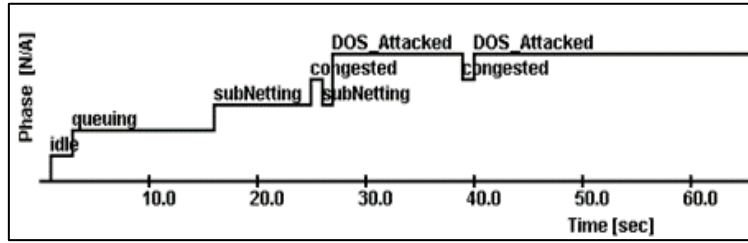
Belirli bir kaynaktan gönderilen paketler, belirli bir sayıya kadar herhangi bir anormalliğe neden olmaz. Bu durum yeşil seviye olarak gösterilmiştir. Atomik model konfigürasyonunda normal ağ trafiği olarak kabul edilebilir seviye için simülasyon süresi ile 10 saniyede 20 paket olarak konfigüre edilmiştir. Bu seviye aşıldıktan sonra anormal durum olarak kabul edilir ve bu anormal duruma göre DoS saldırı uyarı alarmı verilir.

DDoS saldırıları, DoS saldırılarının bir alt sınıfıdır. Bir DDoS saldırısı, toplu olarak botnet olarak bilinen ve sahte trafikle hedef düğümü hizmet veremez duruma getirmek için kullanılan birden çok cihazı içerir. Saldırı emri alan botnetler hedefe yönelik yoğun bir paket trafiği başlatmaktadır. Hedef düğüm yoğun paket akışına hedef olduğunu, düğümüne gelen paket sayısı belli bir sayıyı geçtiğinde bunu DoS\_Attacked durumuna geçerek göstermektedir. Hedef makinenin tampon alanı kısa sürede dolacaktır. Saldırı devam ettiği müddetçe tıkanıklığı sürecektir ve bu cihaz servis dışı kalmaktadır, böylece DDoS saldırısı amacına ulaşmaktadır.

DoS saldırıları uyarı seviyeleri DDoS için de geçerlidir. Şekil 25.'te hedef düğümde saldırıya ait grafiksel gösterimler görülmektedir. Ağ trafiği normal akışını sürdürürken saldırı başladıktan yaklaşık 20 saniye sonra hedef bilgisayarın giriş portlarında sıra dışı bir paket yoğunluğu olduğu görülmektedir. Hedef düğüm yoğun paket akışına hedef olduğunu, düğümüne gelen paket sayısı belli bir sayıyı geçtiğinde bunu "DoS\_Attacked" durumuna geçerek göstermektedir. Hedef makinenin tampon alanı kısa sürede dolmakta ve tıkanma (congested)



Şekil 24. Güvenlik uyarı seviyeleri.

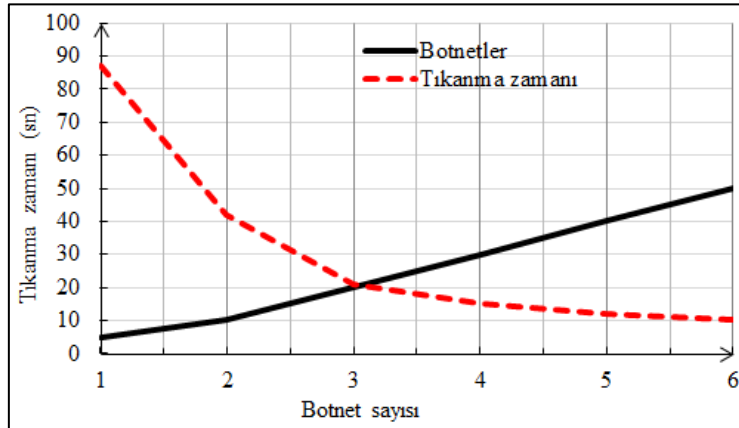


Şekil 25. DDoS saldırısına ait hedef düğüm durum geçiş grafiği.

durumuna geçtiği görülmektedir. Saldırı devam ettiği müddetçe tıkanıklığı sürmektedir ve bu cihaz servis dışı kalmaktadır ve DDoS saldırısı amacına ulaşmıştır.

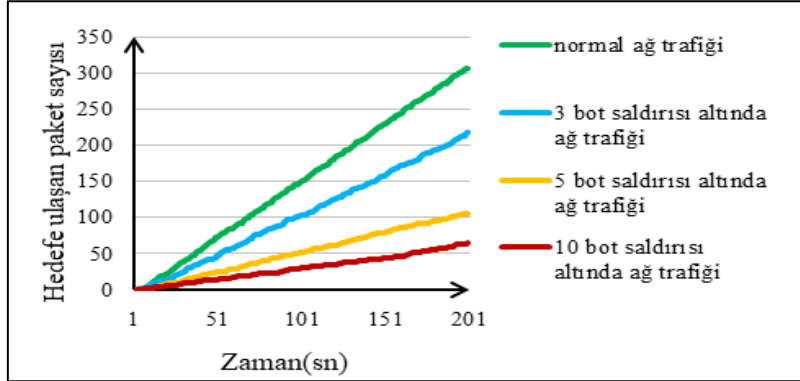
Botnetlerin kullanıldığı bir DDoS saldırısının etkileri bot sayısına bağlı olarak değişmektedir. Bir hizmet reddi saldırısının temel amacı tıkanıklık oluşturup sunucuyu servis veremez duruma getirmek olduğu için aynı anda ne kadar çok istek gönderilirse tıkanma o kadar çabuk gerçekleşir. DDoS saldırılarının başarılı olabilmesi için olabildiğince farklı kaynaklardan hedefe mesaj/paket isteği göndermek gerekir. Botnetler daha çok bu amaçla kullanılmaktadır. Saldırıda kullanılan bot sayısı arttıkça tıkanma süresi kısalmaktadır. Bu durum, simülasyon sonucunda elde edilenlerle Şekil 26.'deki grafikte gösterilmiştir. Grafikten botnet sayısı ile tıkanma süreleri arasında bir ters orantı olduğu görülebilmektedir. Şekil 25.'de 100 düğümlü bir ağda değişen sayıda zombi içeren botnetler ile yapılan DDoS saldırısında hedef düğümde bot sayısına bağlı olarak tıkanmanın gerçekleştiği zaman grafiği gösterilmektedir.

Bot sayısındaki artışla orantılı olarak tıkanma süresi kısalmaktadır ve bu olması beklenen durum grafikten de anlaşılmaktadır. Saldırı simülasyonunda bot sayısı teorik olarak ağdaki düğüm sayısından az olmalıdır.



Şekil 26. Botnet sayısına dayalı tıkanıklık grafiği.

Bu kurala bağlı kalarak ağdaki bot sayısı adım adım artırılarak benzetimi yapılan ağda ağ trafiğinin nasıl etkilendiği gözlemlenmiştir. Normal ağ trafiğinin DDoS saldırısından nasıl etkilendiğini göstermek için belli sayıdaki botnetlerle yapılan saldırıda elde edilen trafik verileri ile normal trafik verileri Şekil 27.'de birlikte gösterilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere sabit bir ağdaki botnetlerin sayısı arttırıldıkça ağ trafiği orantılı olarak yavaşlamaktadır. Ağ trafiği hedefe ulaşan paket sayıları ile orantılı olarak gösterilmiştir.



Şekil 27. Farklı bot sayıları ile DDoS saldırısı altında ağ trafiği grafiği.

## 6. SONUÇ

Bir kurumsal ağı fiziksel olarak gerçekleştirmek ve bu ağlarda yeni siber güvenlik yöntemlerini test etmek maliyetlidir ve test verilerinin elde edilmesi de çok zaman alıcıdır. Kurumsal ağ tasarımı aşamasında ise güvenilir bir simülasyon aracı ile ağ tasarımının oluşturulması, güvenlik simülasyonlarının yapılması ve ağ tasarımlarının doğrulanması maliyet ve zaman tasarrufu sağlamaktadır. Bu çalışmada geliştirilen siber saldırı simülatörü, simülasyon ortamında tasarlanan ağdaki belirli siber saldırılara ilişkin uyarı verilerinin verimli bir şekilde elde edilmesi için bir araç sunmaktadır. Bu araç belirli saldırı türleri için uyarı verileri elde etmek için kullanılsa da, daha farklı saldırı türleri için uyarı verileri oluşturmak için genişletilebilir bir altyapı sağlar. Geliştirilen uygulama, simüle edilen ağ üzerinde saldırı modelleri çalıştırabilme ve sonuçlarını izleyebilme özelliğine sahiptir. Bu çalışmada, büyük ölçekli kurumsal ağların kolaylıkla tasarlanabileceği ve geçerli düzeyde performans, ölçeklenebilirlik ve doğruluk ile siber güvenlik testlerinin kısa sürede yapılabileceği görülmüştür. Uygulama, ağ benzetiminin oluşturulmasına izin veren ağ modelleme yetenekleri ile ayrıntılı saldırı senaryoları oluşturmak ve benzetimi yapılan ağ modeli üzerinde saldırı eylemlerini simüle etmek için kullanılan saldırı modelleme yetenekleri sağlar. DEVS-CAS ek olarak saldırı eylemleri ile ilişkili ağ trafiğinin modellenmesini, saldırıların algılanması ve uygun saldırı uyarılarının üretilmesini içermektedir. Ağ modelinin işlevselliği ve saldırı simülasyonu, bazı farklı yaklaşımlarla doğrulanır. Saldırı uyarılarının üretimi, simüle edilen belirli saldırı eylemlerine karşı saldırı hedefindeki cihaz log çıktıları kontrol edilerek doğrulanır. Bu çalışmada geliştirilen DEVS-CAS çerçevesi, hem modellenmiş bir ağ üzerinden saldırıların ilerlemesini hem de bu tür saldırılar sonucunda doğru IDS uyarılarının oluşturulmasını başarılı bir şekilde simüle etmektedir. Ağ modelleri ve saldırı senaryoları çok detaylı bir şekilde oluşturulabilir ve kontrol edilebilir. Ek olarak, saldırı senaryoları kolayca çalıştırılabilir ve değiştirilebilir.

Çalışmaların çoğunda olduğu gibi, bu çalışmanın sonuçlarının elde edilmesi de sınırlamalara tabidir. Elde edilen sonuçlar bu sınırlamalar ışığında değerlendirilmelidir. Gerçekleştirilen siber saldırı modelinin testleri ortalamanın üzerinde bir konfigürasyona sahip kişisel bir bilgisayarda yapılmıştır. Sınırlı işlemci ve bellek kaynakları, benzetimi yapılan sanal ağın düğüm sayısını da sınırlamıştır. Uygulamanın geliştirdiği DEVS-Suite yazılımı ile ayrı olay modellerinin paralel ve dağıtılmış simülasyonu gerçekleştirilebilmektedir. Gelecekteki araştırmalarda bu uygulama dağıtık ve paralel işlem yapan bilgisayar kümelerinde çalıştırılarak bu sınırlama aşılabilecektir ve çok büyük ölçekteki ağlarda da siber saldırı benzetimleri kolaylıkla yapılabilecektir. Bu da elde edilen sonuçlara etkisi olabilecek gerçek fiziksel sistemlerin daha fazla özelliklerinin sanal modellere dahil edilmesini sağlayacaktır.

Artan siber tehditlere karşı sürekli olarak yeni araçlar ve yöntemler geliştirilmektedir. Mevcut siber güvenlik araçlarının ve geliştirilen yöntemlerin test edilmesi için bilimsel araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Sanal test ortamlarında test sonuçlarının gerçekliğini artırmak için simülasyon araçlarının yetenekleri detaylı olarak incelenmelidir. Siber güvenlik araştırmalarının daha iyi yapılabilmesi için üniversitelerde siber güvenlik uygulama laboratuvarlarının açılmasının teşvik edilmesi ve eğitim süreçlerine siber güvenliğin eklenmesi ile mümkün olacaktır.

## Yazar Katkıları

Şahin Kara- Makale yazımı, literatür araştırması, yöntem, veri işleme, deneysel çalışmalar.

Ahmet Zengin- Özet, yöntem, denetleme ve danışmanlık

Selman Hızal- Literatür araştırması, format düzenleme, sonuç ve çıkarımlar.

## Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler

## KAYNAKÇA

- [1] M. Rai, H. Mandoria “A study on cyber crimes cyber criminals and major security breaches”, Int. Res. J. Eng. Technol., vol. 6, no. 7, pp. 1-8, 2019.
- [2] S. McClure, J. Scambray, G. Kurtz “Network Security Secrets And Solutions”, McGraw-Hill Osborne Media, 2005.
- [3] F. Cohen “Simulating cyber attacks, defences, and consequences. Computers and Security”, vol. 18, no. 6, pp. 479–518, 1999.
- [4] S. Park, J-S. Lee, H. K. Kim, J-R. Jeong, D-B. Yeom, S-D Chi “Secusim: A tool for the cyber-attack simulation. Information and Communications Security”, Third International Conference on Springer, pp. 471–475, 2001.
- [5] Kotenko, E. Man’kov “Experiments with simulation of attacks against computer networks, International Workshop on Mathematical Methods, Models, and Architectures for Computer Network Security”, Springer, vol. 2776, pp. 183–194, 2003.
- [6] J. Kim, H. Kim, “JDEVS-based modeling methodology for cybersecurity simulations from a security perspective”, KSII Transactions on Internet and Information Systems (TIIS), vol. 14, no. 5, pp. 2186-2203, 2020.
- [7] E.T. Dougherty, P.G. Gonslaves “Adaptive cyber-attack modeling system. Sensors, and Command, Control, Communications and Intelligence (C3I) Technologies for Homeland Security and Homeland Defense”, SPIE, vol. 6201, pp. 16-24, 2006.
- [8] S. Cheung, U. Lindqvist, M. W. Fong “Modeling multistep cyber attacks for scenario recognition”, IEEE vol. 1, pp. 284-292, 2003.
- [9] M. Sudit, A. Stotz, M. Holender, “Situational awareness of a coordinated cyber attack”, SPIE, vol. 5812, pp. 114-129, 2005.
- [10] G. Ashish, U. Shambhu, R. Chinchani, K. Kevin “SIMS: A Modeling and Simulation Platform for Intrusion Monitoring/Detection Systems”, Summer Computer Simulation Conference, pp. 89-94, 2003.
- [11] L.L. DeLooze, C. Graig., P. McKean, J.R. Mostow “Incorporating simulation into the computer security classroom”, 34th Annual Frontiers in Education. FIE, IEEE, vol. 3, pp. 13-18, 2004.
- [12] J. Kistner “Cyber Attack Simulation and Information Fusion Process Refinement Optimization Models for Cyber Security”, Masters Thesis, Department of Industrial and Systems Engineering, Rochester Institute of Technology, Kate Gleason College of Engineering, 2006.
- [13] Kotenko, A. Ulanov “Agent-based simulation of DDoS attacks and defense mechanisms”, Journal of Computing, vol. 4, no. 2, pp. 16–37, 2005.
- [14] M.E. Kuhl., M. Sudit “Cyber Attack Modeling and Simulation for Network Security Analysis”, IEEE Simulation Conference, pp. 1180–1188, 2007.
- [15] B. Van Leeuwen, V. Urias, J. Eldridge, C. Villamarin, R. Olsberg “Performing cyber security analysis using a live, virtual, and constructive (LVC) testbed”, Proceedings - IEEE Military Communications Conference MILCOM, pp. 1806–1811, 2010.
- [16] G. Torres, K. Smith, J. Buscemi, S. Doshi, H. Duong, D. Xu, H. K. Pickett “Distributed StealthNet (D-SN): Creating a live, virtual, constructive (LVC) environment for simulating cyber-attacks for test and evaluation (T&E)”, Proceedings - IEEE Military Communications Conference MILCOM, pp. 1284–1291, 2015.
- [17] R. Norman, E.D. Christopher “Cyber Operations Research and Network Analysis (CORONA) Enables Rapidly Reconfigurable Cyberspace Test and Experimentation”, Modeling and Simulation Coordination Office Publication, pp. 15-24, 2013.
- [18] Kotenko, A. Chechulin “A Cyber Attack Modeling and Impact Assessment Framework”, 5th International Conference on In Cyber Conflict, IEEE, pp. 1–24, 2013.
- [19] Ekelhart, E. Kiesling, B. Grill, C. Strauss, C. Stummer “Integrating attacker behavior in IT security analysis: a discrete-event simulation approach”, Information Technology and Management, vol. 16, no. 3, pp. 221–233, 2015.
- [20] D. Bergin “Cyber-attack and defense simulation framework”, Journal of Defense Modeling and Simulation, vol. 2, no. 4, pp. 383–392, 2015.
- [21] S. Hansman, R. Hunt “A taxonomy of network and computer attacks, Computers Security”, Computers and Security, vol. 24, no. 1, pp. 31–43, 2004.
- [22] V.M. Iguere, R.D. Williams “Taxonomies of attacks and vulnerabilities in computer systems”, IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 10, no. 1, pp. 6-19, 2008.
- [23] J. Friedman, D.V. Hoffman “Protecting data on mobile devices: A taxonomy of security threats to mobile computing and review of applicable defenses”, Information, Knowledge, Systems Management, vol. 7, no. 1, pp. 159-180, 2008.
- [24] C. Myers, S. Powers, D. Faissol “Taxonomies of cyber adversaries and attacks: a survey of incidents and approaches”, Lawrence Livermore National Laboratory, vol. 7, pp. 1-22, 2009.
- [25] P.K. Singh, A.K. Vatsa., R. Sharma, P. Tyagi “Taxonomy based intrusion attacks and Detection management scheme in peer-to-peer network”, International Journal of Network Security and Its Applications (IJNSA), vol. 4, no. 5, pp. 167-179, 2012.
- [26] N. Ye, C. Newman, T. Farley “A system-fault-risk framework for cyber attack classification”, Information, Knowledge, Systems Management, vol. 5, no. 2, pp. 135- 151, 2006.



- [27] Avizienis, J.C. Laprie, B. Randell, C. Landwehr "Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing", Dependable and Secure Computing, IEEE Transactions, vol. 1, no. 1, pp. 11-33, 2004.
- [28] Brathen "Correlating IDS alerts with system logs by means of a network-centric SIEM solution", Master's Thesis, Department of Computer Science and Media Technology, Gjøvik University, 2011.
- [29] M. Collins, C. Gates, G Kataria "A model for opportunistic network exploits: The case of P2P worms." In Workshop on the Economics of Information Security (WEIS), University of Cambridge, 2006.
- [30] Dodiya, U.K. Singh "Identification of Taxonomic Features through Assessment of Existing Taxonomies for Vulnerabilities Identification", International Journal of Computer Applications, vol. 174, no. 31, pp. 14–22, 2021.
- [31] M. Kjaerland "A taxonomy and comparison of computer security incidents from the commercial and government sectors" Computers and Security, vol. 25, no. 7, pp. 522-538, 2006.
- [32] L. Lough "A taxonomy of computer attacks with applications to wireless networks", PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- [33] B. K. Mishra, H. Saini, "Cyber attack classification using game theoretic weighted metrics approach", World Applied Sciences Journal, vol .7, pp. 206-215, 2009
- [34] P. Monahan, T. Mary "Attack Evolution: Identifying Attack Evolution Characteristics to Predict Future Attacks" PhD Thesis,, Institute of Systems Research University of Maryland, 2006.
- [35] K. Nasr, A. El Kalam, A. Fraboul "Generating Representative Attack Test Cases for Evaluating and Testing Wireless Intrusion Detection Systems", International Journal of Network Security and Its Applications (IJNSA), vol. 4, no. 3, pp. 1-19, 2012.
- [36] S.R. Nunes "Web attack risk awareness with lessons learned from high interaction honeypots", PhD thesis, Carnegie Mellon University, 2009.
- [37] J. Rutkowska "Introducing stealth malware taxonomy", COSEINC Advanced Malware Labs, vol. 1, no.1, pp. 1-9, 2006.
- [38] M. Saber, T. Bouchentouf, A. Benazzi, M. Azizi "Amelioration of attack classifications for evaluating and testing intrusion detection system", Journal of Computer Science, vol. 6, no. 7, pp. 716-722, 2010.
- [39] America's Cyber Defence Agency, "Understanding Denial-of-Service Attacks" Url:<https://www.cisa.gov/uscert/ncas/tips/ST04-015>. (Erişim Tarihi: 10.02.2023).
- [40] M.F. Hasan, and N.S. Al-Ramadan "Cyber-attacks and Cyber Security Readiness: Iraqi Private Banks" Case. Soc. Sci. Humanit. J, vol. 5, no. 8, pp. 2312-2323, 2021.
- [41] F.E. Lubna, D.P. Robert "DoS and DDoS attacks in Software Defined Networks: A survey of existing solutions and research challenges", Future Generation Computer Systems, vol. 122, no. 1, pp. 149-171, 2021.
- [42] J. Myllyla, A. Costin "Reducing the Time to Detect Cyber-attacks: Combining At-tack Simulation With Detection Logic", Proceedings of the 29th Conference of Open Inno-vations Association FRUCT, pp. 465-474, 2021.



# Uygunluk Mesafe Dengesi Tabanlı Yapay Ekosistem Optimizasyon Algoritması ile Otomatik Gerilim Regülatörü Sistemi için Denetleyici Tasarımı

## Controller Design for Automatic Voltage Regulator System with Fitness Distance Balance Based Artificial Ecosystem Optimization Algorithm

<sup>1</sup>Muhammet DEMİRBAŞ , <sup>2</sup>Serhat DUMAN , <sup>3</sup>M. Kenan DÖŞOĞLU 

<sup>1</sup>Kastamonu Üniversitesi, Tosya Meslek Yüksekokulu, Tosya/Kastamonu, Türkiye

<sup>2</sup>Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bandırma/Balıkesir, Türkiye

<sup>3</sup>Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Merkez/Düzce, Türkiye

<sup>1</sup>muhammetdemirbas@kastamonu.edu.tr, <sup>2</sup>sduman@bandirma.edu.tr

<sup>3</sup>kenandosoglu@duzce.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

### ARTICLE INFO

#### Article history

Received : 30 March 2023

Accepted : 2 May 2023

#### Keywords:

Automatic Voltage Regulator (AVR), Fitness Distance Balance (FDB), Artificial Ecosystem based Optimization (AEO), FOPID

### ABSTRACT

Devices used in power systems are designed to operate at their rated voltages. Variations in the terminal voltages of synchronous generators can shorten the life of these devices. To eliminate these variations, synchronous generators are equipped with Automatic Voltage Regulator (AVR) systems that regulate the excitation currents. The design of controllers used in AVR systems is an important issue for system performance. In this study, PID-AVR and FOPID-AVR systems were designed using the Artificial Ecosystem based Optimization (AEO) algorithm developed with the Fitness Distance Balance (FDB) method. The designed systems were compared with similar studies in the literature in terms of step response and frequency response. The analysis results showed the superiority of the performances of the PID and FOPID controller AVR systems designed with the FDB-AEO algorithm.

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

### MAKALE BİLGİSİ

#### Makale Tarihleri

Gönderim : 30 Mart 2023

Kabul : 2 Mayıs 2023

#### Anahtar Kelimeler:

Otomatik Gerilim Regülatörü (OGR), Uygunluk Mesafe Dengesi (FDB), Yapay Ekosistem Tabanlı Optimizasyon (AEO), FOPID

### ÖZET

Güç sistemlerinde kullanılan cihazlar nominal gerilimlerinde çalışmak üzere tasarlanmıştır. Senkron generatörlerin terminal gerilimlerinde yaşanan değişimler bu cihazların ömürlerinin kılmasına neden olabilir. Bu değişimleri ortadan kaldırmak için senkron generatörler uyarım akımlarını düzenleyen Otomatik Gerilim Regülatörü (OGR) sistemleri ile donatılmaktadır. OGR sistemlerinde kullanılan denetleyicilerin tasarımı sistem performansı için önemli bir konudur. Bu çalışmada Uygunluk Mesafe Dengesi (FDB) yöntemi ile geliştirilmiş Yapay Ekosistem Tabanlı Optimizasyon (AEO) algoritması kullanılarak PID-OGR ve FOPID-OGR sistemlerinin tasarımı yapılmıştır. Tasarımı yapılan sistemler adım yanıtı ve frekans yanıtı açısından literatürde daha önce yapılmış olan benzer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçları FDB-AEO algoritması ile tasarlanan PID ve FOPID denetleyicili OGR sistemlerinin performanslarındaki üstünlüğü göstermiştir.

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

ORCID ID: <sup>1</sup>0000-0002-5223-1279

<sup>2</sup>0000-0002-1091-125X

<sup>3</sup>0000-0001-8804-7070

## 1. GİRİŞ

Güç sistemlerinde kullanılan cihazlar nominal gerilimlerinde çalışmak için tasarlanmaktadır. Sistemde meydana gelen gerilim dalgalanmaları bu cihazların ömürlerinin azalmasına neden olabilir. Gerilimde meydana gelen değişiklikler reaktif güç talebiyle doğrudan ilişkilidir. Reaktif güç talebinin karşılanamadığı durumlarda gerilimde çökmeler meydana gelebilir. İletim ve Dağıtım sistemlerinde reaktif güç talebi reaktif güç kompanzasyon elemanları ile karşılanırken, üretim bölgelerinde, enerji üretimini sağlayan senkron generatörlerin Otomatik Gerilim Regülatörleri (OGR'ler) ile kullanılması ile karşılanmaktadır. OGR'ler beraber kullanıldıkları senkron generatörlerin terminal gerilimlerini ölçer. Ölçtükları bu gerilim değerini referans gerilim ile karşılaştırarak hata sinyali üretir. Hata sinyali bir denetleyici vasıtasıyla işlenir ve elde edilen sonuca göre senkron generatörün uyarım akımı değiştirilerek gerilim kontrol edilmiş olur [1-2]. OGR sistemlerinde en çok kullanılan denetleyici modeli basit kontrol yapısı nedeniyle Oransal-İntegral-Türevsel (PID)'dir [3-9]. Ancak sistemin dinamik yanıtını iyileştirmek amacıyla araştırmacılar kesir dereceli PID (FOPID) denetleyicisini önermişlerdir [10-15]. FOPID denetleyicisi klasik PID denetleyicisine ek olarak iki adet ( $\lambda$  ve  $\mu$ ) kontrol parametresi içerir. Bu durum FOPID'nin PID'ye göre daha esnek ayarlanabilmesine olanak sağlar. Ancak sahip olduğu ek kontrol parametreleri nedeniyle PID'ye göre daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu nedenle kontrol parametrelerinin ayarlanma süreci de daha karmaşıktır.

OGR sistemlerinde kullanılan denetleyicilerin kontrol parametrelerinin ayarlanması araştırmacıların karşılaştıkları önemli bir konudur. Kontrol parametrelerinin belirlenebilmesi için Ziegler-Nichols [16-17], Root-Locus [18] gibi klasik yöntemler kullanılmış olsa da, son yıllarda metasezgisel optimizasyon algoritmalarının da gelişmesiyle kontrol parametresi belirleme işlemi bu algoritmalar ile yapılmaya başlanmıştır. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) [19], Yerçekimi Arama Algoritması (GWO) [20], Stokastik Fraktal Arama (SFS) [21], Simbiyotik Organizma Arama (SOS) [22], Yapay Ekosistem Tabanlı Optimizasyon (AEO) [23], Sinüs Cosinüs Algoritması [24] bu amaçla kullanılan metasezgisel algoritmalarından bazılarıdır. Bu optimizasyon algoritmalarının hepsi senkron generatör terminal geriliminin yükselme zamanı, yerleşme zamanı, en büyük yüzde aşım gibi adım yanıtı özelliklerini iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Ancak algoritmaların hiçbiri en iyi adım yanıtı sonucunu vermeyi garanti etmez. Bu nedenle farklı algoritmalarla OGR sisteminin tasarımı araştırmacılar için önemli bir çalışma konusunu oluşturmaktadır.

Metasezgisel optimizasyon algoritmaları en iyi adım yanıtını veren kontrol parametrelerini çeşitli amaç fonksiyonları kullanarak aramaktadır. Çalışmalarda kullanılan bazı amaç fonksiyonları, Hatanın Mutlak Değerinin İntegrali (IAE) [5,20,25], Hatanın Karesinin İntegrali (ISE) [20,25,26], Zamanın İntegrali ile Çarpılan Mutlak Hata (ITAE) [27-29], Zaman Ağırlıklı Karesel Hatanın İntegrali (ITSE)'dir [21,30,31]. Kullanılan amaç fonksiyonu algoritmanın performansını büyük ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle bazı araştırmacılar amaç fonksiyonu geliştirme çalışmalarına da odaklanmıştır [32-34].

Araştırmacılar tarafından geliştirilen metasezgisel optimizasyon algoritmalarının birçoğunun ortak problemi çözüm adayına erken yakınsayarak en uygun çözüme ulaşamamalarıdır. Bu sorunu ortadan kaldırmak amacıyla 2020 yılında mevcut optimizasyon algoritmaların seçim yöntemi üzerinde geliştirme yapmak için Uygunluk Mesafe Dengesi (FDB) yöntemini önerilmiştir. Önerilen yöntem ilk olarak SOS algoritması üzerinde uygulanmıştır [35]. FDB yönteminin etkisinin gözlemlenmesi yöntemin farklı algoritmalara uygulanmasına neden olmuştur. FDB-SFS [36] ve FDB-AEO [37] bu yöntemle geliştirilen algoritmaların bazılarıdır.

Açıklanan bilgiler değerlendirildiğinde OGR sistemlerinin en uygun şekilde tasarımının güç sistemlerinin kararlı bir şekilde çalışması açısından önemi açıktır. Bu bağlamda yapılan çalışmanın literatüre olan katkısı aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- PID ve FOPID denetleyicilerinin tasarımı OGR sistemi için yapılmıştır.
- 2022 yılında geliştirilen FDB-AEO algoritması [37] ilk kez OGR sistemi tasarımı için kullanılmıştır.
- FDB-AEO algoritması ile OGR sistemi için tasarımı yapılan PID denetleyicisinin performansı Kaotik tabanlı PSO (CPSO) [38], SCA [39] ve SFS [21] algoritmalarının performansları ile karşılaştırılmıştır.
- FDB-AEO algoritması ile OGR sistemi için tasarımı yapılan FOPID denetleyicisinin performansı ise Çoklu Evren Optimizasyon Algoritması (MVO) [40], Salp Sürüsü Optimizasyon Algoritması (SSA) [12] ve Jaya Optimizasyon Algoritması (JOA) [13] algoritmalarının performansları ile karşılaştırılmıştır.
- Tasarımı yapılan sistemler adım yanıtı ve bode analizi ile incelenerek üstün performansları gösterilmiştir.

Bu çalışmanın bölümleri aşağıdaki gibidir.

- Bölüm 2'de FDB-AEO algoritması, OGR sistemi ve amaç fonksiyonu sunulurken çalışmada kullanılan metodlar detaylı bir şekilde açıklanmıştır.
- Bölüm 3'de çalışmada yapılan araştırmaya ve bu araştırmanın sonucunda elde edilen bulgulara yer verilmiştir.
- Son olarak Bölüm 4'de, çalışmada elde edilen sonuçlara yer verilerek değerlendirme ve öneriler sunulmuştur.

## 2. MATERYEL VE METOD

### 2.1. FDB-AEO Algoritması

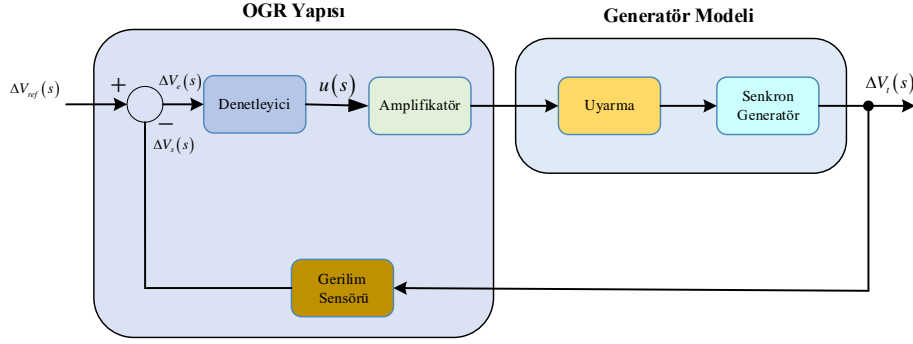
AEO algoritması canlı organizmaların üretim, tüketim ve ayrıştırma özelliklerini taklit edecek şekilde Zhao ve arkadaşları tarafından 2020 yılında geliştirilmiştir [23]. Algoritma oluşturduğu ekosistemde organizmaları üreticiler, tüketiciler ve ayrıştırıcılar olarak gruplandırmaktadır. Üreticiler, ihtiyaç duyduğu besini fotosentez yoluyla elde eden bitkileri içermektedir. Tüketiciler ise ihtiyaç duyduğu enerjiyi diğer tüketici ve üretici gruplarından elde etmek durumunda olan hayvanları içermektedir. Hayvanlar; otobur, etçil ve hem etçil hem otçul olan hepciller olarak gruplara ayrılmaktadır. Ekosistemde bakteri ve mantarlardan oluşan gruba ayrıştırıcılar denir. Bu grup ölen organizmaların kalıntılarını kullanarak su ve mineral gibi besinlere dönüştürür. Üreticiler bu besinleri tekrar kullanarak besin zinciri döngüsünü yeniden başlatır. AEO algoritması, üreticilerden ayrıştırıcılara kadar olan bu besin akışını taklit etmektedir. Ekosistemdeki üretici, tüketici ve ayrıştırıcılar algoritmanın operatörlerini oluşturur. Ekosistemi oluşturan canlı organizmalar çözüm adaylarını oluştururken, bu canlıların enerji düzeyi ise uygunluk değerine karşılık gelmektedir. Çözüm adaylarından bir tanesi üretici, bir tanesi ayrıştırıcı ve kalanları tüketici olarak gruplandırılır. Tüketiciler ise kendi arasında etçil, otçul ve hepcil olarak eşit biçimde ayrılır [23]. AEO algoritmasında en düşük enerji seviyesine veya uygunluk değerine sahip birey ayrıştırıcı olarak kullanılmaktadır. Ancak tek bir ayrıştırıcının kullanılması besin zincirindeki enerji akışını tam olarak yansıtmamaktadır. En düşük enerji düzeyine sahip bireyle birlikte daha yüksek enerji seviyesine sahip bir bireyin kullanılması ayrıştırıcıları dengeleyerek ekolojik dengenin daha iyi temsil edilmesini sağlayabilmektedir [37]. 2020 yılında Kahraman ve arkadaşları tarafından önerilen FDB yöntemi [35], AEO algoritmasının ayrıştırma sürecini iyileştirmek amacıyla kullanılmıştır [37]. Yapılan geliştirmede AEO algoritmasının ayrıştırma sürecinde kullanılan bireye ek olarak, arama sürecine katkıda bulunabilecek birey FDB yöntemi ile seçilerek sürece dahil edilmektedir [37]. Geliştirilen FDB-AEO algoritmasının sözde kodu Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** FDB-AEO algoritmasının sözde kodu [37].

1.	<b>Başla</b>
2.	Ekosistemin oluşturulması: $X_i$ çözümleri rastgele oluşturulur.
3.	<b>for</b> $i=1:n$ <b>do</b>
4.	Uygunluk değeri $fit_i$ ve $X_{best}$ değerleri hesaplanır.
5.	<b>end for</b>
6.	<b>while</b> (arama süreci yaşam döngüsü <b>do</b> : amaç fonksiyonu değerlendirme sayısı)
7.	$X_i$ konumu güncellenir. //Üretim aşaması
8.	<b>for</b> $i=2:n$ <b>do</b> //Tüketim aşaması
9.	<b>If</b> ( $rand < 1/3$ ) $X_i$ konumu otçul olarak güncellenir.
10.	<b>Else If</b> ( $1/3 < rand < 2/3$ ) $X_i$ konumu etçil olarak güncellenir.
11.	<b>Else</b> $X_i$ konumu hepcil olarak güncellenir.
12.	<b>End If</b>
13.	<b>End for</b>
14.	<b>for</b> $i=1:n$ <b>do</b>
15.	Uygunluk değeri $fit_i$ ve $X_{best}$ değeri güncellenir.
16.	<b>End for</b>
17.	<b>for</b> $i=1:n$ <b>do</b> //Ayrıştırma aşaması
18.	Her bireyin mesafesi hesaplanır.
19.	Her bireyin FDB puanı hesaplanır.
20.	<b>End for</b>
21.	$D_p$ ve $S_p$ vektörleri oluşturulur.
22.	<b>for</b> $i=1:n$ <b>do</b>
23.	$X_i$ konumu güncellenir.
24.	Uygunluk değeri $fit_i$ hesaplanır.
25.	<b>end for</b>
26.	Bulunan en iyi $X_{best}$ değeri güncellenir.
27.	<b>End while</b>
28.	En iyi çözüm getirilir.

### 2.2. Otomatik Gerilim Regülatörü (OGR)

Güç sistemlerinde enerji üretimini sağlayan senkron generatörlerin uyarım akımını kontrol ederek terminal gerilimlerinde meydana gelen değişimleri düzenleyen cihazlara Otomatik Gerilim Regülatörleri (OGR) denir. OGR sistemleri Amplifikatör, Uyarma, Senkron Generatör ve Sensör yapıları ile birlikte modellenir. OGR sisteminin blok diyagramı Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. OGR sisteminin blok diyagramı.

OGR sisteminin blok diyagramında; referans gerilimi  $\Delta V_{ref}(s)$ , hata gerilimi  $\Delta V_e(s)$ , kontrol sinyali  $u(s)$  ve sensör gerilimi  $\Delta V_s(s)$  ve senkron generatörün terminal gerilimi  $\Delta V_t(s)$  ile gösterilmiştir. OGR sistemini oluşturan Amplifikatör, Uyarma, Senkron Generatör ve Gerilim Sensörü bileşenlerinin transfer fonksiyonları sırasıyla Denklem 1, 2, 3 ve 4'te verilmiştir.

$$G_{Amplifikatör}(s) = \frac{K_a}{1 + sT_a} \quad (1)$$

$$G_{Uyarma}(s) = \frac{K_e}{1 + sT_e} \quad (2)$$

$$G_{Generatör}(s) = \frac{K_g}{1 + sT_g} \quad (3)$$

$$G_{Sensör}(s) = \frac{K_s}{1 + sT_s} \quad (4)$$

Burada,  $K_a$ ,  $K_e$ ,  $K_g$  ve  $K_s$  kazanç sabitleri,  $T_a$ ,  $T_e$ ,  $T_g$  ve  $T_s$  zaman sabitleridir. Bu değerler literatürden yola çıkılarak  $K_a=10$ ,  $K_e=1$ ,  $K_g=1$ ,  $K_s=1$ ,  $T_a=0.1s$ ,  $T_e=0.4s$ ,  $T_g=1s$  ve  $T_s=0.01s$  olarak belirlenmiştir [5-7,23]. Denetleyici modeli içermeyen OGR sisteminin transfer fonksiyonu Denklem 5'de verilmiştir [41].

$$G_{OGR}(s) = \frac{\Delta V_t(s)}{\Delta V_{ref}(s)} = \frac{0.1s + 10}{0.0004s^4 + 0.0454s^3 + 0.555s^2 + 1.51s + 11} \quad (5)$$

OGR sistemlerinde en sık kullanılan PID denetleyicisinin  $K_P$ ,  $K_I$  ve  $K_D$  olmak üzere 3 adet kontrol parametresi bulunmaktadır. Bu kontrol parametrelerinin optimizasyon metodları ile belirlenmesi ile tasarımı gerçekleştirilir. PID denetleyicisinin transfer fonksiyonu Denklem 6'da verilmiştir.

$$G_{PID}(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (6)$$

Burada;  $K_P$  orantısal kazanç,  $K_I$  integral kazancı,  $K_D$  türev kazancıdır. PID denetleyicili OGR sisteminin transfer fonksiyonu Denklem 7'de verilmiştir [41].

$$G_{OGR-PID}(s) = \frac{0.1K_D s^2 + (0.1K_P + 10K_D)s^2 + (0.1K_I + 10K_P)s + 10K_I}{0.0004s^5 + 0.0454s^4 + 0.555s^3 + (1.51 + 10K_D)s^2 + (1 + 10K_P)s + 10K_I} \quad (7)$$

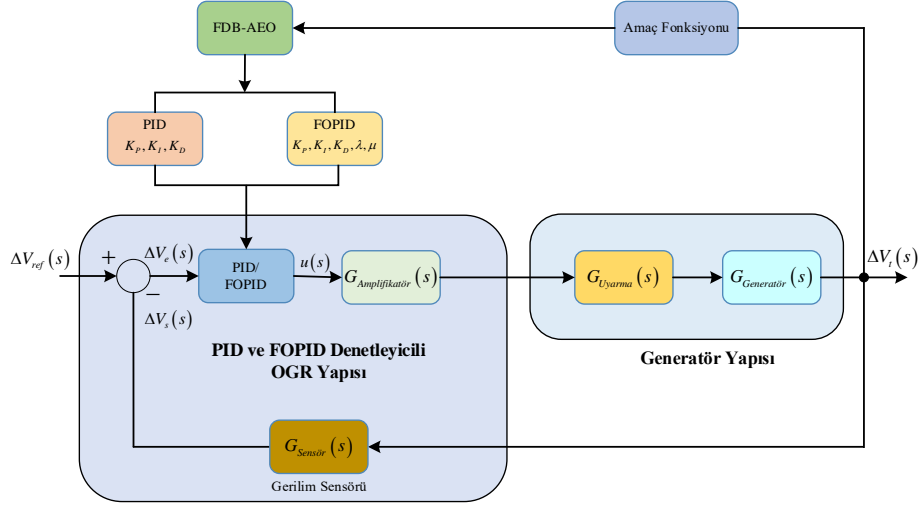
FOPID denetleyicisinin  $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$ ,  $\lambda$  ve  $\mu$  olmak üzere 5 adet kontrol parametresi bulunmaktadır. PID denetleyicisinden farklı olarak sahip olduğu iki kesir derecesi parametresi nedeniyle tasarımı daha zordur. Bu 5 parametre optimizasyon metodları ile belirlenerek tasarımı gerçekleştirilir. FOPID denetleyicisinin transfer fonksiyonu Denklem 8'de verilmiştir.

$$G_{FOPID}(s) = K_P + \frac{K_I}{s^\lambda} + K_D s^\mu \quad (8)$$

Burada; PID denetleyicisinden farklı olarak;  $\lambda$  ve  $\mu$  kesir derecelerdir. FOPID denetleyicili OGR sisteminin transfer fonksiyonu Denklem 9'da verilmiştir [42].

$$G_{OGR-FOPID}(s) = \frac{0.1K_D s^{\lambda+\mu+1} + 10K_D s^{\lambda+\mu} + 0.1K_P s^{\lambda+1} + 10K_P s^{\lambda} + 0.1K_I s + 10K_I}{0.0004s^{\lambda+4} + 0.0454s^{\lambda+3} + 0.555s^{\lambda+2} + 1.51s^{\lambda+1} + 10K_D s^{\lambda+\mu} + (10K_P + 1)s^{\lambda} + 10K_I} \quad (9)$$

Kontrol parametreleri FDB-AEO algoritması ile belirlenen PID ve FOPID denetleyicili OGR sisteminin kapalı çevrim transfer fonksiyonu blok diyagramı Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Kontrol parametreleri FDB-AEO algoritması ile ayarlanan PID ve FOPID denetleyicili OGR sisteminin blok diyagramı.

Şekil 2’de gösterilen PID ve FOPID denetleyicili OGR sisteminin kontrol parametreleri FDB-AEO algoritması ile belirlenerek sistemin çıkış yanıtı  $\Delta V_t(s)$  elde edilir. Elde edilen çıkış yanıtının ideal çıkış yanıtı olan  $\Delta V_{ref}(s)$  ile karşılaştırılması ile hata fonksiyonu elde edilir. Hata fonksiyonunun küçüklüğü kontrol edilen sistemin referans modele yakınlığı ile ilişkilidir. Ancak algoritmanın adım yanıtı açısından da sistemin performansını değerlendirmesi gerekmektedir. Bu nedenle Şekil 2’de gösterildiği gibi her bir döngüde algoritma sistemin çıkış yanıtından yola çıkarak amaç fonksiyonunu hesaplar. Sonlandırma kriteri sağlanana kadar bu amaç fonksiyonunun en düşük değerini elde etmeye çalışır. En küçük amaç fonksiyonunun elde edilmesini sağlayan kontrol parametreleri denetleyicilerin kontrol parametresi olarak belirlenmiş olur.

### 2.3. Amaç Fonksiyonu

OGR sisteminde kullanılan denetleyici parametrelerini belirleyen FDB-AEO algoritması da tüm metasezgisel optimizasyon algoritmalarında olduğu gibi bu işlemi senkron generatör terminal geriliminin yükselme zamanı, yerleşme zamanı ve en büyük yüzde aşım değerlerini değerlendirerek yapmaktadır. Bu nedenle minimizasyonu yapılacak olan amaç fonksiyonunun seçimi en uygun çözüm adayına ulaşmak için önemli bir konudur. Literatürde en çok kullanılan amaç fonksiyonlarından olan IAE, ISE, ITAE ve ITSE Denklem 10-13 arasında verilmiştir.

$$IAE = \int_0^t |e(t)| dt \quad (10)$$

$$ISE = \int_0^t |e^2(t)| dt \quad (11)$$

$$ITAE = \int_0^t t |e(t)| dt \quad (12)$$

$$ITSE = \int_0^t t |e^2(t)| dt \quad (13)$$

Burada; t, simülasyon zamanını ve e(t), t zamanında kalıcı durum hatasını ifade etmektedir. Amaç fonksiyonu seçiminin algoritma performansına etkisi araştırmacıları yeni amaç fonksiyonları belirleme konusundaki çalışmaları yapmaya itmiştir. Bu bağlamda Denklem 14’ de verilen amaç fonksiyonunun [34], OGR sistemi tasarımı için oldukça iyi performans sergilediği görülmüştür.

$$AF = W_1.OS + W_2.t_s + W_3.ITAE + W_4.ITSE \quad (14)$$

Burada; OS, en büyük yüzde aşım ve  $t_s$ , yerleşme zamanınıyken,  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_3$  ve  $W_4$  amaç fonksiyonunda kullanılan bileşenlerin ağırlıklarını ifade eden katsayılarıdır. Bu ağırlık katsayıları sırasıyla 2, 2, 5 ve 5 olarak seçilmiştir.

### 3. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

Bu çalışmada PID ve FOPID denetleyicili OGR sistemi tasarımı; Intel Core i7-11370H işlemcili, 3.30GHz CPU ve 64 GB RAM'e sahip bilgisayar ile Matlab 2022a ortamında gerçekleştirilmiştir. FDB algoritmasının ayar parametreleri, ekosistem boyutu: 50 ve amaç fonksiyonu değerlendirme sayısı 200 olarak belirlenmiştir. FDB-AEO algoritması, Denklem 14'de verilen amaç fonksiyonu ile PID ve FOPID denetleyici parametrelerini Tablo 2'de belirtilen sınırlarda aramıştır.

**Tablo 2.** Belirlenen kontrol parametresi sınırları.

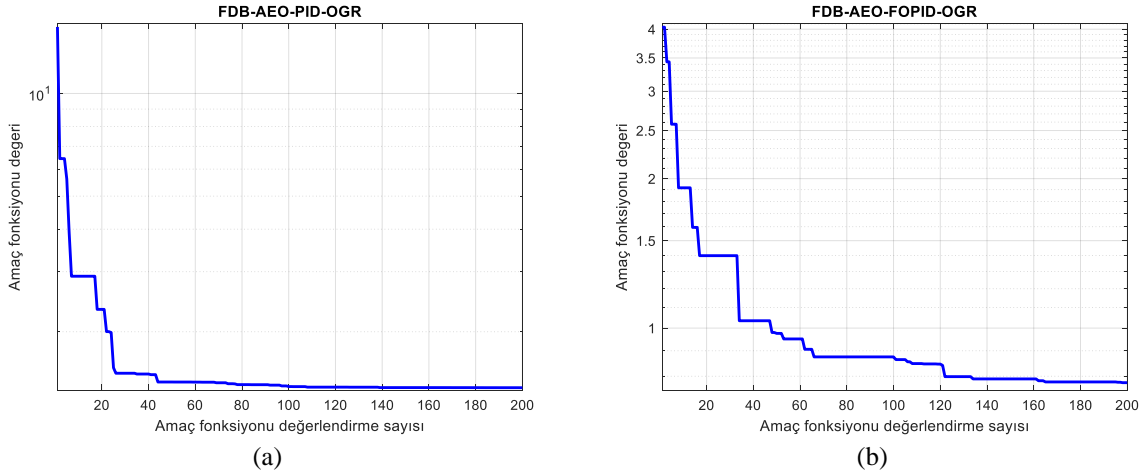
Denetleyici	Kontrol Parametreleri				
	$K_P$	$K_I$	$K_D$	$\lambda$	$\mu$
PID	[0, 2]	[0, 2]	[0, 2]	-	-
FOPID	[0.2, 2]	[0.2, 2]	[0.2, 2]	[1, 2]	[1, 2]

Her bir denetleyici için arama 20 döngü boyunca yapılmıştır. Bu 20 döngüde AF'nin en düşük değerini veren kontrol parametreleri denetleyicilerin kontrol parametresi olarak belirlenmiştir. Denetleyiciler için belirlenen kontrol parametreleri Tablo 3'de verilmiştir.

**Tablo 3.** FDB-AEO algoritmasının belirlediği kontrol parametreleri.

Denetleyici	Kontrol Parametreleri				
	$K_P$	$K_I$	$K_D$	$\lambda$	$\mu$
PID	0.5959	0.4024	0.1967	-	-
FOPID	1.4385	0.6061	0.3023	1.1077	1.2271

En iyi döngülerde AF'nin bulunduğu değer, PID denetleyicisi için 1.3708 iken FOPID denetleyicisi için 0.76106'dır. En iyi döngüde elde edilen yakınsama eğrileri Şekil 3'de verilmiştir.



**Şekil 3.** Amaç Fonksiyonu (AF)'nin yakınsama eğrileri; (a) PID, (b) FOPID.

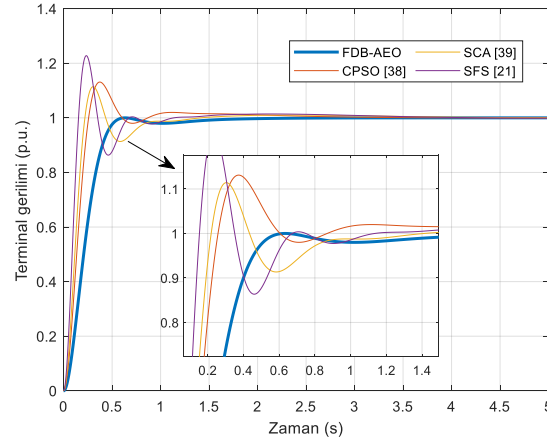
AF'nin 20 döngüde bulunan en düşük değeri, en büyük değeri, ortalama değeri ve standart sapması Tablo 4'de verilmiştir.

**Tablo 4.** AF'nin 20 döngü boyunca elde edilen değerleri.

Önerilen Yaklaşım	En düşük	En büyük	Ortalama	Standart sapma
FDB-AEO-PID	1.3708	0.3711	1.3709	0.00011234
FDB-AEO-FOPID	0.76106	0.78241	0.77386	0.0059817

#### 3.1. Adım Yanıtı

FDB-AEO algoritması ile tasarımı yapılan PID-OGR sisteminin adım yanıtı Şekil 4'de ve bu adım yanıtı ile elde edilen veriler Tablo 5'de verilmiştir.

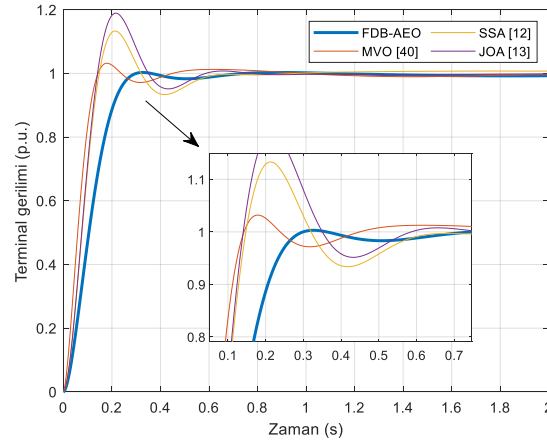


Şekil 4. FDB-AEO algoritması ile tasarımı yapılan PID-OGR sisteminin adım yanıtı.

Tablo 5. FDB-AEO algoritması ile tasarımı yapılan PID-OGR sisteminin adım yanıtı sonuçları.

Algoritma	Tr (0.1 → 0.9)	Ts ( $\pm 2\%$ )	OS%
<b>FDB-AEO (Önerilen yaklaşım)</b>	0.3279	0.5098	0.0039
CPSO [38]	0.1743	0.5640	13.1100
SCA [39]	0.1481	0.8415	11.4244
SFS [21]	0.1030	0.5840	22.8000

Adım yanıtı sonuçlarına göre FDB-AEO algoritması ile tasarımı yapılan PID-OGR sisteminin 0.5098 saniye yerleşme zamanı ve %0.0039 maksimum yüzde aşım değerlerinin literatürde daha önce önerilen çalışmalara göre daha iyi olduğu görülmektedir. 0.3279 saniye yükselme zamanı ile bu çalışmada önerilen yaklaşımın diğer çalışmaların gerisinde kaldığı görülse de bu durum maksimum yüzde aşım değerinde gösterdiği üstün performanstan dolayı kabul edilebilir. Çünkü güç sistemlerinde kullanılan cihazlar nominal gerilimlerinde çalışmak için tasarlanmışlardır. Literatürde daha önce yapılan çalışmalarda yükselme zamanının düşük olmasının etkisi maksimum yüzde aşım değerinin yüksek olmasına neden olmuştur. Bu durum güç sistemlerinde kullanılan cihazlar için olumsuz etki oluşturabilir. FDB-AEO algoritması ile tasarımı yapılan FOPID-OGR sisteminin adım yanıtı Şekil 5'de ve bu adım yanıtı ile elde edilen veriler Tablo 6'da verilmiştir.



Şekil 5. FDB-AEO algoritması ile tasarımı yapılan FOPID-OGR sisteminin adım yanıtı.

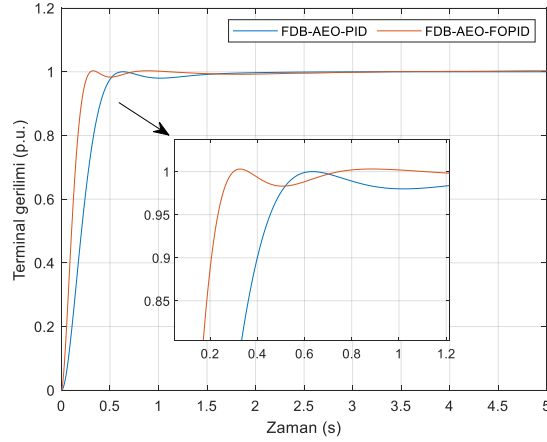
Tablo 6. FDB-AEO algoritması ile tasarımı yapılan FOPID-OGR sisteminin adım yanıtı sonuçları.

Algoritma	Tr (0.1 → 0.9)	Ts ( $\pm 2\%$ )	OS%
<b>FDB-AEO (Önerilen yaklaşım)</b>	0.1726	0.2627	0.1072
MVO [40]	0.1075	0.3493	1.0295
SSA [12]	0.0981	0.551	15.5
JOA [13]	0.0827	0.453	13.2

Adım yanıtı sonuçlarından FDB-AEO algoritması ile tasarımı yapılan FOPID-OGR sisteminin 0.2627 ile yerleşme zamanının ve %0.1072 ile en büyük yüzde aşım değerinin literatürde önerilen yaklaşımlara göre daha iyi olduğu görülmektedir. Yükselme zamanı açısından MVO [40], SSA [12] ve JOA [13] algoritmalarının sırasıyla 0.1075, 0.0981 ve 0.0827 ile daha iyi sonuç vermesine rağmen en büyük yüzde aşım değerlerinin yüksek olması ve



yerleşme zamanlarının da sırasıyla 0.3493, 0.551 ve 0.453 ile FDB-AEO algoritması ile tasarlanan sistemin gerisinde kalması FDB-AEO algoritmasının üstün performansını göstermektedir. Denetleyici modelleri arasında karşılaştırma yapmak amacıyla tasarımı yapılan ve diğer çalışmalara göre üstün performansları gösterilen PID ve FOPID denetleyicili OGR sistemlerinin adım yanıtları tek bir görsel halinde Şekil 6'da gösterilmiştir. Adım yanıt sonuçları ise Tablo 7'de verilmiştir.



Şekil 6. Tasarımı yapılan PID ve FOPID denetleyicili OGR sistemlerinin adım yanıtları.

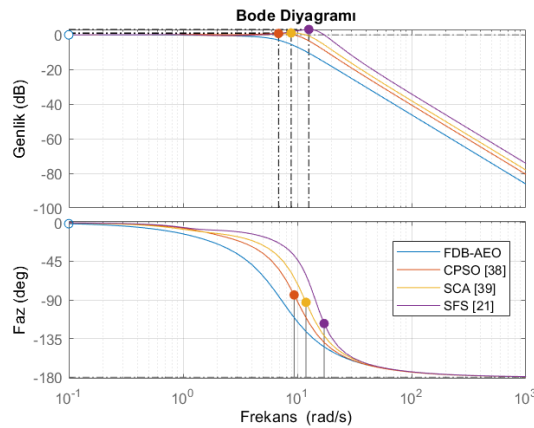
Tablo 7. Tasarımı yapılan PID ve FOPID denetleyicili OGR sistemlerinin adım yanıtı sonuçları

Önerilen yöntem	Tr (0.1 → 0.9)	Ts ( $\pm 2\%$ )	OS%
FDB-AEO-PID	0.3279	0.5098	0.0039
FDP-AEO-FOPID	0.1726	0.2627	0.1072

FDB-AEO algoritması ile tasarımı yapılan PID ve FOPID denetleyicili OGR sistemlerinin adım yanıtı sonuçlarına göre; FOPID denetleyicili OGR sisteminin, 0.1726 saniye yükselme zamanı ve 0.2627 saniye yerleşme zamanı ile PID denetleyicili sisteme göre üstün olduğu görülmektedir. En büyük yüzde aşım konusunda %0.1072 ile kötü bir performans sergilemeyen FOPID denetleyicili sistemin senkron generatörler ile birlikte kullanılmasının uygun olacağı görülmektedir.

### 3.2. Bode Analizi

FDB-AEO algoritması ile tasarımı yapılan PID-OGR sisteminin bode diyagramı Şekil 7'de ve frekans yanıtı Tablo 8'de verilmiştir.



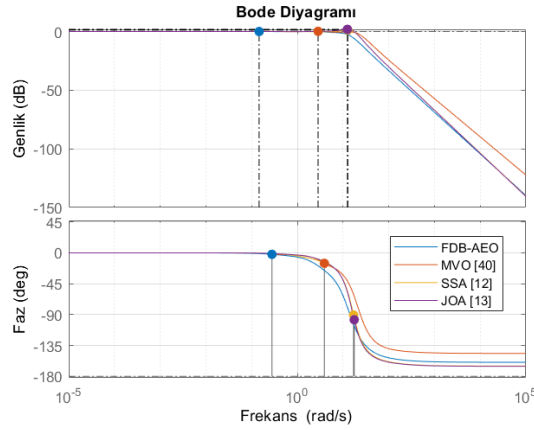
Şekil 7. FDB-AEO algoritması ile tasarımı yapılan PID-OGR sisteminin bode diyagramı.

Bode analizi ile tasarlanan sistemin frekans yanıtı elde edilerek kararlılık düzeyi yorumlanmış olur. Bode diyagramlarından sistemin tepe kazancı (dB), faz marjı (derece), gecikme marjı (s) ve bant genişliği elde edilir. Tepe kazancı genlik grafiğinin en büyük değerini, faz marjı, kararsızlık oluşmadan yaşanabilecek en büyük faz kaymasını ve gecikme marjı, kararsızlık durumunun atlatılabilmesi için sistemin kaldırabileceği en büyük gecikme süresini ifade eder. Bant genişliği ise sistemin yükselme zamanı ile ilişkilidir. Bant genişliğinin yüksek olması daha düşük sürelerdeki yükselme zamanını temsil eder.

**Tablo 8.** FDB-AEO algoritması ile tasarımı yapılan PID-OGR sistemlerinin frekans yanıtı sonuçları.

Algoritma	Tepe kazancı (dB)	Faz marjı (derece)	Gecikme marjı (s)	Bant genişliği (rad/s)
<b>FDB-AEO (Önerilen yaklaşım)</b>	$-1.93 \times 10^{-14}$ (at $2.03 \times 10^{-17}$ rad/s)	-180 (at 0 rad/s)	sonsuz	6.7800
CPSO [38]	0.789 (at 6.85 rad/s)	95.8 (at 9.38 rad/s)	0.178	12.2672
SCA [39]	1.09 (at 9.17 rad/s)	87.3 (at 11.9 rad/s)	0.128	14.8214
SFS [21]	3.11 (at 12.6 rad/s)	62.4 (at 17.2 rad/s)	0.0634	19.8210

FDB-AEO algoritması ile tasarlanan PID denetleyicisi,  $-1.93 \times 10^{-14}$  dB ile en düşük tepe kazancına, -180 derece ile en iyi faz marjına ve sonsuz gecikme marjı ile en iyi gecikme marjına sahiptir. 0.3279 yükselme zamanı ile diğer algoritmalarla tasarlanan sistemlerin gerisinde kalması bant genişliğine de yansımıştır. Ancak adım yanıtı sonuçlarında da belirtildiği gibi bu durum en büyük yüzde aşım değerindeki üstün performans dikkate alındığında kabul edilebilir. FDB-AEO algoritması ile tasarımı yapılan FOPID-OGR sisteminin bode diyagramı Şekil 8’de ve frekans yanıtı Tablo 9’da verilmiştir.

**Şekil 8.** FDB-AEO algoritması ile tasarımı yapılan FOPID-OGR sisteminin bode diyagramı.**Tablo 9.** FDB-AEO algoritması ile tasarımı yapılan FOPID-OGR sistemlerinin frekans yanıtı sonuçları.

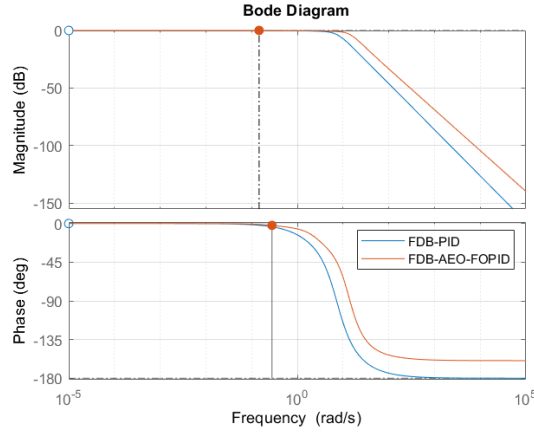
Algoritma	Tepe kazancı (dB)	Faz marjı (derece)	Gecikme marjı (s)	Bant genişliği (rad/s)
<b>FDB-AEO (Önerilen yaklaşım)</b>	0.0168 (at 0.146 rad/s)	178 (at 0.279 rad/s)	11.1	13.3
MVO-FOPID [40]	0.161 (at 2.85 rad/s)	165 (at 3.91 rad/s)	0.735	24.1
SSA-FOPID [12]	1.31 (at 12.8 rad/s)	89.3 (at 17 rad/s)	0.0914	21.2
JOA-FOPID [13]	1.88 (at 12.5 rad/s)	82.5 (at 17.5 rad/s)	0.082	21.3

FDB-AEO algoritması ile tasarımı yapılan FOPID-OGR sistemi 0.0168 dB ile en düşük tepe kazancına, 178 derece ile en büyük faz marjına, 11.1 saniye ile en büyük gecikme marjına ve 13.3 rad/s ile en düşük bant genişliğine sahiptir. Bu durum tasarımı yapılan FOPID-OGR sisteminin kıyaslama yapılan sistemler arasında kararlılık durumunda yaşanabilecek faz kayması açısından ve kararlılığı kaldırılması için sistemin kaldırabileceği en büyük gecikme süresi açısından en iyi durumda olduğunu göstermektedir. Bant genişliğinin düşük olması, yükselme zamanının diğer sistemlere göre daha büyük olduğunu göstermektedir. Bu durum en büyük yüzde aşım ve yerleşme zamanı açısından tasarlanan sistemin üstünlüğü düşünüldüğünde kabul edilebilir. Tasarımı yapılan ve diğer çalışmalara göre üstün performansları gösterilen PID ve FOPID denetleyicili OGR sistemlerinin bode diyagramları Şekil 9’da gösterilmiştir. Frekans yanıtı sonuçları ise Tablo 10’da verilmiştir.

Tasarlanan sistemlerin kararlılık düzeylerini gösteren frekans yanıtları incelendiğinde PID-OGR sisteminin  $-1.93 \times 10^{-14}$  dB ile tepe kazancı, -180 derece ile faz marjı ve sahip olduğu sonsuz gecikme marjı ile FOPID-OGR sistemine göre daha üstün olduğu görülmektedir. Ancak FOPID-OGR sisteminin kararlılık düzeyi, literatürde önerilen diğer çalışmaların durumları da göz önüne alındığında oldukça iyi durumdadır. FOPID-OGR sisteminin adım yanıtı sonuçları bakımından PID-OGR sistemine göre üstün olduğu da düşünüldüğünde senkron generatörlerde kullanılmasının uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

**Tablo 10.** Tasarımı yapılan PID ve FOPID denetleyicili OGR sistemlerinin frekans yanıtları.

Önerilen yöntem	Tepe kazancı (dB)	Faz marjı (derece)	Gecikme marjı (s)	Bant genişliği (rad/s)
FDB-AEO-PID	$-1.93 \times 10^{-14}$ (at $2.03 \times 10^{-17}$ rad/s)	-180 (at 0 rad/s)	sonsuz	6.7800
FDB-AEO-FOPID	0.0168 (at 0.146 rad/s)	178 (at 0.279 rad/s)	11.1	13.3



Şekil 9. Tasarımı yapılan PID ve FOPID denetleyicili OGR sistemlerinin bode diyagramları.

#### 4. SONUÇ

Senkron generatörlerin terminal gerilimlerinde meydana gelen gerilim dalgalanmalarının önüne geçmek için senkron generatörler OGR sistemleri ile birlikte kullanılmaktadır. Bu çalışmada OGR sistemlerinde kullanılan denetleyici modellerinden olan PID ve FOPID denetleyicilerinin tasarımı FDB-AEO algoritması kullanılarak yapılmıştır. Tasarlanan denetleyicilerin performansı literatürde önerilen diğer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir;

- FDB-AEO algoritması ilk kez OGR sistemi tasarımı için kullanılmıştır. Algoritmanın gösterdiği üstün performans OGR sistemi tasarımı için kullanıma uygun olduğunu gösterdiği gibi diğer mühendislik problemlerinin çözümü için de kullanıma değer olduğunu göstermiştir.
- FDB-AEO algoritması ile tasarımı yapılan PID-OGR sistemi; CPSO [38], SCA [39] ve SFS [21] algoritmaları ile tasarımı yapılan PID-OGR sistemleri ile adım yanıtı ve frekans yanıtı açısından karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda FDB-AEO algoritması ile tasarımı yapılan sistemin diğer sistemlere göre üstün olduğu görülmüştür.
- FDB-AEO algoritması ile tasarımı yapılan FOPID-OGR sistemi; MVO [40], SSA [12] ve JOA [13] algoritmaları ile tasarımı yapılan FOPID-OGR sistemleri ile adım yanıtı ve frekans yanıtı açısından karşılaştırılmıştır. FDB-AEO algoritması ile tasarımı yapılan sistemin karşılaştırılan sistemlerden üstün olduğu görülmüştür.
- Tasarımı yapılan PID ve FOPID denetleyicilerinin performansı birbirleri ile de karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda adım yanıtı açısından FOPID, frekans yanıtı açısından PID denetleyicisinin performansı daha iyi bulunmuştur. FDB-AEO algoritması ile tasarımı yapılan FOPID denetleyicisinin frekans yanıtı benzer çalışmalardan daha iyi olduğu için adım yanıtında gösterdiği üstün performans da göz önüne alındığında OGR sistemlerinde kullanılmasının uygun olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

#### Yazar Katkıları

Yazarlar eşit oranda katkı sağlamıştır.

#### Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

#### KAYNAKÇA

- [1] S. Habib, G. Abbas, T.A. Jumani, A.A. Bhutto, S. Mirsaeidi, and E.M. Ahmed "Improved whale optimization algorithm for transient response, robustness, and stability enhancement of an automatic voltage regulator system," *Energies*, vol. 15, no. 14, 5037, 2022.
- [2] B. Ozgenc, M.S. Ayas, and I.H. Altas "Performance improvement of an AVR system by symbiotic organism search algorithm-based PID-F controller," *Neural Computing and Applications*, vol. 34, pp. 7899-7908, 2022.
- [3] A. Sikander, and P. Thakur "A new control design strategy for automatic voltage regulator in power system," *ISA transactions*, vol. 100, pp. 235-243, 2020.
- [4] M. Çalasan, M. Micev, Ž. Djurovic, and H.M.A. Mageed "Artificial ecosystem-based optimization for optimal tuning of robust PID controllers in AVR systems with limited value of excitation voltage," *The International Journal of Electrical Engineering and Education*, 2020.
- [5] A.K. Bhullar, R. Kaur, and S. Sondhi "Enhanced crow search algorithm for AVR optimization. *Soft Computing*," *Soft Computing*, vol. 24, pp. 11957-11987, 2020.

- [6] P. Govindan "Evolutionary algorithms-based tuning of PID controller for an AVR system," *International Journal of Electrical & Computer Engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 3047-3056, 2020.
- [7] E. Köse "Optimal control of AVR system with tree seed algorithm-based PID controller," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 89457-89467, 2020.
- [8] N. Pachauri "Water cycle algorithm-based PID controller for AVR," *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, vol. 39, no. 3, pp. 551-567, 2020.
- [9] M. Micev, M. Čalasan, and D. Oliva "Design and robustness analysis of an Automatic Voltage Regulator system controller by using Equilibrium Optimizer algorithm," *Computers and Electrical Engineering*, vol. 89, p. 106930, 2021.
- [10] A. Sikander, P. Thakur, R.C. Bansal, and S. Rajasekar "A novel technique to design cuckoo search based FOPID controller for AVR in power systems," *Computers and Electrical Engineering*, vol. 70, pp. 261-274, 2018.
- [11] B. Bourouba, S. Ladaci, and H. Schulte "Optimal design of fractional order  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  controller for an AVR system using Ant Lion Optimizer," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 13, 200205, 2019.
- [12] I.A. Khan, A.S. Alghamdi, T.A. Jumani, A. Alamgir, A.B. Awan, and A. Khidrani "Salp swarm optimization algorithm-based fractional order PID controller for dynamic response and stability enhancement of an automatic voltage regulator system, vol. 8, no. 12, pp. 1472, 2019.
- [13] T.A. Jumani, M.W. Mustafa, Z. Hussain, M.M. Rasid, M.S. Saeed, M.M. Memon, I. Khan, and K.S. Nisar "Jaya optimization algorithm for transient response and stability enhancement of a fractional-order PID based automatic voltage regulator system," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 59, no. 4, pp. 2429-2440, 2020.
- [14] S.M.A. Altbawi, A.S.B. Mokhtar, T.A. Jumani, I. Khan, N.N. Hamadneh, and A. Khan "Optimal design of Fractional order PID controller based Automatic voltage regulator system using gradient-based optimization algorithm", *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 2021.
- [15] V.K. Munagala, and R.K. Jatoth "Improved fractional  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  controller for AVR system using Chaotic Black Widow algorithm," *Computers and Electrical Engineering*, vol. 97, p. 107600, 2022.
- [16] J.G. Ziegler, and N.B. Nichols "Optimum settings for automatic controllers," *Transactions of the American society of mechanical engineers*, vol. 64, no. 8, pp. 759-765, 1942.
- [17] C.C. Hang, B. K.J. Åström, and W.K. Ho "Refinements of the Ziegler–Nichols tuning formula," *In IEE Proceedings D (Control Theory and Applications)*, vol. 138, no. 2, pp. 111-118, 1991.
- [18] Q.G. Wang, T.H. Lee, H.W. Fung, Q. Bi, and Y. Zhang "PID tuning for improved performance," *IEEE Transactions on control systems technology*, vol. 7, no. 4, pp. 457-465, 1999.
- [19] M.A. Sabib, and B.S. Ahmed "A new multiobjective performance criterion used in PID tuning optimization algorithms," *Journal of advanced research*, vol. 7, no. 1, pp. 125-134, 2016.
- [20] H. Rezaei, O. Bozorg-Haddad, and X. Chu "Grey wolf optimization (GWO) algorithm," *Advanced optimization by nature-inspired algorithms*, pp. 81-91, 2018.
- [21] E. Çelik "Incorporation of stochastic fractal search algorithm into efficient design of PID controller for an automatic voltage regulator system," *Neural Computing and Applications*, vol. 30, pp. 1991-2002, 2018.
- [22] B. Ozgenc, M.S. Ayas, and I.H. Altas "Performance improvement of an AVR system by symbiotic organism search algorithm-based PID-F controller," *Neural Computing and Applications*, vol. 34, pp. 7899-7908, 2022.
- [23] W. Zhao, L. Wang, and Z. Zhang "Artificial ecosystem-based optimization: a novel nature-inspired meta-heuristic algorithm," *Neural Computing and Applications*, vol. 32, pp. 9383-9425, 2020.
- [24] M.S. Ayas, and E. Sahin "FOPID controller with fractional filter for an automatic voltage regulator," *Computers and Electrical Engineering*, vol. 90, p. 106895, 2021.
- [25] R. Pradhan, S.K. Majhi, and B.B. Pati "Design of PID controller for automatic voltage regulator system using Ant Lion Optimizer," *World Journal of Engineering*, vol.15, no.3, pp. 373-387, 2018.
- [26] A.M. Mosaad, M.A. Attia, and A.Y. Abdelaziz "Comparative performance analysis of AVR controllers using modern optimization techniques," *Electric Power Components and Systems*, vol. 46, no. 19-20, pp. 2117-2130, 2018.
- [27] A.G. Suri babu, B.T. Chiranjeevi "Implementation of fractional order PID controller for an AVR system using GA and ACO optimization techniques," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 1, pp. 456-461, 2016.
- [28] Y. Zhou, J. Zhang, X. Yang, and Y. Ling "Optimization of PID controller based on water wave optimization for an automatic voltage regulator system," *Information Technology and Control*, vol. 48, no. 1, pp. 160-171, 2019.
- [29] I.A. Khan, A.S. Alghamdi, T.A. Jumani, A. Alamgir, A.B. Awan, and A. Khidrani "Salp swarm optimization algorithm-based fractional order PID controller for dynamic response and stability enhancement of an automatic voltage regulator system," *Electronics*, vol. 8, no. 12, pp. 1472, 2019.
- [30] I. Eke, M. Saka, H. Gozde, Y. Arya, and M.C. Toplamacioglu "Heuristic optimization based dynamic weighted state feedback approach for 2DOF PI-controller in automatic voltage regulator," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 24, no. 4, pp. 899-910, 2021.
- [31] S. Ekinci, A. Demirören, H.L. Zeynelgil, and, S. Kaya "Design of PID controller for automatic voltage regulator system through kidney-inspired algorithm," *GU J Sci, Part C*, vol. 7, no. 2, pp. 383-398, 2019.

- [32] E. Çelik, and R. Durgut “Performance enhancement of automatic voltage regulator by modified cost function and symbiotic organisms search algorithm,” *Engineering science and technology, an international journal*, vol. 21, no. 5, pp. 1104-1111, 2018.
- [33] M.S. Ayas “Design of an optimized fractional high-order differential feedback controller for an AVR system,” *Electrical Engineering*, vol. 101, pp. 1221-1233, 2019.
- [34] V. Rajinikanth, and S.C. Satapathy “Design of controller for automatic voltage regulator using teaching learning based optimization,” *Procedia Technology*, vol. 21, pp. 295-302, 2015.
- [35] H.T. Kahraman, S. Aras, and E. Gedikli “Fitness-distance balance (FDB): a new selection method for meta-heuristic search algorithms,” *Knowledge-Based Systems*, vol. 190, 105169, 2020.
- [36] S. Aras, E. Gedikli, and H.T. Kahraman “A novel stochastic fractal search algorithm with fitness-distance balance for global numerical optimization,” *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 61, 100821, 2021.
- [37] Y. Sonmez, S. Duman, H.T. Kahraman, M. Kati, S. Aras, and U. Guvenc “Fitness-distance balance based artificial ecosystem optimisation to solve transient stability constrained optimal power flow problem,” *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, 2022.
- [38] N. Anwar, A. Hanif, M.U. Ali, and A. Zafar “Chaotic-based particle swarm optimization algorithm for optimal PID tuning in automatic voltage regulator systems,” *Electrical Engineering & Electromechanics*, vol. 1, pp. 50-59, 2021.
- [39] B. Hekimoğlu “Sine-cosine algorithm-based optimization for automatic voltage regulator system,” *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 41, no. 6, pp. 1761-1771, 2019.
- [40] A. Tabak “Maiden application of fractional order PID plus second order derivative controller in automatic voltage regulator,” *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 12, e13211, 2021.
- [41] S. Panda, B.K. Sahu, and P.K. Mohanty “Design and performance analysis of PID controller for an automatic voltage regulator system using simplified particle swarm optimization,” *Journal of the Franklin Institute*, vol. 349, no. 8, pp. 2609-2625, 2012.
- [42] A. Tabak “A novel fractional order PID plus derivative ( $PI^{\lambda}D^{\mu}D^{\mu^2}$ ) controller for AVR system using equilibrium optimize,” *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, vol. 40, no. 3, pp. 722-743, 2021.



## Domates Yapraklarında Hastalık Tespiti İçin Transfer Öğrenme Metotlarının Kullanılması

### Use of Transfer Learning Methods for Disease Detection in Tomato Leaves

<sup>1</sup>Serhat KILIÇARSLAN , <sup>2</sup>İshak PAÇAL 

<sup>1</sup>Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bandırma/Balıkesir, Türkiye

<sup>2</sup>Iğdır Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Merkez, Iğdır/Türkiye

<sup>1</sup>skilicarslan@bandirma.edu.tr, <sup>2</sup>ishak.pacal@igdir.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 30 March 2023

Accepted : 15 May 2023

##### Keywords:

Tomato leaf disease detection, Plant disease detection, Leaf classification, Transfer learning

#### ABSTRACT

Tomato consumption per capita worldwide is in the first place with approximately 20 kg per year. For this reason, the detection of diseases that may occur in tomato production is of great importance for producers. Since most of the diseases are based on tomato leaves, a healthy tomato leaf will increase the productivity of the products to be obtained and, as a result, a high harvest. Therefore, early and rapid detection of diseases that may occur in tomato leaves is of great importance in tomato production. In this study, DenseNet, ResNet50 and MobileNet architectures were used to detect diseases in tomato leaves. In order to compare the experimental results, an evaluation was made by considering the error, accuracy, precision, f1-score and sensitivity criteria. In the experimental results, the best performance was achieved with the DenseNet model, and 0.0269 error, 0.9900 accuracy, 0.9880 precision, 0.9892 f1-score and 0.9906 sensitivity results were obtained, respectively. According to the experimental results, deep learning models have been shown to offer high performance and reliability in the classification of tomato leaf diseases.

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 30 Mart 2023

Kabul : 15 Mayıs 2023

##### Anahtar Kelimeler:

Domates yaprağı hastalığı tespiti, Bitki hastalık tespiti, Yaprak Sınıflandırma, Transfer öğrenme

#### ÖZET

Dünya genelinde kişi başı domates tüketimi, yılda yaklaşık olarak 20 kg ile ilk sıralarda yer almaktadır. Bu nedenle domates üretiminde oluşabilecek hastalıkların tespiti üreticiler için büyük önem arz etmektedir. Hastalıkların çoğu domates yaprağı temelli olduğu için, domates yaprağının sağlıklı olması, elde edilecek ürünlerindeki verimliliğinin artması ve sonuç olarak yüksek bir hasat getirir. Bu yüzden domates yaprağında oluşabilecek hastalıkların erken ve hızlı şekilde tespit edilmesi, domates üretiminde büyük bir önem arz etmektedir. Bu çalışmada, domates yaprağında meydana gelen hastalıkları tespit edebilmek için DenseNet, ResNet50 ve MobileNet mimarileri kullanılmıştır. Deneysel sonuçların karşılaştırılması için hata, doğruluk, kesinlik, f1-skor ve duyarlılık metrikleri dikkate alınarak değerlendirme yapılmıştır. Deneysel sonuçlarda en iyi performans DenseNet modeli ile sağlanmış ve sırasıyla 0.0269 hata, 0.9900 doğruluk, 0.9880 kesinlik, 0.9892 f1-skor ve 0.9906 duyarlılık sonuçları elde edilmiştir. Deneysel sonuçlara göre derin öğrenme modelleri domates yaprağı hastalıklarının sınıflandırılmasında yüksek bir başarı ve güvenilirlik sunduğu görülmüştür.

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

## 1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun hızla artması ve kentleşmeden kaynaklı olarak, tarım alanlarının ve kişi başına düşen su gibi doğal kaynakların azalmaktadır. Bu nedenle tarımsal üretimde verimliliği artırmak için teknolojik ve genetik yöntemlerin kullanılması zorunlu hale gelmiştir. Domates, yılda kişi başına yaklaşık olarak 20 kg tüketimi ile toplam sebze tüketiminin yaklaşık %20'sini temsil etmektedir. Domates üretimi dünya genelinde Türkiye, Mısır, Çin gibi domates üreticilerinde ilk sırada yer alan sebze mahsulüdür [1]. Bitki verimliliğini etkileyen en önemli faktörlerden biri bitki hastalıklarıdır. Punjab ve Sindh'ın gerçekleştirdikleri araştırmalarda, domates yaprağının hastalanması sonucunda %30-%40 arasında bir ürün kaybı olduğunu ifade etmişlerdir. Bitki hastalıklarının zamanında tespit edilip önlenememesi, bitki veriminde ve kalitesinde önemli düşüşlere yol açmakta ve yetiştiriciler için önemli ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Bu durum ayrıca, fahiş fiyatlarla domates ithal etme ihtiyacına yol açacaktır. Bu nedenle, bitki hastalık türlerinin hızlı ve doğru bir şekilde belirlenmesi ve hastalık şiddetinin değerlendirilmesi, zamanında önleme ve yönetim stratejilerinin uygulanması için esastır. Böylece ürün hastalıklarının erken tespiti ve kontrolü çiftçiler ve hassas tarım araştırmacıları için üretim kayıplarını azaltmak çok önemli bir süreçtir. Mevcut çiftlik uygulamaları, mikroskop gibi ek kaynaklar ve araçlar kullanan uzmanların desteğiyle çiftlik personeli tarafından bitki hastalıklarının görsel olarak tanımlanmasına dayanmaktadır. Ancak, tarım uzmanları, kapsamlı izleme yapmak için sahada sürekli olarak bulunamaz ve çiftçiler, tespit prosedürünü yürütmek için gereken uzmanlığa sahip değildir. Bundan dolayı, domates yaprağındaki hastalığın tespit edilebilmesi için, literatürde derin öğrenme yöntemleri yaygın şekilde kullanılmaktadır [2], [3].

Günümüzde, domates yaprağındaki hastalığın belirlenip doğru şekilde teşhis edilmesi hem uzun hem de zor bir süreçtir. Ayrıca, göz ile domates yaprağında meydana gelen hastalık türünün tespit edilmesi bu alandaki bilgi ve tecrübeye bağlıdır. Bundan dolayı, çalışmada domates yaprağındaki hastalıkların tespit edilebilmek üzere transfer öğrenme modellerinden DenseNet, ResNet50v2 ve MobileNet kullanılmıştır.

Literatürde, domates yaprağı hastalığının tespit edilmesi üzerine gerçekleştirilen çalışmalarda, YOLO, VGG-16, Faster R-CNN, ResNet, AlexNet, CNN, MobileNet gibi yöntemler kullanılmıştır [4]–[13]. Ayrıca, domateslerde hastalık tanımlaması ile ilgili olarak rengine, dokusuna, yaprakların şekline odaklanılarak sınıflandırılması üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir [14]–[18]. Cengil ve Çıkar'ın yaptıkları çalışmada, Taiwan veri kümesi üzerinden domates yaprağı hastalığının tespiti için, transfer öğrenme modellerinden AlexNet, ResNet50 ve VGG16 kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar doğrultusunda, en iyi başarımın ResNet50 modeli ile 0.9610'luk elde edildiğini bildirmişlerdir [13]. Adhikari ve arkadaşları, PlantVillage veri kümesi üzerinden üç sınıflı domates yaprağı hastalığını tespit edebilmek için YOLO modeli ile 0.7600'lik başarı elde edilmiştir [4]. Tm ve arkadaşları, domates yaprağı hastalığını tespit edebilmek için 18160 adet 2 sınıflı görüntüler üzerinden CNN tabanlı LeNet modeli kullanmışlardır. Deneysel değerlendirme sonucunda LeNet ile 0.9500'lik başarı elde ettiklerini bildirmişlerdir [19]. Mim ve arkadaşları, domates yaprağı hastalığını tespit edebilmek için sekiz katmanlı CNN mimarisi kullanmışlardır. Deneysel değerlendirmede yaklaşık olarak 6000 adet domates yaprağı görüntüsü üzerinden sınıflandırma gerçekleştirilmiş olup, 0.9655'lik başarı oranı elde ettiklerinin bildirmişlerdir [20]. Kushwaha ve Zade tarafından yapılan çalışmada, domates yaprağı hastalığını tespit etmek için 11000 adet 10 sınıflı görüntüler üzerinden hibrit derin öğrenme modeli geliştirmişlerdir. Geliştirilen hibrit derin öğrenme yöntemi ile %85'e yakın başarı elde ettiklerini bildirmişlerdir [21]. Alkaff ve Prasetiyo tarafından yapılan çalışmada, domates yaprağı hastalığını tespit etmek için 11000 adet 10 sınıflı görüntüler üzerinden CNN mimarisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan CNN modelinin Hyberband metodu kullanılarak hiper-parametre optimizasyonu yapıldıktan sonra deneysel değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Deneysel değerlendirme sonucu olarak hiper-parametreleri optimize edilmiş CNN ike %88.50 başarı elde ettiklerini bildirmişlerdir [22]. Peyal ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, Taiwan veri kümesi üzerinden domates yaprağı hastalığının tespiti için, transfer öğrenme modellerinden VGG-16, VGG-19 ve Inception-V3 kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar doğrultusunda, en iyi başarımın Inception-V3 modeli ile %90 başarı elde edildiğini bildirmişlerdir [23]. Önerilen derin öğrenme yöntemlerinin literatürde aynı konuda yapılan çalışmalarla karşılaştırmalı sonuçları Tablo 1'de gösterilmiştir.

Bu çalışmada, bitki verimliliğini etkileyen en önemli faktörlerden biri olan bitki hastalıklarının erken şekilde teşhis edilmesidir. Bitki hastalıklarının zamanında tespit edilip önlenememesi, bitki veriminde ve kalitesinde önemli düşüşlere yol açmakta ve yetiştiriciler için önemli ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Bu doğrultuda, Kaggle platformu üzerinden elde edilen 11000 örnek ve 10 sınıflı veri kümesi üzerinden domates yaprağı hastalık teşhisini için deneysel analizler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, DenseNet, ResNet50v2 ve MobileNet modelleri kullanılarak performansları karşılaştırılmıştır. Analizler sonucunda, DenseNet modelinin diğer yöntemlere göre daha iyi performans sergilediği gözlemlenmektedir. Bu çalışmanın temel motivasyonu, domates yaprağı hastalığının sınıflandırılması için transfer öğrenme yöntemleri kullanılmış olup, hastalığın erken teşhisinde başarılı sonuçlara ulaşmaktır. Çalışmanın ana katkıları;

- Son zamanlarda geliştirilen domates yaprak hastalığının sınıflandırılması ve tanımlanması yaklaşımlarının incelenmesi ve değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir.
- Önerilen çalışmanın sınıflandırma doğruluğunu iyileştirmek için aktivasyon fonksiyonu, epoch sayısı, optimizasyon ve öğrenme oranı gibi hiper-parametrelerin optimizasyonu gerçekleştirilerek deneysel değerlendirmeler yapılmıştır.

- Eğitilen derin öğrenme yöntemleri kullanılarak erken domates yaprağı hastalığının tespiti, hastalıkların zararlı etkilerini azaltabilir ve sürekli insan denetiminin dezavantajlarıyla da başa çıkmamıza olanak tanınması sağlanmıştır.

**Tablo 1.** Domates yaprağı hastalığı ile ilgili literatürün karşılaştırılması.

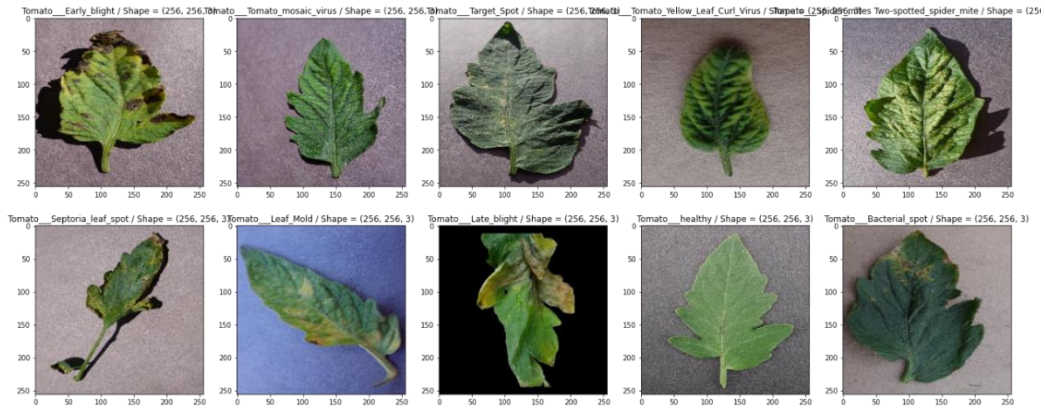
Yayınlar	Yıl	Metot	Doğruluk
[4]	2018	YOLO	0.7600
[5]	2017	VGG16	0.8500
[7]	2018	ResNet	0.9728
[8]	2020	CNN	0.9800
[9]	2020	CNN	0.9120
[10]	2017	AlexNet	0.9565
[11]	2019	MobileNet	0.9030
[20]	2018	CNN	0.9655
[19]	2019	LeNet	0.9500
[21]	2022	Hibrit CNN	0.8800
[22]	2022	CNN	0.8850
[23]	2021	Inception-V3	0.9000

Çalışmanın ikinci bölümünde domates hastalığı veri kümesi ve kullanılan yöntemler verilmiştir. Üçüncü bölümde, deneysel değerlendirme sonuçları ve tartışma verilmiştir. Son bölümde ise sonuçlar ve gelecek çalışmalar sunulmaktadır.

## 2. MATERYAL VE METOD

### 2.1. Domates Yaprığı Hastalığı Veri Kümesi

Domates, dünyanın en önemli meyveleri arasındadır. Domates üretimi dünya genelinde Türkiye, Mısır, Çin gibi domates üreticilerinde ilk sırada yer alan sebze mahsulüdür [1]. Domates, çeşitli mantar, bakteriyel, viral hastalıklardan ciddi şekilde etkilenir ve semptomlar bitkinin farklı kısımlarında yaprak, gövde, meyve gibi alanlarda görülebilir. Bu çalışmada, Kaggle platform üzerinden elde edilen PlantVillage [24], [25] veri kümesi kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan veri kümesi, 11000 örnek ve 9 hastalıklı yaprak sınıfı ve 1 sağlıklı yaprak sınıf bilgisine sahip görüntülerden oluşmaktadır. Şekil 1'de yer alan sınıflar, farklı hastalıklı domates yaprakları örneklerinden bazılarıdır. Böylece, bu verilere dayanarak, Derin Öğrenme modellerinden DenseNet, ResNet50v2 ve MobileNet kullanılarak araştırma yapıldı ve bitki hastalıkları belirlendi.



**Şekil 1.** Sağlıklı ve hastalıklı domates yaprağı görüntüleri.

Şekil 1'de görülen görüntülerde semptomlar solgunluk, çürüklük, meyvelerde lekeler, yapraklarda renk değişikliğinden bodur büyümeye kadar değişiklik gösterir. Çalışmada kullanılan veri kümesi 9000 örnek eğitim, 1000 örnek doğrulama ve 1000 örnek test olarak bölünmüştür. Tablo 2'de, kullanılan veri kümesine ait çeşitli resimlerin ve sınıflarının adlarının kapsamlı bir tasviri gösterilmiştir. Bu görüntüler, verileri eğitmek, test etmek ve doğrulamak için veri kümesinde bulunur.

### 2.2. Derin Öğrenme Yöntemleri

Makine öğreniminin popüler bir alt dalı olan derin öğrenme, büyük veri ve bilgisayar işlem gücü kullanan yapay sinir ağlarına dayalı bir yaklaşımdır. Derin öğrenmenin temelleri geçmişe dayansa da yükselişi son yıllarda olmuştur. Özellikle, bilgisayar dünyasındaki büyük miktardaki veri ve grafik işlem birimlerinin (GPU'lar) artmasıyla birlikte ve buna ek olarak GPU'ların ekonomik bir çizgiye dönmesi ile derin öğrenme yaklaşımları hızlı bir yükseliş trendi yakalamıştır [26]. Derin öğrenmede, matris ve veri işleme birimlerindeki asıl işlemlerin



yürütülmesi GPU'lar sayesinde olur. GPU'lar ise aynı anda birden çok işlemi ve hesaplamayı gerçekleştirme yeteneğine sahiptir. Derin öğrenme yaklaşımları, verileri alırken ve analiz ederken herhangi bir insan müdahalesi gerektirmez. Böylece klasik makine öğrenimi yaklaşımlarından basitçe ayrılırlar. Derin öğrenmenin temelinde yatan en önemli unsurlardan bir tanesi özellik çıkarımını otomatik olarak gerçekleştirerek üst düzey özneliklerin keşfedilmesini sağlar [27]. Böylece gerçek zamanlı işlem yapabilme özelliği ile popüler bir yer edinmiştir. Klasik makine yöntemlerinden olan destek vektör makinesi (DVM), karar ağacı ve lojistik regresyon gibi yapılar basit ve az veri gerektiren problemlere iyi bir çözüm sunar ancak problem karmaşıklığı veya veri arttıkça bu yapılar bir darboğaz yaşarlar ve genelleme yapma yeteneğinden yoksun olurlar. Öte yandan derin öğrenme yaklaşımları, klasik makine öğrenmesi yaklaşımlarının karşılaştığı bu sorunları iyi çözer ve verileri hiyerarşik düzeyde iyi bir şekilde ele alır ve soyutlar. Böylece verileri daha iyi temsil ederler, aynı zamanda güçlü bir genelleme ile yüksek bir uyum sağlama yeteneğine sahiptirler.

**Tablo 2.** Veri kümesine ait kapsamlı özellikleri.

Sınıflar	Eğitim Görüntüleri	Test Görüntüleri	Doğrulama Görüntüleri	Toplam Görüntüler
Tomato Bacterial spot	900	100	100	1100
Tomato Early blight	900	100	100	1100
Tomato Late blight	900	100	100	1100
Tomato Leaf Mold	900	100	100	1100
Tomato Septoria leaf spot	900	100	100	1100
Tomato Spider Mites Two spotted spider mite	900	100	100	1100
Tomato Target Spot	900	100	100	1100
Tomato Yellow Leaf Curl Virus	900	100	100	1100
Tomato mosaic virus	900	100	100	1100
Tomato healthy	900	100	100	1100
<b>Toplam</b>	<b>9000</b>	<b>1000</b>	<b>1000</b>	<b>11000</b>

Derin öğrenme yaklaşımları, verilerin etiketli ve etiketsiz olma duruma göre sınıflandırılır [28]–[34]. Verinin etiketli bir formu varsa o zaman denetimli öğrenme, etiketsiz bir formu olursa o zaman ise denetimsiz öğrenme ve son olarak ise hem etiketli hem de etiketsiz veri kullanılıyorsa yarı denetimli öğrenme diye sınıflandırılır. CNN'ler, RNN'ler ve bunların türetilmiş yapıları, denetimli derin öğrenme ağları kısmını oluşturur. Diğer taraftan ise AE, DBN, RBM gibi derin öğrenme ağları ise denetimsiz öğrenme sınıfında yer alırlar. Ayrıca bu ağların hibrit ve karma form yapıları da kullanılabilir. Ele alınan problemin veri seti, özellikleri ve kısıtları dikkate alınarak çözüm için en uygun derin öğrenme ağı ve modelinin seçilmesi en uygun çözümü sunması beklenmektedir [27], [28], [35], [36].

### 2.3. Sınıflandırma için Modeller

Derin öğrenme mimarileri literatürde yaygın olarak, görüntü işleme, zaman serisi analizi, sınıflandırma gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [28], [29], [37]–[39]. Bu çalışmada, domates hastalıklarını sınıflandırmak için en popüler mimarilerden olan ResNet, MobileNet ve DenseNet kullanılmıştır. Modellerin daha hızlı bir yakınsama ile yüksek bir başarımla göstermesi için öğrenme aktarımı (transfer learning) ve veri artırma teknikleri kullanılmıştır. Transfer öğrenme için ImageNet veri seti üzerinde eğitilen modellerin ön-eğitilmiş ağırlıkları kullanılmıştır. Veri artırma tekniği olarak ise en temel tekniklerden olan döndürme, çevirme ve ölçekleme işlemleri uygulanmıştır.

**ResNet:** Artık Sinir Ağı mimarisi yani kısa adıyla ResNet, 2016 yılında Microsoft araştırma ekibi tarafından önerilen güçlü bir CNN mimarisidir. ResNet'i diğer mimarilerden ayıran özelliklerin başında atlama ya da atık katmanlarının kullanılması gelmektedir. Yani, birkaç tane katman eğitime girmeden atlanır ve doğrudan çıkış sınıfına bağlanmış olmaktadır. Bu da kaybolan gradyan probleminin giderilmesine yardımcı olmaktadır.

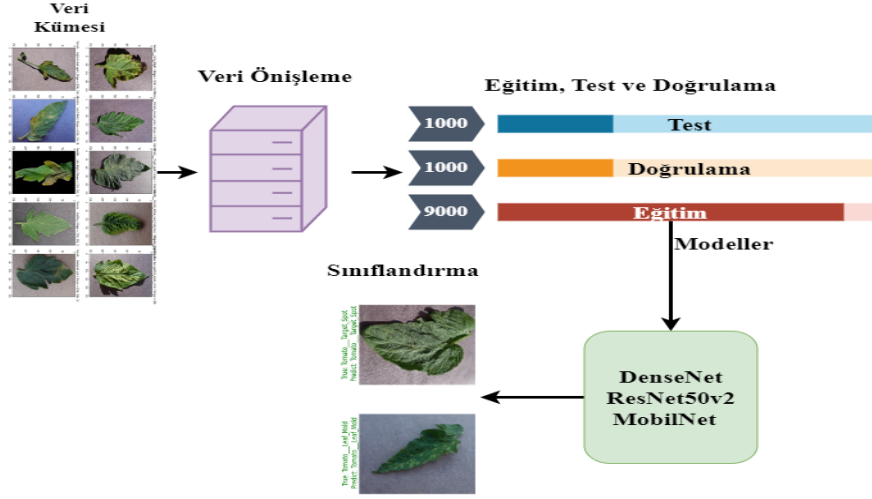
**MobileNet:** Bu ağ, diğer ağlara göre hesaplama açısından yani GPU yükü açısından oldukça verimli bir mimaridir. MobileNet, özellikle gerçek dünya uygulamaları için oldukça tercih edilen bir ağıdır. Bunun temel nedeni ise daha az hesaplama yükü getirmesi ve böylece gerçek zamanlı uygulamalar için daha popülerdir. MobileNet derinlemesine ayrılabilir konvolüsyonlar kullanmaktadır. Aynı derinliğe sahip düzenli evrişimlere sahip ağlara kıyasla parametre sayısını önemli ölçüde azaltır, bu da daha hafif derin sinir ağları yani bu ağı meydana getirmektedir.

**DenseNet:** CNN mimarilerinde, ağ girişine yakın katmanlar ile çıkışa yakın katmanlar arasında daha kısa bağlantılar olduğu zaman ağ daha derin bir yapıya ve yeterli veri seti ile daha etkili ve verimli çalışır. Yoğun Evrişimli Ağ (DenseNet) modeli, ResNet'e benzer bir yapıdadır ve özellikle büyük sinir ağlarında kaybolan gradyan problemini çözmek için tanıtılan başarılı bir derin öğrenme mimarisidir. ResNet'te katmanın çıktısı özellik haritaları toplanırken, DenseNet'te ise bunlar birleştirilir. Ayrıca, DenseNet her katmanı diğer tüm katmanlara ileri beslemeli bir şekilde bağlar. Ağ, özellik haritalarının boyutunun sabit kaldığı, ancak filtre sayısının değiştiği Yoğun Bloklardan oluşur. Geçiş Katmanları olarak adlandırılan filtreler, toplu normalleştirme, çekirdek 1x1 ile bir evrişim ve çekirdek 2x2 ile bir havuzlama katmanı ile alt örneklemeden sorumludur. Yoğun bir Ağda, her katmanın önceki özellik haritalarına erişimi vardır. Dolayısıyla, her katman bu kolektif bilgiye yeni bilgiler ekliyor. Modelin DenseNet121, DenseNet160 ve DenseNet201 gibi farklı versiyonları bulunmaktadır. Bu

çalışmada ImageNet ağırlığı üzerinde eğitilen DenseNet-121 modeli kullanılmıştır. ImageNet veri seti üzerinde eğitilen ağırlıkların kullanılması sayesinde, modelin yakınıması daha kısa sürede olmakla beraber, aynı zamanda modelin daha yüksek bir başarıyı göstermesine olanak sağlamaktadır.

### 3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma, Windows 10 üzerinde çalışan Intel (R) Core (TM) i5-10400 CPU@2.90 GHz ve 8 GB RAM'e sahip dizüstü bilgisayar üzerinde Spyder 3.10.8 Python geliştirme ortamında gerçekleştirilmiştir. Domates yaprağı hastalığının tespiti için geliştirilen karar destek sistemi Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Özet diyagram.

Çalışmada, modelimizin daha verimli olması için 0,2 rastgele döndürme ve büyütme gerçekleştirmek için yatay olan rastgele çevirme (horizontal and vertical) uyguladık. Görüntüler çeşitli açılarda ve konumlarda değiştirilmesi sayesinde, daha iyi bir veri sınıflandırması elde edildi. Ayrıca, önceden eğitilmiş DenseNet, ResNet50v2 ve MobileNet modelleri iki katman olarak kullanıldı. İlk katman için, DenseNet, ResNet50v2 ve MobileNet için önceden eğitilmiş ImageNet ağırlıkları içe aktarıldı. İkinci katman olarak GlobalAveragePooling2D katmanı uygulanmıştır. Tam bağlantı katmanı 1000 nöron ve sınıflandırma katmanı olarak softmax tercih edilmiştir. Ayrıca deneysel değerlendirmelerde optimizör olarak SGD tercih edilmiştir. Kullanılan veri seti üzerinden eğitim sürecini hızlandırmak ve modelin eğitimini hesaplamada uygulanabilir kılmak için görüntüler 224×224 olarak yeniden boyutlandırıldı.

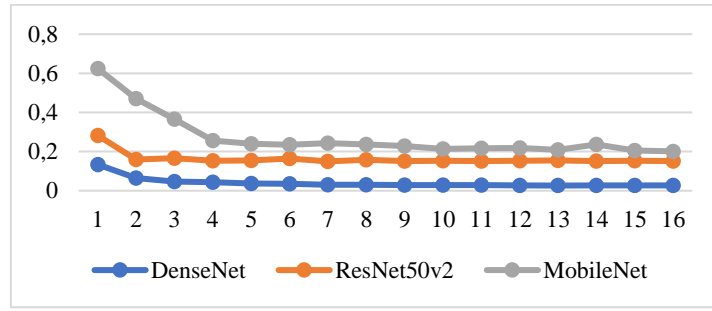
Çalışmada, domates yaprağı hastalığını tespit edebilmek için kullanılan DenseNet, ResNet50v2 ve MobileNet modellere ait hata, doğruluk, duyarlılık, kesinlik ve f1-skor kriterlerinin deneysel değerlendirme sonuçları Tablo 3'te sunulmuştur. Şekil 3 ve 4'te görüldüğü gibi deneysel değerlendirme amacıyla kullanılan yöntemlerine hata ve doğruluk grafikleri görülmektedir. Deneysel sonuçlar her bir model için 20 epok eğitilmiştir.

Tablo 3. Deneysel sonuçlar.

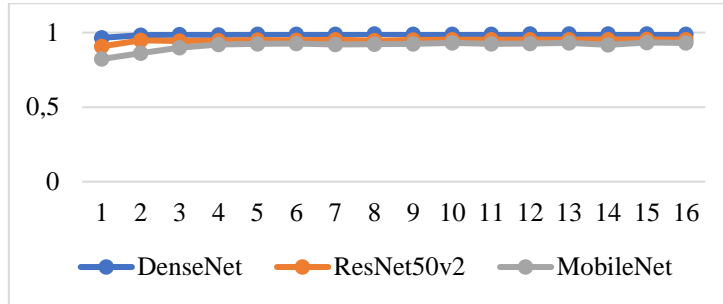
Modeller	Hata	Doğruluk	Duyarlılık	Kesinlik	F1-Skor
DenseNet	0.0269	0.9900	0.9880	0.9906	0.9892
ResNet50v2	0.1511	0.9533	0.9513	0.9568	0.9540
MobileNet	0.2014	0.9317	0.9190	0.9481	0.9333

Tablo 3, domates yaprağı hastalığının teşhisi için DenseNet, ResNet50v2 ve MobileNet modelleri ile gerçekleştirilen deneysel sonuçlar sunulmuştur. Deneysel sonuçlarda en iyi performans değeri DenseNet modeli ile elde edildiği görülmektedir. Deneysel değerlendirmelerde DenseNet ile 0.9900 doğruluk, 0.9880 duyarlılık, 0.9906 kesinlik, 0.9892 f1-skor ve 0.0269 hata değerleri elde edilmiştir. Ayrıca MobileNet modelinin 0.9317 doğruluk, 0.9190 duyarlılık, 0.9481 kesinlik, 0.9333 f1-skor ve 0.2014 hata ile en düşük başarımın elde edildiği görülmüştür.

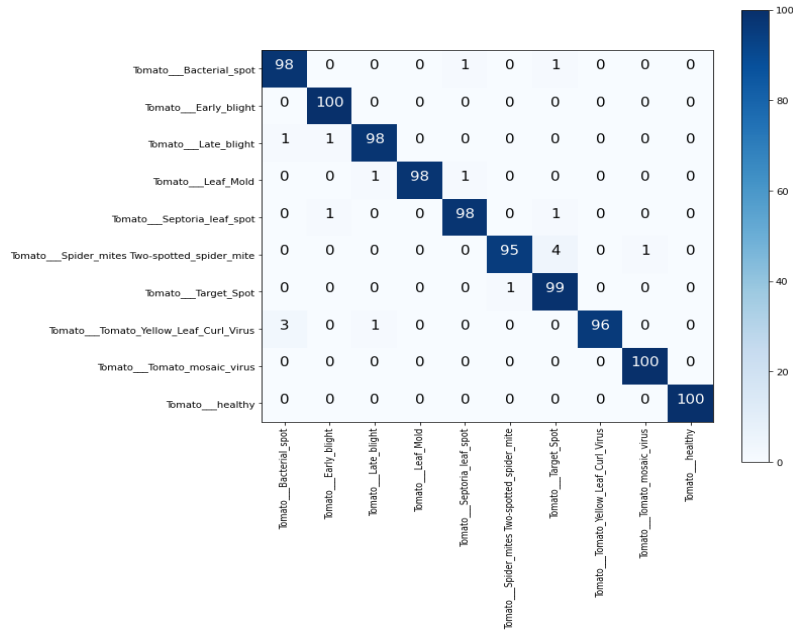
Şekil 3 ve 4 incelendiğinde, hata ve doğruluk grafikleri gözlemlenmektedir. Gerçekleştirilen domates yaprağı hastalığını tespit etmek üzere gerçekleştirilen deneysel değerlendirmelerde, önerilen yöntemin diğer transfer öğrenme yöntemlerine göre daha başarılı sonuçlar elde ettiği gözlemlenmektedir. Şekil 3'de DenseNet modeli, deneysel değerlendirme sürecinin başından sonuna kadar en küçük hata oranı ile çalıştığı gözlemlenmektedir. Ayrıca Şekil 4 incelendiğinde, DenseNet modeli eğitim süreci boyunca en yüksek başarı oranı ile çalıştığı görülmektedir. Şekil 5'te en iyi başarı oranı elde edilen DenseNet modeline dair test verisinin karışıklık matrisi verilmiştir. Şekil 5'te domates yaprağı hastalıklarına ait 10 sınıflı test veri kümesine ait karışıklık matrisi gözlemlenmektedir.



Şekil 3. Deneysel değerlendirme sonuçlarından hata grafiği.



Şekil 4. Deneysel değerlendirme sonuçlarından doğruluk grafiği.



Şekil 5. En iyi başarıyı veren DenseNet modelinin test verisi karışıklık matrisi.

Şekil 5'te, Spidermites Two-spottedspider\_mite ve TomatoYellowLeafCurlVirus sınıfları hariç diğer tüm sınıflarda yüksek oranda başarı ile sınıflandırdığı gözlemlenmektedir. Böylece önerilen yöntemin başarılı sonuçlar elde edebildiği sonucuna varılabilmektedir.

Yapılan tüm deneysel değerlendirmede DenseNet modeli ile en iyi başarı elde edildiği görülmektedir. Modeller hata, doğruluk, duyarlılık, kesinlik ve f1-skor performans değerlendirme ölçütlerine göre değerlendirilmiştir. Derin öğrenme yöntemleri bitki hastalıklarının teşhisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemler sayesinde, domates yaprağındaki hastalığın erken teşhis edilerek, bitki veriminin ve kalitesinin artırılması sağlanmış olmaktadır.

#### 4. SONUÇ

Bitki hastalıklarının zamanında tespit edilip önlenememesi, bitki veriminde ve kalitesinde önemli düşüşlere yol açmakta ve yetiştiriciler için önemli ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Ayrıca, bitki hastalıklarının göz ile denetimi hataya açık ve çok zahmetli olmaktadır. Derin öğrenme algoritmaları kullanılarak erken domates yaprağı hastalığının tespiti, hastalıkların zararlı etkilerini azaltabilir ve sürekli insan denetiminin dezavantajlarıyla da başa çıkmamıza imkân tanımaktadır. Bu çalışmada, domates yaprağı hastalığının teşhisi için derin öğrenme

modellerinden DenseNet, ResNet50v2 ve MobileNet kullanılmıştır. Deneysel değerlendirme sonucunda en iyi başarımın DenseNet ile 0.9900 doğruluk, 0.9880 duyarlılık, 0.9906 kesinlik, 0.9892 f1-skor ve 0.0269 hata değerleri elde edilmiştir. Deneylede önerilen DenseNet modelin mimarisi, domates yaprak hastalıklarının sınıflandırılmasında yüksek sonuçlar vermiştir. Ek olarak, Spidermites Two-spottedspider\_mite ve TomatoYellowLeafCurlVirus sınıfları hariç diğer tüm sınıflarda yüksek oranda başarı ile sınıflandırdığı gözlemlenmektedir. Böylece önerilen yöntemin başarılı sonuçlar elde edebildiği sonucuna varılabilmektedir. Bu modelin performansı, sunulan literatür çalışmalarından daha iyi performans göstermiştir. Kullanılan veri seti gürültüsüz yüksek kaliteli görüntülerden oluşmaktadır. Sistemi gerçek zamanlı olarak daha sağlam hale getirmek için gelecekte akıllı telefon aracılığıyla çekilen görüntüler üzerinde yeniden eğitim yapılmalıdır.

## Yazar Katkıları

Yazar çalışmaya eşit oranlı katkı sunmuştur.

## Çıkar Çatışması

Makale yazarları, aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

## KAYNAKÇA

- [1] S. Zhao, Y. Peng, J. Liu, ve S. Wu “Tomato leaf disease diagnosis based on improved convolution neural network by attention module”, *Agriculture*, vol. 11, no 7, pp. 651, 2021.
- [2] S. Mansoor vd., “Evidence for the association of a bipartite geminivirus with tomato leaf curl disease in Pakistan”, *Plant Dis.*, vol. 81, no. 8, pp. 958-958, 1997.
- [3] A. Raza vd., “First report of tomato chlorosis virus infecting tomato in Pakistan”, *Plant Dis*, vol. 104, no. 2036, pp. 10-1094, 2020.
- [4] S. Adhikari, D. Unit, B. Shrestha, ve B. Baiju, “Tomato Plant Diseases Detection System”, 1st KEC Conference Proceedings, pp. 81-86, 2018.
- [5] A. Fuentes, S. Yoon, S.C. Kim, ve D.S. Park “A robust deep-learning-based detector for real-time tomato plant diseases and pests recognition”, *Sensors*, vol. 17, no. 9, pp. 2022, 2017.
- [6] B.A. Ashqar ve S.S. Abu-Naser “Image-based tomato leaves diseases detection using deep learning”, 2018.
- [7] S. Zhao, Y. Peng, J. Liu, ve S. Wu “Tomato leaf disease diagnosis based on improved convolution neural network by attention module”, *Agriculture*, vol. 11, no. 7, p. 651, 2021.
- [8] R. Karthik, M. Hariharan, S. Anand, P. Mathikshara, A. Johnson, ve R. Menaka “Attention embedded residual CNN for disease detection in tomato leaves”, *Appl. Soft Comput.*, vol. 86, p. 105933, 2020.
- [9] M. Agarwal, A. Singh, S. Arjaria, A. Sinha, ve S. Gupta “ToLeD: Tomato leaf disease detection using convolution neural network”, *Procedia Comput. Sci.*, vol. 167, pp. 293-301, 2020.
- [10] H. Durmuş, E.O. Güneş, ve M. Kırıcı “Disease detection on the leaves of the tomato plants by using deep learning”, 6th International conference on agro-geoinformatics, IEEE, pp. 1-5, 2017.
- [11] A. Elhassouny ve F. Smarandache “Smart mobile application to recognize tomato leaf diseases using Convolutional Neural Networks”, *International Conference of Computer Science and Renewable Energies (ICCSRE)*, IEEE, pp. 1-4, 2019.
- [12] L.R. Burra, J. Bonam, P. Tumuluru, ve B. Narendra Kumar Rao “Fine-tuning for Transfer Learning of ResNet152 for Disease Identification in Tomato Leaves”, *In Intelligent Computing and Applications*, Springer Nature, pp. 295-302, 2022.
- [13] E. Cengil ve A. Çınar “Hybrid convolutional neural network based classification of bacterial, viral, and fungal diseases on tomato leaf images”, *Concurr. Comput. Pract. Exp.*, vol. 34, no. 4, p. e6617, 2022.
- [14] S. Widiyanto, D.T. Wardani, ve S.W. Pranata “Image-Based tomato maturity classification and detection using Faster R-CNN method”, 5th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), IEEE, pp. 130-134, 2021.
- [15] X. Zhou, P. Wang, G. Dai, J. Yan, ve Z. Yang “Tomato Fruit Maturity Detection Method Based on YOLOV4 and Statistical Color Model”, 11th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER), IEEE, pp. 904-908, 2021.
- [16] C. S. Hlaing ve S. M. M. Zaw “Tomato plant diseases classification using statistical texture feature and color feature”, *IEEE/ACIS 17th International Conference on Computer and Information Science (ICIS)*, IEEE, pp. 439-444, 2018.
- [17] J. Lu, G. Shao, Y. Gao, K. Zhang, Q. Wei, ve J. Cheng “Effects of water deficit combined with soil texture, soil bulk density and tomato variety on tomato fruit quality: A meta-analysis”, *Agric. Water Manag.*, vol. 243, pp. 106427, 2021.
- [18] S. Kaur, S. Pandey, ve S. Goel “Plants disease identification and classification through leaf images: A survey”, *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 26, pp. 507-530, 2019.
- [19] P. Tm, A. Pranathi, K. SaiAshritha, N.B. Chittaragi, ve S.G. Koolagudi “Tomato leaf disease detection using convolutional neural networks”, Eleventh international conference on contemporary computing (IC3), IEEE, pp. 1-5, 2018.
- [20] T.T. Mim, M.H. Sheikh, R.A. Shampa, M.S. Reza, ve M.S. Islam “Leaves diseases detection of tomato using image processing”, 8th international conference

- system modeling and advancement in research trends (SMART), IEEE, pp. 244-249, 2019.
- [21] S. Kushwaha ve S. Zade "Identification of Tomato Leaf Disease Prediction Using CNN", *Int. J.*, vol. 7, no. 8, pp. 36-41, 2022.
- [22] A.K. Alkaff ve B. Prasetyo "Hyperparameter Optimization on CNN Using Hyperband on Tomato Leaf Disease Classification", *IEEE International Conference on Cybernetics and Computational Intelligence (CyberneticsCom)*, IEEE, pp. 479-483, 2022.
- [23] H.I. Peyal, S.M. Shahriar, A. Sultana, I. Jahan, ve M. H. Mondol "Detection of tomato leaf diseases using transfer learning architectures: A comparative analysis", *International Conference on Automation, Control and Mechatronics for Industry 4.0 (ACMI)*, IEEE, pp. 1-6, 2021.
- [24] D. Singh, N. Jain, P. Jain, P. Kayal, S. Kumawat, ve N. Batra "PlantDoc: a dataset for visual plant disease detection", *Proceedings of the 7th ACM IKDD CoDS and 25th COMAD*, pp. 249-253, 2020.
- [25] S.P. Mohanty, D. P. Hughes, ve M. Salathé "Using deep learning for image-based plant disease detection", *Front. Plant Sci.*, vol. 7, pp. 1419, 2016.
- [26] I. Pacal, D. Karaboga, A. Basturk, B. Akay, ve U. Nalbantoglu "A comprehensive review of deep learning in colon cancer", *Comput. Biol. Med.*, vol. 126, p. 104003, 2020.
- [27] A. Karaman vd. "Hyper-parameter optimization of deep learning architectures using artificial bee colony (ABC) algorithm for high performance real-time automatic colorectal cancer (CRC) polyp detection", *Appl. Intell.*, pp. 1-18, 2022.
- [28] M.A. Bülbül, E. Harirchian, M.F. Işık, S.E. Aghakouchaki Hosseini, ve E. Işık "A Hybrid ANN-GA Model for an Automated Rapid Vulnerability Assessment of Existing RC Buildings", *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 10, 2022,
- [29] M.A. Bülbül, C. Öztürk, ve M.F. Işık "Optimization of Climatic Conditions Affecting Determination of the Amount of Water Needed by Plants in Relation to Their Life Cycle with Particle Swarm Optimization, and Determining the Optimum Irrigation Schedule", *Comput. J.*, vol. 65, no. 10, 2022.
- [30] M.A. Bülbül "Kuru Fasulye Tohumlarının Çok Sınıflı Sınıflandırılması İçin Hibrit Bir Yaklaşım", *J. Inst. Sci. Technol.*, vol. 13, no. 1, 2023.
- [31] K. Adem "Impact of activation functions and number of layers on detection of exudates using circular Hough transform and convolutional neural networks", *Expert Syst. Appl.*, vol. 203, p. 117583, 2022.
- [32] K. Adem ve S. Kiliçarslan, "COVID-19 Diagnosis Prediction in Emergency Care Patients using Convolutional Neural Network", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendis. Bilim. Derg.*, vol. 21, no. 2, 2021.
- [33] S. Kılıçarslan, A. Kemal, ve M. Çelik "An overview of the activation functions used in deep learning algorithms", *J. New Results Sci.*, vol. 10, no. 3, pp. 75-88, 2021.
- [34] M. Hekim, O. Cömert, ve K. Adem "A hybrid model based on the convolutional neural network model and artificial bee colony or particle swarm optimization-based iterative thresholding for the detection of bruised apples", *Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 28, no. 1, pp. 61-79, 2020.
- [35] E. Dönmez "Enhancing classification capacity of CNN models with deep feature selection and fusion: A case study on maize seed classification", *Data Knowl. Eng.*, vol. 141, p. 102075, 2022.
- [36] S. Kiliçarslan, C. Közkurt, S. Baş, ve A. Elen "Detection and classification of pneumonia using novel Superior Exponential (SupEx) activation function in convolutional neural networks", *Expert Syst. Appl.*, vol. 217, p. 119503, 2023.
- [37] K. Adem, S. Kiliçarslan, ve O. Cömert "Classification and diagnosis of cervical cancer with stacked autoencoder and softmax classification", *Expert Syst. Appl.*, vol. 115, pp. 557-564, 2019.
- [38] S. Kiliçarslan ve M. Celik "RSigELU: A nonlinear activation function for deep neural networks", *Expert Syst. Appl.*, vol. 174, p. 114805, 2021.
- [39] I. Pacal ve D. Karaboga "A robust real-time deep learning based automatic polyp detection system.", *Comput. Biol. Med.*, vol. 134, pp. 104519-104519, 2021.



## Modern Güç Sistemlerinde Tıkanıklık Yönetimi Probleminin Çözümü İçin Balçık Küfü Optimizasyon Algoritması

### Slime Mould Optimization Algorithm for Solving Congestion Management Problem in Modern Power Systems

<sup>1</sup>Mehmet UĞUR , <sup>2</sup>Serhat DUMAN 

<sup>1</sup>Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bandırma/Balıkesir, Türkiye

<sup>2</sup>Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Mühendisliği, Bandırma/Balıkesir, Türkiye

<sup>1</sup>m.ugur\_10@hotmail.com, <sup>2</sup>sduman@bandirma.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 11 April 2023

Accepted : 18 May 2023

##### Keywords:

Modern Power Systems,  
Congestion Management,  
Replanning, Optimization

#### ABSTRACT

Nowadays, the uncertainties that occur in reconstructed electrical power systems create a bottleneck in the competitive electricity market, which leads to economic loss in the power system and weakens the reliability of the system. Given this situation, the congestion management (CM) emerges as one of the most important planning problems for the operation and control of modern power systems. In this article, Slime Mold Algorithm (SMA) and Tasmanian Devil Optimization (TDO) algorithms, which have been recently introduced to the literature, are used to solve the CM problem. In addition, the proposed algorithms minimize the total replanning cost, while eliminating the congestion that occurs according to the scenarios created in the simulation studies. The simulation studies were carried out on a modified IEEE 30-bus test system and according to the results obtained, it was seen that the SMA algorithm was more successful than other algorithms in the literature in solving the CM problem.

© 2023 Bandırma Onyediy Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 11 Nisan 2023

Kabul : 18 Mayıs 2023

##### Anahtar Kelimeler:

Modern Güç Sistemleri,  
Tıkanıklık Yönetimi,  
Yeniden Planlama,  
Optimizasyon

#### ÖZET

Günümüzde, yeniden yapılandırılmış elektrik güç sistemlerinde meydana gelen belirsizlikler rekabetçi elektrik piyasasında tıkanıklık oluşturmakta olup, bu durum güç sisteminde ekonomik kayba ve sistem güvenilirliğini zayıflatmaktadır. Bu durum göz önüne alındığında, tıkanıklık yönetimi (CM) modern güç sistemlerinin işletilmesi ve kontrolü açısından en önemli planlama problemlerinden biri olarak ortaya çıkmaktadır. Bu makalede, CM problemini çözmek için son zamanlarda literatüre sunulan Balçık Küfü Algoritması (SMA) ve Tazmanya Canavarı Optimizasyon (TDO) algoritması kullanılmıştır. Ayrıca önerilen algoritmalar, toplam yeniden planlama maliyetini minimize ederken, benzetim çalışmalarında oluşturulan senaryolara göre meydana gelen tıkanıklığın giderilmesini sağlamaktadır. Benzetim çalışmaları değiştirilmiş IEEE 30- bara test sisteminde gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlara göre SMA algoritmasının CM problemini çözmede literatürdeki diğer algoritmalarından daha başarılı olduğu görülmüştür.

© 2023 Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

## 1. GİRİŞ

Günümüzde, dünya nüfusu, sanayileşme ve teknolojiadaki hızlı gelişmelerle birlikte insanların yaşam standartlarının artması, elektrik enerjisine olan talebi giderek arttırmaktadır. Son kullanıcıların talebini karşılamak için yeniden yapılanma ile iletim hatlarının maksimum kapasitesinden yararlanmak daha önemli hale gelmektedir. Güç sistemlerinin yeniden yapılandırılmasından önce, elektrik şebekeleri üretim, iletim ve dağıtım sistemleri kamu tarafından işletilen ortak kontrole sahip sistemlerdi. Güç sistemlerinin ayrıştırılmasından sonra, üretim, iletim ve dağıtım şirketleri bağımsız sistem operatörleri olarak çalışmakta olup, bu sistem operatörlerinin tüm sistemi birbirleriyle senkronize olarak çalıştırması gerekmektedir. Bağımsız sistem operatörlerine bağlı olarak serbestleştirilmiş veya kuralsızlaştırılmış piyasada, tüm elektrik şirketleri birbirleri ile etkileşime girmekte özgür bir davranış sergilerler. Ancak kuralsızlaştırılmış bir piyasada, elektrik alımı ve satımında uygun bir müzayede stratejisi seçmeyi, katılımcıların piyasa gücünü azaltırken karlarını maksimize etmeyi, sistem güvenilirliği sürdürülürken piyasa dengesi ve etkinliğini değerlendirmeyi, iletişim sıklığını içeren zorluklar bulunmaktadır. Serbestleştirme süreciyle sağlanan rekabetçi piyasa, günümüzde artan elektrik ihtiyacına karşın elektriğin alıcıya uygun bir fiyat bandında satılması içindir. Ayrıca, serbest piyasa, elektrik iletim şebekelerinin güç aktarım sınırlarının ötesinde çalışmasına ve sistemde tıkanık oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, tıkanık elektrik güç sistemlerinin rahatlatılması için tıkanık yönetiminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Elektrik güç sistemlerindeki jeneratörlerin güç çıkışlarının yeniden programlanması tıkanıklık yönetiminde en çok kullanılan yöntemlerden biridir [1-7].

Tıkanıklık yönetimi probleminde, jeneratörlerin aktif güç çıkışlarının yeniden düzenlenmesi veya programlanması için Balaraman ve Kamaraj [4] çalışmalarında, PSO, SA ve RSM algoritmalarını kullanmışlardır. Tıkanıklık yönetimi probleminin çözümü için dört farklı senaryoyu IEEE 30 ve IEEE 57 bara test sistemlerinde ikişerli gruplar halinde düşünmüşlerdir. Bu senaryolara göre yapılan benzetim çalışmalarından elde ettikleri sonuçları kendi içlerinde karşılaştırmışlar ve PSO algoritmasının bu problemin çözümünde daha etkili olduğunu belirtmişlerdir. Verma ve Mukherjee [5] güç sistemlerinin tıkanıklık yönetimi probleminin çözümünde FFA algoritmasını önermişlerdir. Önerdikleri algoritmanın sonuçlarının literatürdeki diğer algoritmaların sonuçlarından daha iyi olduğunu çalışmalarında belirtmişlerdir. Yazarların diğer bir çalışmasında [6], aynı problem ALO algoritması kullanılarak çözülmesi amaçlanmıştır. ALO algoritmasından elde edilen sonuçlar FPA, BA ve CBA algoritmalarından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. 5 farklı senaryo tipi IEEE 30, 57 ve 118 bara test sistemlerinde farklı şekillerde düşünülmüş ve bu senaryolara göre tıkanıklık yönetimini gidermede ve tıkanıklık maliyetini en aza indirmede ALO algoritmasının daha başarılı olduğunu çalışmalarında yazarlar tarafından belirtilmiştir. Verma ve arkadaşları bir başka çalışmalarında [7], TLBO algoritmasını IEEE 30 ve 57 bara test sistemlerinde tıkanıklık maliyetini en aza indirmek için kullanmışlardır. Oluşturulan benzetim senaryolarına göre, TLBO'dan elde edilen sonuçlar literatürde sunulan diğer algoritmalarından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmış ve TLBO algoritmasının optimal çözümü bulmada daha etkili olduğunu göstermişlerdir. Verma ve arkadaşları [8] jeneratörlerin çıkış güçlerinin yeniden düzenlenmesini ve tıkanık maliyetinin minimizasyonu için SOS algoritmasını kullanmışlardır. Yazarlar çalışmalarında, 10 farklı tıkanıklık senaryosunu IEEE 30 ve 57 bara test sistemlerinde gerçekleştirmişler ve elde edilen sonuçları literatürdeki diğer optimizasyon algoritmalarından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sonuçlarına göre, problemin çözümü için önerdikleri SOS algoritmasının optimal çözüme yakınsamada daha başarılı olduğunu yazarlar tarafından belirtilmiştir. Vijayakumar çalışmasında [9], güç sistemlerinin önemli planlama problemlerinden tıkanıklık yönetimi problemini çok amaçlı optimizasyon problemi olarak ele almıştır. Toplam tıkanıklık maliyeti, iletim hattı tıkanıklığı ve gerilim sapması değerlerini amaç fonksiyonları ve bu amaç fonksiyonlarının minimizasyonunda çok amaçlı FEP ve NSGA-II yöntemlerini kullanmışlardır. IEEE 30 bara test sisteminde farklı tıkanıklık senaryoları altında önerilen algoritmaların performansları test edilmiş ve literatüre sunulmuştur. Balaraman ve Kamaraj başka bir çalışmalarında [10], standart IEEE 30 bara test sisteminde farklı tıkanıklık senaryoları altında yapılan benzetim çalışmalarında tıkanıklık maliyetinin optimal değerini DE algoritmasını kullanarak bulmayı amaçlamışlardır. DE algoritmasından elde edilen benzetim sonuçlarını PSO algoritmasının sonuçları ile karşılaştırmışlar ve DE algoritması iletim tıkanıklığını gidermede ve toplam tıkanıklık maliyetini en aza indirmede etkili olmuştur. Kashyap ve Kansal [11] FFA ve DE algoritmalarının hibrit versiyonunu tıkanıklık maliyetini minimize etmek için kullanmışlardır. Ayrıca, yazarlar dağıtılmış üretim birimlerinin test sisteminde en uygun yerleşim yerlerini belirleyerek hem iletim hattındaki tıkanıklığı gidermiş hem de toplam tıkanıklık maliyetini minimize etmişlerdir. Farklı tıkanıklık senaryolarında yapılan benzetim çalışmalarına göre, önerilen hibrit algoritmadan elde edilen sonuçlar FFA algoritmasının sonuçları ile karşılaştırılmış ve önerilen algoritma optimal çözüme yakınsamada daha başarılı olmuştur. Tıkanıklık yönetiminde toplam tıkanıklık maliyetinin minimizasyonu için literatürde; IDE [12], MO-GSO [13], FPSO [14], GSA [15], ve ICSA [16] gibi farklı algoritmalar kullanılmıştır. Bu çalışmada, SMA [17] ve TDO [18] algoritmaları değiştirilmiş IEEE 30 bara test sisteminde iki farklı tıkanıklık senaryosu altında toplam tıkanıklık maliyetinin minimizasyonu için kullanılmıştır. Elde edilen benzetim sonuçları literatürdeki diğer optimizasyon algoritmaların sonuçları ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Yapılan çalışma aşağıdaki alt başlıklara göre organize edilmiştir.

- Güç sistemlerinin en önemli problemlerinden biri olan tıkanık probleminin tanıtılması bölüm 2'de ele alınmıştır.
- Problemin çözümünde başarılı olan optimizasyon algoritması bölüm 3'de sunulmuştur.

- Benzetim çalışmalarının sunulması ve elde edilen sonuçların tartışılması bölüm 4’de verilmiştir.
- Çalışmanın genel bir şekilde değerlendirilmesi sonuç bölümüdür.

## 2. TIKANIKLIK YÖNETİMİ PROBLEMİNİN TANIMLANMASI

Tıkanıklık yönetiminin (CM) temel amacı, şebeke kısıtlamaları karşılanırken jeneratörlerin aktif güç üretiminin artırılması veya azaltılması durumuna göre yeniden programlanarak tıkanıklık maliyetini en aza indirmektir. Jeneratörlerin aktif güç üretimindeki değişiklik, GENCOs tarafından sunulan fiyat tekliflerine bağlı olarak Eşitlik (1)’deki gibi matematiksel olarak ifade edilmektedir.

$$C_C = \sum_{i \in N_G} (C_k \Delta P_{Gi}^+ + D_k \Delta P_{Gi}^-) \quad \$ / h \quad (1)$$

Burada,  $C_C$  jeneratörlerin aktif güç üretimlerindeki değişime bağlı olarak toplam üretim maliyetini göstermektedir.  $C_k$  ve  $D_k$  (\$/MWh) üretim şirketleri tarafından verilen artımlı ve indirimli fiyat tekliflerini ifade etmektedir.  $\Delta P_{Gi}^+$  ve  $\Delta P_{Gi}^-$  jeneratörlerin aktif güçlerinin artışı ve azalmasını temsil etmektedir.

### 2.1. Problemin Eşitlik Kısıtları

Tıkanıklık yönetimi probleminin eşitlik kısıtları güç akışı denklemleri ile aşağıdaki gibi formülize edilmektedir.

$$P_{Gk} - P_{Dk} = \sum_j |V_j| |V_k| |Y_{kj}| \cos(\delta_k - \delta_j - \theta_{kj}) \quad j = 1, 2, \dots, N_B \quad (2)$$

$$Q_{Gk} - Q_{Dk} = \sum_j |V_j| |V_k| |Y_{kj}| \sin(\delta_k - \delta_j - \theta_{kj}) \quad j = 1, 2, \dots, N_B \quad (3)$$

$$P_{Gk} = P_{Gk}^C + \Delta P_{Gk}^+ - \Delta P_{Gk}^- \quad k = 1, 2, \dots, N_G \quad (4)$$

$$P_{Dj} = P_{Dj}^C \quad j = 1, 2, \dots, N_D \quad (5)$$

Eşitlik (2) ve (3) güç sisteminde bulunan her bir baradaki aktif ve reaktif akışı dengesini, Eşitlik (4) ve (5) ise piyasa takas fiyatının fonksiyonu olan nihai gücü temsil etmektedir.  $P_{Gk}$  ve  $Q_{Gk}$ ;  $k$  barasına bağlı jeneratör tarafından üretilen aktif ve reaktif gücü göstermektedir.  $P_{Dk}$  ve  $Q_{Dk}$ ; ise  $k$  barasındaki talep edilen aktif ve reaktif güç değerlerini temsil etmektedir.  $V_j$  ve  $V_k$   $j$ 'inci ve  $k$ 'ıncı baralardaki gerilimlerin genlik değerleridir.  $\delta_j$  ve  $\delta_k$ ,  $j$ 'inci ve  $k$ 'ıncı baralardaki gerilimlerin açıları olarak tanımlanmaktadır.  $\theta_{kj}$ ,  $k$  ve  $j$  baraları arasında bağlanan hattın açısı olarak ifade edilmektedir.  $N_B$ ,  $N_G$  ve  $N_D$ , sırasıyla, güç sistemindeki toplam bara, jeneratör ve yük sayılarını göstermektedir.  $P_{Gk}^C$  ve  $P_{Dj}^C$ , piyasa takas değerinden elde edildiği gibi sırasıyla,  $k$ 'ıncı jeneratör tarafından üretilen aktif güç ve  $j$ 'inci yük barasına bağlı yük tarafından tüketilen aktif güç değerleridir.

### 2.2. Problemin Eşitsizlik Kısıtları

Güç sistemlerinde bulunan jeneratörlerin ve iletim hatlarının çalışma ve fiziksel sınırları CM probleminin eşitsizlik kısıtları olarak matematiksel gösterimi aşağıdaki gibidir.

$$P_{Gk}^{\min} \leq P_{Gk} \leq P_{Gk}^{\max}, \quad \forall k \in N_G \quad (6)$$

$$Q_{Gk}^{\min} \leq Q_{Gk} \leq Q_{Gk}^{\max}, \quad \forall k \in N_G \quad (7)$$

$$(P_{Gk} - P_{Gk}^{\min}) = \Delta P_{Gk}^{\min} \leq \Delta P_{Gk} \leq \Delta P_{Gk}^{\max} = (P_{Gk}^{\max} - P_{Gk}) \quad (8)$$

$$V_n^{\min} \leq V_n \leq V_n^{\max}, \quad \forall n \in N_B \quad (9)$$

$$P_{ij} \leq P_{ij}^{\max} \quad (10)$$

Burada, *min* ve *max* değişkenlerin minimum ve maksimum sınır değerlerini göstermektedir.

Problem için verilen eşitsizlik kısıtlamaları ceza fonksiyonlarına dönüştürülerek amaç fonksiyonu eklenmektedir. Bu çalışmada, Newton-Raphson güç akışı sonucunda elde edilen yük baralarının gerilim değerleri, jeneratörlerin reaktif güç değerleri ve iletim hatlarından akan aktif güç değerleri ikinci dereceden ceza fonksiyonu kabul edilerek Eşitlik (11)'deki uygunluk fonksiyonu değeri elde edilir.

$$\text{Min } F = C_C + \lambda_1 \times \sum_{i=1}^{ovl} (P_{ij} - P_{ij}^{\max})^2 + \lambda_2 \times \sum_{j=1}^{VN} (\Delta V_j)^2 + \lambda_3 \times (\Delta P_G)^2 + \lambda_4 \times (\Delta Q_G)^2 \quad (11)$$



$$\Delta V_j = \begin{cases} (V_j^{\min} - V_j); & \text{if } V_j \leq V_j^{\min} \\ (V_j - V_j^{\max}); & \text{if } V_j \geq V_j^{\max} \end{cases}$$

$$\Delta P_G = \begin{cases} (P_G^{\min} - P_G); & \text{if } P_G \leq P_G^{\min} \\ (P_G - P_G^{\max}); & \text{if } P_G \geq P_G^{\max} \end{cases} \quad (12)$$

$$\Delta Q_G = \begin{cases} (Q_G^{\min} - Q_G); & \text{if } Q_G \leq Q_G^{\min} \\ (Q_G - Q_G^{\max}); & \text{if } Q_G \geq Q_G^{\max} \end{cases}$$

Burada  $F$  minimize edilecek tıkanıklık maliyetini içeren uygunluk fonksiyonunu, aşırı yüklenmiş hatlar  $ovl$ ; ve sınır değerlerini ihlal etmiş yük baralarının toplam sayısını göstermektedir.  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  ve  $\lambda_4$  ceza katsayıları olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada ceza katsayıları sırasıyla, 4200, 500, 1000 ve 500 olarak ayarlanmıştır.

### 3. BALÇIK KÜFÜ ALGORİTMASI

Li ve arkadaşları tarafından 2020 yılında literatüre sunulan SMA, hava kokuları ile ilgili olarak balçık kalıbının gıda erişiminin doğal salınım modeline dayalı popülasyon temelli bir meta-sezgisel optimizasyon algoritmasıdır. Algoritma, yiyeceğe yaklaşma, yiyeceği sarma ve osilasyon olarak adlandırılan üç temel aşamada modellenerek simule edilmektedir [17,19].

#### 3.1. Yiyeceklere Yaklaşma Davranışı

Havada bulunan koku balçık küfünün yiyeceklere yaklaşmasını sağlamakta olup, balçık küfünün büzülme aşaması ve yiyecek arama sürecindeki davranışın matematiksel olarak modellenmesi çözüm adaylarının konumunun güncellenmesi olarak Eşitlik (13)'deki gibi ifade edilmektedir.

$$\overrightarrow{X}(t+1) = \begin{cases} \overrightarrow{X}_b(t) + \overrightarrow{vb} \cdot (\overrightarrow{W} \cdot \overrightarrow{X}_A(t) - \overrightarrow{X}_B(t)), & r < p \\ \overrightarrow{vc} \cdot \overrightarrow{X}(t), & r \geq p \end{cases} \quad (13)$$

$\overrightarrow{vb}$  [-a, a] aralığında bir parametre ve  $\overrightarrow{vc}$  birden sıfıra doğrusal olarak azalan bir sayıdır. Arama uzayında en yüksek koku konsantrasyonuna sahip çözüm adayının konumu  $\overrightarrow{X}_b$  ile gösterilmektedir.  $t$  şundaki iterasyon sayısını,  $\overrightarrow{X}$  ise balçık kalıbının konumunu temsil etmektedir.  $\overrightarrow{W}$  balçık kalıbının ağırlığı,  $\overrightarrow{X}_A$  ve  $\overrightarrow{X}_B$  çözüm uzayından rastgele seçilen iki birey olarak ifade edilmektedir.  $p$  değeri aşağıdaki gibi formülize edilmektedir.

$$p = \tanh |S(i) - DF| \quad (14)$$

Burada,  $i \in 1, 2, \dots, n$   $\overrightarrow{X}$ 'in uygunluk fonksiyonu değerleri  $S(i)$  ile ifade edilmektedir.  $DF$  ise optimizasyon süreci boyunca her bir iterasyonda en iyi uygunluk değeridir.  $\overrightarrow{vb}$  ve  $\overrightarrow{W}$ 'nin matematiksel olarak gösterimi, sırasıyla, Eşitlik (15) ve (16)'da gösterilmiştir.

$$\overrightarrow{vb} = [-a, a] \quad (15)$$

$$a = \arctan h \left( - \left( \frac{t}{maks\_t} \right) + 1 \right)$$

$$\overrightarrow{W}(\text{Smellindeks}(i)) = \begin{cases} 1 + r \cdot \log \left( \frac{bF - S(i)}{bF - wF} + 1 \right), & \text{koşul} \\ 1 - r \cdot \log \left( \frac{bF - S(i)}{bF - wF} + 1 \right), & \text{diğer} \end{cases} \quad (16)$$

$$\text{Smellindeks} = \text{sort}(S)$$

$r$ , [0,1] arasında rasgele üretilen bir sayıyı gösterir. Maksimum iterasyon sayısı  $maks\_t$ , şuan ki iterasyondaki en iyi uygunluk değeri  $bF$ , en kötü uygunluk değeri  $wF$  ile açıklanmaktadır.  $\text{Smellindeks}$  arama uzayındaki uygunluk fonksiyonu değerlerinin minimumdan maksimuma veya maksimumdan minimuma sıralanması olarak tanımlanır [17,19].

#### 3.2. Yiyecekleri Sarma Davranışı

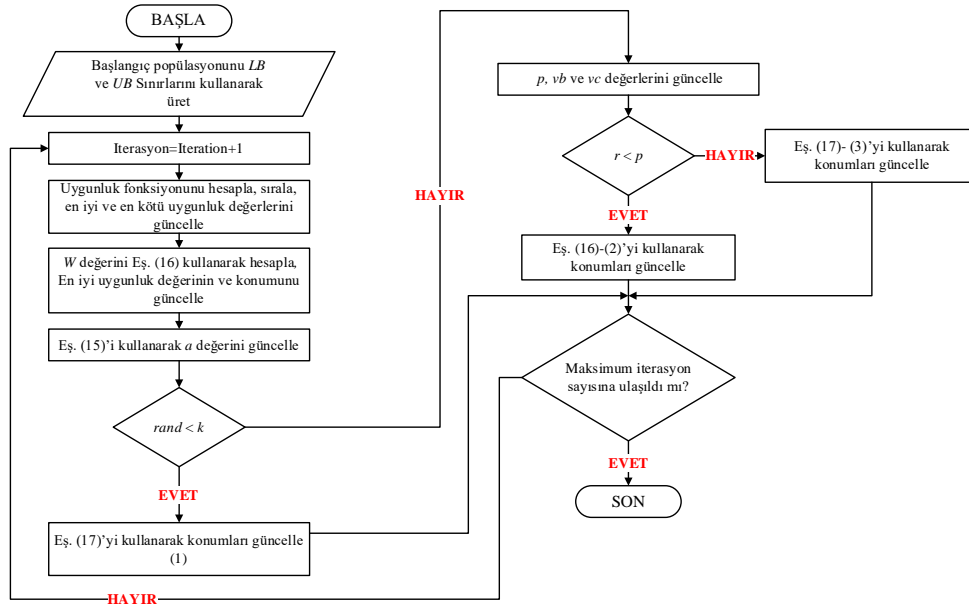
Besin konsantrasyonunun yeterli olduğu bölgelerde ağırlık oranının fazla, besin konsantrasyonunun düşük olduğu bölgelerde ağırlık oranı az olduğu düşünüldüğünde algoritma diğer besin bölgelerini keşfedebilmek için yönelme hareketine bağlı olarak, arama uzayındaki balçık kalıbının yerinin güncellenmesi gerekmekte olup bu davranış matematiksel olarak Eşitlik (17)'deki gibi formülize edilmektedir [17,19].

$$\vec{X}^* = \begin{cases} rand.(UB - LB) + LB, & rand < z \\ \vec{X}_b(t) + vb.(W.\vec{X}_A(t) - \vec{X}_B(t)), & r < p \\ \vec{vc}.\vec{X}(t), & r \geq p \end{cases} \quad (17)$$

Burada, UB ve LB, değişkenlerin üst ve alt sınırlarını belirtir, *rand* ve *r*, [0,1] aralığında rastgele bir sayıyı temsil eder ve *z*, keşif ve kullanım arasındaki dengeyi koruyan sabit olarak tanımlanır.

### 3.3. Osilasyon Davranışı

Algoritma, daha iyi bir gıda konsantrasyonunu bulmak için balçık kalıbının çeşitli varyasyonları  $\vec{W}$ ,  $\vec{vb}$  ve  $\vec{vc}$  parametreleri vasıtasıyla benzetim modeli oluşturulur.  $\vec{W}$  ile matematiksel olarak modellenmiş bire yakın balçık küfünün salınım frekansı, balçık kalıbının besin kaynakları içerisinde yiyecek konsantrasyonu yüksek olanın kaliteli yiyeceğe daha hızlı yaklaşmasını, yiyecek konsantrasyonu düşük olanın yiyeceğe daha yavaş yaklaşmasını sağlar.  $\vec{vb}$  değeri  $[-a, a]$  arasında rastgele salınım yaparken, optimizasyon işlemi boyunca iterasyon sayısının artmasıyla kademeli olarak sıfır değerine yaklaşmaktadır.  $\vec{vc}$  değeri  $[-1,1]$  arasında salınım yaparak optimizasyon işlemi sonunda maksimum iterasyon sayısına ulaşıldığında sıfıra düşer [17,19]. Balçık küf algoritmasının akış diyagramı Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. SMA algoritmasının akış diyagramı.

## 4. BENZETİM ÇALIŞMALARININ SONUÇLARI

Benzetim çalışmaları için değiştirilmiş IEEE 30 bara test sistemi kullanılmış olup, test sistemi 6 jeneratör, 24 yük barası ve 41 iletim hattından oluşmaktadır. Ayrıca, 24 yük barasından toplam talep edilen aktif güç ve reaktif güç değerleri 283.4 MW ve 126.2 MVAR'dır. Benzetim çalışmalarında güç akışı eşitliklerinin ve sonuçlarının elde edilmesi MATPOWER paket programı vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir [20-21]. Benzetim çalışmalarında, hat kesintisi veya tüm yük baralarındaki yük değerlerinin beklenmedik bir şekilde değişmesi gibi durumlar düşünülerek güç sistemlerinde tıkanıklık senaryoları oluşturulmuştur. Bu tıkanıklık senaryoları aşağıdaki gibi gerçekleştirilir.

- *Durum 1A:* Değiştirilmiş IEEE 30 bara test sisteminin 1-2 hattının devre dışı kalması,
- *Durum 1B:* Değiştirilmiş IEEE 30 bara test sisteminin 1-7 hattının devre dışı kalması ve tüm yük baralarındaki yük değerlerinin 50% oranında artması,

Test sistemi için üretim şirketleri tarafından bağımsız sistem operatörlerine sunulan fiyat teklifleri ve test sisteme ait jeneratör verileri Tablo 1'de verilmektedir. Tablo 2'de ise Durum 1A ve Durum 1B için değiştirilmiş IEEE 30-bus test sistemindeki sıkışık hatlar ve bu hatlardan akan aktif güç değerleri gösterilmektedir. Tablo 1'de verilen başlangıç koşullarına göre benzetim durumları için güç akışı çalışmaları yapıldığında, Durum 1A'da 1-7 ve 7-8, Durum 1B'de 1-2, 2-8 ve 2-9 hatlarından akan aktif güç değerleri belirlenen sınır değerlerin üzerinde olduğu Tablo 2'den açıkça görülmekte olup, bu durum güç sisteminde sıkışıklık oluşturmaktadır. İletim hatlarındaki bu sıkışıklık durumunu gidermek için test sistemindeki jeneratörlerin ürettikleri aktif güç değerlerinin yeniden belirlenmesi Eşitlik (1)'de verilen tıkanık maliyetinin minimizasyonu ile yapılmaktadır. Bu çalışmada, tıkanıklık maliyetinin minimizasyonu meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarından TDO ve SMA algoritmaları kullanılarak yapılmıştır.

**Tablo 1.** Generatör ve fiyat teklifleri değerleri.

Bara No	$P_G^{\min}$ (MW)	$P_G^{\max}$ (MW)	$Q_G^{\min}$ (MVAR)	$Q_G^{\max}$ (MVAR)	$P_G^C$	GENCO'lar tarafından verilen fiyat teklifleri	
						$C_k$	$D_k$
1	0	360.2	-30	100	138.59	22	18
2	20	140	-30	100	57.56	21	19
3	15	100	-30	100	24.56	42	38
4	10	100	-30	100	35.00	43	37
5	10	100	-30	100	17.93	43	35
6	12	100	-30	100	16.91	41	39

**Tablo 2.** Değiştirilmiş IEEE 30-bus test sistemi için sıkışık hatların ayrıntıları.

Test Durumları	Sıkışık Hatlar	Hatlardan Akan Güç (MW)	Hat Sınırları (MW)
Durum 1A	1-7	147.463	130
	7-8	136.292	130
Durum 1B	1-2	310.917	130
	2-8	97.353	65
	2-9	103.524	65

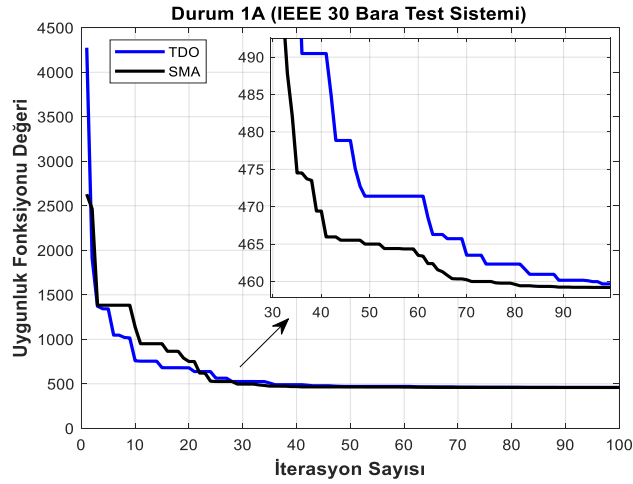
**Tablo 3.** Durum 1A için SMA ve TDO algoritmalarından elde edilen sonuçların diğer algoritmalarla karşılaştırılması.

Parametreler	Algoritmalar					
	FFA [5]	PSO [4]	RSM [4]	SA [4]	BA [6]	CBA [6]
TCC (\$/h)	511.8737	538.95	716.25	719.861	496.78	482.023
PF (Hat 1-7)	129.812	129.97	129.78	129.51	-	-
PF (Hat 7-8)	120.617	120.78	120.60	120.35	-	-
$\Delta P_{G1}$ (MW)	-8.7783	-8.6123	-8.8086	-9.0763	-9.01	-8.694
$\Delta P_{G2}$ (MW)	+15.0008	+10.4059	+2.6473	+3.1332	+13.969	+13.917
$\Delta P_{G3}$ (MW)	+0.1068	+3.0344	+2.9537	+3.2345	+0.102	-0.016
$\Delta P_{G4}$ (MW)	+0.0653	+0.0170	+3.0632	+2.9681	+0.301	+0.109
$\Delta P_{G5}$ (MW)	+0.1734	+0.8547	+2.9136	+2.9540	+0.523	+0.349
$\Delta P_{G6}$ (MW)	-0.6180	-0.0122	+2.9522	+2.4437	+0.035	+0.317
TGRS (MW)	24.7425	22.936	23.339	23.809	23.943	23.402
Parametreler	Algoritmalar					
	FPA [6]	ALO [6]	TLBO [7]	SOS [8]	TDO	SMA
TCC (\$/h)	519.62	480.0438	494.66	460.827	459.6804	459.1921
PF (Hat 1-7)	-	129.5	130	130	129.9993	129.9999
PF (Hat 7-8)	-	120.79	120.78	120.78	123.0755	123.0759
$\Delta P_{G1}$ (MW)	-9.1278	-9.0880	-8.5876	-8.588	-8.6063	-8.6057
$\Delta P_{G2}$ (MW)	+14.14	+15.0668	+12.9855	+14.581	+14.4715	+14.4864
$\Delta P_{G3}$ (MW)	-0.206	+0.0000	+0.4598	0.000	-0.0016	+0.0003
$\Delta P_{G4}$ (MW)	-0.0188	+0.0001	+0.7289	0.000	+0.0060	+0.0001
$\Delta P_{G5}$ (MW)	+0.189	+0.0002	-0.0093	0.000	+0.0063	+0.0002
$\Delta P_{G6}$ (MW)	+1.013	+0.0001	+0.3988	0.000	+0.0067	+0.0011
TGRS (MW)	24.703	24.1552	23.169	23.169	23.0984	23.0638

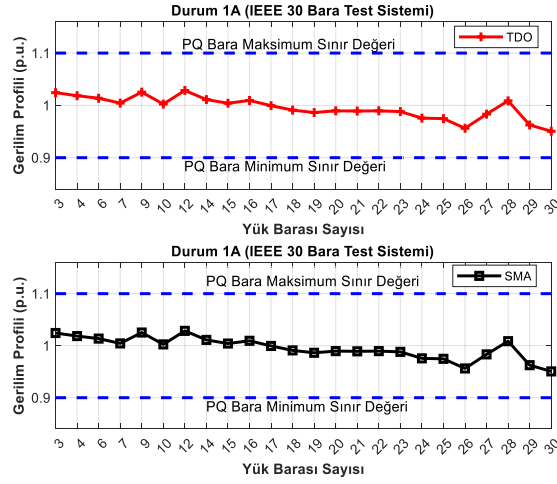
Durum 1A benzetim çalışması için değiştirilmiş IEEE 30 bara test sisteminin 1 ve 2 numaralı baraların arasında bağlanan hattın devre dışı kalması düşünülerek tıkanıklık oluşturulmuştur. Hattın devre dışı kalmasıyla, 1-7 ve 7-8 numaralı baralara bağlı hatlarda güç akışlarının sırasıyla 147.463 MW ve 136.292 MW olduğu görülmüştür. Bu hatlar için güç akışı sınırları 130 MW olduğu için hatlarda tıkanıklık meydana gelmiş olup, bu tıkanıklık jeneratörlerin aktif güç üretiminin en uygun değerde olacak şekilde TDO ve SMA algoritmalarıyla yeniden düzenlenerek hafifletilmiş ve bu algoritmalarından elde edilen sonuçlar Tablo 3'de detaylı bir şekilde verilmiştir. Tablo 3'den de görüldüğü gibi sunulan algoritmaların sonuçları literatürdeki diğer optimizasyon algoritmalarından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçlarına göre, SMA algoritmasından elde edilen sonuçların, diğer hatları aşırı yüklemeyen tıkanıklık maliyeti açısından en iyi değere sahip olduğu Tablo 3'den açıkça görülmektedir. Başka bir ifadeyle, SMA algoritmasının sonucu literatürdeki en iyi iki değere sahip ALO ve SOS algoritmalarından sırasıyla 20.8517 \$/h ve 1.6349 \$/h daha az değere sahiptir. SMA ve TDO algoritmalarından elde edilen uygunluk fonksiyonu değerlerinin değişimini gösteren yakınsama eğrileri Şekil 2'de verilmiştir. SMA ve TDO algoritmalarının optimizasyon işlemi sonucunda elde edilen sonuçlarına göre, yük baralarına ait gerilim değerlerinin belirtilen limit değerleri içinde eşitsizlik kısıtlarını karşıladığı Şekil 3'den açıkça görülmektedir. Şekil 4'te literatürdeki FFA, PSO, RSM, SA, BA, CBA, FPA, ALO, TLBO, SOS ve önerilen SMA ve TDO algoritmalarından elde edilen jeneratörlerin yeniden planlama değerleri gösterilmektedir.

Durum 1B benzetim çalışmasında test sisteminin 1 ve 7 numaralı baralara bağlı hattın devre dışı kalması ve sistemdeki tüm yük baralarının 50% oranında artırılarak tıkanıklık senaryosu oluşturulmuştur. Hattın devre dışı kalması ve yük değerlerinin artmasıyla birlikte, 1-2, 2-8 ve 2-9 numaralı baralara bağlı hatlarda güç akışlarının sırasıyla 310.917 MW, 97.353 ve 103.524 MW olduğu görülmüştür. Bu hatlar için güç akışı sınırları 130 MW ve 65 MW olduğundan bu hatlarda tıkanıklık meydana gelmiştir. Sistemde meydana gelen tıkanıklık, önerilen SMA

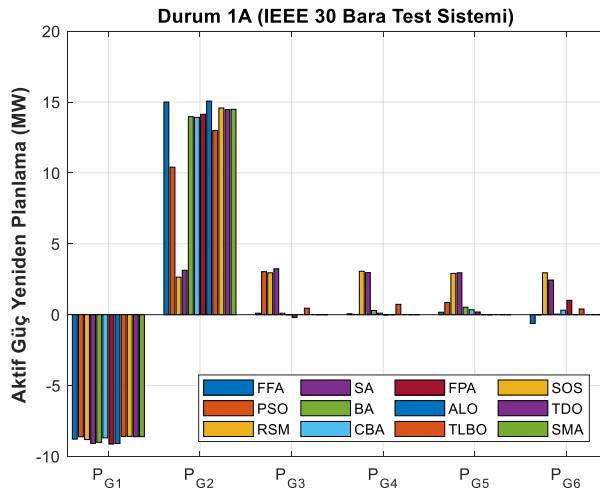
ve TDO algoritmalarıyla jeneratörlerin aktif güç değerlerinin yeniden planlaması yapılarak sistem tıkanık maliyetinin en aza indirilmesi sağlanmıştır.



Şekil 2. Durum 1A için SMA ve TDO algoritmalarının uygunluk fonksiyonu değerinin değişimi.



Şekil 3. Durum 1A için yük baralarına ait gerilim değerleri.



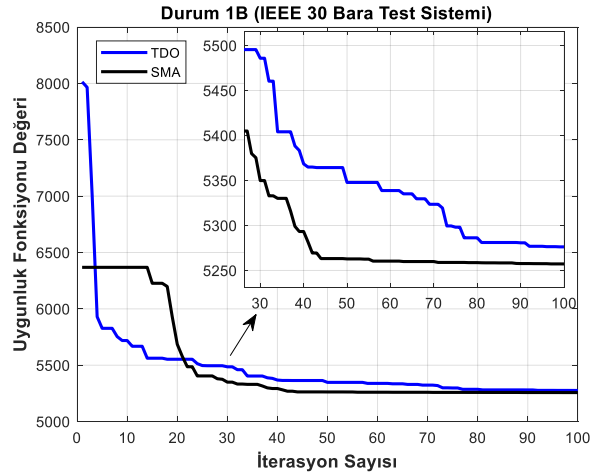
Şekil 4. Durum 1A için jeneratörlerin aktif güçlerinin yeniden planlama değerleri.

Durum 1B için önerilen algoritmalarla elde edilen sonuçlar ve literatürdeki diğer algoritmalarla elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmaları Tablo 4’de detaylı bir şekilde verilmiştir. Tablo 4’de verilen karşılaştırmalı sonuçlara göre, SMA algoritması tarafından elde edilen tıkanıklık maliyeti 5275.2658 \$/h ile en iyi değer olarak,

**Tablo 4.** Durum 1B için SMA ve TDO algoritmalarından elde edilen sonuçların diğer algoritmalarla karşılaştırılması.

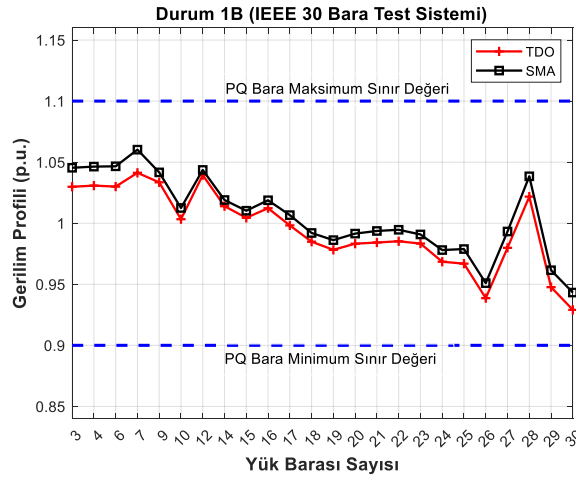
Parametreler	Algoritmalar					
	FFA [5]	PSO [4]	RSM [4]	SA [4]	BA [6]	CBA [6]
TCC (\$/h)	5304.40	5335.5	5988.05	6068.7	5333.72	5302.4
PF (Hat 1-2)	130	129.7	129.91	129.78	-	-
PF (Hat 2-8)	62.713	61.1	52.36	51.47	-	-
PF (Hat 2-9)	64.979	64.67	55.43	54.04	-	-
$\Delta P_{G1}$ (MW)	-8.5798	-	-	-	-8.582	-8.361
$\Delta P_{G2}$ (MW)	+75.9954	-	-	-	+67.72	76.402
$\Delta P_{G3}$ (MW)	+0.0575	-	-	-	+11.27	0.071
$\Delta P_{G4}$ (MW)	+42.9944	-	-	-	+49.42	50.082
$\Delta P_{G5}$ (MW)	+23.8325	-	-	-	+13.15	17.227
$\Delta P_{G6}$ (MW)	+16.5144	-	-	-	+14.45	15.736
TGRS (MW)	167.974	168.03	164.55	164.53	164.61	168.15
Parametreler	Algoritmalar					
	FPA [6]	ALO [6]	TLBO [7]	SOS [8]	TDO	SMA
TCC (\$/h)	5320.8	5296.75	5306.5	5303	5276.2510	5275.2658
PF (Hat 1-2)	-	130	130	130	129.4155	130.0000
PF (Hat 2-8)	-	60.404	62.34	63.11	62.4155	61.4903
PF (Hat 2-9)	-	65	65	65	64.9989	64.9974
$\Delta P_{G1}$ (MW)	-8.589	-8.588	-8.5876	-8.587	-8.6158	-8.5956
$\Delta P_{G2}$ (MW)	+74.024	+76.4	+75.65	+76.459	+76.1004	+76.0360
$\Delta P_{G3}$ (MW)	0.000	+0.056	+0.012	+0.0005	+1.5144	+0.2697
$\Delta P_{G4}$ (MW)	+13.5174	+42.844	+34.357	+41.083	+42.0308	+26.1489
$\Delta P_{G5}$ (MW)	+43.865	+24.571	+31.4791	+30.226	+18.7278	+32.3804
$\Delta P_{G6}$ (MW)	+27.89	+15.525	+17.83	+11.617	+20.6545	+23.8464
TGRS (MW)	167.896	167.98	168.088	167.975	167.6437	167.2770

literatürdeki en iyi sonuca sahip ALO ve SOS algoritmaların sonuçlarından sırasıyla 0.4072% ve 0.5257% daha iyidir. Şekil 5, SMA ve TDO algoritmalarının optimal çözüme yakınsama değişimlerini göstermektedir. Optimizasyon işlemi sonucunda, değiştirilmiş IEEE 30 bara test sisteminin yük baralarının gerilim değerleri Şekil 6'da gösterilmekte olup, bu değerler belirtilen sınırlar içerisinde. Ayrıca, Şekil 7'de literatürde bu problemin çözümünde kullanılan algoritmalar ve önerilen SMA ve TDO algoritmalarından elde edilen jeneratörlerin yeniden planlama değerleri karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

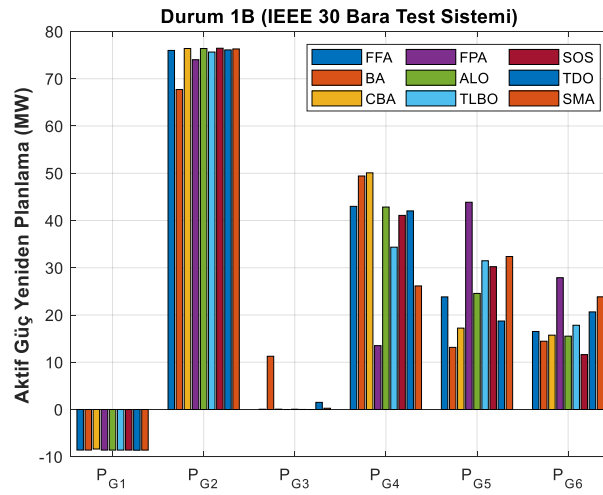
**Şekil 5.** Durum 1B için SMA ve TDO algoritmalarının uygunluk fonksiyonu değerinin değişimi.

## 5. SONUÇ

Bu makalede, güç sistemlerinin planlama problemlerinden biri olan tıkanıklık yönetimi probleminin çözümünde SMA ve TDO optimizasyon algoritmaları kullanımı amaçlanmıştır. Oluşturulan senaryolara göre meydana gelen tıkanıklığı tamamen azaltmak için jeneratörlerin üretim değerlerinin yeniden düzenlenerek tıkanıklık maliyetini en aza indirmeye SMA ve TDO algoritmaları başarıyla uygulanmıştır. Bu çalışmada, iletim hatlarında meydana gelen hat kesintileri ve yük baralarındaki ani yük değişimlerine göre oluşturulan senaryolar, değiştirilmiş IEEE 30 Bara test sisteminde uygulanarak benzetim çalışmaları yapılmıştır. Benzetim çalışmalarına göre, SMA ve TDO algoritmalarından elde edilen sonuçlar literatürde sunulan diğer optimizasyon algoritmalarının sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçlarına göre, SMA algoritmasının tıkanıklığı etkili bir şekilde giderdiği ve



Şekil 6. Durum 1B için yük baralarına ait gerilim değerleri.



Şekil 7. Durum 1B için jeneratörlerin aktif güçlerinin yeniden planlama değerleri.

tıkanıklık maliyetinin literatürdeki diğer algoritmalar tarafından sunulan sonuçlardan daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca, bu problemin çözümünde kullanılan SMA ve TDO algoritmaları kendi içerisinde karşılaştırıldığında, SMA algoritmasının optimal çözüme yakınsamada TDO algoritmasına göre daha etkili olduğu yakınsama grafiklerinden açık bir şekilde görülmektedir. SMA algoritması, tıkanıklık yönetimi probleminin çözümünde etkili olmasının yanı sıra, gelecekte farklı mühendislik ve bilim dallarının optimizasyon problemlerinin çözümünde etkin bir şekilde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

## KISALTMALAR LİSTESİ

CM : Tıkanıklık Yönetimi	TLBO : Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon
SMA : Balık Küfü Algoritması	SOS : Simbiyotik Organizmalar Arama
TDO : Tazmanya Canavarı Optimizasyon	FEP : Bulanık Evrimsel Programlama
PSO : Parçacık Sürü Optimizasyonu	NSGA-II : Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritma II
SA : Benzetim Tavlama	DE : Diferansiyel Evrim
RSM : Rasgele Arama Metodu	IDE : İyileştirilmiş Diferansiyel Evrim
FFA : Ateş Böceği Algoritması	MO-GSO : Çok Amaçlı Ateşböceği Sürüsü Optimizasyon
ALO : Karınca Aslanı Optimizasyon	FPSO : Bulanık Parçacık Sürü Optimizasyonu
FPA : Çiçek Tozlaşma Algoritması	GSA : Yerçekimi Arama Algoritması
BA : Yarasa Algoritması	ICSA : Geliştirilmiş Karga Arama Algoritması
CBA : Kaotik Yarasa Algoritması	GENCOs : Üretim Şirketleri

## Yazar Katkıları

Yazarlar eşit oranda katkı sağlamıştır.

## Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler

## KAYNAKÇA

- [1] A. Narain, S.K. Srivastava, and S.N. Singh “Congestion management approaches in restructured power system: key issues and challenges”, *The Electricity Journal*, vol. 33, p. 106715, 2020.
- [2] R. Peesapati, A. Yadav, V.K. Yadav, and N. Kumar “GSA-FAPSO-based generators active power rescheduling for transmission congestion management”, *IEEE Systems Journal*, vol. 13, no. 3, pp. 3266-3273, 2019.
- [3] A. Pillay, S.P. Karthikeyan, and D.P. Kothari “Congestion management in power systems-a review”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 70, pp. 83-90, 2015.
- [4] S. Balaraman, and N. Kamaraj “Transmission congestion management using particle swarm optimization”, *J. Electrical Systems*, vol. 7, no. 1, pp. 54-70, 2011.
- [5] S. Verma, and V. Mukherjee “Firefly algorithm for congestion management in deregulated environment”, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 19, pp. 1254-1265, 2016.
- [6] S. Verma, and V. Mukherjee “Optimal real power rescheduling of generators for congestion management using a novel ant lion optimiser”, *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 10, no. 10, pp. 2548-2561, 2016.
- [7] S. Verma, S. Saha, and V. Mukherjee “Optimal rescheduling of real power generation for congestion management using teaching-learning-based optimization algorithm”, *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, vol. 5, pp. 889-907, 2018.
- [8] S. Verma, S. Saha, and V. Mukherjee “A novel symbiotic organisms search algorithm for congestion management in deregulated environment”, *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, vol. 29, no. 1, pp. 59-79, 2017.
- [9] K. Vijayakumar “Multiobjective optimization methods for congestion management in deregulated power systems”, *Journal of Electrical and Computer Engineering*, p. 962462, 2012.
- [10] S. Balaraman, and N. Kamaraj “Application of differential evolution for congestion management in power system”, *Modern Applied Science*, vol. 4, no. 8, pp. 33-42, 2010.
- [11] M. Kashyap, and S. Kansal “Hybrid approach for congestion management using optimal placement of distributed generator”, *International Journal of Ambient Energy*, vol. 39, no. 2, pp. 132-142, 2018.
- [12] S.T. Suganthi, D. Devaraj, K. Ramar, and S.H. Thilagar “An improved differential evolution algorithm for congestion management in the presence of wind turbine generators”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 635-642, 2018.
- [13] S.R. Salkuti, and S.C. Kim “Congestion management using multi-objective glowworm swarm optimization algorithm”, *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 14, pp. 1565-1575, 2019.
- [14] C. Venkaiah, and D.M.V. Kumar “Fuzzy PSO congestion management using sensitivity-based optimal active power rescheduling of generators”, *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 32-41, 2011.
- [15] A. Sharma, and S.K. Jain “Gravitational search assisted algorithm for TCSC placement for congestion control in deregulated power system”, *Electric Power Systems Research*, vol. 174, 105874, 2019.
- [16] K. Paul, P. Sinha, S. Mobayen, F.F.M. El-Sousy, and A. Fekih “A novel improved crow search algorithm to alleviate congestion in power system transmission lines”, *Energy Reports*, vol. 8, pp. 11456-11465, 2022.
- [17] S. Li, H. Chen, M. Wang, A.A. Heidari, and S. Mirjalili “Slime mould algorithm: a new method for stochastic optimization”, *Future Generation Computer Systems*, vol. 111, pp. 300-323, 2020.
- [18] M. Dehghani, S. Hubálovský, and P. Trojovský “Tasmanian devil optimization: a new bio-inspired optimization algorithm for solving optimization algorithm”, *IEEE Access*, vol. 10, pp. 19599-19620, 2022.
- [19] F.S. Gharehchopogh, A. Ucan, T. Ibrikci, B. Arasteh, and G. Isik “Slime mould algorithm: a comprehensive survey of its variants and applications”, *Archives of Computational Methods in Engineering*.
- [20] R.D. Zimmerman, C.E. Murillo-Sanchez, and R.J. Thomas “MATPOWER: steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 1, pp. 12-19, 2011.
- [21] MATPOWER  
<http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>



## Trafikle İlgili Seslerin İşitsel Modeller ve Konvolüsyonel Sinir Ağları Kullanılarak Sınıflandırılması

### Classification of Traffic-Related Sounds Using Auditory Models and Convolutional Neural Networks

<sup>1</sup>Mariem Mine Cheikh Mohamed FADEL , <sup>2</sup>Zeynep ÖZER 

<sup>1</sup>Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Teknolojileri, Bandırma/Balıkesir, Türkiye

<sup>2</sup>Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi, Ömer Seyfettin Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Yönetim Bilişim Sistemleri, Bandırma/Balıkesir, Türkiye

<sup>1</sup>minebeyah@gmail.com, <sup>2</sup>zozer@bandirma.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 20 April 2023

Accepted : 8 June 2023

##### Keywords:

Traffic Sounds, Auditory Model, Convolutional Neural Networks

#### ABSTRACT

This study proposes a new approach for the detection of acoustic sources on highways in order to reduce noise pollution in urban areas. The proposed method uses the features of rate map on a logarithmic scale based on the characteristics of the human ear and includes a threshold function to focus the regions where spectral energy is concentrated. Four different inner hair-cell methods were compared in the proposed model, and the Joergensen IHC method provided a significant improvement in classification performance compared to other models. The proposed model achieved approximately 10% improvement in the F1 value compared to previous studies. Overall, this study presents a promising approach to acoustic traffic monitoring using machine learning techniques and auditory models.

© 2023 Bandırma Onyediy Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 20 Nisan 2023

Kabul : 8 Haziran 2023

##### Anahtar Kelimeler:

Trafik Sesleri, İşitsel Model, Konvolüsyonel Sinir Ağları

#### ÖZET

Bu çalışma, kentsel bölgelerdeki gürültü kirliliğini azaltmak amacıyla otoyollardaki akustik kaynakların tespiti için yeni bir yaklaşım önermektedir. Önerilen metod, insan kulağının özelliklerine dayanan logaritmik ölçekte hız haritaları özelliklerini kullanır ve spektral enerjinin yoğunlaştığı bölgelere odaklanmak için bir eşik işlevini içermektedir. Önerilen modelde dört farklı iç tüy hücresi yöntemi karşılaştırıldı ve Joergensen IHC yöntemi diğer modellere göre sınıflandırma performansında önemli bir gelişme sağladı. Önerilen model, önceki çalışmalara kıyasla F1 değerinde yaklaşık %10'luk bir iyileşme sağlamıştır. Genel olarak, bu çalışma, makine öğrenimi teknikleri ve işitsel modeller kullanarak akustik trafik izlemeye umut verici bir yaklaşım sunmaktadır.

© 2023 Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.



## 1. GİRİŞ

Dünya nüfusundaki artış, şehirleşme eğiliminin yükselmesi ve insanların kırsal alanlardan şehirlere taşınması şehir nüfuslarının büyümesine yol açmaktadır. Bu durum şehirlerdeki gürültü seviyelerinin artmasına ve insan sağlığına zarar veren düzeylere ulaşmasına neden olmaktadır. Bu bağlamda, gürültü kirliliği şehirlerde yaşayanlar için önemli bir sorun teşkil etmektedir. Gürültü sorunu şehir sakinleri arasında en yaygın şikayetlerden biridir [1]. Şehirlerdeki araç trafiği, gürültünün ana kaynaklarından biridir ve nüfus yoğunluğu arttıkça daha fazla araç kullanımı, uzun seyahat süreleri, gürültü ve hava kirliliği yaşanmaktadır.

Akıllı ulaşım sistemleri (AUS), trafik akışını hızlandırmak ve optimize etmek için yerel trafik koşullarına göre uyum sağlayarak etkili çözümler sunar. Son on yılda, trafik ışığı kontrolü, trafik kazalarının tespiti, lojistik takip ve diğer akıllı şehir uygulamaları için otomatik yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler, kamera sensörlerinden manyetik döngü sensörlerine, radar ve lidar sistemlerine kadar farklı sensör türlerini kullanarak trafik akışını ölçer. Bu sistemler, geniş kapsamlı sensör ağları olarak kurulabilir; ancak kurulum ve bakım maliyetleri yüksektir. Bu sebeple, daha ekonomik ve müdahaleci olmayan trafik ölçümleri için Akustik Trafik İzleme (ATİ), son yıllarda popülerlik kazanmıştır.

Gürültü kirliliği sorunu nedeniyle, son yıllarda ses ortamlarını izlemeye yönelik teknolojilerin geliştirilmesi hızlanmıştır [2][3]. Otomatik ses tanıma (OST) teknolojisi, sinyal işleme ve makine öğrenimi tekniklerini kullanarak ses olaylarını otomatik olarak tanımlamak için önemli bir araç haline gelmiştir. OST sistemleri, karayollarındaki akustik olayların kaynaklarını belirlemek amacıyla kullanılabilir. Ancak, bu görev birçok zorluk içermektedir. Bir yoldaki işitilebilir sesler, araçların motorları, egzozları, tekerlekleri ve hava türbülansı gibi çeşitli ses kaynaklarından kaynaklanır [1]. Aynı tür ses kaynakları (örneğin otomobiller) için farklı iç değişkenler, konumlar ve durumlar ile akustik ortamın etkileri (örneğin yankı, uzaklık) göz önünde bulundurulduğunda, her kategori için akustik nitelikler önemli ölçüde değişiklik gösterebilir. Bu sebeple, ses kaynaklarının çeşitlerini ayırt etmek oldukça güçtür.

Ses tanıma bir örüntü problemi ve üç temel bileşenden oluşur. Bunlar sinyal ön işleme, nitelik çıkarma ve sınıflandırmadır. Bu yöntem, ses kaynaklarının tanımlanması, konuşma tanıma ve doğal dil işleme gibi çeşitli uygulama alanlarında kullanılır. Sinyal işleme evresinde, gelen sinyal parçalara ayrılır ve nitelik elde etme süreci için uygun hale getirilir. Özellik çıkarma aşamasında, verinin boyutu azaltılarak bir özellik vektörü olarak temsil edilir. Son olarak sınıflandırma aşamasında, elde edilen özellik vektörleri, belirli bir sınıfa atanmak üzere bir sınıflandırma algoritması kullanarak işlenir. Bu yaklaşım, ses tanıma teknolojisinin geniş bir uygulama yelpazesine yayılmasına olanak tanır.

Ses tanıma görevlerinde prozodik özellikler [1], ses kalitesi [2], Teager enerji operatörü (TEO) [3] ve spektral özellikler gibi birçok farklı özellik kullanılabilir. Bununla birlikte son yıllarda geleneksel el ile seçilmiş özelliklerin yanı sıra 2 boyutlu zaman-frekans gösterimleri de yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu gösterimler üzerinden konvolüsyonel sinir ağları (CNN) ile özellik çıkarımı ve sınıflandırması gerçekleştirilmektedir. Böylelikle el ile seçilmiş özelliklerinin belirlenmesindeki uzmanlık ve zaman gerektiren süreçler önemli ölçüde azaltılmaktadır. Fakat 2 boyutlu zaman-frekans gösterimleri kendi içerisinde çeşitlilik göstermektedir ve bunlardan hangisinin en uygun özellik olduğuna dair genel bir kanı bulunmamaktadır.

Son zamanlarda ses [4][5][6] ve konuşma [7][8][9] ile ilgili olaylarda zaman-frekans temsilleri başarıyla kullanılmaktadır. [9]'da yapılan çalışmada, SER görevi için CNN, SVM ve uzun kısa süreli bellek ağı (LSTM) ile birlikte 3B log Mel-spektrogram öznelikleri kullanılmıştır. Çalışmada [9], 64 Mel filtre bankası ve 25 ms uzunluğunda ve 15 ms örtüşme süresi olan Hamming penceresini kullanılmıştır. Önerilen modelin testleri, halka açık dört farklı veri seti üzerinde gerçekleştirilmiş ve EMO-DB veri seti üzerinde konuşmalardan duygu tespiti görevinde %86,44'lük bir sınıflandırma performansı elde edilmiştir. Buna benzer şekilde başka bir çalışmada [1], CNN ve LSTM ağları ile log Mel-spektrogram özelliklerini kullanmıştır. Ancak 3D CNN ağları yerine 1D ve 2D CNN ağları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bir diğer grup çalışmalarda da spektrogram resim özellikleri kullanılarak gürültüye karşı dirençli ses olayı tespiti gerçekleştirilmiştir [10].

İnsan işitme sistemi çevresel sesleri ayırt etme konusunda oldukça başarılıdır. Dolayısıyla insan işitme sistemini modelleyen yaklaşımlar bir ATİ görevi için başarılı olabilir. Bu çalışmada [11] IHC modeli tabanlı oran haritası (rate map) özelliklerini kullanan bir ATİ sistemi önerilmiştir. İnsan kokleasındaki mekanik transdüksiyon sürecinin bir sonucu olarak, işitsel sinir ateşlemesi meydana gelir ve oran haritası özellikleri, bu ateşleme işlemi hızının spektro-zamansal temsiliyi kodlar. Oran haritası özellikleri dört temel aşamada oluşturulur [12]. İlk olarak, ses sinyaline ön vurgulama işlemi uygulanır. Daha sonra Koklear filtreleme gamaton filtresi (GTF) kullanılarak gerçekleştirilir. Bir sonraki aşamada, baziler membran segmentinin çıkışındaki sinyal, yarım dalga doğrultulmuş ve 1 kHz'de düşük geçişli filtrelenmiştir. Bu aşama, baziler membranın mekanik salınımlarının iç tüy hücrelerinde reseptör potansiyellerine dönüşümünü kabaca simüle eder. Son olarak, Hamming penceresi ile meydana gelen ani artışlar entegre edilerek oran haritası özellikleri elde edilir.

GTF, üst frekans bölgesinde geniş frekans bileşenleri ve alt frekans bölgesinde dar frekans bileşenleri sunar [13]. Alt frekans aralığında sağlanan daha kesin frekans çözünürlüğü, üst frekans aralığında önemli spektral bilgileri kaybetmeden daha fazla spektral bilgi elde etmede faydalıdır [13][14]. Bu, OST görevi gibi düşük frekans aralığında yüksek enerji seviyelerine sahip uygulamalar için spektrogram ve Mel-spektrogram gibi 2 boyutlu zaman-frekans gösterimlerine göre bir avantaj sağlar [13][15]. Bu çalışmada ilk olarak WAV dosyaları normalleştirmeden önceki durumlarına ölçüklendi. Daha sonra yukarıda bahsedildiği gibi oran haritası özellikleri

elde edilmiştir. Bu doğrusal hız haritalarının dinamik aralığı log fonksiyonu kullanılarak sıkıştırılmış ve log-güç oran haritaları elde edilmiştir. Bu adımı takiben, oran haritalarının güçlü olduğu bölgelere odaklanmak için doymun ve doğrusal olmayan bir fonksiyon uygulanmıştır. Bu işlem spektral tepelere odaklanmak için gerçekleştirilir. Literatürdeki çalışmalar, spektral tepelerin spektral vadilere kıyasla sağlamlık açısından göreceli önemini ortaya koymaktadır [16]. Spektral vadilerdeki bilgiler, daha önce gürültü ile dolduruldukları için sağlam olmayacaktır. Elde edilen oran haritası özellikleri OST görevi için bir CNN kullanılarak sınıflandırıldı. CNN, son yıllarda görüntü ile ilgili birçok uygulamada oldukça başarılı bir şekilde kullanılmıştır. Önerilen yaklaşım, kamuya açık olarak yayınlanmış bir veri seti üzerinde test edildi ve oldukça başarılı sonuçlar elde edildi.

## 2. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde çalışmada kullanılan oran haritası temsillerinin elde edilişi, kullanılan CNN mimarisi, performans kıyaslama metrikleri ve veri seti hakkında bilgi verilmektedir.

### 2.1. Oran Haritası Temsilleri

Oran haritası gösterimi, insan işitsel sisteminden esinlenmiştir [12][17]. Temel olarak, işitsel sinir ateşleme hızının spektro-zamansal modelini kodlar [17]. Her frekans kanalının zarfı, bir işitsel sinir lifinin anlık ateşleme oranı olarak açıklanabilir [18][19]. Bu, kokleadaki mekanik transdüksiyon işlemine dayanmaktadır [17].

Oran haritası gösterimini elde etme süreci dört temel adımdan oluşur [12]. İlkinde, ses sinyaline ön vurgulama işlemi uygulanır. Daha sonra elde edilen sinyal üzerinde koklear filtreleme gerçekleştirilir. Bu işlem için, insan kokleasının frekans seçim özelliği GTF [20] kullanılarak modellenmiştir. Bir sonraki aşamada, IHC modeli kullanılarak nöromekanik transdüksiyon gerçekleştirilir. Son olarak, sinyale Hamming penceresi uygulandıktan sonra uyartım oluşma olasılığı hesaplanır.

#### 2.1.1. Ön vurgulama süreci

Dış ve orta kulak, kulak zarının ses basıncını farklı frekanslara göre artıran ve azaltan karmaşık bir akustik boşluk yaratır [12]. Küçük ılıman ses yoğunlukları için dış ve orta kulakların yaklaşık olarak lineer olduğu söylenebilir. Bu durumda, rezonansları basit bir lineer filtre ile modellemek mümkündür; burada  $t$  zaman,  $x(t)$  bir giriş sinyali ve  $y(t)$  filtrelenmiş çıkış sinylidir. Bu durumda ön vurgu süreci şu şekilde ifade edilebilir:

$$y(t) = x(t) - 0.97x(t-1) \quad (1)$$

### 2.2. Koklear filtreleme

Ön vurgulama işleminden sonra, insan kokleasının frekans seçim özelliği bir filtre bankası aracılığıyla modellenir. Bu işlem için bir GTF kullanılır [20][21], burada  $A$  genlik,  $j$  filtre sırası,  $f_c$  filtrenin merkez frekansı,  $\phi$  faz,  $B$  bant genişliği ve  $t$  ise zamandır. Bu durumda filtre şu şekilde tanımlanabilir:

$$h(t) = At^{j-1}e^{-2\pi Bt} \cos(2\pi f_c t + \phi) \quad (2)$$

Faz, farklı frekans kanallarının her birinin başlangıç ve ofset sürelerinin karşılaştırılmasında kritik öneme sahiptir. Filtre bankası fazı telafi edilirse, frekans geçiş haritasında performans artar [12]. [22] 'de önerilen kompanzasyon için iki farklı yöntem kullanılmıştır. İlk yöntemde, zaman farkı, her bir dürtü yanıtının zarflarının tepe noktalarının hizalanması için filtrenin çıkışına uygulanır. Bu şu şekilde ifade edilebilir:

$$t_c = \frac{j-1}{2\pi B} \quad (3)$$

İkinci yöntemde, faz düzeltme yoluyla, zamansal ince formdaki bir üst nokta, zarftaki bir üst nokta ile hizalanır. Bu şu şekilde ifade edilebilir:

$$\phi_c = -2\pi f_c t_c \quad (4)$$

Denklem (3) ve (4), Denklem (2)'ye ikame edilirse, faz dengeli bir GTF elde edilir. Bu şu şekilde ifade edilebilir:

$$h(t) = A(t+t_c)^{j-1}e^{-2\pi B(t+t_c)} \cos(2\pi f_c t) \quad (t \geq -t_c) \quad (5)$$

GTF sıra yanıtı, düşük frekans değerlerinde ve aynı frekans çözünürlüğünde geleneksel hızlı Fourier dönüşümü (FFT) filtre bankasından daha hızlıdır. GTF bankası, [23]'de önerilen eşdeğer bir dikdörtgen bant genişliği (ERB) ölçeği ile kullanıldı. Bu aslında MFCC'nin (Mel-Frequency Cepstral Coefficients)[24] biyolojik olarak esinlenilmiş bir modifikasyonudur ve şu şekilde ifade edilebilir:

$$E(f) = 21.4 \log_{10}(4.37f + 1) \quad (6)$$

burada ERB sayısı  $E(f)$  ve  $f$  kHz cinsinden frekanstır.

### 2.3. Nöromekanik Transdüksiyon

Koklea, ses basıncını baziler membranın titreşim hareketlerine dönüştürür ve daha sonra bu titreşimlerden nöral impulslar oluşturulur [25]. Kokleayı karmaşık seslerin frekans bileşenlerini analiz eden bir sistem olarak düşünmek mümkündür çünkü baziler membran boyunca her pozisyonun belirli bir frekansa karşılık geldiği bir frekans analizörü işlevi gerçekleştirir [25]. Koklea şeklini yaklaşık 3.5 cm genişliğinde ve 1 cm uzunluğunda küçük bir tüp olarak tanımlamak mümkündür [25]. Baziler membran, kokleayı oluşturan ana unsurdur ve genişliği ve sertliği koklea boyunca değişir [25]. Aynı zamanda içi sıvı dolu iki tüpü birbirinden ayırır [25] ve oldukça sofistike bir yapıya sahip olan korti organını içerir. Bu organ, baziler membran titreşimlerine yanıt verir ve sinir uyarılarına iletilmesine izin verir [25]. Korti organı boyunca üç outer hair-cell (OHC) ve bir IHC vardır [25]. IHC'ler, saç hücrelerinin etrafındaki hareketi algılayan ve mekanik transdüksiyon yoluyla nöral uyarılar üreten ana sensörlerdir [25].

İşitsel modellerde, tüy hücresi iletimi, bir dizi sinir aktivitesinin bir ölçümünü elde etmek için bir girdi olarak baziler membranın hızı veya yer değiştirmesi kullanılarak temsil edilir [26]. Bu çalışmada 4 farklı IHC modeli kullanılmıştır.

Dau modelinde, spesifik baziler membran segmentinin çıkışındaki sinyal, yarım dalga doğrultulmuş ve 1 kHz'de düşük geçişli filtrelendirilmiştir. Bu aşama, baziler membranın mekanik salınımlarının IHC'de reseptör potansiyellerine dönüşümünü kabaca simüle eder. Alçak geçiren filtreleme, esasen yüksek taşıyıcı frekansları için sinyalin zarfını korur. Adaptasyonun etkileri geri besleme döngüleriyle simüle edildi. Bu aşama, sabit sinyalleri neredeyse logaritmik olarak sıkıştırırken, girişin hızlı dalgalanmaları daha doğrusal olarak dönüştürülür. Geri besleme döngülerini takip eden aşamada, sinyal, 20 ms'lik bir zaman sabitine karşılık gelen 8 Hz'de düşük geçişli filtrelendirilmiştir. Bu değer, eşlik eden Dau ve diğerleri, 1996 belgesinde açıklanan simülasyonların sonucu ile önerilmiştir [11].

Kullanılan bir diğer IHC metodu Joergensen yöntemidir. Bu yöntemin en temel özelliklerinden biri Hilbert dönüşümünün her gamaton filtresinin çıktısının zarfına uygulanmasıdır. Hilbert dönüşümü gerçekleştirildikten sonra elde edilen zarf, kesme frekansı 150 Hz olan tek bir modülasyonlu alçak geçiren filtreye girdi olarak uygulanır. Burada modülasyon-frekans alanında seçiciliğin olmadığı varsayılır [27].

Bir diğer yöntemde IHC'lerin etkin sinyal işleme, bir yarım dalga doğrultucu ve ardından 23 dB 770 Hz'lik bir kesme frekansına sahip beşinci dereceden bir alçak geçiren filtre tarafından modellenmiştir. Yaklaşık 770 Hz'nin altındaki frekanslar için alçak geçiren filtrenin çıkış üzerinde neredeyse hiçbir etkisi yoktur. Bu nedenle dalga formunun sadece negatif fazı kaybolur ve bu nedenle çıkışta dalga formunun ince yapısındaki zamanlama bilgisi korunur. 2000 Hz'nin üzerindeki frekanslar için, alçak geçiren filtreden sonra hemen hemen tüm faz bilgileri kaybolur ve bu aşamanın çıkışında sadece gelen sinyallerin zarfı bulunur. Aradaki frekanslar için kademeli bir faz bilgisi kaybı gözlemlenir. Bu şekilde model, işitsel sinir Kiang, 1975'te gözlemlenen artan frekansla faz kilitlenmesinin azalmasını etkin bir şekilde simüle eder [28][29][30][31].

Kullanılan son yöntem Hilbert dönüşümüdür (Hilbert Transform-HT). Bu dönüşüm, bir spektral analizden minimum faz tepkisini elde etmek için kullanılan bir tekniktir. Ayrıca HT anlık frekansı bulmada kullanılabilen basit bir lineer operatördür. Burada  $s(t)$  gamaton filtresinin çıkışındaki sinyal olmak üzere HT şu şekilde ifade edilir [32].

$$HT[s(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{(t - \tau)} d\tau \quad (7)$$

$a(t) = \sqrt{s^2 + p^2}$  anlık genlik ve  $\theta(t) = \arctan(p/s)$  faz fonksiyonu olmak üzere HT aracılığıyla analitik sinyali şu şekilde tanımlamak mümkündür:

$$z(t) = s(t) + jp(t) = a(t)e^{j\theta(t)} \quad (8)$$

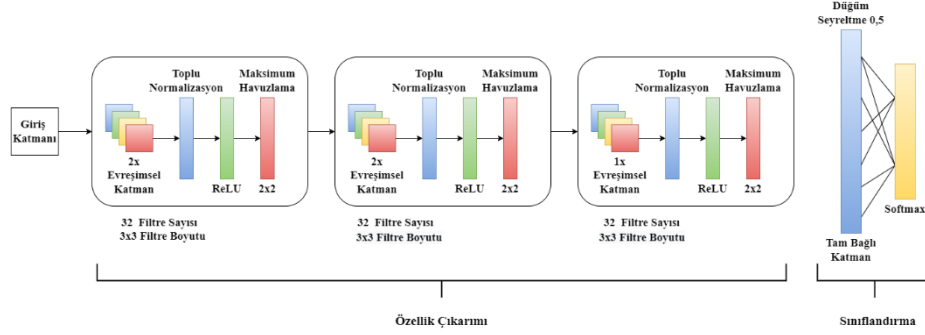
### 2.4. Oran Haritası

Oran haritası, her bir frekans kanalı için ayrı ayrı hesaplanır. Bu işlem için, IHC ölçüleri önce sızdıran bir entegratör kullanılarak düzeltilir. Burada tipik olarak zaman sabiti 8 ms'dir. Daha sonra her kanal örtüşen periyotlara bölünür ve Hamming penceresi uygulanır. Son olarak, her bir zaman çerçevesindeki örneklerin ortalaması alınır.

## 3. DERİN ÖĞRENME MODELİ

Çalışma kapsamında kullanılan CNN modeli 5 evrişimsel katman içermektedir. Tüm evrişimsel katmanlardaki filtre boyutu 3x3 olarak belirlenmiştir. İlk iki evrişimsel katmandaki filtre sayısı 32 olarak belirlenmiştir. Bu katmanları takiben sırasıyla bir toplu normalizasyon (batch normalization) katmanı, ReLU aktivasyon katmanı ve 2x2 boyutlu maksimum havuzlama katmanı yer almaktadır. Bu katmanlardan sonra tekrardan 2 ayrı evrişimsel katmanı yer almaktadır. Bu katmanlardaki filtre sayısı 64'tür. Bu evrişimsel katmanlardan sonra da ilk iki evrişimsel katmanı takip eden katmanlar yer almaktadır. Sonrasında 128 filtreden oluşan bir evrişimsel katman yer almaktadır. Bu katmandan sonra diğer evrişimsel katmanlardakilere ilave olarak düşüm seyreltme (dropout) işlemi uygulanmaktadır. Ayrıca 1024 düğümünden oluşan bir tam bağlı katman bulunur. Bu katmanın aktivasyon

fonksiyonu olarak ReLU kullanılmıştır. Sonrasında ise sınıflandırma işleminin yapıldığı çıkış katmanı yer almaktadır. Bu katmanın düğüm sayısı sınıf sayısı ile aynıdır ve aktivasyon fonksiyonu olarak softmax kullanılmaktadır.



Şekil 1. CNN Mimarisi.

CNN son yıllarda pek çok farklı alanda kullanılan bir derin öğrenme modelidir [33][34][35]. Bu modelin zaman karmaşıklığı filtre sayısı, filtre boyutu ve giriş verisinin boyutu gibi çok sayıda parametreye bağlıdır. Burada  $l$  evrişim katmanının indeksi,  $d$  evrişim katmanlarının toplam sayısı,  $f_l$   $l$ 'inci katmanın filtre sayısı,  $f_{l-1}$  giriş kanallarının sayısı,  $s_l$  filtre uzunluğu ve  $m_l$  özellik haritasının uzamsal boyutu olmak üzere zaman karmaşıklığı şu şekilde ifade edilebilir.

$$O\left(\sum_{l=1}^d f_{l-1} \cdot s_l^2 \cdot f_l \cdot m_l^2\right) \quad (9)$$

Yukarıda verilen eşitlik test aşamasındaki zaman karmaşıklığı için geçerlidir [36]. Eğitim aşamasındaki zaman karmaşıklığı bunun yaklaşık üç katıdır [36]. Bu durumda  $e$  eğitim tur sayısını belirtmek üzere, eğitim aşamasındaki zaman karmaşıklığı şu şekilde yazılabilir:

$$O\left(\left(\sum_{l=1}^d f_{l-1} \cdot s_l^2 \cdot f_l \cdot m_l^2\right) 3e\right) \quad (10)$$

Eğitim sürecinde modellerin kayıp fonksiyonu olarak kategorik çapraz entropi kullanıldı ve optimizasyon amacıyla Adam yöntemi seçildi. Tüm modellerde veri seti, eğitim, test ve doğrulama olmak üzere üç bölüme ayrıldı. Beş parçalı çapraz doğrulama testlerinde, eğitim setinin %10'u doğrulama verisi olarak kullanıldı. Geleneksel bölme yöntemi ile yapılan testlerde ise, eğitim, test ve doğrulama bölümleri daha güvenilir bir karşılaştırma sağlamak adına orijinal çalışmadaki şekilde uygulandı.

Tüm modeller, 250 döngü süresince eğitildi ve doğrulama setinde en iyi performansı sergileyen model ağırlıkları, test sürecinde kullanıldı. Bulgular bölümünde rapor edilen sonuçlar, test veri seti üzerinde elde edilen skorları yansıtmaktadır.

#### 4. PERFORMANS DEĞERLENDİRME METRİKLERİ

Makine öğrenimi modellerinin performansını karşılaştırmak için kullanılan ölçütler, sonuçların doğruluğunu değerlendirmede oldukça kritiktir. Bu kapsamda, bu çalışmada sınıflandırma doğruluğu (ACC), duyarlılık (Sens), özgüllük (Spec), kesinlik (Prec) ve F1 gibi çeşitli metrikler kullanılmıştır. Bu ölçütler, makine öğrenimi algoritmalarının performansını nesnel bir şekilde değerlendirmek amacıyla yaygın olarak kullanılır.

Doğruluk değeri, doğru sınıflandırılmış örneklerin sayısının toplam örnek sayısına bölünmesi ile hesaplanır. Bu değer, sınıflandırma çalışmalarında sıkça başvurulan bir karşılaştırma ölçütüdür ve aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$\text{Doğruluk} = \frac{TN + TP}{TN + TP + FP + FN} \quad (11)$$

Performans değerlendirmesi için sadece doğruluk parametresine dayanmak yetersiz olabilir. Bu sebeple, özgüllük, duyarlılık, kesinlik ve F1 gibi ek istatistiksel performans ölçütleri kullanılması önerilir. Özgüllük, doğru şekilde tahmin edilmiş gerçek negatiflerin oranını belirtirken, duyarlılık doğru şekilde tahmin edilmiş gerçek pozitiflerin oranını ifade eder. Kesinlik, doğru tahmin edilen pozitif örneklerin oranını temsil eder. F1 ise, duyarlılık ve kesinlik değerlerinin harmonik ortalamasını gösterir. Bu değerlerin hesaplanması için kullanılan formüller şöyledir:

$$\text{Özgüllük} = \frac{TN}{TN + FP} \quad (12)$$

$$\text{Duyarluluk} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (13)$$

$$\text{Kesinlik} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (14)$$

$$F1 = \frac{2TP}{2TP + FP + FN} \quad (15)$$

## 5. VERİ SETİ

Bu çalışmada, [29] numaralı kaynakta belirtilen IDMT-Trafik veri seti kullanılmıştır. Bu veri seti, Almanya'nın Ilmenau kentindeki üç şehir trafiği bölgesi ve bir köy yolu bölgesi olmak üzere toplam dört farklı kayıt konumunda, yüksek kaliteli sE8 mikrofonlar ve düşük maliyetli mikroelektromekanik sistem (MEMS) mikrofonları ile gerçekleştirilmiş eş zamanlı stereo ses kayıtlarını içerir. Kayıt senaryoları, çeşitli hız sınırları (30, 50 ve 70 km/s) ve hem kuru hem de ıslak yol koşullarını kapsamaktadır.

Veri setinin ilk rapor edilen hali dört sınıf içermektedir. Bunlar araba (3903 olay), kamyon (511 olay), otobüs (53 olay), motosiklet (251 olay) ve taşıt yok (4071) sınıflarıdır. Araç türlerinin doğal olarak dengesiz dağıldığı yaygın trafik senaryolarını yansıtan bir dağılım elde edilmiştir. Veri setindeki örneklerin dağılımı Tablo 1'de yer almaktadır. Tablo 1'de verilen değerler orijinal çalışmayla birebir aynı olacak şekilde geleneksel bölme işleminin yapıldığı testlerde kullanılmıştır.

**Tablo 1.** Sınıf bazlı dağılımı.

Sınıf	Kamyon	Araba	Motosiklet	Taşıt Yok
Doğrulama Seti	32	275	15	266
Eğitim Seti	290	2471	132	2393
Test Seti	189	1157	99	1412

Veri seti örnek ve sınıf sayısı sonraki versiyonlarında artırılmıştır. Yukarıdaki sınıflara ilave olarak otobüs sınıfı eklenmiştir. Nihai durumda 30-50-70 km/s ve bilinmeyen hızlarda geçen 17506 aracın iki saniye uzunluğunda kaydedilmiş sesleri mevcuttur. Dosya metadatalarında kayıt tarihini yıl-ay-gün saat ve dakika olarak mevcuttur. Kayıtlar [Fraunhofer-IDMT, Schleusinger-Allee, Langewiesener-Strasse, Hohenwarte] adresinde oluşturulmuştur. Ham veri olarak araç sınıfları otobüs, araba, motosiklet ve kamyon olarak ayrılmıştır. Kayıt sırasında hava şartları kuru ve ıslak olacak şekilde (D-W) sınıflandırılmıştır. Araçların hareket yönleri sağ ve sol olarak ayrılmıştır. Ham veri SE, sE8 tipi; ME ise MEMS tipi ICS-43434 tipi mikrofonlar kullanılıp 1+2 veya 3+4 olacak şekilde stereo kanallara kaydedilmiştir.

`2019-10-23-16-20\_Fraunhofer-IDMT\_30Kmh\_990828\_A\_D\_CL\_SE\_CH34.wav` bu örnekte, dosya ismine bakarak araba sesinin sol taraftan saatte 30 km hızla sE8 3+4 stereo kanalı 2019.10.23 saat 16:20' de öğleden sonra hava kuru iken Fraunhofer IDMT lokasyonunda kaydedildiği çıkarımı yapılabilmektedir. Tablo 2'de veri setinin nihai durumundaki sınıf ve olay sayıları verilmiştir.

**Tablo 2.** Veri setinin nihai halindeki sınıflar ve olay sayıları.

Sınıf	Olay Sayısı
Otobüs	106
Araba	7804
Motosiklet	430
Taşıt Yok	8144
Kamyon	1022

## 6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde sonuçlar iki ayrı şekilde değerlendirilmektedir. İlk olarak 4 farklı IHC metodunun performansı 5 parça çapraz doğrulama ile verilmektedir. Sonrasında aynı veri seti üzerinde literatürde daha önce yapılmış çalışmayla sonuçlar kıyaslanmıştır. Literatürdeki çalışmayla kıyaslama yapılırken geleneksel test yapılmıştır.

### 6.1. Çapraz doğrulama testleri

Tablo 3'de 4 farklı IHC metodunun sınıf bazlı değerlendirme sonuçları verilmiştir. Çapraz doğrulama testleri veri setinde bulunan tüm kayıtlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 3'de de görüldüğü gibi taşıt yok, motosiklet ve otobüs sınıfları için en yüksek F1 değerleri Joergensen IHC metoduna aittir. Bu üç sınıf için sırasıyla %97.61, %95.55 ve %69.89 skorları elde edilmiştir. Araba ve kamyon sınıfları için ise en yüksek F1 değerleri sırasıyla %92.5 ve %91.96 olmak üzere Hilbert metoduna aittir. Bununla birlikte Joergensen IHC metodu ile de araba ve kamyon sınıfları için bu skorlara oldukça yakın değerler elde edilmiştir. Araba sınıfı için F1 değeri %92.44 kamyon

için %41.6'dır. Dau ve Breebart IHC modellerinin performansı Joergensen ve Hilbert modellerinin bir miktar gerisinde kalmıştır. Breebart modelinde taşıt yok, motosiklet, araba, kamyon ve otobüs sınıfları için F1 değeri sırasıyla %95.71, %92.56, %90.10, %37.63 ve %62.98'dir. Dau IHC modelinde ise aynı sınıflar için sırasıyla %95.26, %91.9, %90.03, %38.77 ve %52.87 olarak gerçekleşmiştir. Özellikle otobüs sınıfı için Joergensen IHC metodu Dau IHC'ye göre belirgin bir şekilde daha iyi bir performans sergilemiştir. Otobüs sınıfı için iki metod arasındaki F1 değeri farkı yaklaşık olarak %17'dir.

Şekil 2'de tüm sınıflar için 5-fold çapraz doğrulama ile elde edilmiş kıyaslama metriklerinin ortalaması görülmektedir. Hilbert ve Joergensen metodları geneli itibarıyla diğer metotlara göre daha üstün bir performans sergilemiştir. Esasında her iki yöntemde Hilbert dönüşümüne (HT) dayanmaktadır ve sınıflandırma performansındaki iyileşmenin bu dönüşümden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Bunun başlıca sebebinin HT tabanlı özelliklerin durağan olmayan ve doğrusal olmayan sinyalleri analiz etme konusundaki başarımlarından kaynaklandığı değerlendirilmektedir [37]. HT'ye ilave olarak Joergensen IHC metodu alçak geçiren filtre içermektedir. Bu durumda spectral enerjinin daha düşük frekanslarda toplandığı ses sınıflandırma gibi görevler için avantaj sağladığı değerlendirilmektedir [38].

**Tablo 3.** IHC metodunun sınıf bazlı değerlendirme sonuçları.

		Dau	Joergensen	Hilbert	Breebart
Duyarlılık	Taşıt Yok	97.62	98.18	98.17	97.94
	Motosiklet	89.77	94.88	94.19	92.56
	Araba	91.38	95.28	95.21	91.30
	Kamyon	27.79	30.53	30.63	27.40
	Otobüs	43.40	61.32	62.26	53.77
Özgüllük	Taşıt Yok	93.62	97.40	97.20	94.16
	Motosiklet	99.86	<b>99.91</b>	99.89	99.81
	Araba	90.65	91.25	91.43	90.86
	Kamyon	99.04	98.99	99.05	98.87
	Otobüs	99.87	<b>99.91</b>	99.84	99.90
Kesinlik	Taşıt Yok	93.02	97.05	96.83	93.58
	Motosiklet	94.15	96.23	95.52	92.56
	Araba	88.72	89.75	89.94	88.93
	Kamyon	64.11	65.27	66.60	60.09
	Otobüs	67.65	81.25	70.21	76.00
F1	Taşıt Yok	95.26	<b>97.61</b>	97.49	95.71
	Motosiklet	91.90	<b>95.55</b>	94.85	92.56
	Araba	90.03	92.44	<b>92.50</b>	90.10
	Kamyon	38.77	41.60	<b>41.96</b>	37.63
	Otobüs	52.87	<b>69.89</b>	66.00	62.98

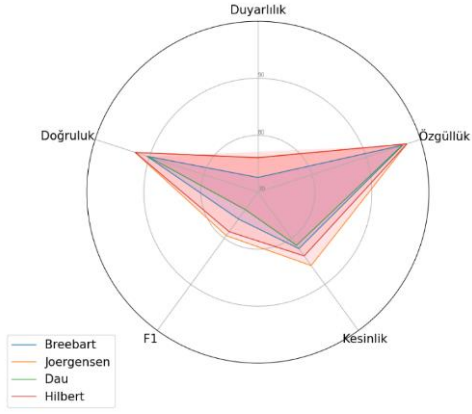
Çalışmada kullanılan veri setinde sınıflar arasındaki veri miktarı ciddi bir biçimde dengesizdir. Bu nedenle daha doğru bir kıyaslama sunabilmek adına duyarlılık, özgüllük, kesinlik, F1 ve doğruluk metrikleri de elde edilmiştir. Şekil 2 tüm bu metrikler için ortalama skorları göstermektedir. Tablo 3 ve Şekil 2 bir arada incelendiğinde duyarlılık metriğinin diğer metriklere kıyasla belirgin bir şekilde daha düşük olduğu görülmektedir. Duyarlılık metriği TP örnekler ile FN örnekler arasındaki oranı göstermektedir. Burada kamyon ve otobüs sınıfı için veri setinde bulunan örnek sayısı araba ve taşıt yok sınıflarına kıyasla bariz bir şekilde daha düşüktür. Makine öğrenmesi modelleri genel olarak çoğunluk sınıfına eğilimlidir [38]. Buna bağlı olarak kamyon ve bu sınıflarında FN değerlerinin daha yüksek olarak gerçekleştiği ve bununla ortalama duyarlılık skorunu düşürdüğü değerlendirilmektedir. Burada en düşük duyarlılık değeri %27.79 ile Dau IHC metodunda kamyon sınıfına aittir. En yüksek duyarlılık değeri ise %98.18 ile taşıt yok sınıfında Joergensen IHC metodu tarafından elde edilmiştir. Özgüllük ve kesinlik metriğinde de benzer şekilde en iyi skorlar Joergensen IHC metodu ile elde edilmiştir. Özgüllük için en iyi skorlar %99.91 değerleri ile motosiklet ve otobüs sınıfları için elde edilmiştir. Kesinlik metriğinde ise en yüksek skor %97.05 ile taşıt yok sınıfında gerçekleşmiştir.

## 7. DİĞER MODELLER İLE KIYASLAMA

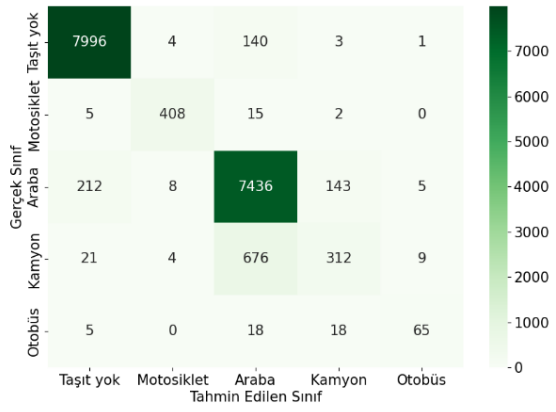
Bu bölümde önerilen modellerden elde edilen sonuçlar literatürde aynı veri seti ile gerçekleştirilen başka bir çalışmayla kıyaslanmaktadır. Sonuçları birebir kıyaslayabilmek için diğer çalışmada kullanılan verilerin birebir aynıları kullanılmıştır [39]. Diğer çalışmada olduğu gibi burada da geleneksel test işlemi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4'te bu çalışmada geleneksel test yöntemiyle elde edilen sonuçlar görülmektedir. Tablo 5'te ise birebir aynı veri seti ile yapılan çalışmaya ilişkin F1 değerleri görülmektedir [39].

Her iki çalışmada da örnek sayısının az olmasına bağlı olarak kamyon sınıfının performansı diğer modellere kıyasla belirgin şekilde daha düşüktür. Bununla birlikte diğer çalışmada ortalama F1 değerinde en iyi sonucu veren VGGNet modeline kıyasla bu çalışmada Joergensen IHC modeli ile F1 değerinde neredeyse %10'a varan belirgin bir iyileşme sağlanmıştır. Ayrıca Joergensen, Hilbert ve Breebart IHC modelleri motosiklet sınıfı içinde F1 değerinde yaklaşık %1.5'lik bir iyileşme sağlamıştır. Araba sınıfı için ise Joergensen IHC metodu F1 değeri %0.76'lık bir iyileşme sağlamıştır.



Şekil 2. Tüm sınıflar için kıyaslama metriklerinin ortalaması.



Şekil 3. Beş kat çapraz doğrulama karışıklık matrisi.

Elde edilen sonuçlar diğer çalışmada kullanılan mel-spektrogram ve CNN yöntemi ile elde edilen değerler ile kıyaslandığında özellikle Joergensen IHC metodunun kullanıldığı oran haritası özelliklerinin belirgin bir şekilde iyileşme sağladığı görülmektedir. Buna ilave olarak burada kullanılan CNN mimarisi diğer çalışmaya kıyasla daha az karmaşıklığa sahiptir. Bu da eğitim aşamasındaki hesaplama maliyetlerinin azalmasına katkı sunmaktadır.

Tablo 4. Geleneksel test yöntemiyle elde edilen sonuçlar.

		Dau	Joergensen	Hilbert	Breebart
Duyarlılık	Taşıtl Yok	99.86	99.79	99.79	99.86
	Motosiklet	93.94	95.96	96.97	94.95
	Araba	98.53	97.67	98.18	98.70
	Kamyon	40.21	49.21	43.91	38.10
Özgüllük	Taşıtl Yok	99.45	99.93	99.86	99.86
	Motosiklet	99.93	99.96	99.93	100.00
	Araba	93.41	94.24	93.71	92.94
	Kamyon	99.40	98.88	99.18	99.36
Kesinlik	Taşıtl Yok	99.44	99.93	99.86	99.86
	Motosiklet	97.89	98.96	97.96	100.00
	Araba	91.05	92.02	91.39	90.49
	Kamyon	82.61	75.61	79.05	80.90
F1	Taşıtl Yok	99.65	99.86	99.82	99.86
	Motosiklet	95.88	97.44	97.46	97.41
	Araba	94.65	94.76	94.67	94.42
	Kamyon	54.09	59.62	56.46	51.80

Tablo 5. Literatürdeki F1 Değerleri [39].

	Model	Araba	Kamyon	Motosiklet	Taşıtl Yok
NB=16	VGGNet	0.94	0.5	0.96	1.0
	ResNet	0.94	0.49	0.96	1.0
	SqueezeNet	0.92	0.48	0.9	1.0
NB=32	VGGNet	0.94	0.46	0.96	1.0
	ResNet	0.94	0.44	0.97	1.0
	SqueezeNet	0.94	0.42	0.9	1.0
NB=64	VGGNet	0.94	0.49	0.97	1.0
	ResNet	0.94	0.49	0.97	1.0
	SqueezeNet	0.94	0.5	0.95	1.0
NB=128	VGGNet	0.94	0.44	0.96	1.0
	ResNet	0.94	0.45	0.95	1.0
	SqueezeNet	0.91	0.53	0.97	1.0

Tablo 6. VGGNet Karışıklık matrisi [39].

	Araba	Kamyon	Motosiklet	Taşıtl Yok
Araba	97.29	2.62	0.02	0.09
Kamyon	60.21	38.84	0.63	0.32
Motosiklet	3.23	1.21	95.35	0.2
Taşıtl Yok	0.23	0.01	0.11	99.65

## 8. SONUÇ

Son dönemlerde, gürültü kirliliğinin azaltılması amacıyla şehirlerdeki ses ortamlarını izlemek için kullanılan teknolojilerde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Makine öğrenimi ve sinyal işleme yöntemlerinin uygulanmasıyla

otomatik ses tanıma sistemleri bu alanda dikkate değer gelişmeler göstermiştir. Bu tür sistemler, ses olaylarını makine öğrenimi ve sinyal işleme teknikleri yardımıyla otomatik olarak tanımaktadır. Bu yetenekler, karayollarındaki akustik olayların kaynaklarını saptamak için kullanılabilir. Bununla birlikte, bu görevin çeşitli zorlukları da vardır. Yol üzerinde duyulan sesler, geçen araçların motorları, egzozları, tekerlekleri ve hava türbülansı gibi farklı ses kaynaklarının bir araya gelmesiyle oluşur. Aynı tür ses kaynaklarının doğal değişkenliği ve akustik ortamın farklı konumlar ve koşullar için olan etkisi göz önünde bulundurulduğunda, her kategori için akustik özellikler oldukça çeşitli olabilir. Bu durum, ses kaynağı türünü sınıflandırmayı güçleştirir.

Bu çalışma, yukarıda bahsedilen problemleri çözmek için logaritmik ölçekte oranı haritası özelliklerinin kullanılması önerilmiştir. Bir işitsel model olan oran haritası, frekans bileşenlerinin oluşturulması sırasında insan işitsel sisteminin frekans seçim özelliğini modellemek için bir gamaton filtresi kullanır. Bu filtre kullanılarak üst frekans bölgesinde geniş frekans bileşenleri, alt frekans bölgesinde dar frekans bileşenleri elde edilir. Böylece yüksek frekanslarda bilgi tamamen kaybolmadan düşük frekans aralığında daha iyi frekans çözünürlüğü sağlanarak daha fazla spektral bilgi elde edilir. Ek olarak, oran haritası yumuşatma özellikleri sağlar. Bunlar özellikler arasındaki farkı azaltarak sınıf ayrılabilirliğini artırır. Ayrıca önerilen model spektral enerjinin yoğun olduğu bölgelere odaklanmak amacıyla bir eşik fonksiyonunun kullanımını da içermektedir. Önerilen yöntemde öncelikle oran haritası gösterimleri oluşturulur. Bu gösterimlerin dinamik aralığı daha sonra logaritma fonksiyonu kullanılarak sıkıştırılır. Bu işlemden sonra eşik fonksiyonu uygulanır. Ayrıca önerilen modelde 4 farklı IHC yönteminin sınıflandırma performansına olan etkisi kıyaslanmıştır. Kamuya açık bir veri seti üzerinde Joergensen IHC yönteminin kullanıldığı model hem çapraz doğrulama testlerinde hem geleneksel test yönteminde diğer modellere kıyasla belirgin bir iyileşme sağlamıştır.

## Yazar Katkıları

Yazarlar çalışmaya eşit oranlı katkı sunmuşlardır.

## Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

## KAYNAKÇA

- [1] K.S. Rao, S.G. Koolagudi, and R.R. Vempada "Emotion recognition from speech using global and local prosodic features," *Int. J. Speech Technol.*, vol. 16, no. 2, pp. 143–160, 2013.
- [2] M. Valstar et al. "AVEC 2016 - Depression, mood, and emotion recognition workshop and challenge," in *AVEC 2016 - Proceedings of the 6th International Workshop on Audio/Visual Emotion Challenge*, co-located with ACM Multimedia, pp. 3–10, 2016.
- [3] S.R. Bandela and T.K. Kumar "Speech emotion recognition using semi-NMF feature optimization," *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 27, no. 5, pp. 3741–3757, 2019.
- [4] O. Martin, I. Kotsia, B. Macq, and I. Pitas "The eNTERFACE'05 Audio-Visual emotion database," in *ICDEW 2006 - Proceedings of the 22nd International Conference on Data Engineering Workshops*, 2006.
- [5] Y. Wang and L. Guan "Recognizing human emotional state from audiovisual signals," *IEEE Trans. Multimed.*, vol. 10, no. 5, pp. 936–946, 2008.
- [6] J.B. Alonso, J. Cabrera, M. Medina, and C.M. Travieso "New approach in quantification of emotional intensity from the speech signal: Emotional temperature," *Expert Syst. Appl.*, vol. 42, no. 24, pp. 9554–9564, 2015.
- [7] C.K. Yogesh et al. "A new hybrid PSO assisted biogeography-based optimization for emotion and stress recognition from speech signal," *Expert Syst. Appl.*, vol. 69, pp. 149–158, 2017.
- [8] M. Huzairah "Comparison of Time-Frequency Representations for Environmental Sound Classification using Convolutional Neural Networks," 2017.
- [9] G. Lu, L. Yuan, W. Yang, J. Yan, and H. Li "Speech emotion recognition based on long short-term memory and convolutional neural networks," *Nanjing Youdian Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)/Journal Nanjing Univ. Posts Telecommun. (Natural Sci.)*, vol. 38, no. 5, pp. 63–69, 2018.
- [10] I. Ozer, Z. Ozer, and O. Findik "Noise robust sound event classification with convolutional neural network," *Neurocomputing*, vol. 272, 2018.
- [11] T. Dau, D. Püschel, and A. Kohlrausch "A quantitative model of the "effective" signal processing in the auditory system. I. Model structure," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 99, no. 6, pp. 3615–3622, 1996.
- [12] G.J. Brown and M. Cooke "Computational auditory scene analysis," *Comput. Speech Lang.*, vol. 8, no. 4, pp. 297–336, 1994.
- [13] R.V. Sharan and T.J. Moir "Acoustic event recognition using cochleagram image and convolutional neural networks," *Appl. Acoust.*, vol. 148, pp. 62–66, 2019.
- [14] R.V. Sharan and T.J. Moir "Subband Time-Frequency Image Texture Features for Robust Audio Surveillance," *IEEE Trans. Inf. Forensics Secur.*, vol. 10, no. 12, pp. 2605–2615, 2015.
- [15] R.V. Sharan, S. Berkovsky, and S. Liu "Voice Command Recognition Using Biologically Inspired Time-Frequency Representation and Convolutional Neural Networks," in *2020 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in*



- Medicine and Biology Society (EMBC), pp. 998–1001, 2020.
- [16] L. Josifovski “Robust Automatic Speech Recognition with Missing and Unreliable Data,” 2002.
- [17] H. Meutzner, N. Ma, R. Nickel, C. Schymura, and D. Kolossa “Improving audio-visual speech recognition using deep neural networks with dynamic stream reliability estimates,” in ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings, pp. 5320–5324, 2017.
- [18] H.E. Romero, N. Ma, G.J. Brown, A.V Beeston, and M. Hasan “Deep Learning Features for Robust Detection of Acoustic Events in Sleep-disordered Breathing,” in ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings, pp. 810–814, 2019.
- [19] D. Wang and G.J. Brown “Fundamentals of computational auditory scene analysis,” in Computational Auditory Scene Analysis: Principles, Algorithms, and Applications, Wiley-IEEE Press, pp. 1–44, 2006.
- [20] R.D. Patterson, K. Robinson, J. Holdsworth, D. McKeown, C. Zhang, and M. Allerhand “Complex Sounds and Auditory Images,” in Auditory Physiology and Perception, CNBH, pp. 429–446, 1992.
- [21] E. de Boer “On cochlear encoding: Potentialities and limitations of the reverse-correlation technique,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 63, no. 1, p. 115, 1978.
- [22] R.D. Patterson “SVOS final report, part B: Implementing a gammatone filterbank,” *Appl. Psychol. Unit Rep. 2341*, 1988.
- [23] B.R. Glasberg and B.C. Moore “Derivation of auditory filter shapes from notched-noise data,” *Hear. Res.*, vol. 47, no. 1–2, pp. 103–138, 1990.
- [24] S. Das, S. Pal, and M. Mitra “Supervised model for Cochleagram feature based fundamental heart sound identification,” *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 52, pp. 32–40, 2019.
- [25] M. Russo, M. Stella, M. Sikora, and V. Pekić “Robust cochlear-model-based speech recognition,” *Computers*, vol. 8, no. 1, p. 5, 2019.
- [26] A.V Beeston “Perceptual compensation for reverberation in human listeners and machines,” University of Sheffield, 2015.
- [27] S. Jørgensen and T. Dau “Predicting speech intelligibility based on the signal-to-noise envelope power ratio after modulation-frequency selective processing,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 130, no. 3, pp. 1475–1487, 2011.
- [28] D.H. Johnson “The relationship between spike rate and synchrony in responses of auditory-nerve fibers to single tones,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 68, no. 4, pp. 1115–1122, 1980.
- [29] T.F. Weiss and C. Rose “A comparison of synchronization filters in different auditory receptor organs,” *Hear. Res.*, vol. 33, no. 2, pp. 175–179, 1988.
- [30] L.R. Bernstein and C. Trahiotis “The normalized correlation: Accounting for binaural detection across center frequency,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 100, no. 6, pp. 3774–3784, 1996.
- [31] A. Breebaart, J. Van De Par, S. and Kohlrausch “Binaural processing model based on contralateral inhibition. I. Model structure,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 110, no. 2, pp. 1074–1088, 2001.
- [32] D. Hilbert “Framework for a General Theory of Linear Integral Equations”, New York, 1953.
- [33] I. Ozer, S. B. Efe, and H. Ozbay, “A combined deep learning application for short term load forecasting,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 60, no. 4, pp. 3807–3818, 2021.
- [34] İ. Özer, S.B. Efe, and H. Özbay “CNN/Bi-LSTM-based deep learning algorithm for classification of power quality disturbances by using spectrogram images,” *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 31, no. 12, p. e13204, 2021.
- [35] M. Bayram, Ö. İlyas “Deep learning methods for autism spectrum disorder diagnosis based on fMRI images,” *Sakarya University Journal of Computer and Information Sciences*, vol. 4, no. 1, 2021.
- [36] K. He and J. Sun “Convolutional Neural Networks at Constrained Time Cost.” Accessed: Jan. 27, 2021. [Online]. Available: [https://www.cv-foundation.org/openaccess/content\\_cvpr\\_2015/html/He\\_Convolutional\\_Neural\\_Networks\\_2015\\_CVPR\\_paper.html](https://www.cv-foundation.org/openaccess/content_cvpr_2015/html/He_Convolutional_Neural_Networks_2015_CVPR_paper.html).
- [37] P. Agarwal and S. Kumar “Imagined word pairs recognition from non-invasive brain signals using Hilbert transform,” *Int. J. Syst. Assur. Eng. Manag.*, vol. 13, no. 1, pp. 385–394, 2022.
- [38] I. Ozer “Pseudo-colored rate map representation for speech emotion recognition,” *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 66, 2021.
- [39] J. Abeber, S. Gourishetti, A. Katai, T. Claub, P. Sharma, and J. Liebetrau “IDMT-Traffic: An Open Benchmark Dataset for Acoustic Traffic Monitoring Research,” in 2021 29th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), pp. 551–555, 2021.



## Solar Sulama Sistemleri için MPPT tabanlı Üç Fazlı Evirici Tasarımı

### MPPT Based Three Phase Inverter Design for Solar Irrigation Systems

<sup>1</sup>Muzaffer ÇAYIR , <sup>2</sup>Harun ÖZBAY 

<sup>1</sup>Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bandırma/Balıkesir, Türkiye

<sup>2</sup>Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bandırma/Balıkesir, Türkiye

<sup>1</sup>muzaffercayir99@gmail.com, <sup>2</sup>hozbay@bandirma.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 11 May 2023

Accepted : 8 July 2023

##### Keywords:

Photovoltaic Systems, Solar Irrigation, Induction Motor, MPPT, PSIM

#### ABSTRACT

Today, as a replacement for fossil-based generation, renewable energy sources have become more significant in the modern world. Photovoltaic Systems (PV) are used to obtain electrical energy from solar energy, which is among these sources. Due to their numerous benefits, in this study, a system design and simulation have been made for agricultural irrigation systems, which are among the usage areas of PV systems. In order to use the PV system in the most efficient way, the Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithms, the Incremental Conductance (IC) algorithm and the Perturb&Observe (P&O) algorithm have been revised and compared according to the characteristics of the designed system. A single-stage inverter is designed without a DC-DC converter in order to transfer the maximum power obtained from the PV panels to the load. The proposed algorithms efficiently transfer the maximum power that the PV panels can obtain under various solar irradiation conditions (between 200 and 1000 W/m<sup>2</sup>) to the system. The irrigation system with a 3 kW three-phase induction motor is simulated using the PSIM, and the results are shown in comparison, in order to assess the performance of the proposed system.

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 11 Mayıs 2023

Kabul : 8 Temmuz 2023

##### Anahtar Kelimeler:

Fotovoltaik Sistemler, Solar Sulama, Asenkron Motor, MPPT, PSIM

#### ÖZET

Günümüzde fosil kaynaklı üretime alternatif olarak yenilenebilir enerji kaynakları önem kazanmıştır. Bu kaynaklar arasında yer alan güneş enerjisinden, elektrik enerjisi elde etmek için Fotovoltaik Sistemler (PV) kullanılmaktadır. Bu çalışmada da PV sistemlerin kullanım alanları arasında yer alan tarımsal sulama sistemleri için bir sistem tasarımı ve benzetimi yapılmıştır. PV sistemin en verimli şekilde kullanılması için Maksimum Güç Noktası Takip (MPPT) algoritmalarından Artan İletkenlik (IC) algoritması ve Değiştir&Gözle (P&O) algoritması tasarlanan sistemin özelliklerine göre revize edilmiş ve karşılaştırılmıştır. PV panellerden elde edilen maksimum gücün yüke aktarımı için ayrıca bir DC-DC dönüştürücü kullanılmadan tek aşamalı bir evirici tasarlanmıştır. Geliştirilen algoritmalar ile 200 - 1000 W/m<sup>2</sup> arasında farklı güneş ışınımı altında PV panellerden elde edilebilecek maksimum güç sisteme yüksek verimlilikle aktarılmıştır. Önerilen sistemin performansını değerlendirmek için 3 kW'lık üç fazlı asenkron motora sahip sulama sisteminin benzetimi PSIM programı kullanılarak yapılmış ve sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

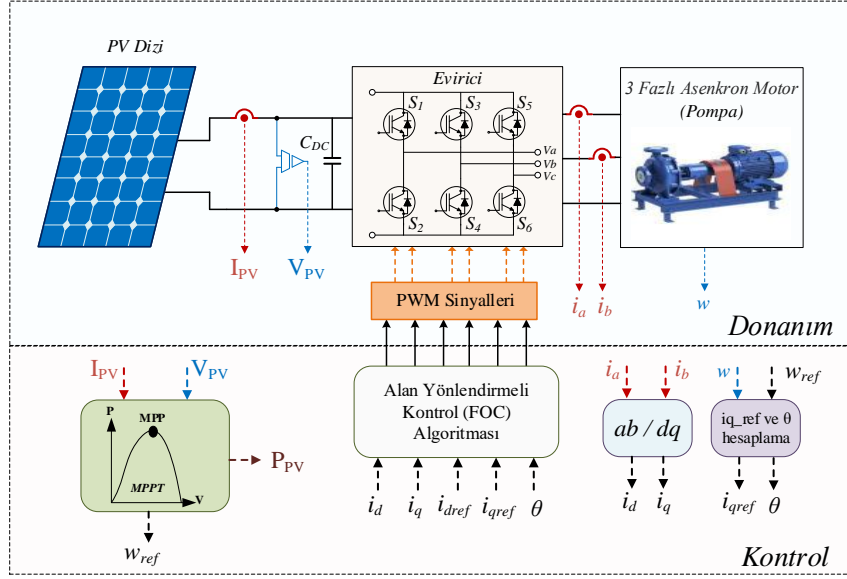
## 1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi günümüz dünyasında büyük bir öneme sahip ve hemen hemen hayatımızın her alanında kullanılmaktadır. Teknoloji ve sanayinin gelişmesiyle elektrik enerjisine ihtiyaç da bu doğrultuda artmaktadır. Bu ihtiyaca cevap vermek adına elektrik enerjisinin üretiminde de çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Geçmişten günümüze enerji üretiminde yoğunlukla fosil yakıtlar kullanılmıştır. Ancak, fosil yakıtların kullanımı çevremizi olumsuz yönde etkilemekte ve artan enerji ihtiyacı ile birlikte tükenmeye yüz tutmaktadır. Bu nedenle, bu kaynakların kullanımı yerine alternatif çözümler bulmak hem sürdürülebilir üretim açısından hem de çevre açısından büyük önem arz etmektedir [1]. Bu doğrultuda fosil yakıtlı enerji üretimine önemli bir alternatif yöntem olan yenilenebilir enerji kaynaklarına ilgi gün geçtikçe artmaktadır [2]. Yenilenebilir enerji kaynakları, güneş, rüzgar, hidroelektrik, jeotermal ve biyokütle gibi doğal kaynaklardan elde edilen enerji kaynaklarıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları çevreye daha az zarar verirken, doğası gereği kendini yenileyerek sınırsız bir kullanım sağlayabilmektedirler [3,4]. Bununla birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırım yapmak birçok ekonomik ve sosyal faydayı da beraberinde getirmektedir. Bu faydalar arasında iş yaratma, ekonomik büyüme, enerji güvenliği ve daha temiz çevre sayılabilir. Enerji üretiminde, bu kaynaklar arasında yer alan güneş ve rüzgar enerjisinin kullanımı diğer kaynaklara göre daha fazladır [5]. Bu iki enerji kaynağı kendi aralarında kıyaslandığında çeşitli avantajlarından dolayı güneş enerjisi daha ön plana çıkmaktadır. Güneş enerjisi, dünya üzerindeki en ulaşılabilir ve en yaygın kullanılan yenilenebilir enerji kaynağıdır. Bu nedenle, günümüzde birçok ülke güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik sistemleri kullanarak enerji üretimine yönelmiştir. Fotovoltaik sistemler, şebeke bağlantılı ve şebeke bağlantısız olarak ikiye ayrılmaktadır. Şebeke bağlantılı sistemler adından da anlaşılacağı üzere enterkonnekte şebeke ile bağlantılı olup üretilen elektrik enerjisinin şebekeye de aktarılabilirdiği sistem türüdür. Şebeke bağlantısız sistemlerde ise üretilen elektrik enerjisi yerel yüklerde kullanımlara olanak sağlamaktadır [6]. Şebeke bağlantısız fotovoltaik sistemler ile birçok alanda karşılaşmak mümkündür. Özellikle yerleşimin olmadığı kırsal bölgelerde, tarımsal arazilerde, hayvancılık yapılan bölgelerde çiftlik ve meralarda, kişisel kullanım alanlarında ve günümüzde teknolojinin gelişmesiyle birlikte elektrikli araçlar için şarj istasyonlarında kullanılmaktadır. Literatürde fotovoltaik sistemlerin kullanım alanları ve tarımsal alanda kullanımı konusunda birçok çalışma yapılmıştır. A.A.S Esmeail, S. Öncü, N. Altın gerçekleştirdikleri bir çalışmada fotovoltaik sistemlerin sulama amaçlı kullanımını ele almışlardır. Tasarlanan sistemde üç fazlı tek kademeli evirici ve asenkron motor tercih edilmiştir. Asenkron motorun hızını kontrol etmek amacıyla skaler V/f kontrol yöntemini kullanmışlardır. Tasarladıkları sistemde fotovoltaik diziden en yüksek verimi alabilmek adına maksimum güç noktası takip algoritmaları arasında yer alan P&O algoritmasını kullanmışlardır. Kullanılan algoritmanın sınanması için farklı ışınım altında elde edilen güç değerleri gözlemlenmiştir. Aynı zamanda sistemin benzetimini hem bu algoritmayı kullanarak hem de algoritma olmadan yapmışlar ve sonuçları karşılıklı olarak analiz etmişlerdir [7]. Jaipal ve T. Ramesh çalışmalarında maksimum güç noktası takibi yapan bir solar sulama sistemini incelemişlerdir. Maksimum güç noktası takibi için P&O algoritmasını tercih ederek sistemden maksimum verimi elde etmeyi amaçlamışlardır. Sistemdeki asenkron motorun hız kontrolü için alan yönlendirmeli kontrol ve doğrudan tork ve akı kontrolü yöntemlerini kullanmışlardır. Sistem standart atmosferik koşullar altında test edilmiş ve tork, hız, stator akımları gözlenmiştir. Sistemin verimli bir şekilde çalıştığı ortaya konmuştur [8]. M.A. Eltawil ve Z. Zhao çalışmalarında çok sayıda maksimum güç noktası takip yöntemini ele almışlardır. Bu konuda geleneksel yöntemlerden farklı olarak diğer yöntemleri de açıklamayı amaçlamışlardır. İncelenen yöntemler kendi aralarında kıyaslanarak alternatifler sunulmuştur. Genel anlamda teorik olarak yapılan bu çalışma MPPT algoritmasına karar verme aşamasında yardım teşkil etmektedir [9]. I.K. Abdul-Razzaq, M.M.F Sakr ve Y.G. Rashid yaptıkları çalışmada solar sulama sistemlerinde kullanılan MPPT tekniklerini incelemişler ve kıyaslamışlardır. Yapılan çalışmada 4 farklı teknik incelenmiş ve benzetimi yapılmıştır. Sistemde aynı zamanda DC-DC yükseltici dönüştürücü kullanılmıştır. Matlab programı yardımıyla benzetimi yapılan çalışmada farklı ışınım değerlerinde tüm teknikler incelenmiş ve sonuçlar alınmıştır. Sonuçlara bakılarak her bir algoritmanın farklı hususlarda gösterdikleri başarılı sonuçlar yorumlanmıştır [10].

Yapılan bu çalışmada fotovoltaik sistemlerin tarımsal sulama alanında kullanılması ele alınmıştır. Tarımsal sulamada güneş enerjisinden yararlanmak, üretim maliyetleri dahilinde en büyük pay sahibi olan sulama maliyetini azaltacağından dolayı üretim maliyeti de azalacaktır. Geçmişten günümüze kadar olan süreçte sulama alanında dizel pompalar ve şebeke elektriği kullanılmıştır. Günümüzde dizel pompalar ve şebeke elektriğinin kullanımına, akaryakıt fiyatlarının ve elektrik tüketim maliyetinin gün geçtikçe artmasından dolayı alternatif bir yol aranmıştır. Fotovoltaik sistemler çoğu alanda olduğu gibi bu alana da önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Fakat bu sistemlerin de kendi içerisinde dezavantajları mevcuttur. Fotovoltaik sistemler ile üretimde, hava koşulları ve güneşlenme süreleri gibi parametreler dezavantaj yaratabilmektedir. Fakat bu gibi dezavantajların yarattığı verim düşüşü gibi sorunların önüne maksimum güç noktası takibi yapabilen güç elektroniği çözümleri ile geçilebilmektedir. Bu çalışmada da maksimum güç noktası takibini yüksek verimlilik ile yapabilen tek aşamalı bir fotovoltaik sulama sistemi tasarlanmıştır. Sistemde tek aşamalı evirici kullanılmasından dolayı hem sistemin karmaşıklığı hem de kurulum maliyeti azaltılmış özgün bir çalışma sunulmuştur. Tasarlanan sistemde kullanılan Değiştir & Gözle ve Artan İletkenlik algoritmaları incelenmiştir. MPPT algoritmalarının kullanımı da sistemin maliyetinde önemli iyileştirmeler sağlamaktadır. Önerilen sistemin benzetimi PSIM programı ile yapılmıştır ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

## 2. ÖNERİLEN SİSTEMİN TANIMI VE MODELLENMESİ

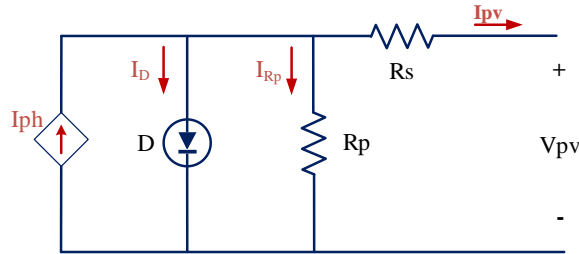
Şekil 1’de önerilen tarımsal solar sulama sisteminin blok şeması görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere bu tür bir sulama sistemi temelde PV dizi, gerilim beslemeli üç fazlı evirici, motor ve pompa kısımlarından oluşmaktadır.



Şekil 1. Önerilen solar sulama sistemi.

### 2.1. Fotovoltaik Hücre Modeli

Fotovoltaik hücre, ışık enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren bir yapıdır. Yarı iletken bir diyot olarak görev yaparlar. Şekil 2’de bir hücrenin eşdeğer devresi verilmiştir. Bu devrede bulunan değerler  $I_{PV}$  güneş enerjisi ile elde edilen elektrik akımını,  $R_s$  seri direnç,  $I$  yük akımını,  $I_D$  diyot akımını,  $R_p$  paralel direnci ifade etmektedir [11].



Şekil 2. Fotovoltaik hücrenin elektriksel eşdeğer devresi.

Fotovoltaik hücre üzerine düşen güneş radyasyonu ile fotovoltaik akım ( $I_{ph}$ ) değeri orantılıdır. Denklem 1’de güneş radyasyonuna göre üretilen hücre akımı verilmiştir;

$$I_{PV} = [I_{SC} + K_I (T - T_{ref})] \times \frac{\lambda}{1000} \quad (1)$$

Burada;  $\lambda$ ,  $kW/m^2$  olarak ışıınımı;  $I_{SC}$ , fotovoltaik hücrenin  $25^\circ$ deki kısa devre akımını;  $K_I$ , kısa devre akımı sıcaklık sabitini ( $0,0017 A/^\circ C$ );  $T$ , fotovoltaik hücrenin Kelvin olarak çalışma sıcaklığını ve  $T_{ref}$  ise referans sıcaklığı ( $298,15 K$ ) ifade etmektedir. Diyot akımı ( $I_D$ ) ise, gerilime ve ters sızıntı akımına ( $I_S$ ) bağlıdır. Diyot akımı Denklem 2’de verilmiştir;

$$I_D = I_S \left( e^{\frac{qV_D}{A k T}} - 1 \right) \quad (2)$$

Burada;  $V_D$ , diyot gerilimi;  $q$ , elektron yükünü ( $1,602 \times 10^{-19} C$ ),  $k$ , Boltzman sabitini ( $1,3806505 \times 10^{-23} J/K$ );  $A$ , diyot kalite faktörünü ifade etmektedir. Paralel dirençten akan akım ise Denklem 3’te verilmiştir. Fotovoltaik hücrenin akımı da Denklem 4’te verilmiştir.

$$I_{Rp} = \frac{V_D}{R_p} = \frac{V_{PV} + I_{PV} \cdot R_p}{R_p} \quad (3)$$

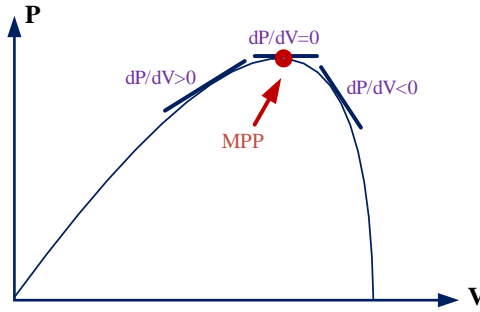
$$I_{PV} = I_{ph} - I_D - I_{Rp} \quad (4)$$

Denklem 2 ve Denklem 3 tekrar Denklem 4 üzerinde yerine koyulursa, fotovoltaik hücrenin akımı Denklem 5 ile elde edilmiş olur.

$$I_{PV} = I_{ph} - I_s \left( e^{\left( \frac{q(V_{PV} + I_{PV} \cdot R_p)}{A \cdot k \cdot T} \right)} - 1 \right) - \frac{V_{PV} + I_{PV} \cdot R_p}{R_p} \quad (5)$$

## 2.2. Maksimum Güç Noktası Takip Algoritması

Maksimum güç noktası takibi (MPPT) algoritmaları, güneş panelleri gibi fotovoltaik kaynakların en verimli güç çıkışını elde etmek için kullanılmaktadır. Evirici devresi için kullanılan anahtarlama sinyallerinin görev oranı, sistemde kullanılan MPPT algoritmaları tarafından ayarlanmaktadır. Bu algoritmalar arasında yer alan Değiştir-gözle ve Artan İletkenlik algoritmaları bu tür sistemler için sıkça tercih edilen algoritmalarlardır [12-14]. Şekil 3'te MPPT güç noktaları incelendiğinde, güneş panelinin çıkış gücündeki eğimin sıfır olduğu yeri maksimum güç noktası olarak belirler.



Şekil 3. MPPT algoritması güç-gerilim karakteristiği.

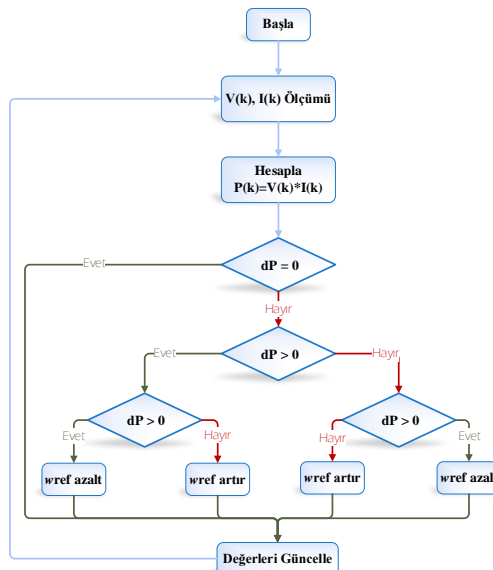
### 2.1.1. Değiştir-Gözle (P&O) Algoritması

Değiştir-gözle algoritması literatürde çok kullanılan ve diğer yöntemlere nazaran daha basit olan bir yöntemdir. Bu yöntemde öncelikle panel gerilimi ve akımı ölçülür ve panel gücü ilk durumda hesaplanır. Gerilimdeki veya akımdaki değişimler göz önünde bulundurularak panelin gücü ikinci kez hesaplanır. Sonuçta hesaplanan bu iki güç arasında fark yok ise algoritma başa döner ve yeniden güç hesapları yapar. Eğer güç değerleri arasındaki fark sıfırdan büyük veya sıfırdan küçük ise bu kez algoritma panel gerilimine ve değişimine bakar. Bu iki gerilim değeri arasındaki farka bakılarak, yarı iletken anahtarın görev oranı değiştirilir ve böylece maksimum güç noktası takibi yapılmış olur. Denklem 6 ve Denklem 8 arasındaki eşitlikler değiştir&gözle algoritmasını ifade etmektedir [15-17]. Şekil 4'te değiştir-gözle (P&O) algoritmasına ilişkin akış diyagramı verilmiştir.

$$P = V_{pv} * I_{pv} \quad (6)$$

$$dP/dV = 0 \quad (7)$$

$$dP/dV_{pv} = \frac{d(V_{pv} * I_{pv})}{dV} = 0 \quad (8)$$

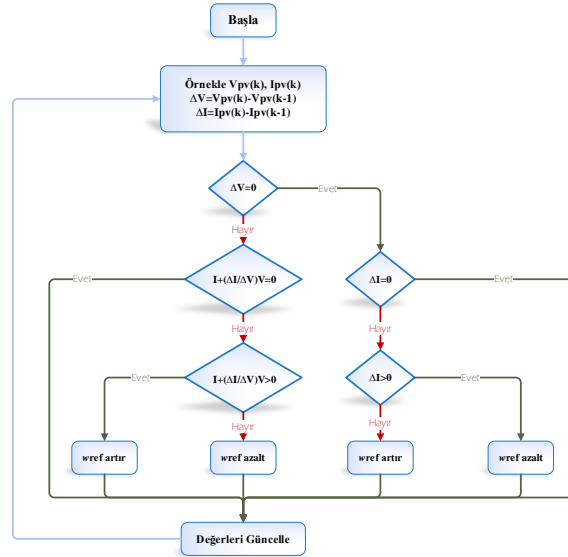


Şekil 4. Değiştir-Gözle (P&O) algoritması akış diyagramı.

### 2.1.1. Artan İletkenlik (IC) Algoritması

Artan iletkenlik yaklaşımı, PV çıkışının güç türevinin sıfıra eşit olduğu fikrine dayanmaktadır. Bu yaklaşım, performans açısından en iyilerden biri olarak kabul edilir, ancak daha pahalı ve karmaşık bir kontrol devresine ihtiyaç duymaktadır. Bir MPPT sisteminin optimum performans özellikleri arasında yeterli izleme hassasiyeti, hız, minimum sabit durum hatası ve yüksek verimlilik bulunur [18-20]. MPPT'de artan iletkenlik yöntemiyle elde edilen gerilim oranı da Denklem 7'de gösterildiği gibi sıfırdır. Denklem 9 artan iletkenlik algoritmasının temel bağıntısını vermektedir. Şekil 5'te ise Artan iletkenlik algoritmasına dair akış diyagramı verilmiştir.

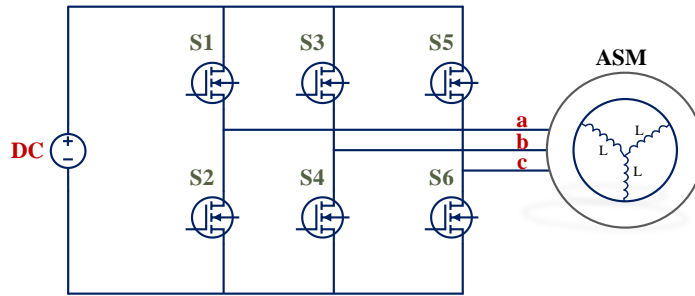
$$\frac{d(V \cdot I)}{dV} = I + V \cdot \frac{dI}{dV} = 0 \quad (9)$$



Şekil 5. Artan İletkenlik (IC) algoritması akış diyagramı.

### 2.3. Asenkron Motor ve Evirici Modeli

Solar sulama sistemde pompa olarak kullanılan asenkron motorun sürülmesi için DA/AA evirici devre yapıları kullanılmaktadır. Eviriciler, sabit bir DA gerilimi, istenilen frekans ve genlikte bir AA gerilime dönüştürürler. Evirici yapısını oluşturan anahtarlar her birine sinyal uygulanır ve bu anahtarlar tetiklenmiş olur. Düşük güçlü uygulamalarda tek fazlı eviriciler yeterli olabilirken, yüksek güç uygulamalarında üç fazlı eviriciler kullanılmaktadır. Üç fazlı eviricilerde, evirici devre, çıkışta üç faz gerilim dalgalarının elde edilebilmesi için karşılıklı olarak  $2\pi/3$  derece faz farklı üç adet yarım köprüden oluşmaktadır [21]. Aynı kolun anahtarlar (örneğin, S1 ve S2), aynı anda iletimde olamaz. Şekil 6'da gerilim beslemeli üç fazlı bir eviricinin ve asenkron motorun temel devre yapısı görülmektedir.



Şekil 6. Gerilim beslemeli üç fazlı bir eviricinin ve asenkron motorun temel yapısı.

Fotovoltaik sistemden elde edilen gerilim, gerekli işlemlerden sonra evirici tarafından motora aktarılmaktadır. Bu işlemler arasında motor kontrol yöntemleri yer almaktadır. Bu yöntemlerden biri de alan yönlendirmeli kontrol (FOC) yöntemidir. Bu yöntem skaler kontrol yöntemine göre, tork kontrolü sırasında tork yükselme süresinde, hız kontrolü sırasında ise çözünürlük, hız sınırı, dinamik doğruluk gibi hususlarda üstünlük sağlamaktadır. Alan yönlendirmeli kontrol yönteminde, sistemde kullanılan üç fazlı yıldız bağlı bir asenkron motorun eviriciden aktarılan stator akımları, senkron hızda dönen d-q koordinasyon sisteminde, id ve iq bileşenlerine dönüştürülür. Denklem 10'da stator akımlarının dq bileşenlerine dönüştürmek için kullanılan matematiksel model verilmiştir. Stator gerilimleri ise d-q koordinasyon sistemindeki akımlar kullanılarak Denklem 11'de hesaplanmaktadır [22-24].

$$\begin{bmatrix} i_{s0} \\ i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\theta_s & \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta_s & -\sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} V_{sd} &= R_s * i_{sd} - \omega_s * \left[ \sigma * L_s * i_{sq} + \frac{L_m}{L_r'} * \psi_{rq} \right] + \frac{d}{dt} \left[ \sigma * L_s * i_{sd} + \frac{L_m}{L_r'} * \psi_{rd} \right] \\ V_{sq} &= R_s * i_{sq} - \omega_s * \left[ \sigma * L_s * i_{sd} + \frac{L_m}{L_r'} * \psi_{rd} \right] + \frac{d}{dt} \left[ \sigma * L_s * i_{sq} + \frac{L_m}{L_r'} * \psi_{rq} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

Burada;  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$ ,  $V_{sd}$ ,  $V_{sq}$ , sırasıyla koordinasyon sistemindeki stator faz akım ve gerilimlerini ifade etmektedir. Ayrıca,  $R_s$ , stator faz sargı direncini;  $L_s$ , stator endüktansını;  $L_r'$ , statora indirgenmiş rotor endüktansını;  $L_m$ , mıknatıslama endüktansını ve  $\sigma$ , kaçak endüktansı ifade etmektedir. Stator güç kayıpları ihmal edilirse, stator besleme gerilimi kullanılarak üç fazlı asenkron motorun momenti ( $T$ ) Denklem 12'den hesaplanabilir.

$$T = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot \frac{V_s^2}{\pi f} \cdot \frac{R_r/s}{(R_r + R_r/s)^2 + (X_{ls} + X_{lr})^2} \quad (12)$$

Burada;  $P$ , çift kutup sayısını;  $V_s$ , stator gerilimini;  $R_r$ , rotor direncini;  $X_{ls}$ , stator endüktif reaktansını;  $X_{lr}$ , rotor endüktif reaktansını ve  $s$ , kaymayı ifade etmektedir. Solar sulama sistemindeki pompanın birleşik tork dinamikleri ise Denklem 13 ile tanımlanabilir.

$$T_e = J * \frac{d\omega}{dt} + B * \omega \quad (13)$$

Burada;  $J$ , eylemsizlik momentini;  $\omega$ , rotor açısal hızını ve  $B$ , sönüm katsayısını ifade etmektedir. Afinite Kanunları, hız ile diğer fan veya pompa değişkenleri arasındaki ilişkiyi tanımlar [25]. Bu yasaya göre, akıştaki değişim ( $Q$ ), hızdaki değişimle orantılıdır; basma yüksekliğindeki ( $H$ ) değişim, hızın karesindeki değişim ile orantılıdır ve güçteki değişim ( $P$ ), hızdaki değişimin küpüyle orantılıdır. Denklem 14'te verildiği gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} Q &= \omega \\ H &= \omega^2 \\ P &= \omega^3 \end{aligned} \quad (14)$$

### 3. SOLAR SULAMA SİSTEMİ PSIM MODELİ

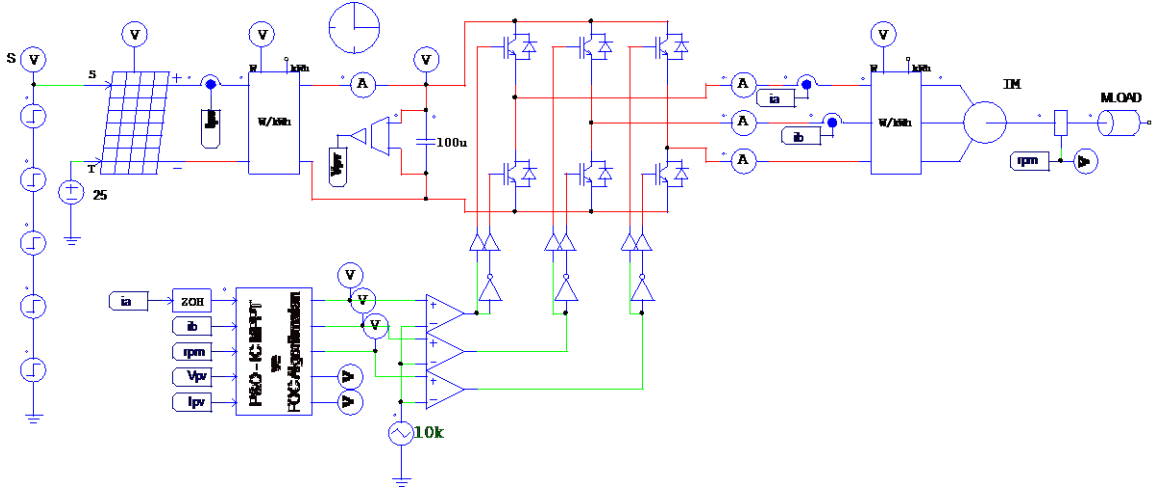
Önerilen solar sulama sisteminin benzetimi Tablo 1'deki parametreler kullanılarak PSIM yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarımı ve benzetimi yapılan solar sulama sistemi, 1000 W/m<sup>2</sup> ve 25°C standart hava şartlarında yaklaşık olarak 3 kW güç aktarabilen PV dizisine sahiptir. Benzetimi yapılan solar sulama sistemi Şekil 7'de verilmiştir. Sistemin kontrol edilmesi amacıyla programda C blok kullanılmış ve C kodları ile P&O - IC MPPT algoritmaları ve alan yönlendirmeli kontrol (FOC) kullanılarak motor sürme işlemleri gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 1.** Motor ve PV dizi parametreleri.

PV Panel Parametreleri		
Açık devre gerilimi	$V_{oc}$	36 V
Kısa devre akımı	$I_{sc}$	9,8 A
MPP gerilimi	$V_{mp}$	34,22 V
MPP akımı	$I_{mp}$	8,83 A
Seri bağlı panel sayısı	$N_s$	10 adet
Motor Parametreleri		
Anma gerilimi	$V_{rms}$	300 V
Frekans	$f_s$	50 Hz
Nominal devri	$n_s$	1000 d/d
Stator sargı direnci	$r_s$	0,294 $\Omega$
Rotor sargı direnci	$r_r$	0,156 $\Omega$
Stator sargı endüktansı	$L_s$	1,39 mH
Rotor sargı endüktansı	$L_r$	0,74 mH
Mıknatıslanma endüktansı	$L_m$	41 mH
Çift kutup sayısı	$2P$	6

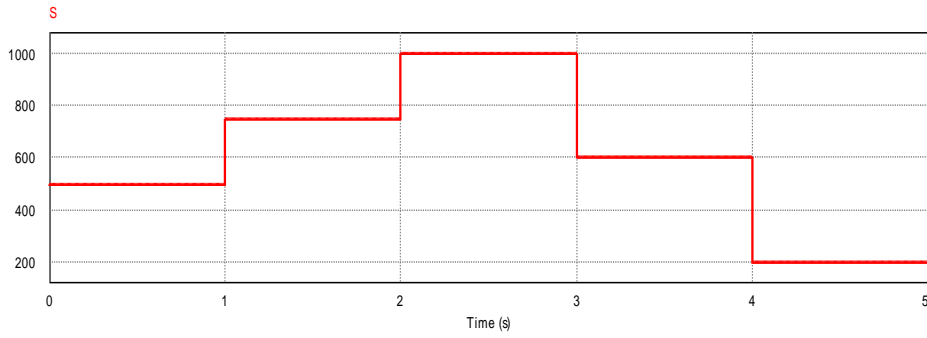
Fotovoltaik sistemlerin verimi çeşitli faktörlerden etkilenebilmektedir. Bu faktörler arasında özellikle ışınım şiddeti ve sıcaklıklar büyük rol oynamaktadır. MPPT algoritmaları da verimin artırılması ve korunması noktasında her şartta başarı göstermelidir. Yapılan benzetim çalışmasının amacı da farklı ışınım değerlerinde maksimum güç noktasının takibini gözlemlemek ve başarılı bir şekilde yapılmasını desteklemektir. Benzetim çalışmasında sıcaklığı sabit tutmak şartıyla 500, 750, 1000, 600 ve 200 W/m<sup>2</sup> ışınım durumlarında P&O ve IC algoritmaları test edilmiştir. Çalışmadaki senaryoya göre ışınım değerlerinin değişimi Şekil 8'de verilmiştir.

Benzetim çalışması sonucunda elde edilen güç değerleri ve güç takibinin gösterimi P&O tekniği için Şekil 9'da verilmektedir.

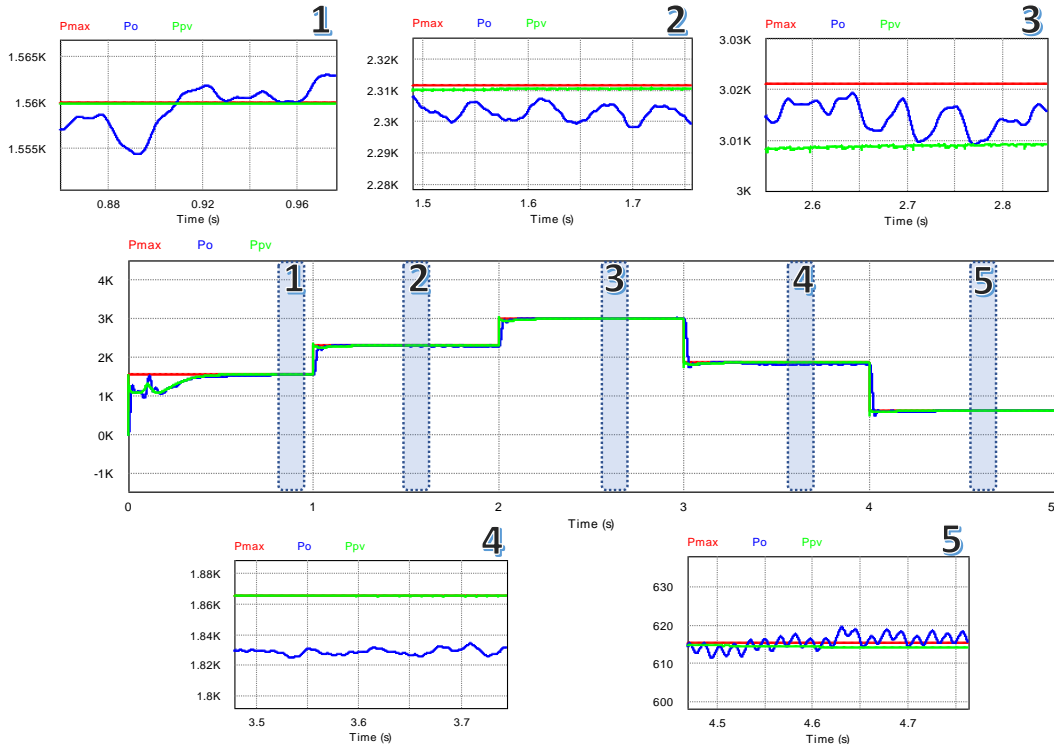


Şekil 7. Önerilen solar sulama sisteminin PSIM devresi.

Verilen şekilde  $P_{max}$  değeri sistemde kullanılan fotovoltaik dizinin maksimum gücünü,  $P_{pv}$  değeri fotovoltaik dizinin anlık verdiği gücü ve  $P_o$  değeri motorun giriş gücü değerini ifade etmektedir.



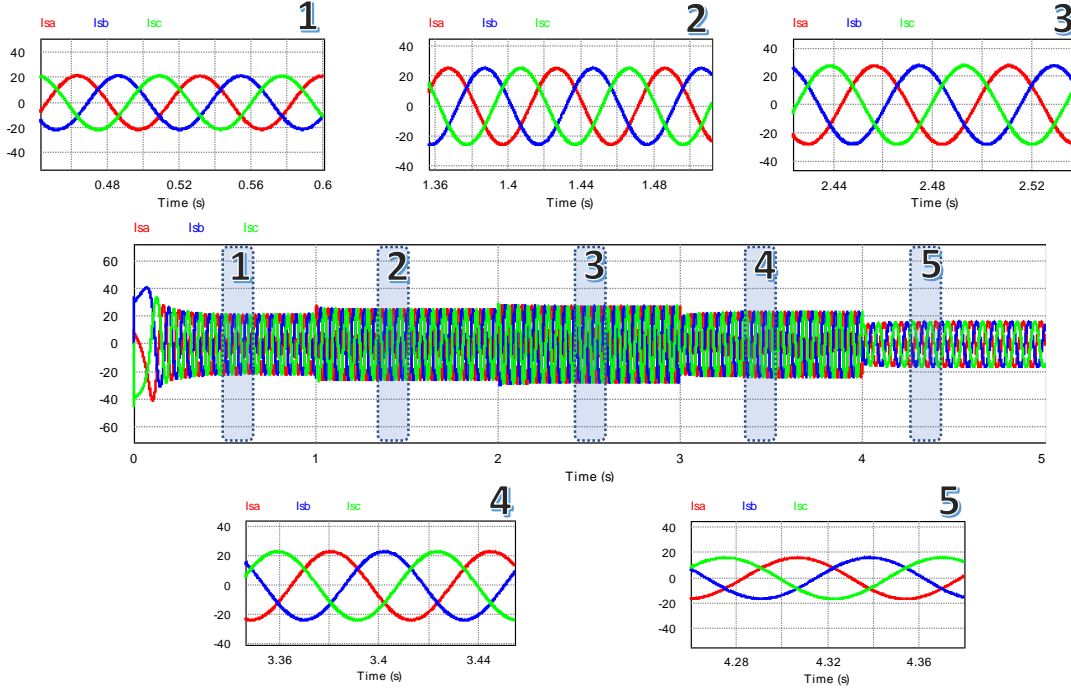
Şekil 8. Benzetim çalışmasındaki senaryoya göre ışınım değişimi.



Şekil 9. P&O algoritması için güç grafikleri.

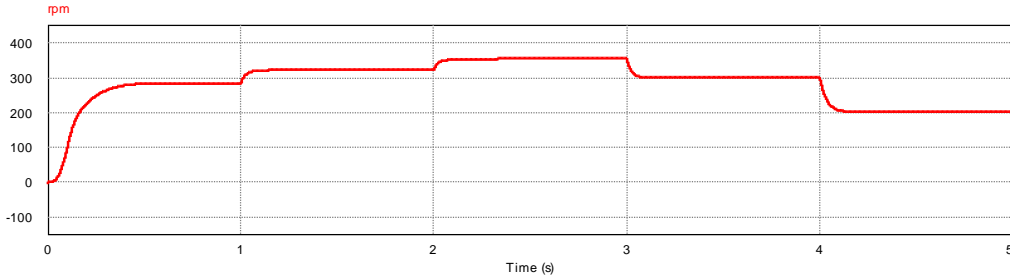


Şekil 9'dan da anlaşılacağı üzere ışınım değeri artış gösterdikçe fotovoltaik dizinin ürettiği güç değeri de artmaktadır. Benzer şekilde ışınım değerinin azaldığı durumlarda da üretilen güç değeri düşmektedir. Değişken ışınım değerleri asenkron motorun stator akımlarında da değişikliğe sebep olmaktadır. Şekil 10'da P&O algoritması için faz akımları gösterilmiştir.  $I_{sa}$ ,  $I_{sb}$  ve  $I_{sc}$  sırasıyla a,b,c faz akımlarını ifade etmektedir. Akım grafiklerine bakıldığında ışınım değeri arttığında akım değerlerinde de artış olduğu gözlenmektedir.

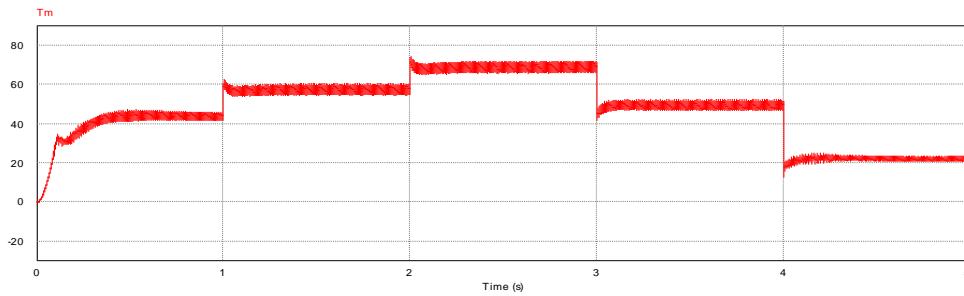


Şekil 10. P&O algoritması için asenkron motor stator akımları.

Sistemde kullanılan asenkron motorun hızı, değişen ışınım miktarlarında üretilen güce göre değişiklik göstermektedir. İlk çalışmada P&O algoritmasının kullanımı ile asenkron motorun hız değişimi Şekil 11 ile sunulmaktadır. Şekilden de anlaşılacağı üzere ışınım değeri arttıkça asenkron motorun da hızı bu doğrultuda artmaktadır. P&O algoritması kullanımında asenkron motorun tork değerlerinin değişimi ise Şekil 12'de verilmiştir.



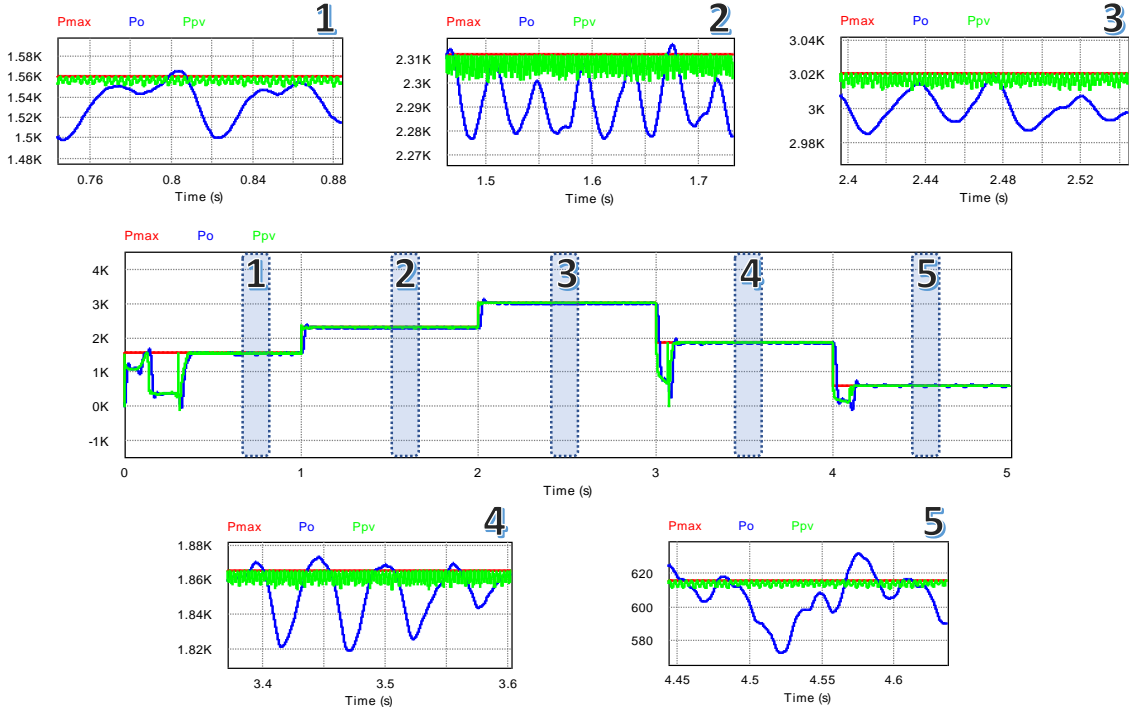
Şekil 11. P&O algoritmasında asenkron motor hız değişimi.



Şekil 12. P&O algoritmasında asenkron motor tork değişimi.

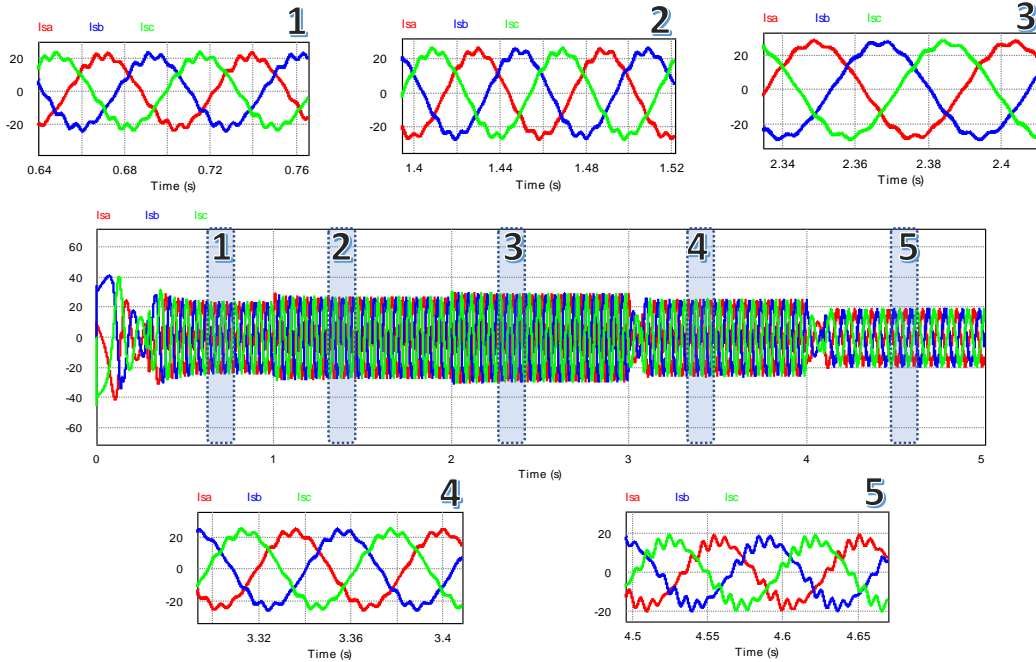
P&O algoritması ile yapılan benzetim çalışması sonucunda sistem fotovoltaik dizinin maksimum gücü ve motora aktarılan güç değerleri analiz edilerek MPPT verimi elde edilmiştir.

Aynı senaryo IC algoritması kullanılarak tekrar edilmiş ve sonuçlar alınmıştır. Bu teknikte de P&O'da olduğu gibi benzer değerler gözlenmiştir. Şekil 13'te IC algoritması kullanılarak elde edilen güç değerleri sunulmuştur.



Şekil 13. IC algoritması için güç grafikleri.

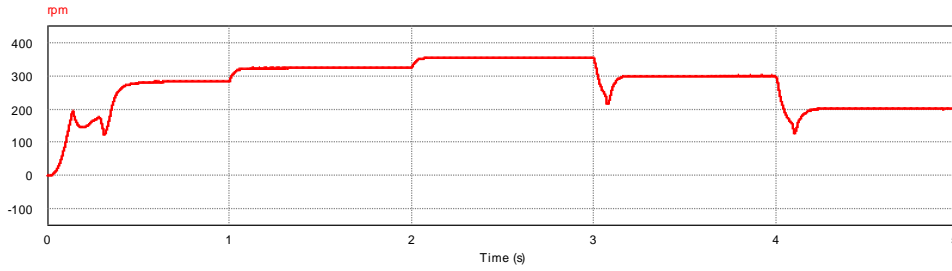
Şekil 13'e bakıldığında IC algoritmasının maksimum gücü takip ettiği görülebilir. Fakat IC algoritması, P&O algoritmasına göre daha dinamik bir yapıya sahip olduğundan çalışma esnasında akım ve güç grafiklerinden de anlaşılacağı üzere salınımlar meydana gelmektedir. Aynı zamanda ışınlım değerlerinin değiştiği anlarda maksimum güce yaklaşımları zaman alabilmektedir. P&O algoritmasında olduğu gibi bu teknikte de ışınlım değiştiğinde sistemde kullanılan asenkron motorun stator faz akımları da bu doğrultuda değişiklik göstermektedir. Şekil 14'te a,b,c fazlarına ait akımlar grafiksel olarak verilmektedir.



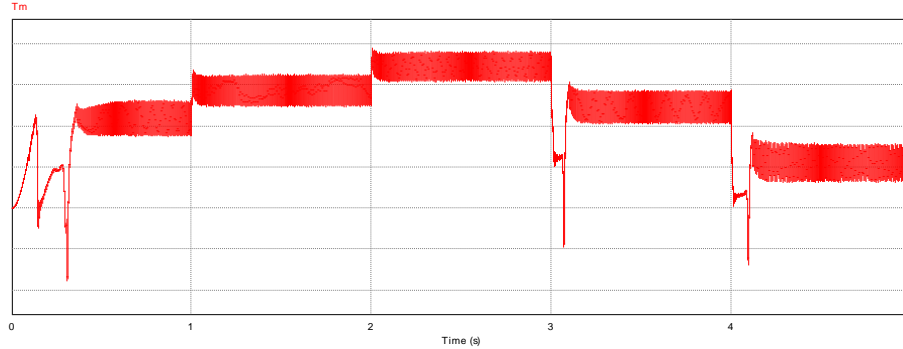
Şekil 14. IC algoritması için asenkron motor stator akımları.

IC algoritması uygulanan sistemde faz akımları incelendiğinde, akım sinyallerinde bozulmalar olduğu gözlemlenmiştir. Sistemin yararlandığı ışınlım miktarının değişimi, aynı zamanda algoritma da değiştiği için motor hızını etkilemektedir. ışınlım miktarının artması ile hızın bu doğrultuda arttığı Şekil 15'te sunulmuştur. Şekil

incelendiğinde düşük ışınım miktarında motor hızının anlık olarak bozulduğu gözlemlenmektedir. Son olarak bu teknik ile yapılan benzetim sonucunda motorun tork değeri grafiksel olarak Şekil 16’da verilmektedir.



Şekil 15. IC algoritmasında asenkron motor hız değişimi.



Şekil 16. IC algoritmasında asenkron motor tork değişimi.

Tork grafiğine bakıldığında uygulanan algoritma sonucunda salınımin oldukça fazla olduğu görülmektedir. Oluşan salınım motora bağlı olan yükte sarsılmaya neden olacağından sulama sistemindeki su akışını da etkilemektedir. Bu durum sistem için dezavantaj yaratabilmektedir. P&O ve IC algoritmaları ile yapılan benzetim çalışması sonucunda sistemin verdiği sonuçlar analiz edilerek Tablo 2’de sunulmuştur. Sistemin veriminin hesaplanmasında sistem çıkış gücü  $P_o$  ve fotovoltaik diziden üretilen güç değeri  $P_{pvmax}$  kullanılmıştır.

Tablo 2. P&O ve IC algoritmaları için benzetim sonuçları.

	İşınım (W/m <sup>2</sup> )	$P_{pvmax}$ (W)	$P_o$ (W)	$\eta_{MGNT}$ (%)	$n_r$ (d/dk)	$T_m$ (N.m)
P&O	500	1560	1552	99,4	283	43,97
	750	2310	2304	99,7	324	57,6
	1000	3021	3015	99,8	355	69,15
	600	1865	1840	98,6	300	49,66
	200	615	614	99,8	201	22,46
IC	500	1560	1542	98,8	283	43,96
	750	2311	2292	99,1	324	57,63
	1000	3021	3005	99,4	355	69,1
	600	1865	1851	99,2	300	49,47
	200	615	606	98,5	201	22,24

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada fotovoltaik sistemlerin tarımsal sulama alanında kullanılmak üzere MPPT tabanlı tek aşamalı bir evirici tasarımı yapılmıştır. Önerilen sistemde yaklaşık 3 kW güç sağlayabilen bir fotovoltaik dizi kullanılmıştır. Yapılan bu çalışmada hem karmaşık yapıların hem de maliyet artışının önüne geçilmek amaçlanmıştır. Bu sebeple sistemde herhangi bir DA-DA dönüştürücü yapısı kullanmadan doğrudan tek seviyeli evirici yapısı kullanılarak tasarım yapılmıştır. Böylece devre daha basit bir yapıya indirgenmiş ve dönüştürücünün oluşturacağı maliyet ortadan kalktığı için sistemin kurulum maliyetine katkı sağlanmıştır. Benzetim çalışması atmosferik değişimler göz önüne alınarak farklı ışınım değerlerinde ve farklı MPPT teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuç grafiklerine bakıldığında her iki MPPT algoritması da güç takibini düzgün bir şekilde yaparak görevini başarıyla yerine getirdiği görülmektedir. Fakat bu iki algoritmanın birbirlerine karşı olan avantajları karar verme aşamasında detaylı incelemeye yöneltilmektedir. Maksimum gücün takip edildiğini görmek amacıyla iki teknik için de güç grafiklerine bakıldığında, IC tekniğinde P&O tekniğine kıyasla çok daha fazla salınım olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca P&O tekniği ışınım miktarından dolayı oluşan güç değişimlerinde maksimum gücü daha hızlı bir şekilde yakalayabilmektedir. Sisteme gelen ışınım miktarının değişimi asenkron motor stator akımlarını da etkilemiştir. Uygulanan tekniklerin ve ışınım değerlerinin değişimi motor hızını ve torkunu da

etkilemektedir. İki algoritmanın uygulanması sonucunda, P&O tekniğinde motor hızında daha düzgün davranışlar görülmektedir. IC tekniğinde ise ışının anlık değişmesi motor hızında bozulmalara neden olmuştur. Motor torku konusunda da benzer şekilde P&O tekniğinin kullanımı IC tekniğine nazaran daha az salınım göstermektedir. Her iki algoritmanın da %99'un üzerinde MPPT verimi sağladığı görülmektedir. Fakat IC tekniğinde verim yüksek olsa da diğer çıktılarına bakıldığında özellikle stator akımlarında yarattığı salınımların P&O tekniğine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Benzetim sonuçlarına göre, önerilen sistemin 200 – 1000 w/m<sup>2</sup> güneş radyasyonu arasında 3 kW'lık PV panellerden elde edilebilecek maksimum gücü asenkron motora başarılı şekilde aktardığı görülmektedir. Sistemde tasarlanan alan yönlendirmeli kontrol algoritmasının da pompa olarak kullanılan üç fazlı asenkron motorun tork kontrolünü başarılı şekilde yaptığı anlaşılmaktadır.

### Yazar Katkıları

Tüm yazarların çalışmadaki katkı oranları eşittir.

### Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

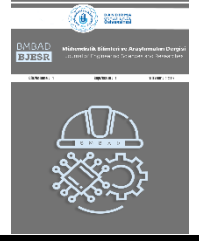
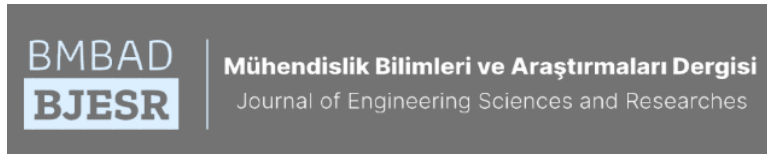
### Destek ve Teşekkür Beyanı

Bu çalışma Bandırma Onyedü Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje Numarası: BAP-22-1004-007.

### KAYNAKÇA

- [1] C. Şahin, M. Karaçor and H. Özbay “Yenilenebilir enerji kaynağı kurulum gücü minimize katsayısının belirlenmesi”, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi vol. 15, pp. 404-411, 2019.
- [2] O. Bingöl, and B., Özkaya “A comprehensive overview of soft computing based MPPT techniques for partial shading conditions in PV systems,” Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, vol. 7, no. 4, pp. 926-939, 2019.
- [3] R. Şenol “Tarımsal sulama ve güneş enerjisi”, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, vol. 27, no. 3, pp. 519 – 526, 2012.
- [4] A. Karafil, H. Özbay, M. Kesler “Sıcaklık ve Güneş Işınım Değişimlerinin Fotovoltaik Panel Gücü Üzerindeki Etkilerinin Simülasyon Analizi,” Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu, 2016.
- [5] İ. Yavuz, and H. Özbay “Rüzgar Türbinlerinde Kurulum ve Bakım Süreçleri: Bandırma Örneği”, Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi vol. 2, no. 2, pp. 58-68, 2020.
- [6] F., Kantaroğlu, “Fotovoltaik sistemler”, Tiirk Tesisat Mühendisleri Derneği, TTMD, 2010.
- [7] A.A. Esmeail, S. Öncü, N. Altın “MPPT controlled three phase PV supplied water pumping system”, 13th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence, IEEE, pp. 1-5, 2021.
- [8] T. Ramesh “Solar powered based water pumping system using perturb and observation MPPT technique,” In 2018 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS), pp. 1-6, IEEE, 2018.
- [9] M.A. Eltawil, Z. Zhao “MPPT Techniques for Photovoltaic Applications”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 25, pp. 793-813, 2013.
- [10] I.K. Abdul-Razzaq, M.M.F. Sakr, Y.G. Rashid “Comparison of PV panels MPPT techniques applied to solar water pumping system”, International Journal of Power Electronics and Drive Systems, vol. 12, no. 3, pp. 1813-1822, 2021.
- [11] C. Sachin, and K.B. Shah “Solar photovoltaic fed induction motor for water pumping system using MPPT algorithm”, Int. J. Electr. Electron. Eng, vol. 7, no. 3, pp. 31-42, 2018..
- [12] S.S., Chandel, M.N. Naik, and R. Chandel “Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 49, pp. 1084-1099, 2015.
- [13] H. Özbay, S. Öncü, and M. Kesler “SMC-DPC based active and reactive power control of grid-tied three phase inverter for PV systems”, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 42, no. 28, pp. 17713-17722, 2017.
- [14] O.N. Mahmmoud, S.R. Mehdi, K.S. Gaeid, and A.L. S. Al-Tameemi “Solar cell split source inverter for induction motor with computer control”, International Journal of Power Electronics and Drive Systems, vol. 14, no. 1, pp. 174-184, 2023.
- [15] Y.E. Keskin, M.E. Başoğlu, İ.G. Tekdemir, B. Çakır “Fotovoltaik Sistemlerde Değiştir Gözle ve Artan İletkenlik Algoritmalarının Karşılaştırılması”, Elektrik – Elektronik – Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu, pp. 91-95, 2014.
- [16] H. Özbay “Rezonans Dönüştürücülü Fotovoltaik Batarya Şarj Sistemi”, Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi vol. 2, no. 1, pp. 11-20, 2020.
- [17] U. Badak, A.B. Yıldız “Maksimum Güç Noktası İzleyici Algoritmalarının Verim, Salınım Miktarı ve Yakınsama Süresi Açısından Karşılaştırılması,” Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, vol. 21, pp. 463-472, 2021.

- [18] A. Loukriz, H. Mourad and M. Sabir “Simulation and experimental design of a new advanced variable step size Incremental Conductance MPPT algorithm for PV systems”, ISA transactions vol. 62, pp. 30-38, 2016.
- [19] H. Özbay “PSIM simulation of flyback converter for P and O and IC MPPT algorithms”, European Journal of Engineering and Natural Sciences, vol. 2, no. 1, pp. 204-209, 2017.
- [20] H. Alrajoubi, S. Öncü, S. Kivrak “An MPPT Controlled BLDC Motor Driven Water Pumping System”, 10th International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA), pp. 116-119, 2021.
- [21] A. Karakaya “Asenkron Motorun Modellenmesi ve Modern Denetim Yöntemleri ile Hız Analizi”, Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, vol. 7, no. 2, pp. 497-502, 2017.
- [22] A.Y. Yousef, and S.M. Abdelmaksoud “Review on field oriented control of induction motor”, Int. J. Res. Emerg. Sci. Technol, vol. 2, pp. 5-16, 2015.
- [23] A. Pal, S. Das, and A.K. Chattopadhyay “An improved rotor flux space vector based MRAS for field-oriented control of induction motor drives”, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 6, pp. 5131-5141, 2017.
- [24] I.M. Mehedi, N. Saad, M.A. Magzoub, U.M. Al-Saggaf, and A.H. Milyani “Simulation analysis and experimental evaluation of improved field-oriented controlled induction motors incorporating intelligent controllers”, IEEE Access, vol. 10, pp. 18380-18394, 2022.
- [25] S. Özdemir, N. Altin, I. Sefa, and G. Bal “PV supplied single stage MPPT inverter for induction motor actuated ventilation systems” elektronika ir elektrotehnika, vol. 20, no. 5, pp. 116-122, 2014.



## A Reconfigurable 4<sup>th</sup> Order IIR Filter For The Low Frequency Applications

### Düşük Frekans Uygulamaları İçin Yeniden Yapılandırılabilir Bir IIR Süzgeç Yapısı

<sup>1</sup>Deniz OZENLİ

<sup>1</sup>Department of Electronics Engineering, Turkish Air Force Academy, National Defence University, Istanbul, 34149 TURKEY

<sup>1</sup>dozenli@hho.msu.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 13 May 2023

Accepted : 30 June 2023

##### Keywords:

Infinite Impulse Response (IIR), IIR filter, Z-Transform, Verilog.

#### ABSTRACT

Huge numbers of advanced electrical engineering applications employ infinite impulse response (IIR) filters very frequently in order to meet market's demands. Especially, some applications such as video processing, digital signal processing and high-speed digital communication require computational efficiency and low latency. In this point of view, high-speed processing of digital data requires a digital signal processor or an FPGA instead of a conventional microprocessor. This work gives a FPGA hardware design of a 4<sup>th</sup> order IIR reconfigurable filter structure. The proposed filter's maximum clock frequency is around 32MHz which covers different low frequency applications from biomedical signal processing up to speech applications. To verify the performance of the filter, 4<sup>th</sup> order Butterworth and Chebyshev filters are realized in the basis of MATLAB results and FPGA behavioral model. It should be considered that the proposed filter scheme presents promising results to meet low frequency applications.

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 13 Mayıs 2023

Kabul : 30 Haziran 2023

##### Anahtar Kelimeler:

Sonsuz Uzunluklu Birim Dürtü Yanıtı (IIR), IIR Süzgeç, Z-Dönüşümü, Verilog.

#### ÖZET

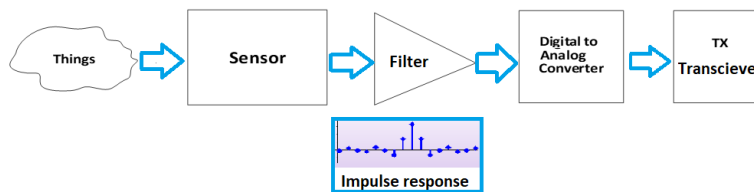
Çok sayıda ileri elektrik mühendisliği uygulaması, tüketici taleplerini karşılamak adına çok sık olarak sonsuz dürtü yanıtı sahip (IIR) filtreleri bünyelerinde barındırırlar. Özellikle video işleme, sayısal işaret işleme ve yüksek hızlı sayısal iletişim gibi bazı uygulamalar, hesaplama verimliliği ve düşük gecikme süresi gerektirir. Bu noktada, sayısal verilerin yüksek hızda işlenmesi, geleneksel bir mikroişlemci yerine bir sayısal işaret işlemcisi veya bir FPGA gerektirir. Bu çalışmada 4.dereceden IIR ayarlanabilir bir süzgeç yapısı FPGA donanım tasarımı eşliğinde verilecektir. Önerilen süzgecin maksimum saat frekansı 32MHz civarındadır ki, bu frekans biyomedikal işaret işlemeden konuşma işareti işlemeye kadar pek çok uygulamaya uygun aralıktadır. Süzgecin başarımını doğrulamak adına 4.dereceden Butterworth ve Chebyshev süzgeç örnekleri MATLAB ve FPGA davranışsal modelleri kıyaslaması tabanında sunulmaktadır. Şu ifade edilebilir ki önerilen süzgeç yapısı düşük frekans uygulamalarında yer alabilmek adına güvenilir sonuçlar içermektedir.

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

## 1. INTRODUCTION

In advanced signal processing, a great deal of filtering applications have been realized by employing digital signal processing blocks. In this view, analog to digital conversion is employed, which contains sampling and quantizer circuitries. After conversion, digital filtering can be provided by using different units such as microprocessor units (MCUs), digital signal processors (DSPs) or FPGAs. In this manner, Figure 1 illustrates a low frequency signal acquisition flow based on digital filtering. In the end of filtering, baseband signal can be safely converted back to the analog domain in order to communicate with the other parts in the medium. It should be noted that real time performance and total design time are crucial parameters for the digital signal processing. Hence, FPGA based operations can be safely preferred in order to reduce the design cycles and increase real time performance to meet market's demands [1-3].

Most of digital signal processing applications necessitate a resilient digital filter block based on low cost, less memory and low power design strategy. In the further view of digital filters, FIR and IIR architectures are presented in the previous studies [4-11]. When compared to the FIR counterparts, IIR filter structures presents more flexibility, less memory requirement and reduced design time. Also, they bring some drawbacks such as non-linear phase characteristics and complicated feedback mechanism worsening system stability. On the other hand, in order to discard noisy signal components placed in high frequency region, fast and more stable IIR digital filters are implemented in basis of behavioral models and generated special filter functions such as Chebyshev or Butterworth.



**Figure 1.** Low frequency signal acquisition system in digital signal processing.

Whereas FIR filters bring several advantages such as linearity, stability and fixed-point analysis, IIR architectures can be safely implemented in different low frequency applications ranging from biomedical filtering up to speech analysis and recognition. In addition, FIR filters have high computational burden and memory requirements. In this view, some FIR structures necessitate huge amount of design time compared to IIR counterparts. In order to decrease design cycles, there are some commercial software tools in the market such as MATLAB and Simulink programs presenting user friendly design tools, which the designer can define a cost function and filter constraints. In the further view, Verilog HDL (Hardware Description Language) gives new opportunities to the users based on high level design paths. Therefore, behavioral view of the desired filter architecture can be safely transformed into block level synthesis, which will be resulted in transistor level design by adding pads and clock trees [12-13].

In this paper, 4<sup>th</sup> order IIR filters including Butterworth and Chebyshev architectures are presented by using Transpose design technique [13]. Normalized filter frequency is selected from 0.1 up to 0.6, which is suitable for biomedical and speech applications. In order to evaluate the filter performance, MATLAB results are compared with Verilog based design. In addition, design flow of the architectures is given with device utilizations after synthesis of the core 4<sup>th</sup> order reconfigurable IIR filter. To justify the performance, real audio (speech) signal is sampled at 48kHz and summed with additive gaussian noise. The filtered output signal is evaluated in both of time and frequency domains.

This paper is organized as follows: The next chapter gives the design flow of the proposed 4<sup>th</sup> order IIR filter architecture. The third part introduces Verilog implementation of the filter, whereas fourth chapter gives the filter results in comparison with MATLAB ideal responses. The last part ends up the paper with concluding remarks.

## 2. THE PROPOSED 4<sup>TH</sup> ORDER IIR FILTER DESIGN METHODOLOGY

Low-pass and high-pass filters allow signals in pass-band region, whilst the other signals outside the pass-band region are suppressed with high rejection ratio. In this work, low-pass and high-pass filters in basis of Butterworth and Chebyshev structures are generated. It should be noted that Butterworth structure gives maximally flatness in pass-band, whereas Chebyshev topology has an equiripple amplitude response [14]. Furthermore, the digital filters can be designed in FIR or IIR topology. In order to reduce memory requirement and effects arising from windowing steps, IIR configuration is preferred in this work. General IIR filter design strategy can be given in Figure 2, whilst (1) and (2) give IIR difference equation.

In this work, sampling frequency  $f_s$  is selected as 48kHz, when low-pass and high-pass filters are designed. While designing the filters, analog transfer function of  $H(s)$  is converted to  $H(z)$  by using bilinear transformation [15-16]. Hence, (3) and (4) are applied to the desired filters in order to obtain the projection of the filters in unit circle. It should be considered that the designed filters in this work are 4<sup>th</sup> order, also have four zeroes and poles on the unit circle. In this respect,  $a_k$  and  $b_k$  coefficients can be obtained for each IIR filter configurations.

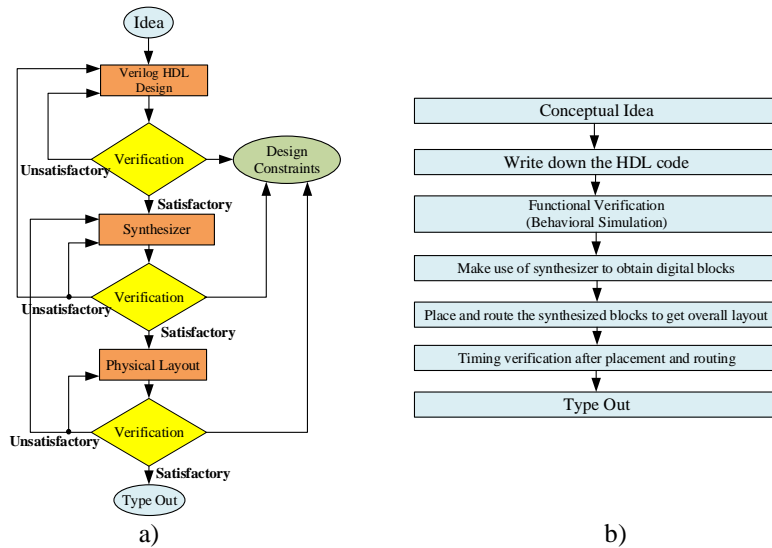


Figure 2. General IIR filter design strategy: a) Design flow, b) Details in each design step up to production.

$$y(n) = \sum_{k=0}^M b_k x(n-k) - \sum_{k=0}^N a_k y(n-k) \quad (1)$$

$$H(z) = \frac{\sum_{k=0}^M b_k z^{-k}}{\sum_{k=1}^N a_k z^{-k}} \quad (2)$$

$$s = \frac{2}{T_s} \cdot \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \quad (3)$$

$$z = r.e^{j\omega} = \frac{1 + \frac{T_s}{2} s}{1 - \frac{T_s}{2} s} \quad (4)$$

When considered re-arrangements described in (3)-(4), the filter coefficients can be employed in transposed IIR filter topology as illustrated in Figure 3. In order to provide low-pass and high-pass filters, Butterworth and Chebyshev concepts are employed. For 16 bits resolution level and fixed design methodology, impulse and step responses are given in Figure 4 for the Butterworth 4<sup>th</sup> order low-pass filters with 0.1 normalized cut-off frequency. Moreover, Figures 5, 6 and 7 give low-pass and high-pass filter-time responses according to the 4<sup>th</sup> order Chebyshev filter design with different normalized cut-off frequencies.

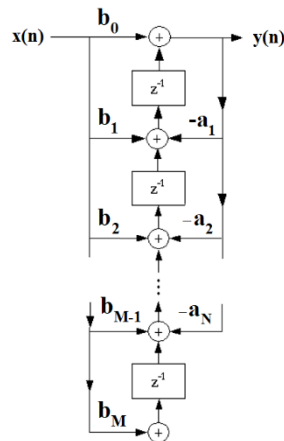
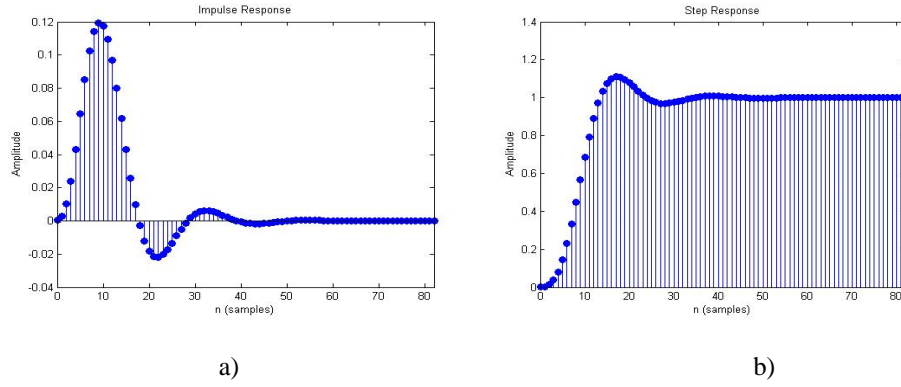
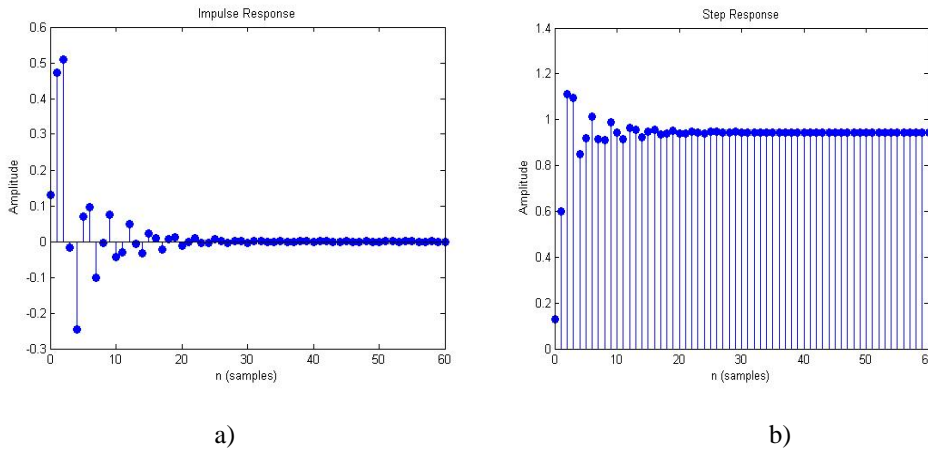


Figure 3. Transposed IIR filter realization.

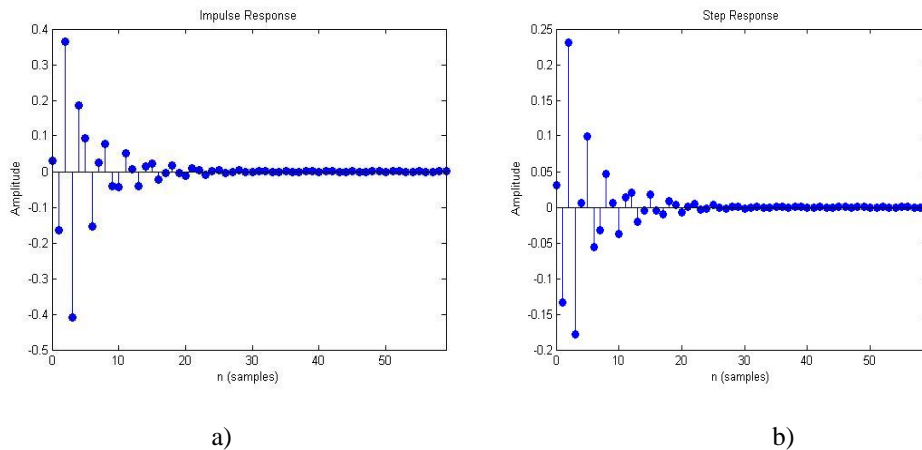




**Figure 4.** Butterworth 4<sup>th</sup> order low-pass filter with 0.1 normalized cut-off frequency: a) Impulse response, b) Step response.



**Figure 5.** Chebyshev 4<sup>th</sup> order low-pass filter with 0.6 normalized cut-off frequency: a) Impulse response, b) Step response.



**Figure 6.** Chebyshev 4<sup>th</sup> order high-pass filter with 0.6 normalized cut-off frequency: a) Impulse response, b) Step response.

### 3. VERILOG IMPLEMENTATION OF THE PROPOSED FILTER

In order to realize the proposed filter structure, a design flow is employed as illustrated in Figure 8. After description of filter type (FIR/IIR, order of filter or Chebyshev/Butterworth/Elliptic topologies etc.), transposed filter structure is constructed in behavioral simulation. In conjunction with the algorithm in Table 1 and design flow in Figure 8, transposed IIR filter is implemented. Also, filter coefficients determine the transposed filter structure's forward and reverse path gains. In this respect, the coefficients are given for all configurations of the proposed 4<sup>th</sup> order IIR structure in Table 2. After the filter coefficients are obtained, which result in the desired filter response, behavioral simulation is generated in order to testify the filter responses.

As shown in Figure 9, behavioral simulation is given in order to obtain transposed 4<sup>th</sup> order IIR filter structure signal flow. In this graph, filter output is investigated with regard to each filter configuration. Also, it can be

verified that filter output is generated correctly based on delay cells and gain blocks in each positive edge of the clock signal. In this respect, the filter responses of each configuration can be compared with the theoretical results after filter results are saved in a separate file.

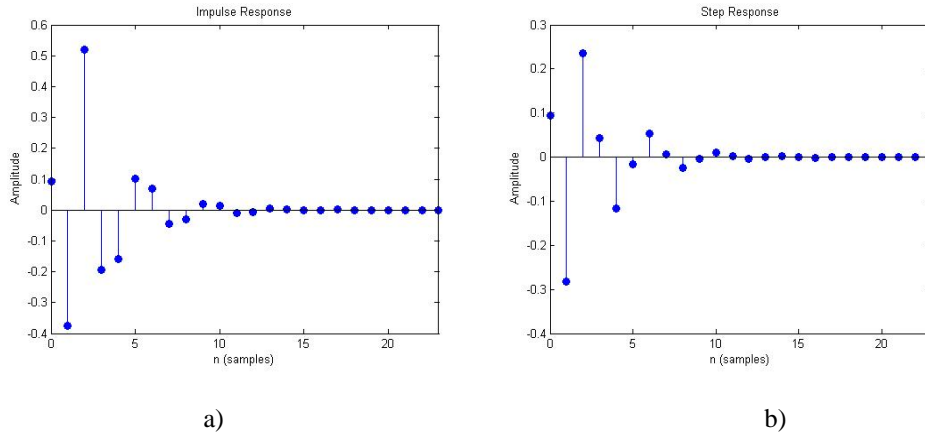


Figure 7. Chebyshev 4<sup>th</sup> order high-pass filter with 0.5 normalized cut-off frequency: a) Impulse response, b) Step response.

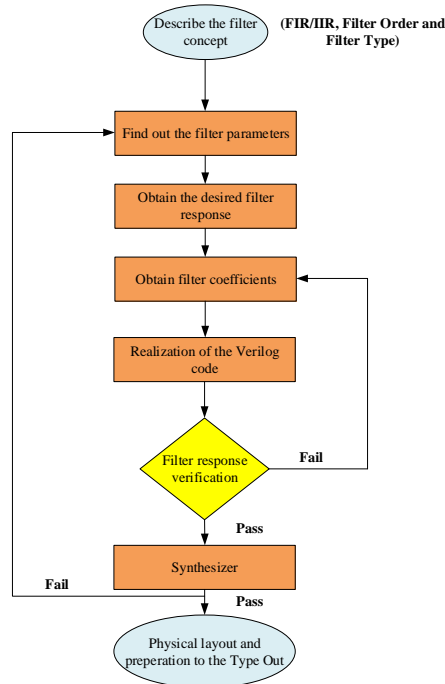


Figure 8. 4<sup>th</sup> order IIR filter design flow in Verilog.

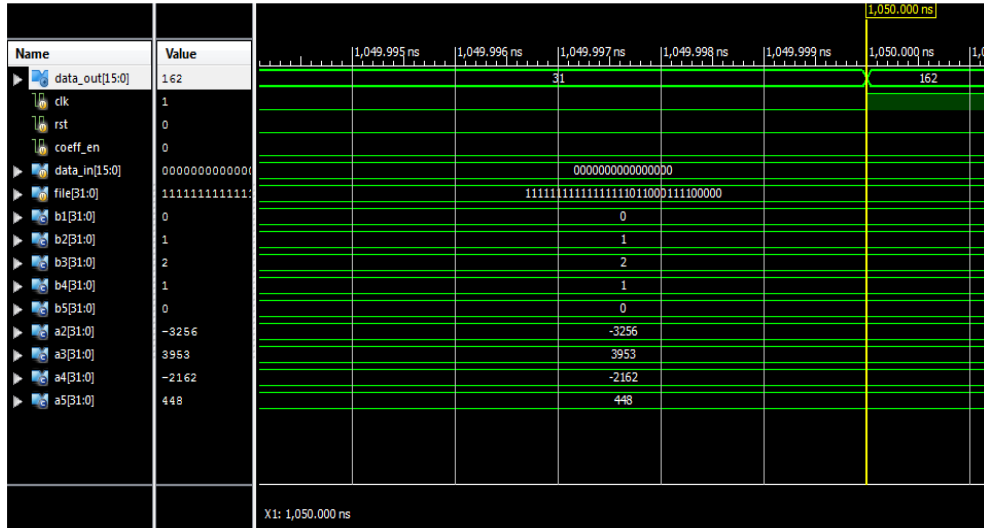
Table 1. Behavioral design of the 4<sup>th</sup> order IIR filter in Verilog.

Algorithm: Discrete Time 4 <sup>th</sup> Order IIR Filter
1: Define filter inputs
2: Define inputs to be activated in positive edge of the clock
3: Output assignment in 16 bits in the end of filtering block
4: Entering the pre-determined filter coefficients
5: 4 <sup>th</sup> order IIR filter construction in transposed architecture
6: Non-blocking assignments for the filter's output calculation in each positive edge of the clock signal

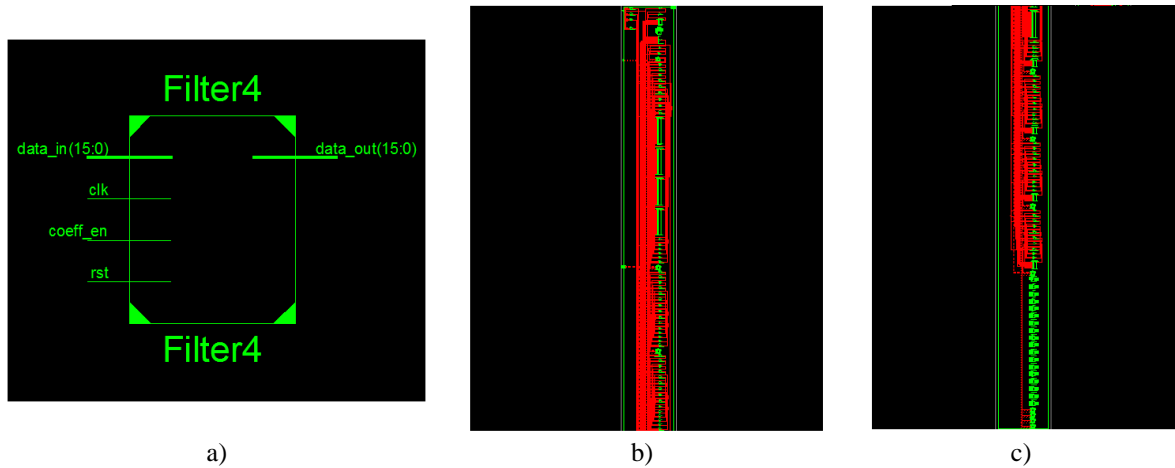
After investigation of filter responses in the behavioral simulations, RTL view of the designed filter block can be obtained by using synthesizer. Therefore, top view of the designed filter block can be given as Figure 10a, whereas the estimated number of utilized logic blocks can be tabulated in Table 2. All logic blocks, which consist of delay cells and multiplexers can be depicted as shown in Figure 10a 10b and 10c. In this figure, upper and lower parts of the synthesized filter are given separately in order to illustrate logical blocks and interconnections.

**Table 2.** Filter coefficients of the proposed 4<sup>th</sup> order IIR filter in the transposed structure illustrated in Figure.3.

4 <sup>th</sup> Order IIR Filter Coefficients								
Filter Configuration	a		b					
Butterworth LP (Normalized $f_c = 0.1$ )	[1.0000	-3.1806	3.8612	[0.0004	0.0017	0.0025	0.0017	0.0004]
Chebyshev LP (Normalized $f_c = 0.6$ )	[1.0000	0.3516	0.7708	[0.1293	0.5171	0.7756	0.5171	0.1293]
Chebyshev HP (Normalized $f_c = 0.6$ )	[1.0000	1.3834	1.4721	[0.0304	-0.1218	0.1827	-0.1218	0.0304]
Chebyshev HP (Normalized $f_c = 0.5$ )	[1.0000	0.0000	0.4860	[0.0940	-0.3759	0.5639	-0.3759	0.0940]



**Figure 9.** The proposed IIR filter structure’s behavioral simulation in timescale of 1ps. (Clock Frequency is selected as 1MHz.).



**Figure 10.** The proposed IIR filter’s register transfer level (RTL) view with synthesized logic blocks: a) Top view, b) Upper side of the core structure, c) Lower side of the core structure.

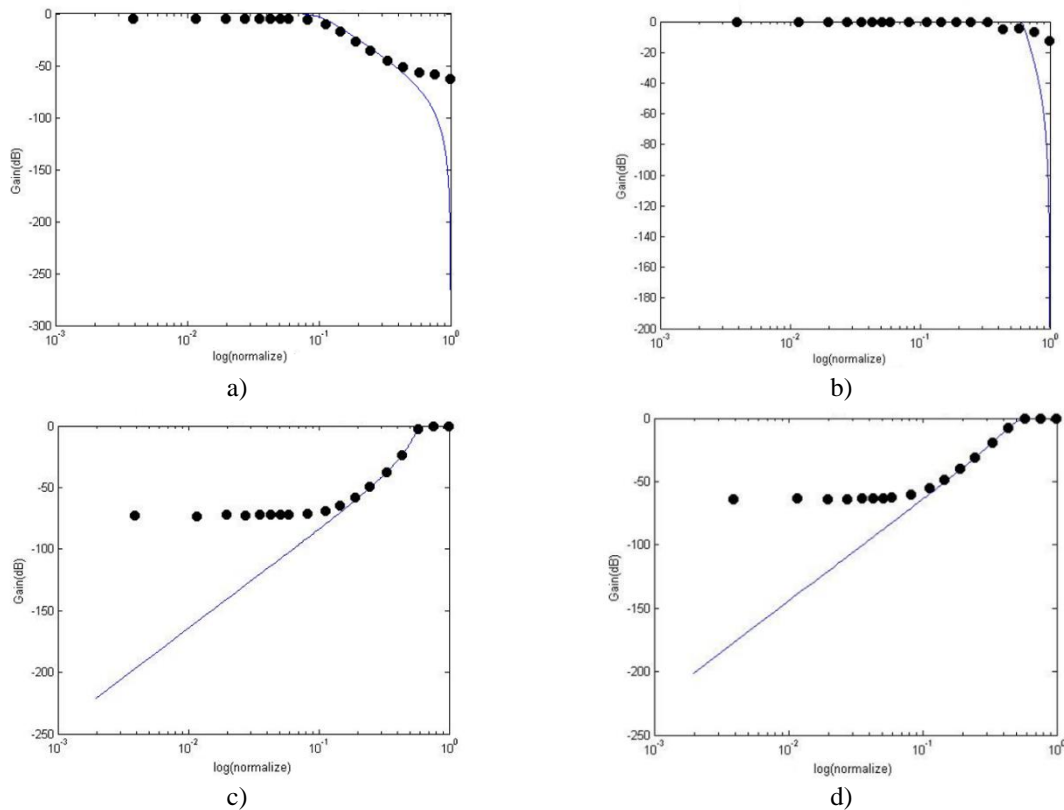
When considered estimated logical blocks’ utilization given in Table 3, synthesizing of the filter structure is finalized without any errors. Meanwhile, it should be noted that the number of slices is more than available slices in ISE 13.4 design suite. This is because the required number of slices is likely to be more than available slices. If type out of the filter structure is considered after place and route process, total chip area can be increasing due to additional transistors and logical blocks in order to reach the required number of slices. Moreover, maximum clock frequency of the designed IIR filter structure is given as 32MHz, whereas combinational path delay is around of 18ns. The maximum clock frequency enables the filter structure to be a competitive candidate for the low frequency applications up to around of 1.5MHz, which are ranging from biomedical filtering to speech processing implementations.

**Table 3.** The proposed IIR filter’s logic blocks utilization (Estimated by Xilinx Verilog Design Suite version of ISE 13.4).

Device Utilization Summary (Estimated Values)			
Logic Utilization	Used	Available	Utilization
Number of Slices	1077	768	140%
Number of Slice Flip-Flops	306	1536	19%
Number of 4 input LUTs	1536	1841	84%
Number of bonded IOBs	35	63	55%
Number of MUX 18x18s	4	4	100%
Number of GCLKs	1	8	12%

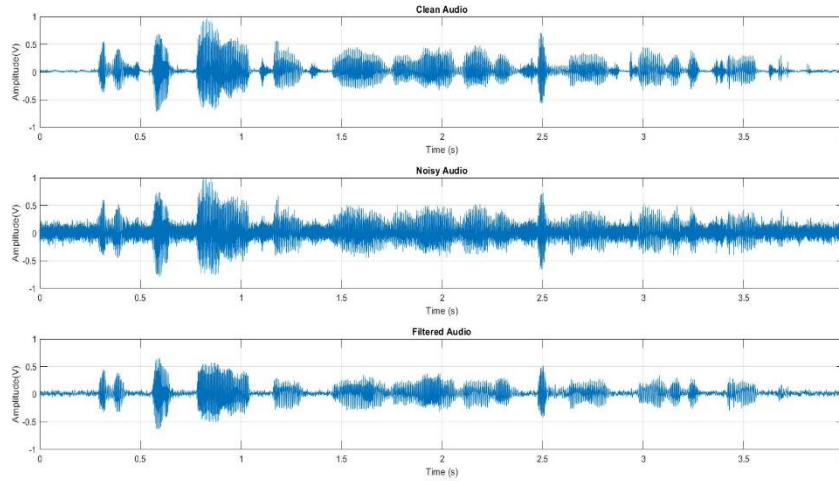
**4. VERIFICATION OF THE PROPOSED ARCHITECTURE**

In order to verify performance of the IIR filter structure, ideal filter characteristics should be compared with FPGA behavior compiled with the transposed topology aforementioned in the previous section. In this analysis, ISE 13.4 design environment is employed with SPARTAN-3 FPGA development board. Also, codes are executed by 64-bit Intel i5 processor, running at 2.4GHz. In this respect, provided IIR filter results can be justified for each configuration with sampling frequency of 48kHz. When considered gain frequency responses of the filter configurations shown in Figure 11, FPGA results are in a good accordance with the ideal behavior. As for the suppression bands of the filters, there are no high rejection ratios due to fact that filter coefficients are quantized with the accuracy of 16 bits. It should be noted that digital filters such as Butterworth, Chebyshev structures or low order FIR structures suffer from the low rejection ratios in the suppression bands. At the expense of increasing filter’s order and design complexity, suppression bands’ behaviors come closer to the ideal ones.

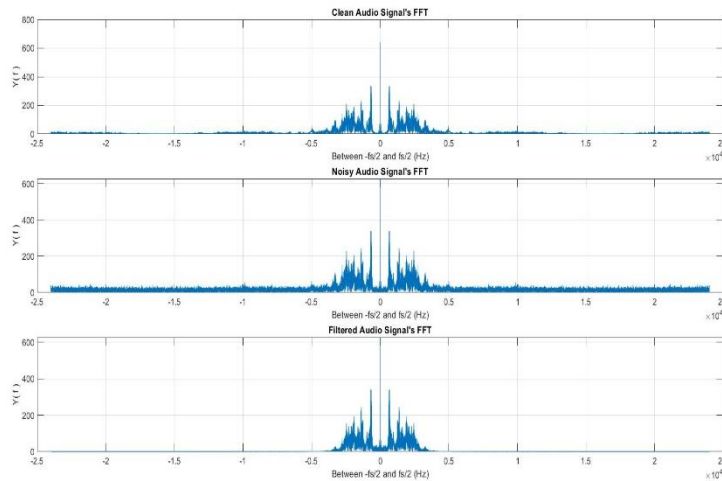


**Figure 11.** The proposed IIR filter’s frequency responses (Solid is ideal response, whereas dots are FPGA results): a) Butterworth 4<sup>th</sup> order low-pass filter with 0.1 normalized cut-off frequency, b) Chebyshev 4<sup>th</sup> order low-pass filter with 0.6 normalized cut-off frequency, c) Chebyshev 4<sup>th</sup> order high-pass filter with 0.6 normalized cut-off frequency, d) Chebyshev 4<sup>th</sup> order high-pass filter with 0.5 normalized cut-off frequency.

In order to justify the filter’s performance, real audio (speech) signal is sampled at 48kHz and summed with additive gaussian noise. In the end of this process, the high frequency noise components are added to the original (clean) signal under the gaussian noisy channel with zero mean and sigma value of 0.05. As shown in Figure 12



**Figure 12.** Real Audio signal test for the IIR filtering performance. Upper side: Clean Audio Signal, Center: Noisy Audio Signal Generated with Additive Gaussian Noise Channel, Lower side: Filtered Audio Signal.



**Figure 13.** Real Audio signal test for the IIR filtering performance with FFTs. Upper side: Clean Audio Signal's FFT, Center: Noisy Audio Signal's FFT, Lower side: Filtered Audio Signal's FFT.

and Figure 13, noise effects, which are spread over large frequency interval can be removed safely by using the proposed IIR filter structure. It should be noted that in this exemplary acquisition, 4<sup>th</sup> order Butterworth low-pass filter is employed with 0.1 normalized cut-off frequency as mentioned in the previous section. In order to prove the competitive performance, Table.4 is given in comparison to the previous studies. Hence, it should be noted that the proposed reconfigurable filter structure can be a good candidate for the low frequency applications, where digital signal processing blocks are needed. In the comparison of tabulated resource utilization, the proposed work brings new facilities to the designers in order to decrease the number of multiplexers, memory devices and flip-flops in the digital filtering applications where chip area occupation and calculation efficiency are very crucial.

**Table 4.** Used FPGA resources in comparison with the previous studies

FPGA Resource Utilization	[4]	[9]	[16]	The Proposed Work
Number of Slice Flip- Flops	1553	896	177	<b>306</b>
Number LUTs	4458	896	1662	<b>1536</b>
Number of Block RAMs	0	0	2	<b>0</b>
Number of MUX	24	0	142	<b>4</b>

## 5. CONCLUSIONS

This work gives a FPGA hardware design of a 4<sup>th</sup> order IIR reconfigurable filter structure. The proposed filter's maximum clock frequency is around 32MHz which covers different low frequency applications from biomedical signal processing up to speech applications. To verify the performance of the filter, 4<sup>th</sup> order Butterworth and Chebyshev filters are realized in the basis of MATLAB results and FPGA behavioral model. Also, consumed logic gates and blocks are given with estimated numbers in order to evaluate chip area occupation. It should be considered that the proposed filter scheme gives promising results to meet low frequency applications. Also, it is considered that large numbers of advanced electrical engineering applications usually make use of infinite impulse response (IIR) filters in order to reach market's trends. Especially, some applications such as video processing, digital signal processing and high-speed digital communication necessitate computational efficiency and low latency. In this regard, the proposed architecture can be a candidate solution in the low frequency applications where reconfigurable digital IIR filters are needed. The proposed filter's cut-off frequency can be safely tunable up to 1.5MHz, whereas filter's type can be adjustable in 4<sup>th</sup> order topology such as low-pass, high-pass or Chebyshev, Butterworth configurations.

### Author Contribution

Author approves sole responsibility for the parts of study: study conception and design, data collection, analysis and evaluation of the results, and manuscript preparation.

### Conflict of Interest

Author declares that he has no conflicts of interest.

## REFERENCES

- [1] C.J. Kikkert "A Phasor Measurement Unit Algorithm Using IIR Filters for FPGA Implementation", *Electronics*, vol. 8, no. 12, pp. 1523-1540, 2019.
- [2] F. Capligns, A. Litvinenko, D. Kolosovs, M. Terauds, M. Zeltins, and D. Pikulins "FPGA-Based Antipodal Chaotic Shift Keying Communication System", *Electronics*, vol. 11, no. 12, pp. 1870-1892, 2022.
- [3] G. Tatar, O. Kılıç, and S. Bayar "FPGA Based Fault Distance Detection and Positioning of Underground Energy Cable by Using GSM/GPRS", In *IEEE International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies (ISAECT)*, pp. 1-6, 2019.
- [4] G. Tatar, İ. Çiçek, and S. Bayar "FPGA design of a fourth order elliptic IIR band-pass filter using LabVIEW", *European Journal of Science and Technology*, vol. 26, no. 1, pp. 122-127, 2021.
- [5] D. Datta, and H.S. Dutta, "High performance IIR filter implementation on FPGA", *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, vol. 8, no. 2, pp. 1-9, 2021
- [6] M.A.A. Al-Dulaimi, H.A. Wahhab, and A.A. Amer "Design and Implementation of Communication Digital FIR Filter for Audio Signals on the FPGA Platform", *Journal of Communications*, vol. 18, no. 2 pp. 89-96, 2023.
- [7] V. Thamizharasan, and N. Kasthuri "FPGA implementation of high performance digital FIR filter design using a hybrid adder and multiplier", *International Journal of Electronics*, vol. 110, no. 4, pp. 587-607, 2023.
- [8] S.M.R. Islam, R. Sarker, S. Saha, and A.N. Uddin "Design of a programmable digital IIR filter based on FPGA", In *IEEE International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV)*, pp. 716-721, 2012.
- [9] H.R. Faleh "Performance investigation of digital lowpass IIR filter based on different platforms", *International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems*, vol. 12, no. 2, pp. 105-111, 2021.
- [10] E. Barhoumi, Y. Charabi, and S. Farhani "FPGA Application: Realization of IIR filter based Architecture", *Journal of VLSI Circuits and Systems*, vol. 5, no. 2, pp. 29-35, 2023.
- [11] V. Vijay, V.S. Rao, K. Chaitanya, S.C. Venkateshwarlu, C.S. Pittala, and R.R. Vallabhuni "High-Performance IIR Filter Implementation Using FPGA", In *IEEE 4th International Conference on Recent Trends in Computer Science and Technology (ICRTCST)*, pp. 354-358 2022.
- [12] J. Wu, and J. Xu "Research on noise impact of building environment based on FPGA high-performance algorithm", *Microprocessors and Microsystems*, vol. 80, no.1, pp. 103342-103349, 2021.
- [13] A. Volkova, M. Istoan, F. De Dinechin, and T. Hilaire "Towards hardware IIR filters computing just right: Direct form I case study", *Computers, IEEE Transactions on*, vol. 68, no. 4, pp. 597-608, 2018.
- [14] R. Garcia, A. Volkova, M. Kumm, A. Goldsztejn, and J. Kühle "Hardware-aware Design of Multiplierless Second-Order IIR Filters with Minimum Adders", *Signal Processing, IEEE Transactions on*, vol. 70, no. 1, pp. 1673-1686, 2022.
- [15] A.I. Al-Shueli "Optimized Implementation of ECG Signal Noise Cancellation Using FIR and IIR Filter Techniques Based On FPGA", *Eurasian Journal of Engineering and Technology*, vol. 9, no. 1, pp. 43-54, 2022.
- [16] V. Pathak, S.J. Nanda, A. M. Joshi, and S.S. Sahu "FPGA implementation of high - speed tunable IIR band pass notch filter for identification of hot - spots in protein", *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 49, no. 11, pp. 3748-3765, 2021.



## Design of High-Power Density Spoke-Type Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for E-Bikes

### Elektrik Destekli Bisikletler için Yüksek Güç Yoğunluğuna Sahip Çubuk Tipi Gömülü Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı

<sup>1</sup>Yusuf YASA 

<sup>1</sup>Istanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, İstanbul, Türkiye

<sup>1</sup>yusufyasa@itu.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 22 May 2023

Accepted : 10 July 2023

##### Keywords:

Electrified bike, E-bike, high-performance electric motor, Spoke type interior permanent magnet synchronous motor.

#### ABSTRACT

In this paper, the high-performance electric motor is designed for e-bikes. Desired features from the electric motor are discussed and the required parameters such as outer diameter, stack length, operating speed, and torque are determined. High-power and high-torque densities at low-rated speeds are the most important required features in e-bike applications. In addition, the high dynamic mechanical response is also important as the motor should be synchronized with the user's foot activity. A design study is executed for a mid-drive e-bike traction system. The electromagnetic design study is started by determining the motor type and slot/pole configuration. Based on the required features, the spoke type IPM is chosen to be developed. Hereafter design tips are mentioned and electromagnetic analyses are performed through finite element analyses. The results show that the developed spoke-type interior permanent magnet motor (IPM motor) in the limited volume can run the bike efficiently and silently which are the signs of successful design.

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 22 Mayıs 2023

Kabul : 10 Temmuz 2023

##### Anahtar Kelimeler:

Elektrikli bisiklet, E-bisiklet, Yüksek-performanslı elektrik motoru, Çubuk-tipi gömülü mıknatıslı senkron motor

#### ÖZET

Bu yazıda, e-bisikletler için yüksek performanslı elektrik motoru tasarlanmıştır. Elektrik motorundan istenen özellikler tartışılmış; dış çap, laminasyon uzunluğu, çalışma hızı ve tork gibi gerekli parametreler belirlenmiştir. Düşük nominal hızlarda yüksek güç ve yüksek tork yoğunlukları, e-bisiklet uygulamalarında gereken en önemli özelliklerdir. Ayrıca, motorun kullanıcının ayak aktivitesi ile senkronize olması gerektiğinden, yüksek dinamik mekanik cevap önemlidir. Ortadan çekişli bir e-bisiklet çekiş sistemi için bir tasarım çalışması yapılmıştır. Elektromanyetik tasarım çalışmasına motor tipi ve oluk/kutup konfigürasyonu belirlenerek başlanır. İstenen özellikle dikkate alınmış, geliştirilmek üzere çubuk tipi gömülü mıknatıslı senkron motor (IPM motor) seçilmiştir. Sonrasında, tasarım ipuçlarından bahsedilmiş ve elektromanyetik analizler sonlu eleman analizleri ile gerçekleştirilmiştir. Elektrik destekli bisiklette sınırlı bir hacimde çalışacak şekilde geliştirilmiş olan bu çubuk tipi gömülü mıknatıslı senkron motor, analiz sonuçlarından da anlaşıldığı üzere, elektrikli bisikletin ihtiyaç duyduğu tüm çalışma rejimlerinde yüksek verimli ve sessiz/konforlu şekilde çalışmaktadır.

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

## 1. INTRODUCTION

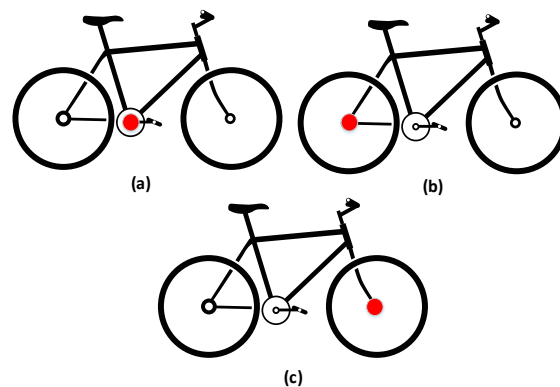
The bicycle is one of human history's most aged and used vehicles. The time of its invention is not clear but probably around the 18th century according to the most common view. People usually start using bikes at very early ages and do not give up on their life span.

Electric vehicles are now very popular in the 21st century with electrified cars. The main reason is the oil depletion in the world. Moreover, electric vehicles are usually more comfortable and less costly than conventional internal combustion engines. The awareness of environmental pollution is another big reason for the people.

Electrified bikes are now a new trend nowadays. The technology is based on supporting cyclists when he/she has difficulty in driving the ride such as climbing hills. The application term is named “electrically assisted e-bike” in the literature. The assisted electric motor can be mounted in three places, as shown in Figure 1. The first one is called a mid-drive electric motor-assisted bike. However, the second and third names are hub-motor-assisted e-bikes. Hub motors can be located on either the rear wheel or the front. Each option has several advantages and disadvantages. Front-hub motors provide a pulling sensation to the rider which is most usual and the same as front-wheel cars. Despite this, the rear hub makes feeling like a “pushing” which is not subject to choice for some people. Front-hub motors require less maintenance and provide easy installation as there is no chain or gear in the front wheel. However, spinning out is also easier than the rear-hub option as the weight is concentrated on the front side.

The rear side of the frame in the bike is usually much stronger than the front side. Hence, there is the possibility to put a much more powerful electric motor in the front-side hub. Moreover, as the front wheel can rotate, mounting the torque sensor pedal assist is not possible in the front-hub option. Torque sensor offers exclusive skills to the bike. With a torque sensor, the controller can control the electric motor to assist the rider with support. So, the rider can feel the uphill road as a straight road where the electric motor provides differential force between the two road types. However, the installation of the rear-hub motor is not straightforward.

The third alternative driving method is the mid-drive system. Here, standard wheels and drive-train including chains and gears can be used. Just the electric motor is added to the mid-frame.



**Figure 1.** The mounting plates of the electric motor in the bike.

In the motion flow diagram, as the electric motor exists before the gear and chain, the electric motor speed is usually in the optimum range. This is adjusted either by the rider or the controller automatically. Moreover, the rider feels more like a natural bike in the mid-drive. As the electric motor is in the middle of the frame, the bike weight is more balanced than front or rear-hub e-bikes. As the electric motor-gear shaft is directly integrated with the pedals, the aggressive behavior by the riders may increase the wear in the system which may cause faster maintenance [1].

In the e-bike drive system, a permanent magnet synchronous motor (PMSM) is mostly preferred. In some academic research [2]–[5], switched reluctance electric motor is proposed as traction. Switched reluctance motors can provide high torque density and high efficiency with a cheap production cost. As an alternative to the PMSM, the absence of the magnet cost plays a key role in the cost advantage. However, the torque ripple may cause a bad feeling which results in comfortless driving for the rider. In PMSM-assisted e-bikes, internal or external rotor types can be used [6]. Outer rotor PMSMs are typically used in the front or rear hub-assisted e-bikes. However, in mid-drive applications, internal rotor PMSM is popular [7]–[10]. Advancements in e-bikes are going parallel with electric vehicle technology. In [3], [11]–[13], the researchers proposed regenerative braking which will make the e-bike more efficient and increase driving mileage. Charging the battery is another challenging subject for researchers. In [14]–[17] the charging methods including wireless power transfer are studied.

In this study, a spoke-type interior permanent magnet synchronous motor is developed for e-bikes. The desired features of the electric motor are mentioned then a step-by-step design study is discussed for e-bike applications. Finally, the results are discussed in the conclusion section.



## 2. DESIRED FEATURES FROM THE E-BIKE ELECTRIC MOTOR

Electrified bikes are getting famous nowadays at affordable prices. Comfort level is getting a rise in bikes with electrifying. There is no doubt the high-performance electric motor in the e-bike system plays an important role in that comfort level. The desired features from the mid-drive system are,

1. High power density (W/kg),
2. High torque output at low speed,
3. Low-rated speed (around 100rpm),
4. Low weight,
5. Waterproof,
6. Quick response,
7. Resistant to mechanical shock,
8. Durable,
9. Long maintenance period.

The weight of the bike is one of the important issues which determines the comfort level of the rider. Usually, conventional un-electrified bikes have a 12-14 kg weight. The electrification system includes a drive unit, onboard computer and controller, lithium-ion battery, and sensors. Table 1 shows two market players' drive unit specifications. Usually, the drive unit power is chosen as 250W. All brands have a reduction in the drive unit to increase the torque and reduce the operating speed. As the volume and diameter are limited with an application, the only way is designing the electric motor with high speed and relatively lower torque than increasing the torque level by using gear. Most of the batteries in the e-bikes have a 36V voltage level and 400Wh energy storage. Adding the drive unit and battery to the bike almost increases the system weight by around 50%.

**Table 1.** E-bike drives unit specifications in two famous brands.

	Yamaha	Bosch	
<b>Battery</b>			
Capacity	400	400	Wh
Weight	3	2.5	kg
Voltage	36	36	V
Battery range	95	90	km/average
Battery type	Lithium-ion		
<b>Drive unit</b>			
Output Power	250	250	W
Weight	3.1	2.9	kg
Torque	70	30	Nm
Torque (e-motor)	21.7	12	Nm
Gear ratio	3.22	2.5	
Speed (reduced)	110	100	rpm
Speed (e-motor)	354.2	250	rpm

In this study, a permanent magnet synchronous motor is selected to develop an e-bike drive unit. Permanent magnet synchronous motors (PMSMs) offer several advantages over other types of electric motors. Some key advantages of PMSMs are high efficiency, high power density, excellent speed and position control, wide speed range, high torque density, rapid dynamic response, and regenerative braking capability. Overall, the advantages of PMSMs make them well-suited for a wide range of applications that require high efficiency, precise control, compact size, and high torque output.

The drive unit design specifications are given in Table 2.

**Table 2.** E-bike drives unit specifications in two famous brands.

Drive Unit	Proposed study	
Capacity	400	Wh
Voltage	36	V
Output Power	250	W
Torque (gear output)	24	Nm
Torque (motor shaft output)	6	Nm
Gear ratio	4	
Speed (reduced)	100	Rpm
Speed (e-motor)	400	Rpm
Diameter	90	mm
Length	50	mm

### 3. PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR DESIGN

Determining the number of slots and poles is the first step in the motor design. As the rated rotational speed is relatively lower than conventional electric machines, a high number of poles is usually preferred to keep the power density high. So the number of poles should be inversely proportional to the rated speed. In high rotational speeds, to limit the commutation frequency and iron losses, the number of poles should be kept low. However, in this application, the number of poles is maximized.

In PMSMs, there are several rotor types. Here, embedded magnet rotor configuration is selected to use the reluctance torque component effectively which provides high torque and power densities. Moreover, it is a relatively low-cost fabricated design. Spoke type rotor configuration is selected to continue design steps.

Cogging torque, also known as detent torque or reluctance torque, refers to the phenomenon in electric motors where there is a pulsating or non-uniform torque output during rotation. It occurs in motors with salient pole construction, such as permanent magnet motors or reluctance motors. The cogging torque arises due to the interaction between the magnetic field generated by the stator and the permanent magnets of the motor. When the rotor teeth align with the stator poles, there is an increase in magnetic reluctance, causing a variation in the magnetic flux density and resulting in a torque disturbance. This irregular torque can cause mechanical vibrations, and noise, and affect the smoothness of motor operation. Cogging torque is generally undesirable because it can degrade the motor's performance and efficiency, particularly at low speeds. It can also lead to position errors in motion control applications. Therefore, efforts are made in motor design and control techniques to minimize cogging torque. These methods include optimization of the motor geometry, selection of appropriate pole and slot configurations, and the use of control algorithms that compensate for or suppress cogging effects.

The cogging torque should be kept in a limited range to make the movement smooth and have low acoustic noise. There are several cogging torque minimization methods in literature such as skewing the stator lamination, skewing the magnets, chamfering the edges of the magnet surface geometry, etc. However, these methods make motor production more difficult. An easier cogging torque minimization method is concealed in configuring the appropriate slot/pole number. In this case, the fractional-slot configuration is always preferred to minimize the cogging torque. For the minimum cogging torque goal in three-phase PMSMs, appropriate slot/pole numbers are given in Table 3 [18]. An 18/16 slot/pole is selected for this application.

**Table 3.** Appropriate slot/pole number configuration for minimum cogging torque[18] for three-phase PMSMs.

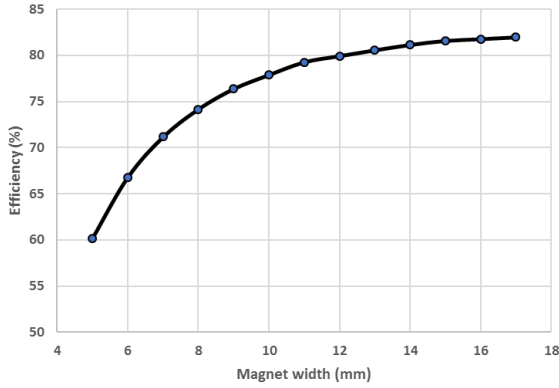
0.75		1.125		1.5	
slots	poles	slots	poles	slots	poles
3	4	9	8	3	2
6	8	18	16	6	4
9	12	36	32	9	6
12	16			12	8
15	20			15	10
18	24			18	12
21	28			21	14
24	32			24	16
2.25		3		3.75	
slots	poles	slots	poles	slots	poles
9	4	6	2	15	4
18	8	12	4	30	8
27	12	18	6	45	12
		24	8		
		30	10		
		36	12		
4.5		5.25		6	
slots	poles	slots	poles	slots	poles
9	2	21	4	12	2
18	4	42	8	24	4
27	6			36	6
36	8			48	8

After determining the outer diameter, length, and number of slots and poles, the stator's inner diameter and air gap will be decided. As it is known from (1), generated torque in an electric motor is a function of the rotor outer diameter with a square relation. However, torque is proportional to the stack length. Hence, high torque-density electric machines are always designed with large diameters but short lengths. However, there is a space limit in rotor diameter. Based on experience, in spoke-type PMSMs, the rotor diameter can be kept larger than the usual surface PMSMs with high-energy magnets.

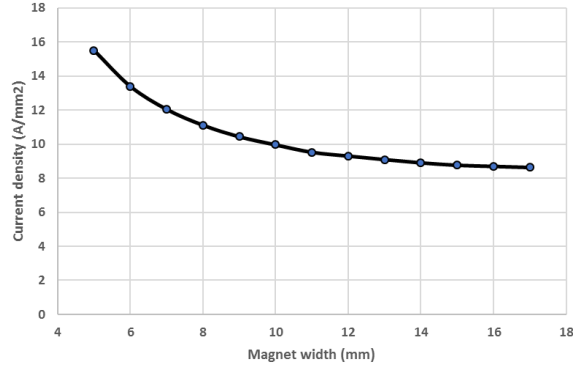
$$T = \sigma\pi DL \frac{D}{2} = \frac{\pi}{2} D^2 L \sigma \tag{1}$$

The geometry of the PMSM is optimized based on maximizing efficiency and minimizing the cogging torque and current density. The variation of the efficiency and current density in response to the magnet width is given in Figure 2 and Figure 3, respectively. Efficiency is increasing with magnet width however the rising edge is desaturating after some points. As the mechanical output power emerges with the production of the rotor and stator magnetic fields via  $\vec{B}_r \times \vec{B}_s$ , With rising magnet width, the required magnetic field from the stator,  $\vec{B}_s$  is decreased. So, the required current and the current density is reduced, as well.

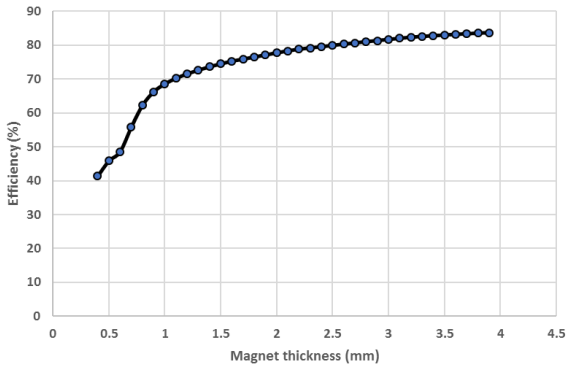
Figure 4 and Figure 5 show the efficiency and cogging torque variation with a function of magnet thickness. With an incremental magnet thickness, the efficiency rises higher than the width. However, saturation starts around 1mm magnet thickness. Large magnet volume causes cogging torques as shown in Figure 5. However, as the cogging torque is minimized by selecting a fractional slot/pole ratio, the cogging level is in ignorable levels.



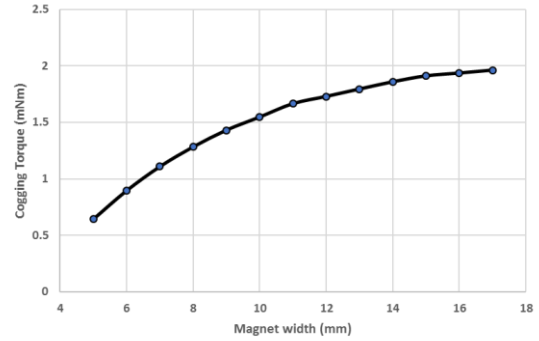
**Figure 2.** The variation of the efficiency with response to the magnet width.



**Figure 3.** The variation of the current density in response to the magnet width.



**Figure 4.** The variation of the efficiency with response to the magnet thickness.

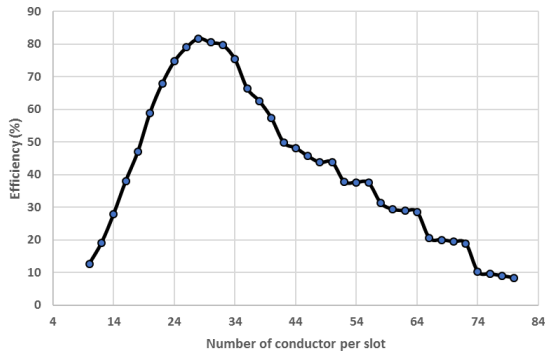


**Figure 5.** The variation of the cogging torque with response to the magnet thickness.

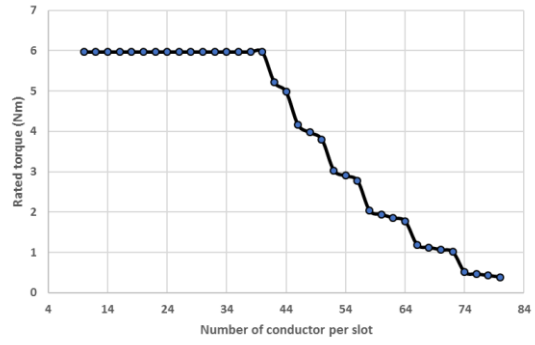
One of the most important parameters which play an important role on the efficiency is the number of conductors per slot. The conductor number determines the nominal or rated operating speed. Figure 6 and Figure 7 show the efficiency and rated torque parameters as a function of the number of conductors per slot. 28 conductors maximize efficiency. However, the corner speed where the rated torque starts to decrease is coming up with 40 conductors as shown in Figure 7.

Slot opening or clearance is useful for winding assembly to the stator. More clearance means easier winding assembly. However, the clearance deteriorates the magnetic field in the airgap and concentrates the magnetic field into the tooth which increases the cogging torque. Airgap magnetic field deterioration results in efficiency reduction as well, as shown in

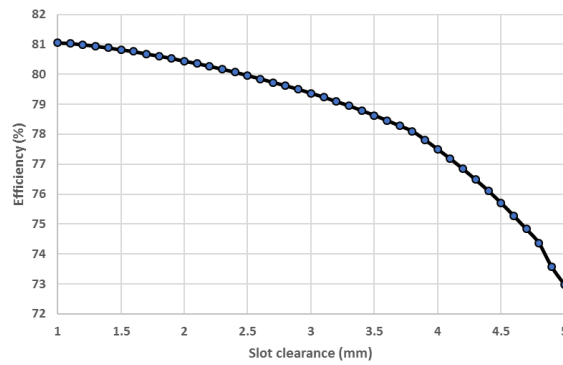
Figure 8. Slot clearance with 2.2 mm is selected as an optimal point. The final geometry of the spoke-type PMSM is given in Figure 9. For 2D finite element analysis (FEA), meshing of the geometry is executed, initially. Mesh settings play a crucial role in getting accurate results. As the energy conversion place is the air gap between the stator and rotor, meshes in the air gap should be the smallest in the geometry. The magnets and the stator and rotor lamination are the second-order priorities after the air gap. Moreover, if the excited electrical frequency was high, the meshes on the lamination corners would be small to see the effect of the leakage. However, in this study, the excitation frequency at the rated speed is 53.33 Hz. Thus, the meshes on the corners are chosen as regular size same as lamination. Figure 10 shows the meshes on the quarter motor geometry.



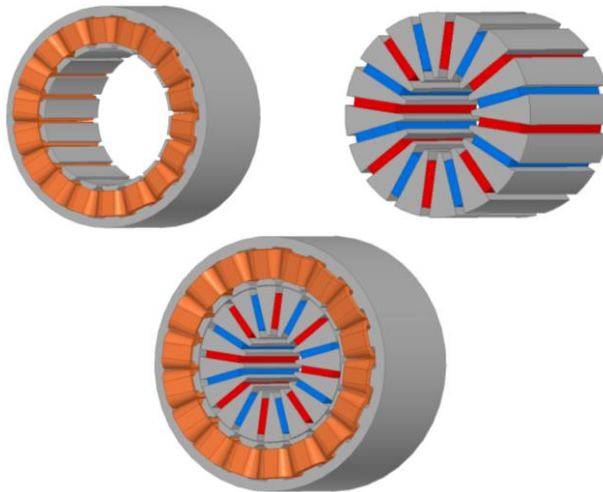
**Figure 6.** The variation of the efficiency in response to the number of conductors per slot.



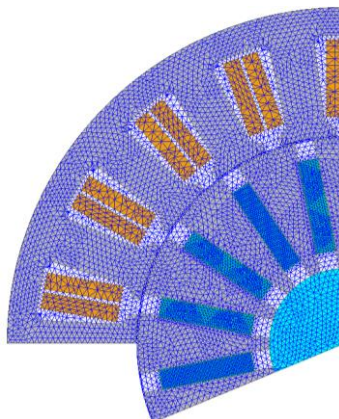
**Figure 7.** The variation of the rated torque in response to the number of conductors per slot.



**Figure 8.** The variation of the efficiency in response to the slot clearance.

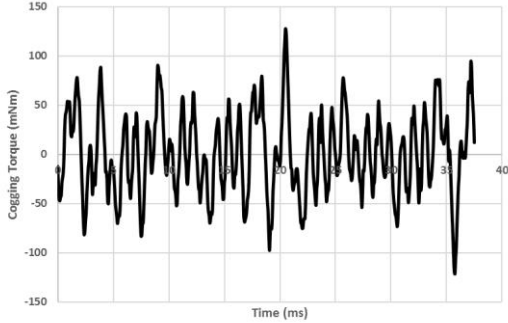


**Figure 9.** Designed spoke-type PMSM geometry.

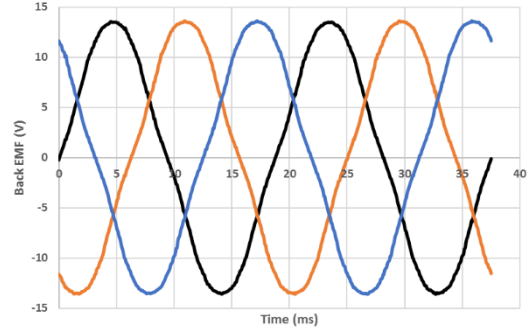


**Figure 10.** The meshing of designed spoke type PMSM for 2D FEA setup.

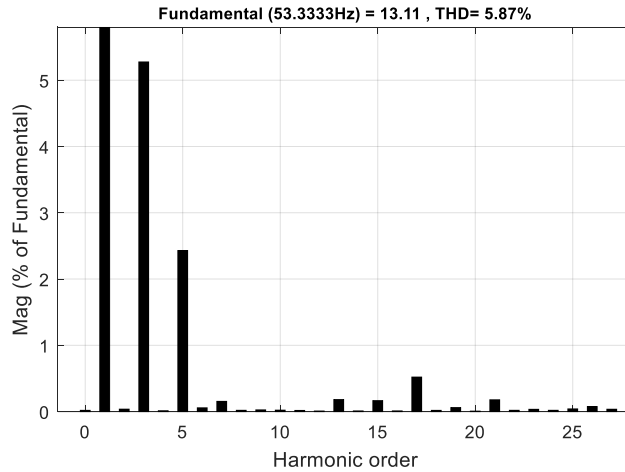
In 2D FEA analysis, cogging torque variation is plotted versus time. Figure 11 shows two electrical periods cogging torque data. From peak to peak there is a 0.2 Nm cogging value. Compared to the 6 Nm rated torque, 3.3% percent cogging is reported which will not be felt by the rider in terms of mechanical force and acoustic noise. For smooth motor control, the back EMF waveform is important. Figure 12 shows the back EMF waveforms of three phases at 400rpm operating speed. The fast Fourier Transform (FFT) analysis is performed for the one-phase back-EMF as given in Figure 13. The fundamental back-EMF magnitude is 13.11V and the total harmonic distortion of the back-EMF is 5.87%.



**Figure 11.** 2D finite element analysis result; cogging torque variation.



**Figure 12.** 2D finite element analysis result; Back-EMF variation.



**Figure 13.** 2D finite element analysis result; Back-EMF fast Fourier transform total harmonic distortion result.

#### 4. CONCLUSION

In this study, a spoke type of interior permanent magnet synchronous motor is developed using finite element analysis for electrified bike applications. High power/torque density at low speeds is one of the required challenging issues in e-bikes. Hence, with a minimum volume, the efficiency is maximized with parametrical analyses of the motor geometry. At e-bike applications, the required motor feature should not be focused only on the efficiency and power/torque density. High dynamic response with low mechanical inertia, low cogging torque, low torque ripple, low harmonic content in back EMF are important performance outputs, as well. The pedelec applications limits the motor output power at 250W and the maximum speed at 25 km/hour. The designed e-bike traction mechanical system is developed with 4 gear ratios. Hence, the rated motor speed is 400 rpm. At these particular conditions, the motor efficiency is reached to 81%. Moreover, critical design tips are mentioned considering e-bike requirements such as minimizing the cogging torque, maximizing the efficiency, etc. From the FEA results, 3% cogging torque is reached with fractional 18/16 spoke PMSM. The FFT analysis is executed on the back-EMF waveform. A 5.87% total harmonic distortion at the rated conditions is reported. The results show that developed spoke-type IPM in the limited volume can run the bike efficiently and silently which are the signs of successful design.

#### Author's Contribution

Yusuf YAŞA contributed to the design and implementation of the research, to the analysis of the results, and to the writing, reviewing, and editing of this manuscript.

## Conflict of Interest

All authors declare that they have no conflicts of interest.

## KAYNAKÇA

- [1] "https://momentummag.com/types-of-ebikes/," 2022-09-19, Date accessed.
- [2] B. Howey, E. Rowan, B. Bilgin, and A. Emadi "Thermal Trade-off Analysis of an Exterior Rotor E-Bike Switched Reluctance Motor," *Itec* 2017, pp. 605–612, 2017.
- [3] X.L.X. Liu, C.L.C. Liu, M.L.M. Lu, and D.L.D. Liu "Regenerative braking control strategies of switched reluctance machine for electric bicycle," *Int. Conf. Electr. Mach. Syst.*, pp. 3397–3400, 2008.
- [4] J. Lin, N. Schofield, and A. Emadi "External-Rotor Switched Reluctance Motor for an Electric Bicycle," *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 1, no. 4, pp. 348–356, 2015.
- [5] J. Lin, N. Schofield, and A. Emadi "External-rotor 6 #x2013;10 switched reluctance motor for an electric bicycle," *Ind. Electron. Soc. IECON 2013 - 39th Annu. Conf. IEEE*, pp. 2839–2844, 2013.
- [6] W. Chlebosz, G. Ombach, and J. Junak "Comparison of permanent magnet brushless motor with outer and inner rotor used in e-bike," *19th Int. Conf. Electr. Mach. ICEM 2010*, 2010.
- [7] A. Christen and V.V. Haerri "Analysis of a six- and three-phase interior permanent magnet synchronous machine with flux concentration for an electrical bike," *2014 Int. Symp. Power Electron. Electr. Drives, Autom. Motion, SPEEDAM 2014*, pp. 1251–1255, 2014.
- [8] V. Naveen Kumar, A. Syed, D. Kuruganti, A. Egoor, and S. Vemuri "Measurement of position (angle) information of BLDC motor for commutation used for e-bike," *Proc. 2013 Int. Conf. Adv. Electron. Syst. ICAES 2013*, pp. 316–318, 2013.
- [9] R. Meireles, J. Silva, A. Teixeira, and B. Ribeiro "An E . Bike Design for the Fourth Generation Bike - Sharing Services," *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*, pp. 1–6, 2013.
- [10] R. Jiang, J. Zhang, G. Zhao, and C. Wu "Enhancing speed estimation accuracy of electric bike riders through training," *2014 17th IEEE Int. Conf. Intell. Transp. Syst. ITSC 2014*, pp. 1915–1916, 2014.
- [11] E. Ceuca, G. Brezeanu, and V. Trifa "Study for developing the energy recovering circuit for modern e-bike controller," *Proc. Int. Semicond. Conf. CAS*, vol. 2015–Decem, pp. 245–248, 2015.
- [12] E. Ceuca, I. Pocan, and O. Pop "Electromagnetic Compatibility Analysis of the Assembly e-bike - Power Electronic Converter with Recovery Function," no. December 1918, pp. 398–401, 2016.
- [13] N. Hatwar, A. Bisen, H. Dodke, A. Junghare, and M. Khanapurkar "Design approach for electric bikes using battery and supercapacitor for performance improvement," *IEEE Conf. Intell. Transp. Syst. Proceedings, ITSC*, no. Itsc, pp. 1959–1964, 2013.
- [14] L.A.L. Cardoso, M.C. Martinez, A.A.N. Meléndez, and J.L. Afonso "Dynamic inductive power transfer lane design for E-Bikes," *IEEE Conf. Intell. Transp. Syst. Proceedings, ITSC*, pp. 2307–2312, 2016.
- [15] H. On, T.H.E-bike, and U. Di "Ride by Wire Build a push- electronic bicycle shifter on the cheap," no. may, 2013.
- [16] K. Sangani "E-Bikes Take Off," *Eng. Technol.*, vol. 6, no. June, pp. 34–35, 2009.
- [17] L. Celentano, D. Iannuzzi, and L. Rubino "Controller design and experimental validation of a power charging station for e-bike clever mobility," *Conf. Proc. - 2017 17th IEEE Int. Conf. Environ. Electr. Eng. 2017 1st IEEE Ind. Commer. Power Syst. Eur. IEEEIC / I CPS Eur. 2017*, pp. 1–6, 2017.
- [18] T.J.E.M.J.R. Hendershot "Design of Brushless Permanent-Magnet Motors", Chelsea, Michigan: Oxford University Press, 1994.



## Modifiye Edilmiş Inception Modülü Kullanılarak İnsan Periferik Kan Hücrelerinin Çoklu Sınıflandırılması

### Multiple Classification of Human Peripheral Blood Cells Using Modified Inception Module

<sup>1</sup>Hüseyin FIRAT 

<sup>1</sup>Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Diyarbakır, Türkiye

[huseyin.firat@dicle.edu.tr](mailto:huseyin.firat@dicle.edu.tr)

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 25 May 2023

Accepted : 13 July 2023

##### Keywords:

Peripheral Blood Cell, Classification, Inception Module, Depthwise Separable Convolution

#### ABSTRACT

Classification of peripheral blood cells plays an important role in the diagnosis of many blood diseases such as anemia, leukemia etc. Therefore, correct blood cell classification is clinically very significant in diagnosing the disease. In recent years, deep learning, especially Convolutional neural networks, has been used frequently in the medical field thanks to its strong self-learning capabilities. In this study, a new hybrid method consisting of depthwise separable convolution and Inception module has been developed, which reduces the computational cost and the number of parameters for blood cell classification. This method provides an advantage over standard convolutional neural networks by reducing the number of parameters and computational cost and increasing the classification accuracy. As a result of experimental studies conducted on an 8-class blood cell dataset to test the performance of the developed method, 98.89% accuracy, 98.88% precision, 98.85% recall, 98.86% F1-score were obtained. It is seen that our method is effective when compared with the studies in the literature.

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 25 Mayıs 2023

Kabul : 13 Temmuz 2023

##### Anahtar Kelimeler:

Periferik Kan Hücresi, Sınıflandırma, Inception modülü, Derinlemesine Ayrılabilir Evrişim

#### ÖZET

Periferik kan hücrelerinin sınıflandırılması anemi ve lösemi gibi birçok kan hastalığının teşhisinde önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle, doğru kan hücresi sınıflandırması hastalığın teşhisinde klinik olarak oldukça önemlidir. Son yıllarda, derin öğrenme, özellikle Evrişimsel sinir ağları, güçlü kendi kendine öğrenme yetenekleri sayesinde tıp alanında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada, kan hücre sınıflandırması için hesaplama maliyetini ve parametre sayısını azaltan derinlemesine ayrılabilir evrişim ile Inception modülünden oluşan yeni bir hibrit yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem, parametre sayısını ve hesaplama maliyetini azaltıp sınıflandırma doğruluğunu artırmasıyla, standart evrişimsel sinir ağlarına göre bir avantaj sağlamaktadır. Geliştirilen yöntemin performansını test etmek için 8 sınıflı bir kan hücresi veri seti üzerinde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda %98.89 doğruluk, %98.88 kesinlik, %98.85 duyarlılık, %98.86 F1-skoru elde edilmiştir. Literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırıldığında yöntemimizin etkili olduğu görülmektedir.

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

## 1. GİRİŞ

Sağlıklı bir insanın damarlarında dolaşan kan, vücut ağırlığının yaklaşık %7'si kadardır. Sahip olduğumuz yaklaşık 5 litre kanın yapısı mikroskop altında incelendiğinde plazma adı verilen sıvılardan ve çeşitli kan hücrelerinden oluştuğu görülmektedir [1]. Bu kan hücrelerinin birincil bileşenleri, kırmızı kan hücreleri (eritrositler-alyuvarlar), beyaz kan hücreleri (lökositler-akyuvarlar) ve trombositlerden (kan pulcukları) oluşmaktadır [2]. Damar yaralanması sırasında metabolik süreçlerin, savunma mekanizmalarının ve duyarlı etmenlerin sürdürülmesinde temel bileşenler olarak işlev gören bu üç hücre kategorisi, kan dokusunun %45'ini, geri kalan %55'i ise plazmayı oluşturmaktadır [3]. Kanda bulunan her hücre türü, insanın yaşamsal fonksiyonlarının sürdürülmesinde bir role sahiptir. Örneğin, alyuvarlar oksijen taşınmasından sorumludur ve lökositler insan bağışıklık sisteminin önemli bir parçasıdır. Alyuvarlarda ve trombositlerde görülen şekil ve form birliğinin aksine, lökositler hücre tipinde çeşitlidir ve hücre formunda farklıdır, bu da onları tıbbi görüntü analizi ve sınıflandırmasında ilgi odağı haline getirmiştir. Lökositler vücudun savunma sisteminde çok önemli bir role sahiptir. Öncelikle insan vücudunu yabancı bakterilerden, virüslerden, parazitlerden ve diğer mikroorganizmalardan korumaktan sorumludurlar [4]. Lökositler morfolojik yapılarına göre granülositler, lenfositler ve monositler olarak sınıflandırılmaktadır. Granülositler, nötrofilleri, bazofilleri ve eozinofilleri içerir ve sitoplazmik granüllerin ve loblu polimorf çekirdeklerin varlığı ile karakterize edilmektedirler [5]. Buna karşılık, lenfositler ve monositlerin tümü yuvarlak bir mono çekirdeğe ve renksiz bir sitoplazmaya sahiptir. Lökositlerin özelliklerinde gözlenen sayı, oran, şekil gibi bazı değişkenlikler, bazı hastalıkların habercisi olabileceği gibi (örneğin lösemi, anemi, sıtma), hücre alt tiplerinde görülen anormallikler de bazı hastalıkların (örneğin nötrofil) belirtisi olabilmektedir. Bu açıdan lökositlerin alt tiplerinin doğru bir şekilde tanımlanması ve incelemesi klinik olarak oldukça önemlidir. Lökosit tanımlama, sınıflandırma ve kantitatif analiz süreci hem manuel hem de otomatik olarak gerçekleştirilebilmektedir. Lökosit sınıflandırmasının manuel süreci oldukça zaman alıcıdır ve hematoloğun deneyimine bağlıdır. Daha sıklıkla, Lökosit sınıflandırmasını gerçekleştirmek için klinik olarak otomatik bir lökosit analiz cihazı kullanılmaktadır [6][7]. Bu ticari analizörler, sınıflandırma için segmentasyon ve örüntü tanıma algoritmalarını kullanarak hızlı ve düşük maliyetli analizler gerçekleştirebilmektedir. Ancak hem morfolojik korelasyonların saptanması hem de güvenilirlik açısından manuel sınıflandırmaya göre daha düşük bulunmuştur [8].

Otomatikleştirilmiş lökosit sınıflandırma algoritmaları, uzun zamandır bir araştırma alanı olmuştur [9][10][11]. Bu doğrultuda, bilgisayarla görme tekniklerinden yararlanan lökositlerin analizi için otomatik ama daha hızlı yaklaşımlar geliştirilmiştir. Makine öğrenimi ve bilgisayar görüşündeki son gelişmeler göz önüne alındığında, lökosit sınıflandırması ve segmentasyonu için destek vektör makinesi (DVM) [12] ve Naive Bayesian [13] gibi daha geleneksel makine öğrenimi modellerinden daha gelişmiş derin öğrenme yöntemlerine kadar çeşitli yaklaşımlar önerilmiştir. Geleneksel makine öğrenmesi tekniklerinde, sınıflandırmanın doğruluğunu elde etmeye katkıda bulunan belirli morfolojik lökosit özellikleri dikkate alınmıştır. Girdi görüntülerinden geometrik, dokusal, istatistiksel, dalgacık vb. özellikleri çıkarılmış ve sınıflandırma için rastgele orman [9], destek vektör makinesi (DVM) [12] ve naive bayesian [13] gibi sınıflandırıcılara verilmeden önce özellik seçimi ve sıralamaya tabi tutulmuştur. Evrişimli sinir ağlarını içeren derin öğrenme yöntemleri son yıllarda sıklıkla lökosit sınıflandırmasında kullanılmaktadır. Son araştırmalar, evrişimsel sinir ağlarının kullanımının, geleneksel makine öğrenimi yöntemlerinde manuel özellik çıkarımından kaçınarak özellikleri otomatik olarak çıkararak sınıflandırmanın doğruluk oranını artırdığını göstermiştir [14][15][16]. Güçlü kendi kendine öğrenme yetenekleri sayesinde evrişimsel sinir ağları, görüntülerde daha güçlü semantik bilgilerle daha derin özellikler çıkarabilmektedir. Bu nedenle son yıllarda geleneksel sınıflandırıcılardan farklı olarak lökosit sınıflandırılması için evrişimsel sinir ağı tabanlı çalışmalar yapılmaya başlanmıştır.

Tıbbi görüntülerin analizinde oldukça başarılı sonuçlar veren lökositlerin derin öğrenme, özellikle evrişimsel sinir ağları tabanlı yöntemler ile tanınması ve sınıflandırılması konusunda da literatürdeki çalışmalardan bazıları şu şekildedir. Liang vd. [5] LSTM ve Xception yöntemlerinin özelliklerini birleştirerek lökosit sınıflandırılması için yeni bir yöntem geliştirdi. Önerdikleri hibrit yöntem ile dört sınıf (nötrofil, monosit, lenfosit ve eozinofil)'tan oluşan ve 12444 lökosit görüntüsü içeren bir seti üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda genel doğruluğun %90.79 olduğu görülmektedir. Toğaçar vd. [17] lökosit sınıflandırması için evrişimsel sinir ağı ve özellik seçimi yöntemlerinin yeni bir kombinasyonunu önerdi. Bu yöntemde özellik çıkarıcı olarak ResNet50, GoogLeNet, AlexNet yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerle çıkarılan öznelikler birleştirilerek Ridge öznelik seçimi ve Maksimal Bilgi Katsayısı kullanılarak en belirleyici öznelikler seçilmektedir. Son olarak, bir sınıflandırıcı olarak Kuadratik diskriminant analizi kullanılmıştır. Önerilen yöntemin sınıflandırma doğruluğunu analiz etmek için toplam 12435 lökosit görüntüsü kullanılmıştır. Bu veri setinde, nötrofil, monosit, lenfosit ve eozinofil olmak üzere dört tip lökosit sınıflandırılmıştır. Önerilen yöntem ile %97.95 genel doğruluk elde edilmiştir. Uçar [18], lökosit sınıflandırması için ShuffleNet mimarisini önerdi. Bu yöntem ile 8 sınıflı (nötrofiller, eozinofiller, bazofiller, lenfositler, monositler, olgunlaşmamış granülositler, eritroblastlar, trombositler) ve toplam 17092 görüntü içeren veri seti üzerinde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda %97.94 sınıflandırma doğruluğu elde edilmiştir. Sharma vd. [19] lökosit sınıflandırması için hızlı bir geleneksel evrişimsel sinir ağı yöntemi sunmuştur. Bu yöntem 3 evrişim ve 3 tam bağlantılı katmandan oluşmaktadır. Ancak, her evrişim katmanı ReLU, maksimum havuzlama ve bırakma katmanlarını içermektedir. 4 sınıflı Blood Cell Count and Detection veri seti üzerinde yapılan deneysel çalışmaların sonuçları incelendiğinde %84.64 sınıflandırma doğruluğu elde edildiği görülmektedir. Baby vd. [20] lökosit sınıflandırması için DVM ve önceden eğitilmiş derin öğrenme mimarilerinin



bir kombinasyonundan oluşan hibrit bir yöntem önerdi. Özellik çıkarıcı olarak Xception, InceptionV3, MobileNetV2, DenseNet121 ve ResNet50 kullandılar. Ayrıca, en seçici özellikleri seçmek için bir ara adım olarak ekstra ağaç sınıflandırıcısını kullandılar. Son olarak, sınıflandırma için çok sınıflı DVM kullandılar. Bu hibrit yöntemin performans analizi için, 4 sınıf içeren 431 lökosit görüntüsünden oluşan bir veri seti üzerinde deneysel çalışmalar yaptılar. Yapılan deneysel çalışmalara göre elde edilen sınıflandırma doğruluk sonuçları şu şekildedir: ResNet50+DVM (%90.76), DenseNet121+DVM (%72.3), MobileNetV2+DVM (%87.69), InceptionV3+DVM (%76.92) ve Xception +DVM (%70.26). Bani-Hani vd. [21] dört tip (monositler, lenfositler, nötrofiller ve eozinofiller) lökosit görüntüsünün sınıflandırılması için yeni bir evrişimsel sinir ağı yöntemi önerdi. Ayrıca, evrişimsel sinir ağı yönteminde kullanılan hiperparametrelerin optimizasyonu için genetik algoritmayı kullandılar. Blood Cell Count and Detection (BCCD) veri seti üzerinde yapılan uygulamalar incelendiğinde genel olarak %91.01 doğruluk elde edildiği görülmüştür. Mohamed vd. [22] lökosit sınıflandırması için sınıflandırıcı olarak lojistik regresyon ve özellik çıkarıcı olarak MobileNet-224'ten oluşan hibrit bir yöntem önerdi. BCCD üzerinde yapılan deneylere göre %97.03 sınıflandırma doğruluğu elde etmişlerdir. Patil vd. [23] LSTM ve evrişimsel sinir ağını birleştirerek lökosit sınıflandırması için kanonik korelasyon analizine dayalı bir derin öğrenme yöntemi geliştirdi. Kanonik korelasyon analizi, girdi görüntüsünden çeşitli örtüşen özellikleri çıkarır, böylece diğer benzer derin öğrenme yöntemlerine kıyasla doğruluğunu artırır. BCCD veri seti üzerindeki uygulamalara göre elde edilen sınıflandırma doğruluğu %95.89'dur. Cheuque vd. [24] dört lökosit tipini (eozinofiller ve nötrofiller (polimorfonükleer), monositler ve lenfositler (mononükleer)) etkili bir şekilde sınıflandıran iki fazlı hibrit çok düzeyli bir yapı oluşturmuştur. Öncelikle, mononükleer hücrelerden polimorfonükleer hücrelerin tahsisi ile birlikte, lökositlerin ilgi bölgesinin tanınması için bir Faster R-Evrişimsel sinir ağı uygulanmaktadır. Tahsis işleminden sonra, bir sonraki aşamada alt sınıfları tanımlamak için MobileNet ile iki paralel evrişimsel sinir ağı kullanılır. Monte Carlo çapraz doğrulama kullanılarak elde edilen sonuçlar, önerilen yöntemin %98.4'lük bir doğruluğa sahip olduğunu göstermektedir. Banik vd. [25] lökosit sınıflandırması için yeni bir Evrişimsel sinir ağı modeli önermiştir. Bu model, 5 evrişimli, 3 maksimum havuzlama ve bir tam bağlantılı katmandan oluşmaktadır. Bu modelde, 2 evrişimli katmanın özellik haritaları, tam bağlantı katmanına girdi vermek için maksimum havuzlama kullanılarak birleştirilmektedir. Modelin sınıflandırma performansını test etmek için, 4 lökosit sınıfını içeren BCCD veri seti üzerinde deneyler yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda %90.79 sınıflandırma sonucu bulunmuştur. Literatür taramasından sonra, lökosit tiplerinin sınıflandırma problemi için hala iyi sınıflandırma sonuçları verecek Evrişimsel sinir ağı tabanlı yöntemlerin geliştirilebileceği sonucuna varılmıştır. Bu gerçek, bizi daha iyi sınıflandırma doğruluğu elde edebilecek yeni yöntemler geliştirmeye motive etmektedir.

Bu çalışma, insan periferik kan hücrelerinin sınıflandırılması için daha az parametreye sahip hibrit bir derin öğrenme mimarisi önermektedir. Bu hibrit mimari, Inception modülü ile derinlemesine ayrılabilir evrişimin birleşiminden oluşan modifiye edilmiş Inception modülleri içermektedir. Inception modülünün kullanımı ile farklı ölçeklerde çoklu paralel evrişimler gerçekleştirilerek evrişimsel sinir ağlarının etkinliğinin ve sınıflandırma performansının iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Inception modülü ayrıca, daha büyük filtreler uygulamadan önce giriş tensöründeki kanal sayısını azaltmak için kullanılan 1x1 evrişimli bir katman içerir. Bu, sınıflandırma doğruluğunu korurken ağırlık hesaplamaya yardımcı olur. Aynı zamanda bellekten verimli bir şekilde tasarımı sağlanabilir. Derinlemesine ayrılabilir evrişimin kullanımı ile parametre sayısını azaltmak ve sınıflandırma doğruluğunu arttırmak amaçlanmaktadır. Önerilen yöntem, parametre sayısını ve hesaplama karmaşıklığını azaltarak standart evrişimsel sinir ağlarına göre bir avantaj sağlamaktadır. Önerilen yöntem, Acevedo vd. [26] tarafından sağlanan halka açık bir veri seti kullanılarak eğitilmiştir. Bu veri seti, 8 periferik kan hücresi sınıfı (nötrofiller, eozinofiller, bazofiller, lenfositler, monositler, olgunlaşmamış granülositler, eritroblastlar, trombositler) içermekte ve 17.092 görüntüden oluşmaktadır. Bu çalışmanın başlıca katkıları şu şekilde özetlenebilir:

1. Inception modülünün farklı ölçeklerde çoklu paralel yapısı ile derinlemesine ayrılabilir evrişimlerin parametre sayısını azaltma avantajı birleştirilerek hibrit bir yaklaşım sunulmaktadır.
2. Önerilen yöntem, standart evrişimsel sinir ağlarına kıyasla daha az parametreye sahip ve hesaplama maliyeti daha azdır.
3. Önerilen yöntemin sınıflandırma performans sonuçları, önerilen yöntemin daha az parametre kullanımı ile literatürdeki aynı veri setini kullanan çalışmalardan daha iyi sınıflandırma doğruluğuna sahip olduğunu göstermektedir.
4. Önerilen yöntemin sınıflandırma performansının analizi için 8 sınıf içeren bir periferik kan hücresi veri seti üzerinde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda %98.89 genel doğruluk, %98.88 kesinlik, %98.85 duyarlılık ve %98.86 F1-skor değeri elde etmiştir. Bu sonuçlar literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırıldığında, önerilen yöntemin başarılı olduğu görülmektedir. Parametre sayısını önemli ölçüde azaltan önerilen yöntem klinik çalışmalarda uygulanabilmektedir.

Çalışmanın geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir: Önerilen yöntemin teorik arka planını oluşturan derinlemesine ayrılabilir evrişim ve Inception modülü Bölüm 2'de açıklanmıştır. Ayrıca önerilen yöntemde yer alan ve derinlemesine ayrılabilir evrişim ile Inception modülünün birleşiminden oluşan modifiye edilmiş Inception modülü, önerilen yöntem ve üzerinde çalışılan veri seti de Bölüm 2'de yer almaktadır. Bölüm 3'te kullanılan veri setleri ile ilgili deneysel çalışmalar ve bu deneysel çalışmaların sonuçları tartışılmaktadır. Bu makalenin genel bir değerlendirmesi Bölüm 4'te yer almaktadır.

## 2. MATERYAL VE METOT

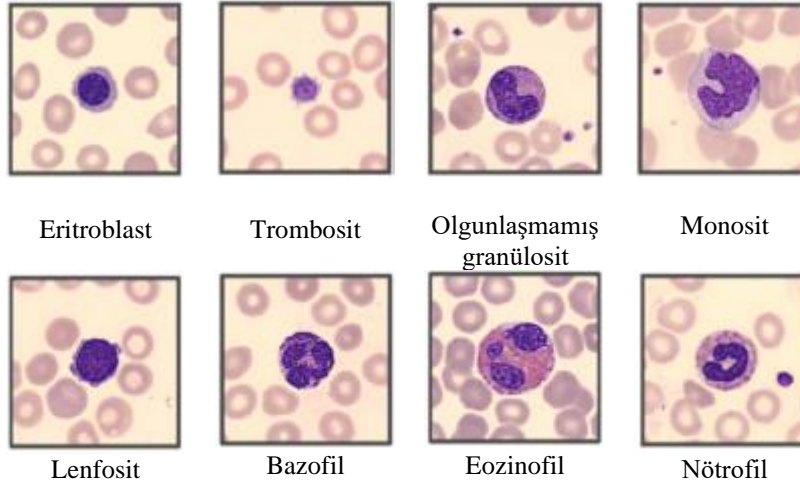
Bu bölümde, öncelikle Bölüm 2.1’de deneysel çalışmalarda kullanılan veri seti ile ilgili detaylı bilgi verilmiştir. Ardından önerilen yöntemin teorik arka planını oluşturan Inception modülü Bölüm 2.2’de, derinlemesine ayrılabilir evrişim Bölüm 2.3’te ve modifiye edilmiş Inception modülü Bölüm 2.4’te açıklanmıştır. Son olarak Bölüm 2.5’te önerilen yöntem ele alınmıştır.

### 2.1. Veri Seti

Bu çalışmada kullanılan veri setinde yer alan insan periferik kan hücresi görüntü örnekleri, Barcelona Hastane Kliniği’nden Acevedo vd. [26] tarafından sağlanan halka açık bir veri setinden alınmıştır. Bu veri seti, enfeksiyonu, onkolojik hastalığı veya farmakolojik tedavisi olmayan sağlıklı bireylerin kanlarından elde edilen insan normal kan hücrelerinin toplam 17.092 görüntüsünü içermektedir. Spesifik olarak, bu periferik kan hücreleri 8 alt türe ayrılmaktadır. Bunlar, nötrofiller, eozinofiller, bazofiller, lenfositler, monositler, olgunlaşmamış granülositler (promiyelositler, miyelositler ve metamiyelositler), eritroblastlar, trombositler veya kan pulcuklarıdır. Veri setinde yer alan kan hücresi görüntüleri, hastanedeki klinik uzman patoloğlar tarafından etiketlenmiş, 360 x 363 piksel boyutunda, jpg formatında ve RGB renk uzayındadır. Veri setinde yer alan 8 farklı kan hücre türü ile ilgili istatistiksel bilgiler Tablo 1’de verilmiştir. Veri setinden 8 farklı kan hücresi türünün temsili görüntüleri de Şekil 1’de gösterilmektedir.

**Tablo 1.** Veri setindeki periferik kan hücrelerinin türleri ve sayıları.

Periferik kan hücre türü	Görüntü sayısı	%
Nötrofiller (N)	3329	19.48
Eozinofiller (EO)	3117	18.24
Bazofiller (B)	1218	7.13
Lenfositler (L)	1214	7.10
Monositler (M)	1420	8.31
Olgunlaşmamış Granülositler (Metamiyelositler, Miyelositler Ve Promiyelositler) (OG)	2895	16.94
Eritroblastlar (ER)	1551	9.07
Trombositler (T)	2348	13.74
<b>Toplam görüntü sayısı</b>	<b>17.092</b>	<b>100</b>

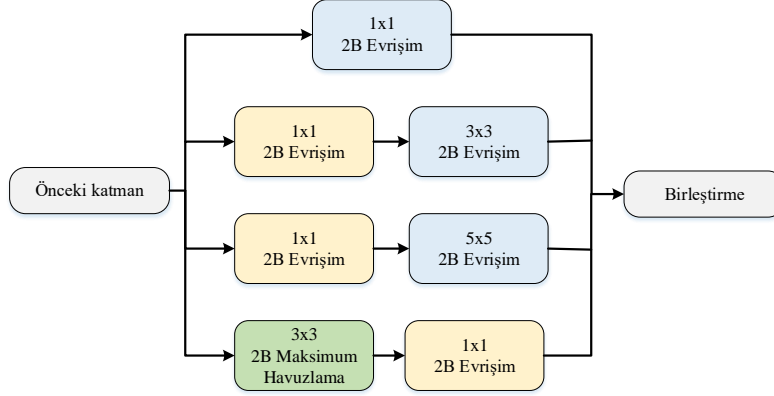


**Şekil 1.** Veri setindeki 8 kan hücresi türü ile ilgili görüntü örnekleri.

### 2.2. Inception Modülü

Inception modülü, Evrişimsel sinir ağlarında (ESA) sınıflandırma ve nesne tanımda kullanılmaktadır. 2014 yılında ImageNet Büyük Ölçekli Görsel Tanıma Yarışmasını kazanan GoogleNet mimarisinde tanıtıldı [27]. Bu modül, paralel olarak farklı boyutlarda (1x1, 3x3 ve 5x5) filtreler kullanarak birden çok ölçek ve çözünürlükteki görüntülerden özellikleri verimli bir şekilde çıkarmak için tasarlanmıştır. Inception modülü, 1x1 evrişim katmanları kullanarak boyut azaltma yoluyla daha derin ağ yapılarına ve daha verimli hesaplamalara izin vermek için ESA’larda kullanılmaktadır. Inception modülünde 1x1, 3x3, 5x5 çekirdek boyutunda 2 boyutlu evrişim ve 3x3 maksimum havuzlama işlemleri aynı girdi verileri kullanılarak paralel olarak gerçekleştirilmekte ve çıktıları birleştirilmektedir. 1x1 evrişim katmanları kullanılarak ağdaki giriş verilerinin boyutları küçültülmekte ve aynı zamanda ağın daha fazla öğrenmesini sağlamaktadır. 3x3 ve 5x5 evrişim katmanları ile ağ farklı ölçeklerde özellikleri öğrenmektedir. 3x3 maksimum havuzlama katmanı kullanılarak görüntünün genişliği ve yüksekliği azaltılmaktadır. Ancak, aynı anda farklı özelliklerin çıkarılmasına izin vermektedir. Bu nedenle, giriş verilerinden

daha fazla özellik çıkarmak için maksimum havuzlama kullanılmaktadır. ESA'da kullanılan evrişim ve maksimum havuzlama işlemleri aynı seviyede çalışacak şekilde yapılandırıldığından bu modül kullanımı ile ağ giderek genişlemektedir. Aynı zamanda, farklı çekirdek boyutlarına sahip evrişim katmanlarının paralel olarak kullanılması, görüntülerin birden çok ölçekte daha iyi işlenmesini sağlamaktadır. Inception modülü, derin ağlar oluşturmak için birlikte istiflenebilmekte ve çeşitli görüntü tanıma görevlerinde son teknoloji performans elde edebilmektedir [28]. Inception modülünün yapısı Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Inception modül yapısı.

### 2.3. Derinlemesine Ayrılabilir Evrişim

Derinlemesine ayrılabilir evrişim, Xception [29] ve MobileNet [30] mimarileri tarafından kullanılmıştır. Xception ve MobileNet'in performans avantajından esinlenen bu çalışma, derinlemesine ayrılabilir evrişim kullanan bir yöntem önermektedir. Derinlemesine ayrılabilir evrişim süreci Şekil 3'te gösterildiği gibi iki aşamada gerçekleşir: noktasal evrişim (1x1 evrişim olarak da bilinir) ve derinlemesine evrişim. Bu aşamalardan ilki olan derinlemesine evrişim, giriş görüntüsünün her kanalında ayrı bir evrişim işlemi gerçekleştirir. Evrişim işlemi, tüm boyutlardaki uzamsal özellikleri çıkarmak için kullanılır. Noktasal evrişim, çıktı özellik haritasındaki 1x1 standart evrişim işlemidir. Bu evrişim işleminde, derinlemesine evrişimin çıkışında 1x1 filtre kullanılarak elde edilen özellik haritası kanallar boyunca birleştirilir. Standart evrişim işleminde, giriş görüntülerine tek adımlı evrişim işlemi uygulanmaktadır (Şekil 3(a)). Standart evrişimin aksine, derinlemesine ayrılabilir evrişim kullanımı evrişim işlemi iki ayrı aşamada gerçekleştirerek eğitilebilir parametre sayısını azaltmaktadır (Şekil 3(b)). Bu aynı zamanda aşırı öğrenme problemini önleyebilmektedir. Ayrıca daha az hesaplama nedeniyle işlem maliyetlerini düşürmektedir. Şekil 3(a)'da gösterildiği gibi  $W \times H \times M$  boyutunda bir girdi görüntüsü olsun. Burada  $W$  giriş görüntüsünün genişliği,  $H$  yüksekliği ve  $M$  kanal sayısıdır. Benzer şekilde,  $C \times C \times M$  evrişim çekirdek boyutunda  $R$  adet filtre olsun. Standart bir evrişim işlemi uygulandığında, çıktı özellik haritası boyutu  $W \times H \times R$  olacaktır. Standart evrişim işleminin işlem maliyeti Denklem (1)'deki gibidir.

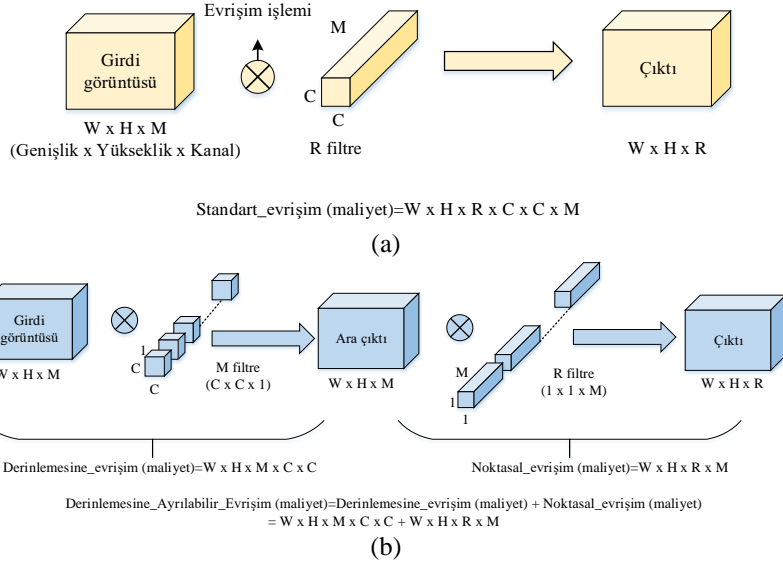
$$\text{Standart\_convolution (cost)} = W \times H \times R \times C \times C \times M \quad (1)$$

Şekil 3(b)'de gösterildiği gibi, derinlemesine ayrılabilir evrişim 2 evrişim işlemine bölünmüştür. İlk olarak, derinlemesine evrişim işleminde, tüm  $M$  kanalları için standart evrişim işleminin aksine, evrişim her seferinde bir kanala uygulanmaktadır. Burada, evrişim çekirdek boyutu  $C \times C \times 1$  olan  $M$  filtreleri gereklidir. Ortaya çıkan ara çıktının boyutu  $W \times H \times M$  olacaktır. Derinlemesine evrişim işlemi için işlem maliyeti Denklem (2)'deki gibi hesaplanmaktadır. Noktasal evrişimde elde edilen ara çıktıya 1x1 evrişim işlemi uygulanmaktadır. Bu işlemin çekirdek boyutu  $1 \times 1 \times M$  olacaktır.  $R$  adet filtrenin kullanıldığını varsayarsak, çıktı boyutu  $W \times H \times R$  olacaktır. Noktasal evrişim işlemi sonucunda elde edilen maliyet Denklem (3)'teki gibidir. Derinlemesine ayrılabilir evrişimin işlem maliyeti, derinlemesine evrişim ve noktasal evrişim işlemleri sonucunda elde edilen maliyetin toplamıdır. Standart evrişim işlemi sonucunda elde edilen işlem maliyetinin derinlemesine ayrılabilir evrişim ile karşılaştırılması için gerekli hesaplama Denklem (4)'teki gibidir. Denklem (4) göz önüne alındığında, derinlemesine ayrılabilir evrişimin standart evrişime göre eğitilebilir parametre sayısını ve hesaplama maliyetini azalttığı görülmektedir. Bu, yöntemin hesaplama maliyetini ve eğitim süresini azaltırken hesaplama gücünü artırmaktadır [31][32].

$$\text{Derinlemesine\_evrişim (maliyet)} = W \times H \times M \times C \times C \quad (2)$$

$$\text{Noktasal\_evrişim (maliyet)} = W \times H \times R \times M \quad (3)$$

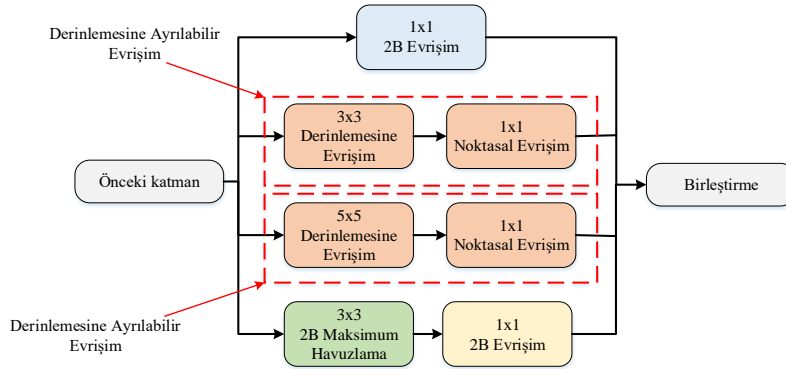
$$\frac{\text{Derinlemesine\_Ayrılabilir\_Evrişim}}{\text{Standart\_Evrişim}} = \frac{W \times H \times M \times C \times C + W \times H \times R \times M}{W \times H \times R \times C \times C \times M} = \frac{1}{R} + \frac{1}{C^2} \quad (4)$$



Şekil 3. (a) Standart evrişim ve (b) Derinlemesine ayrılabilir evrişim.

## 2.4. Modifiye Edilmiş Inception Modülü

Inception modülünde, evrişim ve maksimum havuzlama işlemleri paralel olarak gerçekleştirilip daha zengin özellik çıkarılması amaçlanmaktadır. Derinlemesine ayrılabilir evrişim, standart evrişimi derinlemesine ve noktasal evrişim olarak iki ayrı yapı olarak ele almaktadır. Derinlemesine evrişim, giriş görüntüsünün her kanalı için bağımsız evrişim gerçekleştirirken, noktasal evrişim derinlemesine evrişimden elde edilen çıktıyı birleştirmek için kullanılmaktadır. Derinlemesine ayrılabilir evrişim, standart evrişimi iki ayrı evrişim halinde ele alarak hesaplama maliyetini ve parametre sayısını azaltmaktadır. Inception modülü ile derinlemesine ayrılabilir evrişimler birleştirilerek başarı oranı yüksek, parametre sayısı daha az olan bir modül tasarlanmıştır. Bu modül Modifiye edilmiş Inception modülü olarak adlandırılmaktadır. Modifiye edilmiş Inception modülü Şekil 4'te gösterilmektedir. Bu modülde, standart Inception modülündeki sıralı 1x1-3x3 evrişim katmanları, 3x3 derinlemesine ve 1x1 noktasal evrişim ile 1x1-5x5 evrişim, 5x5 derinlemesine ve 1x1 noktasal evrişim katmanları ile değiştirilmiştir [33]. Standart Inception modülü ve modifiye edilmiş Inception modülünün parametre sayıları sırasıyla Tablo 2 ve 3'te verilmiştir. Standart Inception modülü ile elde edilen toplam parametre sayısı 140416 iken, modifiye edilmiş Inception modülü ile elde edilen toplam parametre sayısı 1132'dir. Bu değişiklik ile hesaplama için kullanılan parametre sayısı yaklaşık 124 kat azaltılarak son derece başarılı sonuçlar alınmıştır.



Şekil 4. Modifiye edilmiş Inception modülü.

Tablo 2. Inception modülünün parametre sayısı.

Katman	Girdi(Input)	Çekirdek boyutu/Filtre	Parametre sayısı
Girdi_görüntüsü	128x128x3	-	-
Evrişim 1	Girdi_görüntüsü	1x1/64	256
Evrişim 2	Girdi_görüntüsü	1x1/64	256
Evrişim 3	Evrişim 2	3x3/64	36928
Evrişim 4	Girdi_görüntüsü	1x1/64	256
Evrişim 5	Evrişim 4	5x5/64	102464
Maksimum havuzlama	Girdi_görüntüsü	3x3/64	0
Evrişim 6	Maksimum havuzlama	1x1/64	256
<b>Toplam parametre sayısı</b>			<b>140416</b>

**Tablo 3.** Modifiye edilmiş Inception modülünün parametre sayısı.

Katman	Girdi(Input)	Çekirdek boyutu/Filtre	Parametre sayısı
Girdi_görüntüsü	128x128x3	-	-
Evrişim 1	Girdi_görüntüsü	1x1/64	256
Derinlemesine evrişim 1	Girdi_görüntüsü	3x3/64	30
Noktasal evrişim 1	Derinlemesine evrişim 1	1x1/64	256
Derinlemesine evrişim 2	Girdi_görüntüsü	5x5/64	78
Noktasal evrişim 2	Derinlemesine evrişim 2	1x1/64	256
Maksimum havuzlama	Girdi_görüntüsü	3x3/64	0
Evrişim 6	Maksimum havuzlama	1x1/64	256
<b>Toplam parametre sayısı</b>			<b>1132</b>

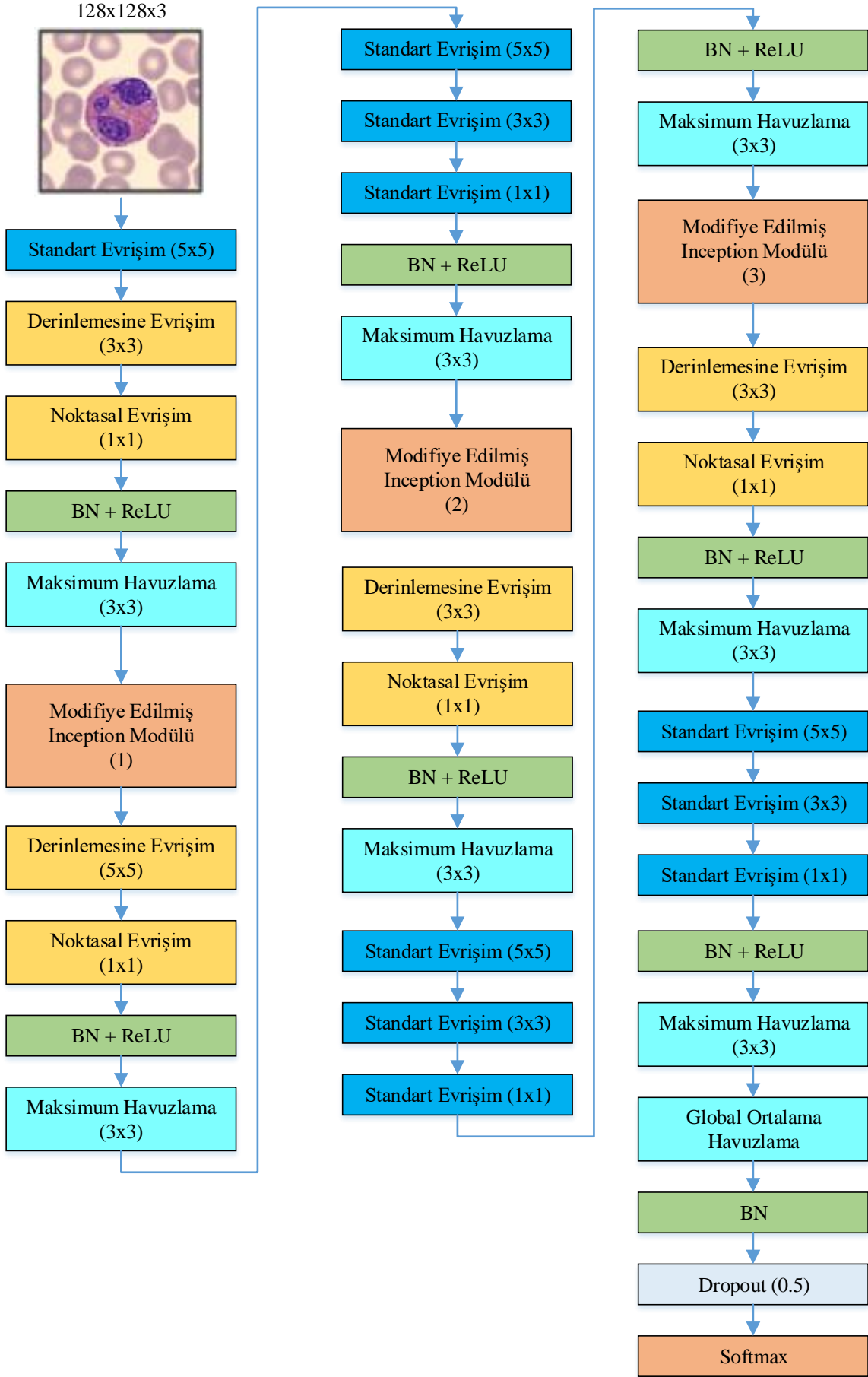
## 2.5. Önerilen Yöntem

Önerilen yöntemin mimarisi Şekil 5'te gösterilmektedir. Önerilen yöntem periferik kan hücre görüntülerine uygulanmadan önce, veri setindeki görüntüler 128x128x3 piksel olarak yeniden boyutlandırılmıştır. Girdi görüntüsüne öncelikle 5x5 çekirdek boyutuna ve 32 filtreye sahip standart evrişim işlemi uygulanmaktadır. Ardından 3x3 çekirdek boyutuna sahip derinlemesine evrişim ve 1x1 noktasal evrişim işlemi gerçekleştirilmektedir. Elde edilen özellik haritasına sırasıyla eğitim sürecini kolaylaştırmak ve hızlandırmak için toplu normalleştirme (Batch normalization-BN) ve 3x3 çekirdek boyutuna sahip maksimum havuzlama işlemi uygulanmaktadır. Bu işlemlerin ardından elde edilen özellik haritası derinlemesine ayrılabilir evrişim katmanlarından oluşan modifiye edilmiş Inception modülüne girdi olarak verilmektedir. Önerilen yöntem kapsamında modifiye edilmiş Inception modülü 3 defa uygulanmaktadır. Birinci modifiye edilmiş Inception modülünün çıktısına 5x5 çekirdek boyutuna sahip derinlemesine evrişim ve 1x1 noktasal evrişim uygulanmaktadır. Ardından sırasıyla, BN ve 3x3 çekirdek boyutuna sahip maksimum havuzlama uygulanmıştır. Bu işlemin ardından ard arda 3 standart evrişim işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu evrişim işlemlerinin çekirdek boyutu ve filtre sayıları sırasıyla şu şekildedir: 5x5 çekirdek boyutu ve 64 filtre, 3x3 çekirdek boyutu ve 64 filtre, 1x1 çekirdek boyutu ve 64 filtre. Bu evrişim işlemlerinin çıktısına BN ve 3x3 maksimum havuzlama uygulanarak elde edilen özellik haritası girdi olarak ikinci modifiye edilmiş Inception modülüne verilmektedir. Bu modülden sonra, 3x3 çekirdek boyutuna sahip derinlemesine evrişim, 1x1 noktasal evrişim, BN, 3x3 maksimum havuzlama uygulanmaktadır. Daha sonra ard arda 5x5 çekirdek boyutu ve 64 filtre, 3x3 çekirdek boyutu ve 64 filtre, 1x1 çekirdek boyutu ve 64 filtreden oluşan standart evrişim ile BN ve 3x3 çekirdek boyutuna sahip maksimum havuzlama işlemleri gerçekleştirilmektedir. Bu işlemlerin sonucunda elde edilen özellik haritası son modifiye edilmiş Inception modülünün girişine verilmektedir. Bu modülün çıktısına uygulanan işlemler sırasıyla şu şekildedir: 3x3 derinlemesine evrişim, 1x1 noktasal evrişim, BN, 3x3 maksimum havuzlama, 5x5, 3x3, 1x1 ve 128 filtreye sahip standart evrişim, BN ve 3x3 maksimum havuzlama. Ayrıca, ReLU aktivasyon fonksiyonu tüm evrişim katmanlarına uygulanmıştır. Tüm bu işlemlerden sonra elde edilen özellik haritasına global ortalama havuzlama katmanı uygulanmaktadır. Standart evrişimsel sinir ağlarında tam bağlantılı katmanları değiştirmek için tasarlanmış bir havuzlama işlemidir. Global ortalama havuzlama ile son katmandaki sınıflandırma görevinin karşılık gelen her sınıfı için bir özellik haritası oluşturulmaktadır. Özellik haritalarının üstüne tam bağlantılı katmanları eklemek yerine, her bir özellik haritasının ortalaması alınmakta ve elde edilen vektör doğrudan softmax katmanına aktarılmaktadır. Ayrıca önerilen yöntemde global ortalama havuzlama kullanmanın avantajı, global ortalama havuzlamada optimize edilecek bir parametre olmaması ve dolayısıyla bu katmanda aşırı öğrenmenin önlenmesidir. Global ortalama havuzlamanın çıktısı, özellikleri sınıflandırmak ve periferik kan hücresi görüntülerini tahmin etmek için bir softmax fonksiyonuna verilmektedir. Bununla birlikte, softmax'tan önce, eğitim sürecini kolaylaştırmak ve hızlandırmak için Toplu normalleştirme (BN) uygulanmaktadır. Ardından, aşırı öğrenmeyi önlemek için ağda 0.5'lik bir bırakma (dropout) katmanı uygulanmaktadır. Son olarak, Softmax her sınıfa olasılık değerleri atamaktadır. Bu olasılık değerlerinin toplamı bire eşittir. Önerilen yöntem ile ilgili detaylı bilgi Tablo 4'te yer almaktadır. Ayrıca önerilen yöntemde kullanılan modifiye edilmiş Inception modülü ile standart Inception modülünün kullanıldığı durumlarda elde edilen parametre sayıları da Tablo 4'te verilmiştir. Önerilen yöntem ile elde edilen toplam parametre sayısı 993.512'dir. Önerilen yöntemde kullanılan modifiye edilmiş Inception modülü yerine standart Inception modülünün kullanıldığı durumda elde edilen toplam parametre sayısı 2.214.344'dür. Önerilen yöntemde kullanılan modifiye edilmiş Inception modülü sayesinde parametre sayısında yaklaşık %45 azalma sağlanmıştır.

## 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI

### 3.1. Çalışma Ortamı ve Hiperparametre Ayarları

Kaggle ortamındaki Keras ve TensorFlow kitaplığını kullanarak modeli eğitmek için belirli bir hiperparametre seti kullanılmaktadır. Periferik kan hücresi veri seti için deneysel çalışmalar, kaggle ortamında bir donanım hızlandırıcı olan TPU VM v3-8 ile gerçekleştirilmiştir. Genel olarak, Keras-TensorFlow ve Kaggle ortamı ile birlikte hiperparametreler, optimize ediciler ve geri aramaların kullanılması, önerilen yöntem mimarimizle son teknoloji sonuçlar elde etmemizi sağlayacağı umulmaktadır.



Şekil 5. Önerilen yöntem.

**Tablo 4.** Standart Inception ve Modifiye edilmiş Inception modüllerinin parametre sayıları.

Modifiye Edilmiş Inception modülü			Standart Inception Modülü		
Katman	Çıktı	Parametre sayısı	Katman	Çıktı	Parametre sayısı
Girdi görüntüsü	128x128x3	0	Girdi görüntüsü	128x128x3	0
Evrişim	128x128x32	2432	Evrişim (5x5)	128x128x32	2432
Derinlemesine Evrişim	128x128x32	320	Evrişim (3x3)	128x128x32	9248
Noktasal Evrişim	128x128x32	1056	Evrişim (1x1)	128x128x32	1056
BN	128x128x32	128	BN	128x128x32	128
Maksimum Havuzlama	128x128x32	0	Maksimum Havuzlama	128x128x32	0
Modifiye edilmiş Inception modülü1	128x128x256	9600	Standart Inception modülü1	128x128x256	147840
Derinlemesine Evrişim	128x128x256	6656	Evrişim (5x5)	128x128x64	409664
Noktasal Evrişim	128x128x64	16448	Evrişim (1x1)	128x128x64	4160
BN	128x128x64	256	BN	128x128x64	256
Maksimum Havuzlama	128x128x64	0	Maksimum Havuzlama	128x128x64	0
Evrişim	128x128x64	102464	Evrişim (5x5)	128x128x64	102464
Evrişim	126x126x64	36928	Evrişim (3x3)	126x126x64	36928
Evrişim	126x126x64	4160	Evrişim (1x1)	126x126x64	4160
BN	126x126x64	256	BN	126x126x64	256
Maksimum Havuzlama	126x126x64	0	Maksimum Havuzlama	126x126x64	0
Modifiye edilmiş Inception modülü2	126x126x256	18944	Standart Inception modülü2	126x126x256	156032
Derinlemesine Evrişim	126x126x256	2560	Evrişim (3x3)	126x126x64	147520
Noktasal Evrişim	126x126x64	16448	Evrişim (1x1)	126x126x64	4160
BN	126x126x64	256	BN	126x126x64	256
Maksimum Havuzlama	126x126x64	0	Maksimum Havuzlama	126x126x64	0
Evrişim	126x126x64	102464	Evrişim (5x5)	126x126x64	102464
Evrişim	126x126x64	36928	Evrişim (3x3)	126x126x64	36928
Evrişim	126x126x64	4160	Evrişim (1x1)	126x126x64	4160
BN	126x126x64	256	BN	126x126x64	256
Maksimum Havuzlama	126x126x64	0	Maksimum Havuzlama	126x126x64	0
Modifiye edilmiş Inception modülü3	126x126x256	18944	Standart Inception modülü3	126x126x256	156032
Derinlemesine Evrişim	126x126x256	2560	Evrişim (3x3)	126x126x128	295040
Noktasal Evrişim	126x126x128	32896	Evrişim (1x1)	126x126x128	16512
BN	126x126x128	512	BN	126x126x128	512
Maksimum Havuzlama	126x126x128	0	Maksimum Havuzlama	126x126x128	0
Evrişim	126x126x128	409728	Evrişim (5x5)	126x126x128	409728
Evrişim	126x126x128	147584	Evrişim (3x3)	126x126x128	147584
Evrişim	126x126x128	16512	Evrişim (1x1)	126x126x128	16512
BN	126x126x128	512	BN	126x126x128	512
Maksimum Havuzlama	126x126x128	0	Maksimum Havuzlama	126x126x128	0
Global Ortalama Havuzlama	128	0	Global Ortalama Havuzlama	128	0
BN	128	512	BN	128	512
Dropout	128	0	Dropout	128	0
Output	8	1032	Output	8	1032
<b>Toplam parametre sayısı</b>		<b>993.512</b>			<b>2.214.344</b>

Kullanılan hiperparametreler arasında batch size, görüntü boyutu, eğitim-test-doğrulama ayrımı, epoch sayısı yer almaktadır. Önerilen yöntemi eğitmek için batch size değeri olarak 128, 128x128'lik bir görüntü boyutu ve %80-%10-%10'luk bir eğitim-test-doğrulama ayrımı kullanılmaktadır. Ek olarak, modeli 100 epoch için eğitilmektedir. Kayıp fonksiyonunu en aza indirmek ve modeli optimize etmek için Adam optimizer kullanılmaktadır. Hiperparametrelere ek olarak, eğitim sürecini optimize etmek için iki özel geri arama (callbacks) kullanılmaktadır. İlk geri arama, doğrulama kaybı iyileşmeyi durdurduğunda öğrenme oranını azaltmak için kullanılan ReduceLROnPlateau geri aramasıdır. Bu, eğitim sürecini stabilize etmeye ve aşırı öğrenmeden kaçınmaya yardımcı olur. Bu geri aramada, öğrenme oranının (min\_learning\_rate) alt sınırı olarak 0.000001 alınır. Ayrıca öğrenme oranını azaltacak faktör değeri de 0.3'tür. İkinci geri arama, eğitim sırasında belirli aralıklarla model ağırlıklarını kaydetmek için kullanılan ModelCheckpoint geri aramasıdır. Bu, doğrulama doğruluğuna dayalı olarak en iyi modeli kaydetmemize ve ileride kullanmak üzere yüklememize olanak tanımaktadır.

### 3.2. Performans Ölçütleri

Önerilen yöntemin verimliliği, kesinlik (precision), F1-puanı (F1-score), duyarlılık (recall) ve sınıflandırma doğruluğu (accuracy) gibi performans ölçütleri kullanılarak belirlenmektedir. Performans ölçütleri, bir modelin tahminlerinin etkinliğinin niceliksel ve nesnel bir ölçüsünü sağlamaktadır. Ayrıca sınıflandırma performansını

değerlendirmek için gereklidir. Bu ölçütler, her birinin kendine özgü güçlü yanları ve sınırlamaları olan, modelin performansı hakkında farklı bakış açıları sağlamaktadır. Bu ölçütlerin detaylı açıklaması şu şekildedir. Temel bir performans değerlendirme ölçütü olan doğruluk, yöntem tarafından üretilen doğru tahminlerin yüzdesini ölçer. Bu ölçüt, doğru tahmin sayısının yapılan toplam tahmin sayısına bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Doğruluk değerinin hesaplanması Denklem (5)'teki gibidir. Önerilen yöntemle yapılan tüm pozitif tahminlerdeki gerçek pozitiflerin oranını ölçen bir ölçüm olan kesinlik, gerçek pozitif sayısının, gerçek pozitif ve yanlış pozitiflerin toplamına bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Kesinlik değerinin hesaplanması Denklem (6)'daki gibidir. Veri setindeki tüm gerçek pozitif örnekler arasında gerçek pozitif oranını ölçen bir metrik olan duyarlılık, gerçek pozitif sayısının gerçek pozitif ve yanlış negatiflerin toplamına bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Duyarlılık değeri Denklem (7)'deki gibi formülize edilmektedir. Duyarlılık ve kesinliğin harmonik ortalaması olan F1 puanı, özellikle sınıfların dengesiz olduğu durumlarda kesinlik ve duyarlılığı dengelemek için vazgeçilmez bir ölçüttür. Hem kesinliği hem de duyarlılığı yakalayan tek bir puan sağlayarak, onu genel model performans değerlendirmesi için güçlü bir ölçü haline getirir [34][35][36]. F1 puanı Denklem (8)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\text{Doğruluk (Accuracy)} = \frac{TP+TN}{TP+FP+TN+FN} \quad (5)$$

$$\text{Kesinlik (Precision)} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (6)$$

$$\text{Duyarlılık (Recall)} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (7)$$

$$\text{F1-puanı (F1-score)} = 2 * \frac{\text{Kesinlik} \times \text{Duyarlılık}}{\text{Kesinlik} + \text{Duyarlılık}} \quad (8)$$

Denklem (5), (6), (7) ve (8)'deki gerçek negatifler (TN), yanlış negatifler (FN), yanlış pozitifler (FP) ve gerçek pozitifler (TP) değerleri karışıklık matrisinden elde edilmektedir. Bu değerler şu şekildedir: Doğru tanımlanmış kan hücresi türlerinin sayısı: TP, hedef kan hücresi türleri olarak doğru şekilde ayırt edilmeyen kan hücresi sayısı: TN, yanlış tanımlanmış kan hücresi türlerinin sayısı: FN ve hedef kan hücresi türleri olarak yanlış ayırt edilemeyen kan hücresi sayısı: FP'dir.

### 3.3. Deneysel Sonuçlar

Deneysel çalışmalar kapsamında kullanılan veri seti 8 kan hücre tipi içermektedir. Bunlar şu şekildedir: Nötrofiller (N), Eozinofiller (EO), Bazofiller (B), Lenfositler (L), Monositler (M), olgunlaşmamış granülositler (OG), Eritroblastlar (ER) ve Trombositler (T)'dir. Önerilen yöntem ile gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda 8 sınıflı veri seti için karışıklık matrisi Tablo 5'te verilmiştir. Tablo 5 incelendiğinde, 124 B görüntüsünden 122'sinin, 348 EO görüntüsünün tamamının, 135 ER görüntüsünden 132'sinin, 301 OG görüntüsünün 296'sının, 126 L görüntüsünün tamamının, 143 M görüntüsünden 141'inin, 307 N görüntüsünden 301'inin ve son olarak 225 T görüntüsünden 224'ünün başarılı bir şekilde tahmin edildiği görülmektedir.

Önerilen yöntemin sınıf bazlı performans ölçütleri (doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve F1-score) Tablo 6'da yer almaktadır. Tablo 6'daki doğruluk değerleri incelendiğinde, B görüntülerinin %99.82 doğru sınıflandırıldığı görülmektedir. Benzer şekilde EO görüntülerinin %100, ER görüntülerinin %99.82, OG görüntülerinin %99.3, L görüntülerinin %99.77, M görüntülerinin %99.82, N görüntülerinin %99.36 ve T görüntülerinin %99.88 doğru sınıflandırıldığı görülmektedir. Tüm sınıfların makro ortalama doğruluk değerlerine bakıldığında %99.72 elde edilmektedir. Tüm sınıfların genel doğruluk değerleri ise Tablo 7'de gösterildiği gibi %98.89 olarak elde edilmiştir. En düşük doğruluk değeri %99.3 ile OG sınıfında elde edilmiştir. En iyi doğruluk değeri ise %100 ile EO sınıfında elde edilmiştir. Tablo 6'daki kesinlik, duyarlılık ve F1-skor değerleri incelendiğinde, B sınıfında sırasıyla %99.19, %98.39, %98.79 değerleri elde edilmiştir. Benzer şekilde diğer sınıflar için sonuçlar şu şekildedir. EO sınıfında tüm performans ölçütlerinde %100, ER sınıfında %100 kesinlik, %97.78 duyarlılık, %98.88 F1-skor, OG sınıfında %97.69 kesinlik, %98.38 duyarlılık, %98.03 F1-skor, L sınıfında %96.92 kesinlik, %100 duyarlılık, %98.44 F1-skor, M sınıfında %99.30 kesinlik, %98.60 duyarlılık, %98.95 F1-skor, N sınıfında %98.37 kesinlik, %98.05 duyarlılık, %98.21 F1-skor ve son olarak T sınıfında her üç performans ölçütünde %99.56 değeri bulunmuştur. Kesinlik, duyarlılık ve F1-skor değeri göz önüne alındığında en düşük kesinlik değeri %96.92 ile L sınıfında, en düşük duyarlılık değeri %97.78 ile ER sınıfında ve en düşük F1-skor değeri %98.03 ile OG sınıfında bulunduğu görülmektedir.

Önerilen yöntemin literatürden aynı veri setini kullanan farklı çalışmalar ile karşılaştırılması Tablo 7'de gösterilmektedir. Tablo 7'ye göre önerilen yöntem %98.89 genel doğruluk, %98.88 kesinlik, %98.85 duyarlılık ve %98.86 F1-skor elde ettiği görülmektedir. Önerilen yöntem dışındaki diğer yöntemlerin elde ettiği değerler ise şu şekildedir. Uçar vd. [18], tüm performans ölçütlerinde %97.94 değerini elde etmişlerdir. Banik vd. [25], %95.19 genel doğruluk, %92.32 kesinlik, %90.39 duyarlılık, %91.34 F1-skoru, Acevedo vd. [37], %96.20 genel doğruluk, %97 kesinlik, %96 duyarlılık, %96.50 F1-skoru, Ruberto vd. [38], %95.60 genel doğruluk, %98.40 kesinlik, %95 duyarlılık, %96.67 F1-skoru, Atıcı vd. [39], %99.31 genel doğruluk, %97.25 kesinlik, %97.37 duyarlılık, %97.31 F1-skoru elde etmişlerdir. En iyi genel doğruluk sonucu %99.31 ile Atıcı vd. [39] tarafından bulunmuştur. Önerilen yöntem ise %98.89 genel doğruluk sonucu elde etmiştir. Önerilen yöntem %0.42 oranında daha az genel doğruluk



değerinde sahiptir. Ancak kesinlik, duyarlılık ve F1-skor değerlerine bakıldığında, önerilen yöntemin diğer tüm yöntemlerden daha iyi sonuç ürettiği görülmektedir. Önerilen yönteme en yakın kesinlik değeri %98.40 ile Ruberto vd. [38], en yakın duyarlılık değeri %97.94 ile Uçar vd. [18] ve son olarak en yakın F1-skor değeri %97.94 ile Uçar vd. [18] tarafından elde edildiği görülmektedir.

Son olarak, önerilen yöntemde kullanılan modifiye edilmiş Inception modülü ile standart Inception modülünün karşılaştırılması Tablo 8’de verilmiştir. Tablo 8 incelendiğinde önerilen yöntemin daha az parametre sayısı ile daha iyi sınıflandırma sonucu elde ettiği görülmektedir.

**Tablo 5.** Karışıklık matrisi.

Gerçek	Çoklu sınıflandırma için test veri seti							
	Tahmin							
	B	EO	ER	OG	L	M	N	T
B	122	0	0	2	0	0	0	0
EO	0	348	0	0	0	0	0	0
ER	0	0	132	0	3	0	0	0
OG	1	0	0	296	0	0	4	0
L	0	0	0	0	126	0	0	0
M	0	0	0	1	0	141	0	1
N	0	0	0	4	1	1	301	0
T	0	0	0	0	0	0	1	224

**Tablo 6.** Önerilen yöntemin performans ölçütlerine göre sınıf bazlı sınıflandırma sonuçları (%).

Performans ölçütü	B	EO	ER	OG	L	M	N	T
<b>Doğruluk</b>	99.82	100	99.82	99.3	99.77	99.82	99.36	99.88
<b>Kesinlik</b>	99.19	100	100	97.69	96.92	99.30	98.37	99.56
<b>Duyarlılık</b>	98.39	100	97.78	98.38	100	98.60	98.05	99.56
<b>F1-skor</b>	98.79	100	98.88	98.03	98.44	98.95	98.21	99.56

**Tablo 7.** Literatürde aynı veri setini kullanan çalışmaların karşılaştırılması.

Literatürdeki Çalışma	Genel Doğruluk (%)	Kesinlik (%)	Duyarlılık (%)	F1-skor (%)
Uçar vd. [18]	97.94	97.94	97.94	97.94
Banik vd. [25]	95.19	92.32	90.39	91.34
Acevedo vd. [37]	96.20	97.00	96.00	96.50
Ruberto vd. [38]	95.60	98.40	95.00	96.67
Atıcı vd. [39]	<b>99.31</b>	97.25	97.37	97.31
<b>Önerilen Yöntem</b>	<b>98.89</b>	<b>98.88</b>	<b>98.85</b>	<b>98.86</b>

**Tablo 8.** Standart Inception modülü ile modifiye edilmiş Inception modülünün karşılaştırılması.

Yöntem	Parametre sayısı	Genel Doğruluk (%)
Standart Inception Modülü	2.214.344	98.36
Önerilen yöntem (Modifiye edilmiş Inception Modülü)	993.512	98.89

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada, insan periferik kan hücrelerinin çoklu sınıflandırılması için modifiye edilmiş Inception modüllerinden oluşan yeni bir evrimsel sinir ağı tabanlı yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemde 3 tane modifiye edilmiş Inception modülü, standart evrişim, maksimum havuzlama, BN, ReLU, dropout, global ortalama havuzlama ve softmax katmanları yer almaktadır. Önerilen yöntemin içerisinde bulunan modifiye edilmiş Inception modülleri ise, Inception modülü ve derinlemesine ayrılabilir evrişim’in birleşiminden oluşan hibrit bir modüldür. Böyle bir hibrit modül tasarlanmasındaki amaç, Inception modülünün farklı ölçeklerde çoklu paralel yapısı ile derinlemesine ayrılabilir evrişimlerin parametre sayısını azaltma avantajını birleştirip sınıflandırma doğruluğu arttırmaktır. Inception modülünün kullanımı ile farklı ölçeklerde çoklu paralel evrişimler gerçekleştirilerek evrimsel sinir ağlarının etkinliğinin ve sınıflandırma performansının iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Derinlemesine ayrılabilir evrişimin kullanımı ile parametre sayısını azaltmak ve sınıflandırma doğruluğunu arttırmak amaçlanmaktadır. Önerilen yöntemde kullanılan modifiye edilmiş Inception modülleri sayesinde parametre sayısında yaklaşık %45 oranında azalma sağlanmıştır. Bu nedenle, standart Inception modüllerine göre daha hızlıdır. Aynı zamanda, önerilen yöntemde kullanılan modifiye edilmiş Inception modülleri sayesinde parametre sayısının azalması ile standart evrimsel sinir ağlarına göre hesaplama maliyetinin azaldığı açıkça görülmektedir. Önerilen yöntemin performansını test etmek için 8 sınıf içeren periferik kan hücresi veri seti üzerinde deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda %98.89 doğruluk, %98.88 kesinlik, %98.85 duyarlılık ve %98.86 F1-skor değeri elde edilmiştir. Literatürde son yıllarda yapılan çalışmalar ile kıyaslandığında önerilen yöntem ile daha başarılı sonuçların elde edildiği görülmektedir. Ayrıca önerilen

yöntemdeki modifiye edilmiş Inception modülleri, standart Inception modülleri ile karşılaştırılmıştır. Önerilen yöntem ile 993.512 parametre ile %98.89 genel doğruluk sonucu elde edilirken, Standart Inception modüllerinin kullanılmasıyla 2.214.344 parametre ve %98.36 genel doğruluk sonucu elde edilmiştir. Bu durumdan yola çıkarak, önerilen yöntemin daha az parametre ile daha iyi sınıflandırma doğruluğu elde ettiği sonucu çıkarılmaktadır. Gelecekteki çalışmalarda, kodlayıcı-kod çözücü tabanlı derin öğrenme yöntemleri ile segmentasyon çalışmalarının yapılması planlanmaktadır.

### Yazar Katkıları

Hüseyin Fırat: Makalede çalışılan konunun belirlenmesi, literatür çalışması, derin öğrenme mimarisinin geliştirilmesi, makalenin yazılması, deneysel çalışmaların yapılması ve sonuçların değerlendirilmesi süreçlerinin tamamını gerçekleştirmiştir.

### Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler

### KAYNAKÇA

- [1] Y.Y. Baydilli and Ü. Atila "Classification of white blood cells using capsule networks," *Comput. Med. Imaging Graph.*, vol. 80, 2020.
- [2] R.B. Hegde, K. Prasad, H. Hebbar, and B.M.K. Singh "Comparison of traditional image processing and deep learning approaches for classification of white blood cells in peripheral blood smear images," *Biocybern. Biomed. Eng.*, vol. 39, no. 2, pp. 382–392, 2019.
- [3] F. Long, J.J. Peng, W. Song, X. Xia, and J. Sang "BloodCaps: A capsule network based model for the multiclassification of human peripheral blood cells," *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 202, no. 105972, 2021.
- [4] A. Khan, A. Eker, A. Chefranov, and H. Demirel "White blood cell type identification using multi-layer convolutional features with an extreme-learning machine," *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 69, no. November 2020, p. 102932, 2021.
- [5] G. Liang, H. Hong, W. Xie, and L. Zheng "Combining Convolutional Neural Network With Recursive Neural Network for Blood Cell Image Classification," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 36188–36197, 2018.
- [6] N. Bayat, D.D. Davey, M. Coathup, and J.-H. Park "White Blood Cell Classification Using Multi-Attention Data Augmentation and Regularization," *Big Data Cogn. Comput.*, vol. 6, no. 4, p. 122, 2022.
- [7] N. Dong, M. die Zhai, J. fang Chang, and C. ho Wu "A self-adaptive approach for white blood cell classification towards point-of-care testing," *Appl. Soft Comput.*, vol. 111, p. 107709, 2021.
- [8] N. Ramesh, B. Dangott, M.E. Salama, and T. Tasdizen "Isolation and two-step classification of normal white blood cells in peripheral blood smears," *J. Pathol. Inform.*, vol. 3, no. 1, p. 13, 2012.
- [9] X. Yao, K. Sun, X. Bu, C. Zhao, and Y. Jin "Classification of white blood cells using weighted optimized deformable convolutional neural networks," *Artif. Cells, Nanomedicine Biotechnol.*, vol. 49, no. 1, pp. 147–155, 2021.
- [10] A. Girdhar, H. Kapur, and V. Kumar "Classification of White blood cell using Convolution Neural Network," *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 71, no. PA, p. 103156, 2022.
- [11] A. Çınar and S.A. Tuncer "Classification of lymphocytes, monocytes, eosinophils, and neutrophils on white blood cells using hybrid Alexnet-GoogleNet-SVM," *SN Appl. Sci.*, vol. 3, no. 4, pp. 1–11, 2021.
- [12] R.B. Hegde, K. Prasad, H. Hebbar, B.M.K. Singh, and I. Sandhya "Automated Decision Support System for Detection of Leukemia from Peripheral Blood Smear Images," *J. Digit. Imaging*, vol. 33, no. 2, pp. 361–374, 2020.
- [13] J. Prinyakupt and C. Pluempitiwiriwajew "Segmentation of white blood cells and comparison of cell morphology by linear and naïve Bayes classifiers," *Biomed. Eng. Online*, vol. 14, no. 1, pp. 1–19, 2015.
- [14] J. Zhao, M. Zhang, Z. Zhou, J. Chu, and F. Cao "Automatic detection and classification of leukocytes using convolutional neural networks," *Med. Biol. Eng. Comput.*, vol. 55, no. 8, pp. 1287–1301, 2017.
- [15] B. Dayı, H. Üzen, İ.B. Çiçek, and Ş.B. Duman "A Novel Deep Learning-Based Approach for Segmentation of Different Type Caries Lesions on Panoramic Radiographs," *Diagnostics*, vol. 13, no. 2, p. 202, 2023.
- [16] E. Bütün, M. Uçan, and M. Kaya "Automatic detection of cancer metastasis in lymph node using deep learning," *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 82, no. August 2022, p. 104564, 2023.
- [17] M. Toğaçar, B. Ergen, and Z. Cömert "Classification of white blood cells using deep features obtained from Convolutional Neural Network models based on the combination of feature selection methods," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 97, p. 106810, 2020.
- [18] F. Uçar "Deep Learning Approach to Cell Classification in Human Peripheral Blood," in *2020 5th International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK)*, 2020, pp. 383–387.
- [19] A. Sharma, S. C. Thomas, A. Sah, V. V. Abhyankar, V. K. Singh, and S. Prakash "White Blood Cells Subtypes Classification Using Fast Traditional Convolutional Neural Network," *Proc. 2021 Int.*

- Conf. Emerg. Tech. Comput. Intell. ICETCI 2021, pp. 113–117, 2021.
- [20] D. Baby, S.J. Devaraj, J. Hemanth, and M.M. Anishin Raj “Leukocyte classification based on feature selection using extra trees classifier: A transfer learning approach,” *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 29, no. 8, pp. 2742–2757, 2021.
- [21] D. Bani-Hani, N. Khan, F. Alsultan, S. Karanjkar, and N. Nagarur “Classification of Leucocytes Using Convolutional Neural Network Optimized Through Genetic Algorithm,” *Proc. 7th Annu. World Conf. Soc. Ind. Syst. Eng. Binghamton, NY, USA*, vol. 10, no. November, pp. 1–7, 2018.
- [22] E.H. Mohamed, W.H. El-Behaidy, G. Khoriba, and J. Li “Improved white blood cells classification based on pre-trained deep learning models,” *J. Commun. Softw. Syst.*, vol. 16, no. 1, pp. 37–45, 2020.
- [23] A.M. Patil, M.D. Patil, and G.K. Birajdar “White Blood Cells Image Classification Using Deep Learning with Canonical Correlation Analysis,” *Irbm*, vol. 42, no. 5, pp. 378–389, 2021.
- [24] C. Cheuque, M. Querales, R. León, R. Salas, and R. Torres “An Efficient Multi-Level Convolutional Neural Network Approach for White Blood Cells Classification,” *Diagnostics*, vol. 12, no. 2, 2022.
- [25] P.P. Banik, R. Saha, and K.D. Kim “Fused Convolutional Neural Network for White Blood Cell Image Classification,” *2019 Int. Conf. Artif. Intell. Inf. Commun.*, pp. 22–24, 2019.
- [26] A. Acevedo, A. Merino, S. Alférez, Á. Molina, L. Boldú, and J. Rodellar, “A dataset of microscopic peripheral blood cell images for development of automatic recognition systems,” *Data Br.*, vol. 30, p. 105474, 2020.
- [27] C. Szegedy et al. “Going deeper with convolutions,” in *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1–9, 2015.
- [28] H. Firat, M. Emin, A. Mehmet, I. Bayındır, and D. Hanbay “Hybrid 3D / 2D Complete Inception Module and Convolutional Neural Network for Hyperspectral Remote Sensing Image Classification,” *Neural Process. Lett.*, pp. 1–44, 2022.
- [29] F. Chollet “Xception: Deep learning with depthwise separable convolutions,” *Proc. - 30th IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognition, CVPR 2017*, vol. 2017-Janua, pp. 1800–1807, 2017.
- [30] A.G. Howard et al. “MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision Applications,” 2017.
- [31] H. Üzen, M. Turkoglu, M. Aslan, and D. Hanbay “Depth-wise Squeeze and Excitation Block-based Efficient-Unet model for surface defect detection,” *Vis. Comput.*, 2022.
- [32] H. Firat, M. E. Asker, and D. Hanbay “Hybrid 3D Convolution and 2D Depthwise Separable Convolution Neural Network for Hyperspectral Image Classification,” *Balk. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 10, no. 1, pp. 35–46, 2022.
- [33] A. Tuncer “Cost-optimized hybrid convolutional neural networks for detection of plant leaf diseases,” *J. Ambient Intell. Humaniz. Comput.*, vol. 12, no. 8, pp. 8625–8636, 2021.
- [34] Y. Ha, Z. Du, and J. Tian “Fine-grained interactive attention learning for semi-supervised white blood cell classification,” *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 75, no. September 2021, p. 103611, 2022.
- [35] A.I. Shahin, Y. Guo, K.M. Amin, and A.A. Sharawi “White blood cells identification system based on convolutional deep neural learning networks,” *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 168, pp. 69–80, 2019.
- [36] A. Naseri and A. Rezaei Nasab “Automatic identification of minerals in thin sections using image processing,” *J. Ambient Intell. Humaniz. Comput.*, no. 0123456789, 2021.
- [37] A. Acevedo, S. Alférez, A. Merino, L. Puigví, and J. Rodellar “Recognition of peripheral blood cell images using convolutional neural networks,” *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 180, p. 105020, 2019.
- [38] C. Di Ruberto, A. Loddo, and L. Putzu “Detection of red and white blood cells from microscopic blood images using a region proposal approach,” *Comput. Biol. Med.*, vol. 116, no. August 2019, p. 103530, 2020.
- [39] H. Atıcı and H.E. Koçer “Mask R-CNN Based Segmentation and Classification of Blood Smear Images,” *Gazi J. Eng. Sci.*, vol. 9, no. 1, pp. 128–143, 2023.



## Makine Öğrenmesi ve Optimizasyon Yöntemleri ile Uzun Dönem Elektrik Enerjisi Tahmini: Türkiye Örneği

### Long-Term Electricity Demand Forecasting with Machine Learning and Optimization Methods: The Case of Turkey

<sup>1</sup>Ömer Ali KARAMAN , <sup>2</sup>Yasin BEKTAŞ 

<sup>1</sup>Batman Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Batman, Türkiye

<sup>2</sup>Aksaray Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Aksaray, Türkiye

<sup>1</sup>omer.ali.karaman@batman.edu.tr, <sup>2</sup>yasinbektas@aksaray.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 29 May 2023

Accepted : 23 July 2023

##### Keywords:

Particle Swarm Optimization, Linear Regression, Gaussian Process Regression, Energy Demand Forecasting

#### ABSTRACT

Today, with the rapid increase in industrialization, the demand for energy has risen. To meet this growing energy demand and make accurate energy predictions, optimization and machine learning algorithms have become prominent. Particle swarm optimization (PSO), Linear Regression (LR) and Gaussian Process Regression (GSR) are included in these algorithms. In this study, using PSO, LR and GSR algorithms, Turkey's energy demand estimation between the years 2020-2040 was carried out. In order to make these estimations, the past population, exports, imports, gross domestic product (GDP) between 1980-2019 were used as input data, while energy consumption was used as output data. Coefficient of determination ( $R^2$ ) value, root mean square error (RMSE), mean square error (MSE), and mean absolute error (MAE) error metrics were used to evaluate the performance results of the PSO, LR, and GSR methods. The  $R^2$  values for the GSR, LR and PSO methods were obtained as 0.9983, 0.9923 and 0.9938, respectively.

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 29 Mayıs 2023

Kabul : 23 Temmuz 2023

##### Anahtar Kelimeler:

Parçacık Sürü Optimizasyonu, Lineer Regresyon, Gauss Sürec Regresyonu, Enerji Talep Tahmini

#### ÖZET

Günümüzde sanayileşmenin hızla artmasıyla birlikte enerji ihtiyacı artmıştır. Bu artan enerji ihtiyacını karşılayabilmek ve ön görülebilecek enerji tahminlerini yapabilmek için optimizasyon ile makine öğrenme algoritmaları ön plana çıkmıştır. Parçacık sürü optimizasyonu (PSO), Lineer Regresyon (LR) ve Gauss Sürec Regresyonu (GSR) bu algoritmalar içerisinde yer almaktadır. Bu çalışmada PSO, LR ve GSR algoritmaları kullanılarak Türkiye'nin 2020-2040 yılları arasındaki enerji talep tahmini yapılmıştır. Bu tahmin işlemlerinin yapılabilmesi için 1980-2019 yılları arasında geçmiş nüfus, ihracat, ithalat, gayri safi yurtiçi hâsıla (GSYH) giriş verileri olarak kullanılırken enerji tüketimi çıkış verisi olarak kullanılmıştır. PSO, LR ve GSR yöntemlerinin performans sonuçlarını değerlendirebilmek için determinasyon katsayısı ( $R^2$ ) değeri, kök ortalama kare hatası (KOKH), ortalama kare hatası (OKH) ve ortalama mutlak hata (OMH) hata metrikleri kullanıldı. GSR, LR ve PSO yöntemleri için  $R^2$  değeri sırasıyla 0.9983, 0.9923 ve 0.9938 olarak elde edildi.

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

## 1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojik gelişmelere ve nüfus artışına bağlı olarak enerji ihtiyacı da birlikte artmaktadır. Artan bu enerji ihtiyacı içerisinde elektrik enerjisi büyük bir paya sahiptir. Gelişmekte olan ekonomiler için teknoloji, sağlık, üretim, hizmet gibi birçok farklı alanda sürdürülebilir büyümeyi sağlamak için enerji kaynaklarının uzun vadeli planlanması zorunludur. Bu planlamalar yapılırken ülkenin dinamiklerini içeren parametrelerden faydalanılmalıdır. İthalat, nüfus, GSYH ve ihracat gibi sayısal veriler ülkenin büyümesine dair parametreler olarak kullanılabilir. Bu parametreler optimizasyon yöntemleriyle modellenerek enerji için gerekli alt yapı tesisinin planlanması ve bu alanda yatırımların artırılması için kullanılabilir. Bu nedenle enerji tahmini önemli ve gereklidir. Enerji ve yük tahminleri elektrik taleplerinden daha yüksek olduğunda aşırı sayıda güç kaynağı ünitesi devreye girerek aşırı miktarda elektrik kullanılmasına ve fazladan rezerv verilmesine neden olur. Öte yandan, daha düşük yük tahmin projeksiyonları, sistemi sınırlılıklar içinde çalışmaya zorlayarak yetersiz beslemeye neden olabilir [1,2]. Son 20 yılda, yük ve enerji tahmini hakkında çok sayıda literatür çalışması vardır. Bu literatür çalışması, Türkiye için geçerli ve ilgili çalışmaları kategorize etmeyi ve analiz etmeyi amaçlamaktadır. Burada önemli nokta, hangi yöntemlerin dikkate alındığını, girdi değişkenlerinin seçimini ve parametre değerlerinin düzenini belirlemektir. Bu araştırma, makine öğrenme yöntemleri LR ve GSR ve meta sezgisel algoritmalar dahil olmak üzere elektrik talebini tahmin etmek için kullanılan karma yöntemleri kapsamaktadır. Tablo 1, elektrik talebini tahmin etmek için yapılan araştırmalara genel bir bakış sunmaktadır.

**Tablo 1.** Literatürdeki elektrik enerjisi tüketimi ve talep tahmini için yapılan bazı çalışmalar

Yazar	Tahmin Edilen	Metot	Değişkenler
Saglam vd. [2]	Gökçeada Elektrik Talebi	YSA, PSO ve Çoklu lineer Regresyon (ÇLR)	İthalat, ihracat, araç ve turist sayısı
Zeng vd. [3]	Bina Elektrik Kullanımı tahmini	GSR	Elektrik tüketim data seti
Sen vd. [4]	Elektrik Tüketimi	YSA- DVM	Nüfus, GSYH, enflasyon ve işsizlik oranı
Zhai ve Che [5]	Pik Yük	PSO temelli SVR ve Rastgele Orman	Geçmiş yük verileri
Raju ve Laxmi [6]	Elektrik yük tahmini	LR, DVM, GSR, Ensemble Bagged (EB) regresyon, Ensemble Boosted (EBo) regresyon, Fine Tree (FT)	Elektrik tüketim data seti
Lu ve Wang [7]	Elektrik yük tahmini	SVR ve Balina Optimizasyon Algoritması (WOA)	Elektrik yük verileri ve elektrik fiyatları
Ramsami and King [8]	Elektrik yük talebi	Fuzzy temelli adaptif ağlar, YSA, RNN	Tarihsel elektrik verileri
Huang vd. [9]	Pik Yük	PSO tarafından optimize edilen SVR	Gerçek yük veri seti
Fan vd. [10]	Kısa dönem yük tahmini	Rastgele Orman	Saatlik yük veri setleri
Dua vd. [11]	Kısa dönem yük tahmini	SVR-Derin sinir ağları (DSA)	Hava ve zaman parametreleri
İbrahim vd. [12]	Kısa dönem yük tahmini	LSTM ve derin öğrenme	Yük ve sıcaklık parametreleri
Dhaval ve Deshpande [13]	Kısa dönem yük tahmini	ÇLR	Geçmiş tüketim değerleri
Tosun vd. [14]	Kısa dönem yük tahmini	YSA	Geçmiş tüketim değerleri, sıcaklık ve zaman veri setleri

Özkan tarafından 2018 yılında yapılan çalışmada, 1979-2015 yılları arasındaki GSYH, nüfus, ithalat ve ihracat verileri kullanılarak PSO ve genetik algoritma (GA) teknikleri ile Türkiye'nin 2018-2050 yılları arasındaki enerji talep tahmini yapılmıştır. 4 farklı senaryo oluşturulmuştur. Bu 4 senaryoya ait yüzde doğruluk ölçüt değerlerine bakıldığında tahmin doğruluğu açısından GA'ya ait değerlerin PSO algoritmalarının gerisinde kaldığı gözlemlenmiştir [15].

Martins ve arkadaşları tarafından 2019 yılında yapılan çalışmada, Ogun Eyaletindeki 10 yıllık enerji talep tahminini yapmak için LR tekniği kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlarda enerji talebinde 2028 yılına kadar %53'lük bir artış göstereceği gözlemlenmiştir. Bu sonuçların operasyonel ve planlama faaliyetleri için İbadan Elektrik Dağıtım A.Ş.'ye (IBEDC) çok faydalı olacağı anlaşılmıştır [16].

Yakut ve Özkan tarafından 2020 yılında yapılan çalışmalarında, Enerjinin stratejik bir konumda olduğu günümüz dünyasında Türkiye'de 2018-2050 yılları arasında gereksinim duyulan enerji tüketimini tahmin etmek için PSO ve GA modelleri kullanılmıştır. İthalat, nüfus, GSYH ve ihracat parametrelerinin 1979-2017 yılları arasındaki verileri kullanılmıştır. Enerji tahmininde optimal değere ulaşabilmek için hızlı ekonomik gelişmeler, hükümet kararları, teknoloji ve diğer faktörlerden oluşan 4 farklı senaryo oluşturulmuştur. Çalışmalar neticesinde PSO ve GA

algoritmalarının ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) değerlerinin %20'nin altında olması nedeniyle iyi sonuç veren modeller arasında yer alabileceği sonucuna ulaşmışlardır. MSE, MAPE ve RMSE sonuçları göz önünde bulundurulduğunda, PSO'nun GA'ya göre daha optimal sonuçlar verdiği görülmüştür [17].

Kayakuş tarafından 2020 yılında yapılan çalışmada, Türkiye'de Ocak 2016-Mart 2020 tarihleri arasındaki dönemlerde gerçekleşen aylık elektrik tüketim verileri kullanılarak enerji tahmini için bir model geliştirilmiştir. Bu modelde destek vektör regresyonu (DVR) ve yapay sinir ağları (YSA) kullanılmıştır. 15 bağımsız değişken değeri girdi olarak kullanılmış ve Türkiye'nin enerji tüketim değeri bağımlı değişken olarak tahmin edilmiştir. Çalışma verileri neticesinde YSA yönteminde DVR yöntemine göre daha başarılı sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir [18].

Karaman ve Sağlam tarafından 2022 yılında yapılan çalışmada; PSO ve LR yöntemleri kullanılarak kişi başına tüketilecek enerji talebi tahmin edilmiştir. Hem PSO hem de LR Yöntemleri ile elde edilen sonuçlar MSE, RMSE ve MAE gibi istatistiksel hatalar kullanılarak analiz edilmiştir. Bu yöntemlerin analizi için 1980 ile 2019 yılları arasındaki nüfus, ithalat, ihracat ve GSYH gibi veriler giriş parametreleri olarak kullanılmıştır. Çalışmada; PSO yönteminin diğer modele göre daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır [19].

Karaman ve Sağlam tarafından 2022 yılında yapılan çalışmada; GSYH, ithalat, ihracat ve nüfus gibi çeşitli giriş parametreleri kullanılarak Türkiye'nin yıllık tepe yükünü tahmin etmek için YSA ve LR yöntemleri MATLAB ortamında tasarlanmış ve uygulanmıştır. Çalışmada kullanılan modeller R<sup>2</sup> değerleri dikkate alındığında kullanılabilir sonuçlar göstermiş ancak YSA modelinin performansının LR modeline göre daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır [20].

Türkiye'nin gelecek enerji talebini tahmin etmek için Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı da bazı çalışmalar yapmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2035 yılında Türkiye'nin enerji talebinin 510,5 TWh olacağını öngörmektedir [21].

Derlediğimiz literatür araştırması sonucunda, Türkiye anakarasının 2040 yılına kadar enerji talep tahminine yönelik standart bir veri kümesi ve çözüm yönteminin ele alınmadığı, genellikle çalışmalarda yerel veriler üzerinden farklı algoritmalar ile kısa dönem tahminler yapıldığı gözlemlenmiştir.

Türkiye'nin sosyoekonomik ve geçmiş enerji tüketimleri göz önünde bulundurularak temel bir senaryo oluşturulmuştur. Bu temel senaryo kullanılarak giriş veri setleri elde edilmiştir. Bu veri setlerini işleyerek gelecek enerji tahminini yapmak için PSO, LR ve GSR algoritmaları kullanılmıştır. Bu algoritmaların tahmin performansını değerlendirmek üzere RMSE, MSE, MAE ve R<sup>2</sup> metrikleri kullanılmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde veri setinin hazırlanma süreci, kullanılan yöntemler ve bu yöntemlerin performanslarını ölçmek için kullanılan hata metriklerinden bahsedilecektir.

### 2.1. Veri Seti

Bu çalışmada ilk olarak tahmin etmek istediğimiz çıkış değişkeni olan elektrik enerjisi tüketimi, Türkiye Elektrik İletim A.Ş.'den (TEİAŞ) 1980-2019 dönemi baz alınarak yıllık olarak toplanmıştır [22]. İkinci adım olarak giriş değişkenleri olarak nüfus verisi Türkiye İstatistik Kurumundan (TÜİK) [23], ihracat, ithalat ve GSYH, Dünya Bankasından elde edilmiştir [24].

Modelleri geliştirmek ve eğitmek için, veri ön işleme çok önemli bir ilk adımdır. Başlangıçta, tüm değişkenler birleştirildi ve uygun bir formatta tek bir Excel dosyasında düzenlendi. Dosya daha sonra MATLAB R2019b sürümüne aktarıldı. Daha sonra, tüm veri seti, verilerin kronolojik sırası koruyarak bir eğitim seti (%70), test seti (%20) ve doğrulama seti (%10) olarak bölünmüştür. GSYH, ithalat ve ihracat ekonomik bir göstergedir.

Değişen dünyada nüfusun artması ve yeni teknolojilerin insan yaşamına girmesiyle birlikte enerjiye olan ihtiyaç daha da artmaktadır. Sürdürülebilir kalkınma açısından, gelişmekte olan Türkiye'nin 2023 ve sonrasında artan nüfusunun enerji ihtiyacını büyük ölçüde kendi imkânlarıyla karşılaması beklenmektedir. Bu amaçla Türkiye'nin; Önümüzdeki yıllarda birincil enerji ihtiyacının hesaplanması ve bu ihtiyacın nasıl karşılanabileceğinin araştırılması önemlidir. Tahmin işlemi için Türkiye'nin sosyoekonomik göstergeleri göz önünde bulundurularak Tablo 2'de gösterildiği gibi temel senaryo oluşturulmuştur. Temel senaryo oluşturulurken ithalat ve ihracat büyüme oranları Kıran ve ark.'nın [25] yaptığı çalışmadan, GSYH büyüme oranı Sağlam ve ark.'nın [26] yaptığı çalışmadan ve nüfus artış oranı TÜİK açık veri bankası verilerinden elde edilmiştir.

**Tablo 2.** Türkiye Ankarası giriş değişkenleri senaryoları.

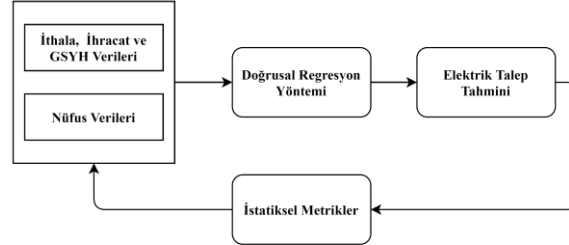
Giriş Değişkenleri	Türkiye Ankarası
	Temel Senaryo
İthalat	5%
İhracat	4.5%
GSYH	5%
Nüfus	0.5%

Bu senaryoya göre veriler yeniden düzenlenerek giriş verileri oluşturulmuştur. Türkiye'nin 2040 yılına kadar ihtiyaç duyacağı enerji LR, GSR ve PSO yöntemleri kullanılarak tahmin edilmiştir. Tahmin performanslarını

değerlendirmek üzere hata metrikleri (MAE,  $R^2$ , RMSE ve MSE) kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

## 2.2. Lineer Regresyon Yöntemi

Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki neden-sonuç ilişkisini matematiksel bir model olarak ortaya koyan yönteme lineer regresyon (LR) modeli denir. Bir LR modeli, bağımsız ve bağımlı değişkenler arasındaki ilişkiyi açıkça tanımlar. Şekil 1'de LR akış şeması gösterilmektedir. Giriş verileri LR yöntemi ile analiz edildikten sonra bir talep tahmini elde edilmektedir.



Şekil 1. LR akış diyagramı.

Bağımlı değişken  $y$ 'nin birden fazla bağımsız değişkenin ( $x_1, x_2, \dots, x_k$ ) bir fonksiyonu olduğu elektrik talebi tahmininde doğrusal regresyon kullanılır. İlişki şu şekilde verilir:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \quad (1)$$

Denklem (1)'de,  $y$  elektrik talebini temsil eder,  $a_0, a_1$  ve  $a_2$  bilinmeyen regresyon katsayıları,  $x_1$  ve  $x_2$  ise dışsal değişkenlerdir.  $a_0, a_1$  ve  $a_2$  her bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerindeki etkisini gösterir. Denklem (2)'de şu şekilde basit bir şekilde ifade edilebilir:

$$y = a + bx_1 + cx_2 \quad (2)$$

Burada,  $a, b$  ve  $c, y$ 'nin ortalama değerini  $x_1$  ve  $x_2$  regresyon parametreleridir [27].

## 2.3. Gauss Süreç Regresyonu

GSR, rastgele değişkenler koleksiyonunu içeren stokastik bir süreç olarak tanımlanan parametrik olmayan bir modeldir. Bu değişkenlerin herhangi bir sonlu grubu ortak bir Gauss/normal dağılıma sahiptir [28]. GSR, küçük verilerde bile başarılı sonuçlar üretebilir. Gauss süreç fonksiyonu  $f(x)$  denklem 3 de verilmektedir.

$$f(x) = GP(m(x), k(x, x')) \quad (3)$$

Burada  $k(x, x')$  kovaryans fonksiyonu,  $m(x)$  ortalama fonksiyonudur. Ortalama fonksiyonu denklem 4'te, kovaryans fonksiyonu ise denklem 5'te verilmektedir.

$$m(x) = E[f(x)] \quad (4)$$

$$k(x, x') = E[(f(x) - m(x))(f(x') - m(x')))] \quad (5)$$

Gauss sürecinin hiper-parametreleri ortalama fonksiyonu ve kovaryans fonksiyonudur. Ortalama fonksiyonu,  $x$  girdisine sahip  $f(x)$  fonksiyonunun beklenen değerini göstermektedir. Ortalama fonksiyonu için güven düzeyinin bir ölçüsü kovaryans fonksiyonudur [29].

## 2.4. Parçacık Sürü Optimizasyonu

Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) Algoritması 1995 yılında Kennedy ve Eberhart tarafından yazılmıştır. PSO, her türlü alandaki optimizasyon problemlerini başarıyla çözen sürü tabanlı stokastik ve akıllı bir algoritmadır [2, 30]. Bu yöntemde, sürü olarak bilinen her olası çözüm, bir popülasyonun parçacıklarını temsil eder. Bu yaklaşımda, parçacığın konumu çok yönlü bir arama bölgesinde optimum yanıtı ve/veya hesaplama kısıtlamalarına ulaşana kadar sürekli olarak değişir. Literatürde verilen bazı çalışmalar, bu yaklaşımın optimizasyon amaçlı etkinliğini ve kullanılabilirliğini göstermiştir [2, 31]. PSO algoritmasında her parçacığın konum ve hız tanımları en önemli parametrelerdir. Aşağıdaki stokastik ve deterministik yenileme kuralları, bir parçacığın hızının ve konumunun nasıl yenilendiğini gösterir. Parçacığın bir sonraki konumunu belirlemek için, parçacığın o noktaya kadarki konumları hakkındaki bilgiler kullanılarak sırasıyla Denklem 6 ve 7 ile hız ve yeni konum vektörü elde edilir.

$$\overline{V}_i^{t+1} = w\overline{V}_i^t + c_1r_1(\overline{P}_i^t - \overline{X}_i^t) + c_2r_2(\overline{G}^t - \overline{X}_i^t) \quad (6)$$

$$\overline{X}_i^{t+1} = \overline{X}_i^t + \overline{V}_i^{t+1} \quad (7)$$

Hız vektörünün 3 bileşeni vardır. Birincisi, hız çarpı  $w$ 'dir. Burada  $w$ , mevcut hızı korumak için gerekli bir terim olan atalet katsayısıdır. Ayrıca mevcut hareket yönünü korumaya çalışır. İkincisi bilişsel bileşendir. Literatürde bireysel bileşenler olarak da adlandırılırlar. Bunun, her bir parçacığın konumunun her bir parçacığın en iyi değerine (PBEST) uzaklığı olduğu söylenebilir. Son bileşene sosyal bileşen denir. Bu bileşen, her parçacığın tüm sürü ekibinin şimdiye kadar bulduğu en iyi değerden (GBEST) ne kadar uzakta olduğunu belirtir. Formüldeki  $r_1$  ve  $r_2$  katsayıları, algoritmayı stokastik yapmak için kullanılan sıfırdan bire değişen katsayılardır. Aynı zamanda,  $c_1$  ve  $c_2$  katsayıları stokastik terimlerin ivmesini ağırlıklandırmak için kullanılır.

Her parçacığın bir sonraki konumunu ( $X_i^{t+1}$ ) bulmak için, bir sonraki iterasyondaki hız değeri ( $V_i^{t+1}$ ) mevcut konumuna eklenir. Konum, hız, PBEST ve GBEST değerleri her yinelemede sürekli olarak güncellenir [2].

## 2.5. Hata Ölçütleri

Hata ölçütleri, MSE, MAE, RMSE, ve determinasyon katsayısını ( $R^2$ ) içerir. MAE ve RMSE, tahmindeki pozitif ve negatif hataların karşılıklı olarak karşılaştırılmasından kaçınarak, sırasıyla tahmin edilen değerlerin gerçek değere yakınlığını ve tutarsızlığını değerlendirir. MSE, tahmin edilen değerlerin gerçek değerden sapmasını yansıtır.  $R^2$ , bağımlı değişkendeki değişikliklerin ne kadarının bağımsız değişkendeki değişikliklerden kaynaklandığını gösterir ve  $1 > R^2 > 0$  arasında değer almalıdır.  $R^2$  değeri 1'e ne kadar yakınsa, regresyon doğrusunun o kadar iyi uyduğu söylenmektedir [2, 32]. Aşağıda sırasıyla  $R^2$ , MSE, MAE ve RMSE'ye ait denklemler verilmektedir.

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^N (x_i^* - \bar{x}_i)(x_i - \bar{x}_i))^2}{\sum_{i=1}^N (x_i^* - \bar{x}_i)^2 \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}_i)^2} \quad (8)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - x_i^*)^2 \quad (9)$$

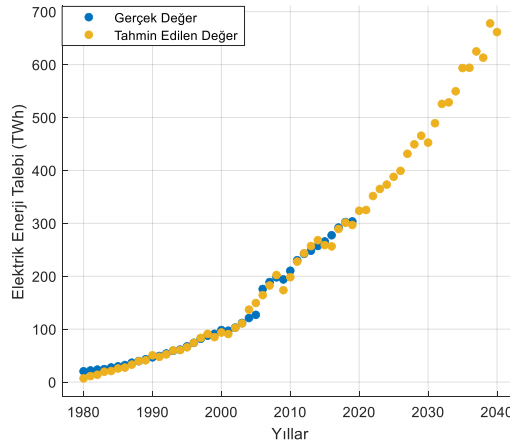
$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - x_i^*| \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^* - x_i)^2} \quad (11)$$

Denklemlerde  $x_i$ ,  $x_i^*$ ,  $\bar{x}_i$ ,  $\bar{x}_i^*$ , N sırasıyla gerçek değeri, tahmin edilen değeri, ortalama gerçek değeri, ortalama tahmin edilen değeri ve örneklem büyüklüğünü temsil eder.

## 3. DENEYSEL SONUÇLAR

Türkiye'nin 2023 ve sonrasında artan nüfusu göz önünde bulundurularak enerji ihtiyacını büyük ölçüde kendi imkânlarıyla karşılaması gerekmektedir. Bu amaçla Türkiye'nin; Önümüzdeki yıllarda birincil enerji ihtiyacının hesaplanması ve bu ihtiyacın nasıl karşılanabileceğinin araştırılması önemlidir. LR modeli kullanılarak elde edilen elektrik enerjisi talep tahmini ile gerçek değer arasındaki grafik Şekil 2'de gösterilmektedir.



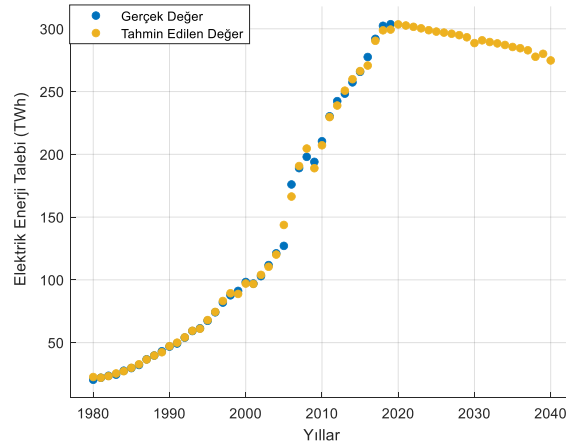
Şekil 2. Gerçek değer ve LR model tahmin değeri.

Şekilden görüleceği üzere 2019 yılına kadar gerçek değer ile LR model tahmin değerinin örtüştüğü görülmektedir. LR model 2020-2040 yılları arasında temel senaryoya göre lineer bir şekilde arttığı görülmektedir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının 2035 yılında Türkiye enerji tüketiminin 510,5 TWh olacak tahmini göz önünde bulundurulduğunda, LR yönteminin benzer tahmin performansını tutturduğu söylenebilir.

GSR modeli kullanılarak elde edilen elektrik enerjisi talep tahmini ile gerçek değer arasındaki grafik Şekil 3'te gösterilmektedir.

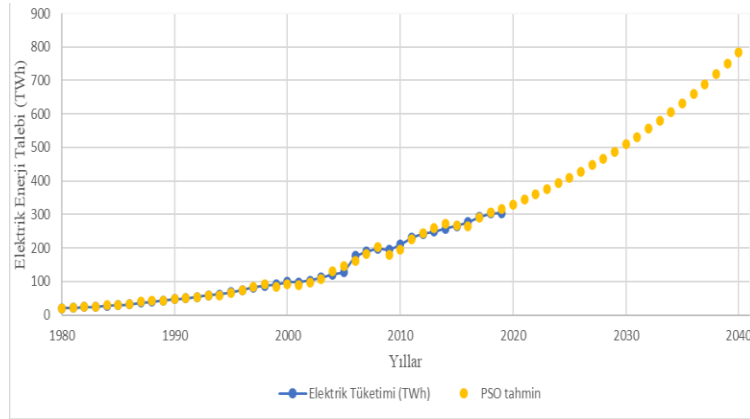
Şekilden görüleceği üzere 2019 yılına kadar gerçek değer ile GSR model tahmin değerinin örtüştüğü görülmektedir. GSR model tahmin grafiği 2020-2040 yılları arasında temel senaryoya göre azalan eğimle devam ettiği görülmektedir.





Şekil 3. Gerçek değer ve GSR model tahmin değeri.

PSO modeli kullanılarak elde edilen elektrik enerjisi talep tahmini ile gerçek değer arasındaki grafik Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Gerçek değer ve PSO model tahmin değeri.

Şekilden görüleceği üzere 2019 yılına kadar gerçek değer ile PSO model tahmin değerinin örtüştüğü görülmektedir. 2020 yılından sonra ise lineere yakın bir artışla devam ettiği görülmektedir. Her üç yöntem için istatistiksel analiz ve hata metrik sonuçları Tablo 3'te gösterilmektedir. Bu değerler 1980-2019 yılları arasındaki gerçek değerler ve yöntemlerin tahmin performans sonuçları kullanılarak elde edilmiştir.

Tablo 3. Anakara istatistiksel analiz sonuçları.

	Metotlar	Değerler
<b>R<sup>2</sup></b>	GSR	0.9983
	LR	0.9923
	PSO	0.9938
<b>RMSE</b>	GSR	3.8141
	LR	8.5212
	PSO	7.3256
<b>MSE</b>	GSR	14.548
	LR	72.612
	PSO	53.665
<b>MAE</b>	GSR	2.1852
	LR	6.2095
	PSO	5.2215

Tablo 3 incelendiğinde her üç yöntemin geçmiş 1980-2019 yılları arasındaki tahmin performanslarının iyi olduğu görülmektedir. Hata metriklerine bakıldığında geçmiş 1980-2019 yılları arasında GSR modelinin sonuçları, diğer yöntemlere göre daha iyi olduğu söylenebilir. Ancak bu GSR yönteminin gelecek enerji tahmininde iyi bir yöntem olduğu anlamına gelmez. Daha sağlıklı bir değerlendirme bütün sonuçlara bakılarak, sonuç ve değerlendirme kısmında yapılmıştır.

Bağımsız girdi değişkenleri ile bağımlı elektrik tüketimi arasındaki ilişki Tablo 4'te gösterilmektedir. Elektrik tüketimi ile ihracat arasında güçlü bir ilişki (0.9910) olduğu görülmektedir.

**Tablo 4.** Bağımsız değişkenler ve bağımlı değişken arasındaki korelasyon.

Değişkenler	İthalat	İhracat	GSYH	Nüfus	Elektrik Tüketimi
İthalat	1	0.9895	0.9460	0.9232	0.9742
İhracat	0.9895	1	0.9727	0.9478	0.9910
GSYH	0.9460	0.9727	1	0.9684	0.9892
Nüfus	0.9232	0.9478	0.9684	1	0.9669
Elektrik Tüketimi	0.9742	0.9910	0.9892	0.9669	1

Elektrik tüketimi ile ihracattan sonra en güçlü ilişki sırasıyla GSYH, ithalat ve nüfus'tur. Aynı şekilde ithalat ile ihracat arasında güçlü bir ilişki (0.9895) olduğu görülmektedir.

#### 4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada 1980-2019 yılları arasında geçmiş nüfus, ihracat, ithalat, GSYH giriş verileri olarak ve enerji tüketimi çıkış verisi olarak belirlenmiştir. Bu giriş ve çıkış verileri kullanılarak PSO, LR ve GSR algoritmaları vasıtasıyla Türkiye'nin 2020-2040 yılları arasındaki enerji talep tahmini yapılmıştır. Tablo 3'teki sonuçlara ve Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4'e bakıldığında geçmiş 1980-2019 yılları arasında her üç yöntemin de başarılı sonuçlar gösterdiği anlaşılmaktadır. Ancak gelecek 2020-2040 yılları arasında Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4'e bakıldığında GSR yöntemi tahmin grafiğinin düşme eğilimi göstermesi, tahmin performansının kötü olduğu anlamına gelmektedir. LR ve PSO yöntemleri incelendiğinde gelecek 2020-2040 yılları arasında daha gerçekçi ve doğru tahmin performansı sergiledikleri söylenebilir. LR ve PSO'nun R<sup>2</sup> değerleri sırasıyla 0.9923 ve 0.9938'dir. Tablo 3'de görüleceği üzere LR ve PSO yöntemlerinin hata metriklerinin düşük olması bu yöntemlerin tahmin performansının iyi olduğunu gösteren bulgulardır.

Korelasyon matrisine bakıldığında elektrik tüketimi ile ihracat arasında güçlü bir ilişki (0.9910) olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla ihracat, üretimi yani sanayiye yansıtarak elektrik tüketimi üzerinde en çok etkiye sahip giriş parametresi denilebilir. Yine ithalat ve ihracat arasında güçlü bir ilişki (0.9895) vardır.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının enerji tahmin çalışmaları ile kıyas edildiğinde PSO ve LR yöntemlerinin Türkiye'nin gelecek enerji talep tahmininde kullanılabileceği söylenebilir. İleriki çalışmalarda hibrit makine öğrenme yöntemleri kullanılarak enerji talep tahmini yapılabilir.

#### Yazar Katkıları

Yazarlar makaleye eşit derecede katkı sağlamıştır.

#### Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler

#### KAYNAKÇA

- [1] M.E. Gunay "Forecasting annual gross electricity demand by artificial neural networks using predicted values of socio-economic indicators and climatic conditions: Case of Turkey", Energy Policy, vol. 90, no.1, pp. 92-101, 2016.
- [2] M. Sağlam, C. Spataru and O.A. Karaman "Electricity Demand Forecasting with Use of Artificial Intelligence: The Case of Gokceada Island", Energies, vol.15 no.16, pp. 1-22, 2022.
- [3] A. Zeng, H. Ho and Y. Yu "Prediction of building electricity usage using Gaussian Process Regression", Journal of Building Engineering, vol.28, no.1, pp.1-8, 2019.
- [4] D. Sen, K.M. Tunç and M.E. Günay "Forecasting electricity consumption of OECD countries: A global machine learning modeling approach", Util. Policy, vol. 70, no. 1, pp. 1-15, 2021.
- [5] H. Zhai, and C. Jinxing "Combining PSO-SVR and Random Forest Based Feature Selection for Day-ahead Peak Load Forecasting", Engineering Letters vol. 30, no. 1, pp. 1-7, 2022.
- [6] M.P. Raju and A.J. Laxmi "IOT based online load forecasting using machine learning algorithms", Procedia Computer Science, vol. 171, no.1, pp 551-560, 2020.
- [7] Y. Lu and G.A. Wang "Load forecasting model based on support vector regression with whale optimization algorithm", Multimed Tools Appl vol. 82, no. 1, pp. 9939-9959, 2023.
- [8] P. Ramsami, and R.T.A. King "Neural Network Frameworks for Electricity Forecasting in Mauritius and Rodrigues Islands. In Proceedings of the 2021" 2021 IEEE PES/IAS Power Africa, pp. 1-5, 2021.
- [9] Y. Huang, N. Hasan, C. Deng, and Y. Bao "Multivariate empirical mode decomposition based hybrid model for day-ahead peak load forecasting", Energy, vol. 239, pp. 1-15, 2022.
- [10] G. F. Fan, L. Z. Zhang, M. Yu, W. C. Hong and S. Q. Dong "Applications of random forest in multivariable response surface for short-term load forecasting", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 139, pp. 1-17, 2022.

- [11] S. Dua, S. Gautam, M. Garg, R. Mahla, M. Chaudhary and S. Vadhera “Short Term Load Forecasting using Machine Learning Techniques”, 2022 2nd International Conference on Intelligent Technologies (CONIT), pp. 1-6, 2022.
- [12] B. Ibrahim, L. Rabelo, E. Gutierrez-Franco and N. Clavijo-Buritica “Machine Learning for Short-Term Load Forecasting in Smart Grids”, *Energies*, vol. 15, no. 21, pp. 1-19, 2022.
- [13] K.A. Abdulsalam, and O.M. Babatunde “Electrical energy demand forecasting model using artificial neural network: A case study of Lagos State Nigeria”, *International Journal of Data and Network Science*, vol. 3, no. 4, pp. 305–322, 2019.
- [14] S. Tosun, A. Öztürk, and F. Taşpınar “Short Term Load Forecasting for Turkey Energy Distribution System with Artificial Neural Networks”, *Tehnički vjesnik*, vol. 26, no. 6, pp. 1545-1553, 2019.
- [15] E. Özkan “Parçacık Sürü Optimizasyonu ve Genetik Algoritma Kullanarak Türkiye'nin 2050 Yılına Kadar Enerji Tüketim Tahmininin Yapılması”, *Yüksek Lisans Tezi, Osmanije Korkut Ata Üniversitesi, Türkiye*. pp. 59-60, 2018.
- [16] O. Martins, O.O. Ade-Ikuesan, and A. Oyedeji “Ogun Eyaletinde doğrusal regresyon uzun vadeli enerji talep tahmini modellenmesi”, *Nijerya Uygulamalı Bilimler ve Çevre Yönetimi Dergisi*, vol. 23, no. 4, pp. 753, 2019.
- [17] E. Yakut, ve E. Özkan “Parçacık Sürü Optimizasyonu ve Genetik Algoritma Kullanılarak Ekonomik Göstergelerle Enerji Tüketim Tahmininin Modellenmesi: 1979-2050 Yılları Arasında Türkiye'de Bir Uygulama”, *Alfanümerik Günlük*, vol. 8, no.1, pp. 59-78, 2020.
- [18] M. Kayakuş “The Estimation of Turkey's Energy Demand Through Artificial Neural Networks and Support Vector Regression Methods”, *Alphanumeric Journal*, vol. 8, no. 2, pp. 227-236, 2020.
- [19] Ö.A. Karaman, and M. Sağlam “Performance Analysis of Modern Methods For Estimating Electricity Energy Consumption Per Capita”, *International Informatics Congress (IIC2022)*, pp. 20-25, 2022.
- [20] Ö.A. Karaman, and M. Sağlam “Performance Analysis Of Modern Methods For Estimating Instantaneous Peak Load”, *International Informatics Congress (IIC2022)*, pp. 25-30, 2022.
- [21] <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik> (Erişim: 10 Haziran 2023).
- [22] Türkiye Elektrik İletim A.Ş. Erişim adresi: <https://www.teias.gov.tr/enUS/interconnections> (Erişim: 10 Mayıs 2023).
- [23] Türkiye İstatistik Kurumu. Erişim adresi: <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=nufus-ve-demografi-109&dil=1> (Erişim: 10 Mayıs 2023).
- [24] World Bank, Erişim adresi: [https://data.worldbank.org/?intcid=ecr\\_hp\\_BelTD\\_en\\_ext](https://data.worldbank.org/?intcid=ecr_hp_BelTD_en_ext) (Erişim: 10 Mayıs 2023).
- [25] M.S.Kıran, E. Özceylan, M. Gündüz, and T. Paksoy “A novel hybrid approach based on particle swarm optimization and ant colony algorithm to forecast energy demand of Turkey”, *Energy conversion and management*, vol. 53, no. 1, pp. 75-83, 2012.
- [26] M. Sağlam, C. Spataru, O.A. Karaman “Forecasting Electricity Demand in Turkey Using Optimization and Machine Learning Algorithms”, *Energies*, vol. 16, no. 11, p. 4499, 2023.
- [27] M. Binici “Turkey's energy consumption forecast by using mathematical modeling”, *Master Thesis, Sivas Cumhuriyet University, Turkey*, pp. 50-51, 2019.
- [28] Y. Guan, D. Li, S. Xue, and Y. Xi “Feature-fusion-kernel-based Gaussian process model for probabilistic long-term load forecasting”, *Neurocomputing*, vol. 426, pp. 174-184, 2021.
- [29] M. Korkmaz, A. Doğan and V. Kırmacı “Karşıt Akışlı Ranque – Hilsch Vorteks Tüpünün Lineer Regresyon, Destek Vektör Makineleri ve Gauss Süreç Regresyonu Yöntemi ile Performans Analizi”, *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 8, pp. 361-370, 2022.
- [30] A. Anand, and L. Suganthi “Hybrid GA-PSO Optimization of Artificial Neural Network for Forecasting Electricity Demand”, *Energies (Basel)*, vol. 11, no. 4, pp. 1-15, 2018.
- [31] W.Chen, M. Panahi, H.R. Pourghasemi “Performance evaluation of GIS-based new ensemble data mining techniques of adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) with genetic algorithm (GA), differential evolution (DE), and particle swarm optimization (PSO) for landslide spatial modelling”, *CATENA*, vol. 157, pp. 310–324, 2017.
- [32] W. Zhang, W. Zhang, J. Wang and X. Niu “Hybrid system based on a multi-objective optimization and kernel approximation for multi-scale wind speed forecasting”, *Applied Energy*, vol. 277, pp. 1-19, 2020.



## Bulanık TOPSIS Yöntemiyle Rüzgar Türbin Kanat Atıkları İçin En Uygun Bertaraf Yönteminin Belirlenmesi: Bandırma Örneği

### Determination of the Most Appropriate Disposal Method for Wind Turbine Blade Waste by Fuzzy TOPSIS Method: Bandırma Case

<sup>1</sup>Samet ÖZTÜRK <sup>2</sup>Kübra ATALAY

<sup>1,2</sup> Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 16310, Bursa

<sup>1</sup>samet.ozturk@btu.edu.tr, <sup>2</sup>kubraatalay71@gmail.com

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 31 May 2023

Accepted : 7 August 2023

##### Keywords:

Bandırma, Wind Turbine  
Blade Waste, Fuzzy  
TOPSIS

#### ABSTRACT

In this study, it is aimed to determine the most appropriate method of disposal of blade waste, which is prominent in the literature, with a Multi-Criteria Decision Making method selected for wind turbines that will expire in the near future. For this purpose, the Fuzzy TOPSIS method was applied. In order to implement Fuzzy TOPSIS in the study, a questionnaire study was conducted with 5 experts in solid waste management to evaluate the relevant criteria. For the study, a wind power plant in Bandırma region, which is close to the end of its life, is taken as an example. As a result of the study, the suitability of the disposal methods of wind turbine blade wastes are as follows, reuse in art and buildings, use as aggregate in concrete, energy production in cement factories and disposal in landfills, respectively. It is thought that this study will be beneficial to wind farm operators, municipalities and turbine blade manufacturers.

© 2023 Bandırma Onyediy Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 31 Mayıs 2023

Kabul : 7 Ağustos 2023

##### Anahtar Kelimeler:

Bandırma, Rüzgar Türbin  
Kanat Atıkları, Bulanık  
TOPSIS

#### ÖZET

Bu çalışmada, yakın gelecekte ömrünü dolduracak rüzgar türbinleri için seçilen Çok Kriterli Karar Verme yöntemi ile literatürde öne çıkan kanat atıklarının en uygun bertaraf yönteminin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla Bulanık TOPSIS yöntemi uygulanmıştır. Çalışmada Bulanık TOPSIS'in uygulanabilmesi için katı atık yönetimi konusunda uzman 5 kişi ile ilgili kriterlerin değerlendirilmesi için anket çalışması yapılmıştır. Çalışma için Bandırma bölgesinde ömrünün sonuna yaklaşan bir rüzgar santrali örnek alınmıştır. Çalışma sonucunda, rüzgar türbini kanat atıklarının bertaraf yöntemlerinin uygunlukları sırasıyla sanat ve binalarda yeniden kullanım, betonda agrega olarak kullanım, çimento fabrikalarında enerji üretimi ve düzenli depolama alanlarında bertaraf edilmesi şeklindedir. Bu çalışmanın rüzgar santral işletmecilerine, belediyelere ve türbin kanat üreticilerine faydalı olacağı düşünülmektedir.

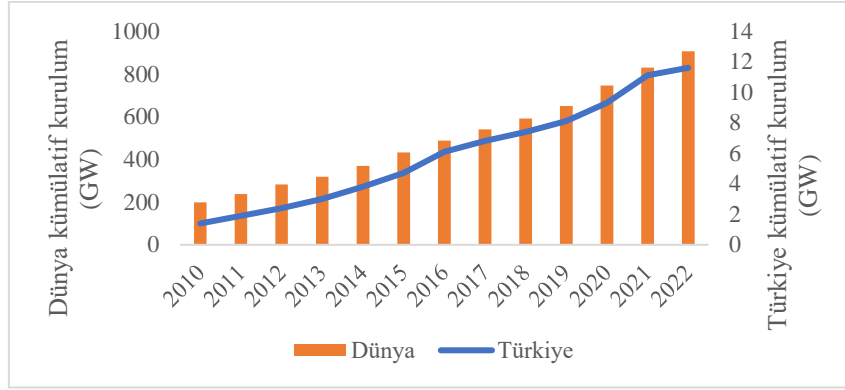
© 2023 Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

## 1. GİRİŞ

Günümüzde enerjiye olan talep her geçen gün artış göstermektedir. Enerji ihtiyacının büyük bir kısmı fosil yakıtların yakılmasıyla karşılanmaktadır. Fosil yakıt yüksek oranlarda karbon ve hidrokarbon içeriğine sahip olan kömür, doğalgaz ve petrol gibi doğal enerji kaynaklarına verilen isimdir. Ayrıca fosil yakıtların tüketimi nüfus ve ekonomik büyümeye bağlı olarak hızlı şekilde artmaya devam etmektedir. Fosil yakıtların yanması ekosistemde olumsuz etkilere neden olmaktadır. Sera gazı emisyonları, hava kirliliği, fosil yakıt kaynaklarının tükenmesi ve yüksek enerji talebi ile enerji sorunlarının üstesinden gelmek için sürdürülebilir ve temiz enerji sistemleri ile yenilenebilir ve alternatif yakıtların geliştirilmesi gereklidir.

Yenilenebilir enerji; sürdürülebilirliği olan doğal kaynaklardan elde edilen enerjiler olarak tanımlanmaktadır. Yenilenebilir enerjiler; güneş, biyokütle, rüzgar, dalga ve jeotermal enerjisi gibi doğada kendiliğinden var olan kaynaklardan elde edilmektedir. Bu kaynaklar, fosil enerji kaynaklarının tersine zamanla tükenmez ve kömür, benzin, doğalgaz gibi yenilenemeyen enerjilere alternatiflerdir. Farklı alanlarda kullanımları mümkündür.

Rüzgar enerjisi, sera etkisi yaratan emisyonların azaltılmasını sağlayan en yaygın yenilenebilir enerji kaynaklarından birini temsil etmektedir. Fosil yakıtların çevreye olan etkileri nedeniyle son yirmi yılda rüzgar enerjisine talep oldukça artmıştır. 2001 yılında küresel rüzgar enerjisi kurulumu 24 GW iken, 2022 yılı itibarıyla 906 GW kurulum ile küresel olarak neredeyse 45 kat olmuştur [1]. Türkiye’de ise 2022 yılı sonu itibarıyla 11 GW’I aşan rüzgar enerjisi kurulu gücün yaklaşık %11’lik kısmını oluşturmaktadır [2, 3]. Şekil 1 dünyada ve Türkiye’de rüzgar enerjisi kurulu gücünün yıllara göre değişimini göstermektedir.



Şekil 1. Türkiye’de ve dünyada rüzgar enerjisi kurulu gücünün yıllara göre değişimi [1, 2].

Türkiye’de ve dünyada enerji ihtiyaçlarının artmasıyla birlikte binlerce rüzgar türbini santralinin faaliyette olduğu ve gün geçtikçe faaliyette olan türbin sayısının artacağı ön görülmektedir. Diğer bir yandan, rüzgar türbinleri ortalama 20 yıllık bir ömre sahiptir ve kullanım ömürleri bittikten sonra sökülüp çoğunlukla katı atık depolama sahalarında bertaraf edilmektedir. Bu da yaşam döngülerinin sonunda rüzgar türbini kanat atıklarının çevresel bir yük oluşturduğunu göstermektedir. Rüzgar türbin kanatları cam veya karbon elyafların termoset reçinelerle takviye edilmiş dayanıklı kompozit malzemelerden üretilmektedir [4]. Bu da rüzgar türbin kanatlarının kolaylıkla geri dönüşümünü zorlaştırmaktadır. Aynı zamanda hacimsel olarak çok geniş alanlar kaplamaları rüzgar türbin kanat atıklarının depolama sahalarında bertarafı konusunda da olumsuz bir durum oluşturmuştur. Bu soruna bir çözüm sağlamak için ülkeler çeşitli uygulamalar başlatmıştır. Örneğin, Avusturya, Finlandiya, Almanya ve Hollanda’da rüzgar türbin kanat atıklarının katı atık depolama sahalarında bertarafı yasaklanmıştır [5]. Bunun yanında rüzgar türbin kanatlarının geri dönüştürülebilir malzemelerden yapılması için birçok çalışma başlatılmış ve devam etmektedir [6].

Dünyada rüzgar türbin katı atıklarının birikim tahminiyle alakalı çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Buna göre dünyada 2050 yılında yıllık 2,9 milyon ton ve kümülatif olarak 2050 yılına kadar 43 milyon ton rüzgar türbin kanat atıklarının birikeceği belirtilmiştir [7]. Türkiye’de ise 2020-2039 yılları arasında birikecek rüzgar türbin kanat atığı 80.500 ton olarak belirlenmiştir [8]. Ortaya çıkacak bu kanat atıklarının ekonomiye katkı sağlayabilmesi ve çevresel olumsuz etkilerinin minimum indirgenebilmesi için de literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Jensen ve Skelton (2018) rüzgar türbin kanat atıkları için geri kazanım ve geri dönüşüm metodlarını araştırmış ve mekanik ve termo-kimyasal yöntemler önermiştir [9]. Beton içerisinde değerlendirme, enerji geri kazanımı, yeniden sanat ve bina yapılarında kullanım gibi yöntemler literatürde sıkça araştırılmıştır. Bu çalışmada, rüzgar türbin kanat atıklarının en uygun şekilde bertarafını araştırmak için çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri uygulanmıştır. Örnek bir çalışma için de Balıkesir ili Bandırma ilçesinde bulunan bir rüzgar türbin santralinde yakın gelecekte ömrünü tamamlayacak olan rüzgar türbini kanat atıkları temel alınmıştır. Çok kriterli karar verme metodu uygulanırken beş katı atık yönetimi uzmanına kriterlerin ağırlıkları ve alternatiflerin ağırlıkları ile karşılaştırmalı anket çalışması uygulanmıştır. Alternatiflerin verilerle desteklenebilecek karşılaştırmaları bu şekilde elde edilmiştir. Son olarak alternatifler öncelik sırasına göre Çok Kriterli Karar Verme yöntemlerinden biri olan Bulanık TOPSIS yöntemi uygulanarak belirlenmiştir.

Bu çalışmanın amacı, Türkiye'de yakın gelecekte kullanımdan kaldırılacak olan kanat atıklarının en uygun bertaraf yöntemini belirlemektir. Bu çalışmanın yenilikçilik özelliği ise Türkiye'de ilk kez bir santral üzerinde en uygun rüzgar türbin kanat atık bertaraf metodunun belirlenmiş olmasıdır.

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Literatürde rüzgar türbin kanat atıklarının geri dönüşüm yöntemleriyle ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Ramirez-Tejeda vd. (2017), ABD'de rüzgar türbini kanatlarının imhasının mevcut durumunu araştırmış ve depolama sahalarında bertaraf yönetiminin maliyet açısından en uygun olduğunu, malzeme ve enerji geri kazanımı için termal mekanik ve kimyasal süreçlerde olumsuzluklar taşıdığını belirtmiştir [10]. Atık maddeler enerji üretmek için bir kaynak olarak değerlendirilebilir. Özellikle çimento fabrikalarında alternatif yakıtların ikamesi olarak, doğalgaz ve kömür gibi birincil yakıtlar yerine atıktan türetilmiş yakıtlar, plastik, tekstil vb. malzemelerin enerji eldesinde kullanılması tasarruf sağlamaktadır. Türbin kanat atıkları enerji üretmek için veya atığın hacmini azaltmak için yüksek sıcaklıkta yakılabilir. Kanat atıklarının mekanik geri dönüşümü sırasında düşük enerji ihtiyacı gerektirdiğinden ve kimyasal işlemler içermediğinden dolayı tercih sebebidir. Piroliz, enerji geri kazanımı ve akışkan yatak işlemi gibi termal işlemlerle geri dönüşüm sağlayan yöntemleri inceleyen çalışmalar da vardır. Nagle et al. (2020) çimento üretiminde yakıtın yerini almak için türbin kanat atığının kullanılması, depolama işleminden 6 kat daha faydalı olduğunu ileri sürmektedir [11]. Fonte ve Xydis (2021) ilk olarak çeşitli rüzgar türbin kanatları üreticisi olan firmaların kanat üretiminde kullandıkları materyallere değinmiştir [12]. Daha sonrasında mekanik öğütme ile geri kazanılmış ürünler, piroliz ve solvoliz ile geri kazanılmış ürünler ve geri kazanılan malzemelerin uygulamalarından bahsedilmiştir [12].

Rüzgar türbini kanat atıklarının kimyasal veya termal işlemlerle küçük parçacıklara öğütülmesi, parçalanmasıyla ya da toz haline getirilmesiyle yeni malzemelerin üretiminde dolgu maddesi olarak kullanılmak üzere geri dönüştürülmesine yönelik birçok yöntem geliştirilmiştir [13]. Yağlakçı ve Çelikaş (2018) rüzgâr türbin kanatlarının bünyesinde bulunan kompozit malzemelerin dayanım özelliklerin artırılması için çalışmalar yapmışlardır [14]. Mevcutta bulunan ve sonradan eklenen malzemelerin oluşturdukları numunelerin test edilmesiyle karşılaştırma gerçekleştirmişlerdir [14]. Sonuçlar olarak mevcutta bulunan cam-karbon hibrit malzemenin cam elyaf takviyeli malzemelere göre dayanımının daha yüksek durumda olduğu saptanmıştır [14]. Cousins ve diğ. (2019), cam elyaf takviyeli termoplastik reçine ile üretilen kompozit rüzgar türbini kanat bileşenlerinin geri dönüşümünün fizibilitesi araştırılmıştır. Rüzgar türbin kanat atıklarının öğütülmüş hali çekme deneyine tabi tutulmuştur [15]. Çözünme ile ayrılmış bir kompozit parçadan geri kazanılan cam elyaf fitillerinin, aynı materyalin işlenmemiş numunelerinden alınan fitillere kıyasla eşit gerilme mukavemetine ve sadece %12 azaltılmış sertliğe sahip olduğu gösterilmiştir [15]. Mamanpush vd. (2018), geri dönüştürülmüş rüzgar türbini malzemesi ve bir poliüretan yapıştırıcı kullanılarak üretilen bir dizi ikinci nesil kompoziti araştırmıştır [16]. Geri dönüştürülmüş malzeme ilk önce bir çekiçli değirmende çeşitli elek boyutlarında ufalanmış, reçineleştirilmiş ve nihai kalınlığa kadar sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir [16]. Daha sonrasında parçacık boyutu, nem içeriği ve reçine içeriği, geri dönüştürülmüş kompozitlerin özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiş. Elde edilen sonuçlarda, katma değerli yüksek performanslı kompozit üretmek için rüzgar türbini kanadının geri dönüştürülmesinin mümkün olduğunu göstermiştir [16]. Böylelikle atıkların kullanım ömrünün tamamlanmasından sonra yeniden değerlendirilerek mimari dekorasyon, oyun alanları, köprüler, yürüyüş yollarında kullanılabilir olduğu belirtilmiştir [16].

Bazı araştırmacılar da, betonda ve beton-polimer kompozitte dolgu maddesi olarak mekanik olarak işlenmiş türbin kanat atıklarının kullanımını incelemiştir [17]. Mekanik işleme (toz haline getirme veya parçalama) ile ilgili sorun, türbin kanat atıklarının büyük bir kısmının termoset plastiklerden oluşmasıdır. Türbin kanatlarının öğütülmüş hali betonda kullanıldığında, betonun yüksek alkalinite özelliği nedeniyle zarar görür [17]. Dayanımı ve sertliği düşük olan reçine parçacıkları betonun basınç dayanımı önemli oranda azaltır [17]. Türbin kanat atıklarının daha büyük parçalara ayrılarak beton içerisinde kullanılması, küçük yüzey alanı ve daha az enerji gerektirdiğinden avantaj sebebidir. Bu çalışmalara örnek olarak cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) kompozit malzemelerden yapılmış bir rüzgar türbini kanat kabuğu, mekanik olarak küçük parçalara ayrıldıktan sonra beton karışımlarındaki kaba agreganın hacimce %5 ve %10'unu değiştirmek için kullanılmış [13]. İğnelerin (ince çubuk şeklindeki türbin kanat atıkları) taze betonun stabilitesini ve işlenebilirliğini olumsuz yönde etkilemediği tespit edilmiştir. İğnelerin eklenmesi betonun basınç, çekme ve eğilme dayanımı üzerinde kayda değer bir etkiye sahip olmamasına rağmen, enerji emme kapasitesinde (tokluk) kontrol numunelerinde 1,2 J'den %10 artışa sebep olduğu sonucuna varılmıştır [13]. Baturkin vd. (2021) yaptıkları çalışmada, rüzgar türbin kanatlarını toz, agrega ve lif olarak üç farklı şekilde betona ilave ettikten sonra etkileri çeşitli analiz yöntemleri ile incelemiştir [18]. Yapılan araştırmanın sonucunda saf türbin kanat atığı tozunun dahil edilmesi, esas olarak yüksek organik içeriğin, özellikle de çimento hidratasyon kinetiğini engelleyen polisakkarit içeren ahşaptan dolayı betonun basınç ve eğilme kapasitesinde önemli bir azalmaya neden olduğu, türbin kanat atığının elyaf takviyesi olarak betona dahil edildiğinde, basınç dayanımında gözle görülür bir düşüş olmaksızın eğilme kapasitesinde %15'e varan bir artış sağlandığı, agrega şeklinde eklenmesinin, pürüzsüz yüzeyi nedeniyle daha düşük basınç ve eğilme mukavemetleri ile sonuçlanmış ve bu da matris ile daha düşük yapışmaya ve düşük mukavemetli ara yüzey geçiş bölgesi yaratılmasına yol açtığı gözlenmiştir [18].

Türkiye’de rüzgar türbin kanat atıklarının yönetimiyle alakalı yapılmış çalışmalar oldukça az sayıdadır. İzmir şehrindeki tüm santrallerde açığa çıkacak rüzgar türbin kanat atıklarını kapsayan çalışma beton içerisinde agrega olarak değerlendirme yönteminin İzmir şehri için uygun olduğunu belirlemiştir [8]. İzmir Kalkınma Ajansı (2021) rüzgar türbin kanadı geri kazanım tesisi fizibilitesi çalışması yapmıştır. Yapılan çalışmada türbin kanat atıkları çimento üretim tesisleri için yakıtlara dönüştürülerek ekonomik kazanımın mümkün olduğu belirtilmiştir [4]. Rüzgar türbin kanat atıkları yukarıda da bahsedildiği üzere birçok farklı yöntemle bertaraf edilebilmektedir. Bu durumda her bir yerel koşul için en uygun yöntemin belirlenmesi gereksinimi doğmaktadır. Literatürde çok alternatifli ve birden çok kriterin etkili olduğu karar verme durumunda Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) metodlarının kullanıldığı görülmektedir. Korkmazer (2015) tehlikeli atık oluşumu söz konusu olan tesislerde atığın bertarafını sağlayan yükleniciler arasında ekonomik ve çevreye zararı en az olan bertaraf firmasının seçilmesi konusunda çalışma yapmıştır [19]. Çalışmada ÇKKV yöntemlerinden Analitik Serim Süreci kullanılmıştır. İlk olarak yüklenici firma ağırlıkları hesaplanmış ve kurulan matematiksel model kullanılarak tehlikeli atık türlerinden hangisinin hangi atık bertaraf firmasına verileceği belirlenmiştir [19]. Hanan vd. (2012), İngiltere’de bulunan Isle of Wight adasında atık kağıt yönetimi için ÇKKV yöntemini kullanmıştır [20]. Bu çalışmada bir panel düzenlenmiş olup, yedi adet geri kazanım, geri dönüşüm ve bertaraf alternatifi sunulmuştur [20]. Ayrıca yedi adet ekonomik, çevresel ve sosyal kriter ışığında değerlendirmeler yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda geri kazanım ve gazifikasyon yüksek puanlar almıştır. ÇKKV yönteminin atık yönetimi kararında etkili bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır [20]. Ekmekçioğlu vd. (2010) ÇKKV yöntemlerinden Bulanık AHS ve Bulanık TOPSİS kullanarak kentsel katı atıkların bertaraf yöntemleri ve yer seçimi belirlenmiştir [21]. Bertaraf yöntemi için 10 kriter ve 4 alternatif, yer seçimi için 8 kriter ve 4 alternatif kullanılmıştır [21]. Eskandari vd. (2012) İran’da Marydasht bölgesinin katı atıkları için en iyi bertaraf yeri seçimi çalışmaları yapmıştır [22]. Entegre ÇKKV yöntemiyle katı atık bertaraf yeri ekonomik, kültürel ve çevresel yönünden değerlendirilmiştir [22]. Günümüzde meydana gelen hızlı değişimlerden dolayı karar verme süreçlerinde belirsizlikler oluşmaktadır. Bu belirsizlikler karar vermeyi zorlaştırmaktadır. Karar verme sürecinde gerekli olan verilerin toplanması için doğru ve yeterli zaman olmadığından dolayı bilimsel yöntemlerden yararlanılarak analizlerin yapılması gerekmektedir [23]. Bu çalışmada literatürde bulunan rüzgar türbin kanat atıkları için en uygun bertaraf yönteminin tespiti eksikliği metodolojik yeni bir yaklaşımla giderilmeye çalışılmış ve rüzgar santrallerinin yoğun olarak bulunduğu Bandırma bölgesinde ilk defa uygulaması gerçekleştirilmiştir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu kısımda uygulanan yöntem ve örnekleme alanı açıklanmıştır. İlk olarak ÇKKV yöntemlerinden seçilen yöntem açıklanacaktır, daha sonrasında örnekleme alanı detaylarıyla anlatılacaktır.

#### 3.1. Bulanık TOPSİS Yöntemi

Karar verme süreci genel olarak üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada karar verici, var olan problemin detaylarını, karar değişkenlerini, alternatifleri ve problemi çözmek için gereken parametreleri belirlemelidir. İkinci aşamada, ilk aşamada toplanan bilgilere göre seçenekler belirlenir. Son aşama ise, kararın istenen sonuçla tutarlı olup olmadığını görmektir [24].

ÇKKV yöntemiyle iki veya daha fazla kriterlerin birbirleriyle karşılaştırılması sağlanmaktadır. Seçim sırasında birden fazla kriterin değerlendirilmesi sonucu kriterli karar verme olarak adlandırılmaktadır. Literatüre bakıldığında birden fazla ÇKKV yöntemi mevcuttur. Ancak bu yöntemlerde problemlerin taşıdığı özellikler hemen ortaktır [25].

Çok kriterli karar verme yöntemleri arasında AHP, SAW, TOPSİS, ELECTRE, PROMETHEE, MAUT, ANP, VIKOR, MOORA MACBETH literatürde sıkça kullanılanlar olarak sayılabilir. Bu çalışmada Bulanık TOPSİS yöntemi ÇKKV metodu olarak kullanılmıştır. Bulanık TOPSİS yöntemi, bulanık ortamlarda çok sayıda kriter, alternatif grup ve az sayıda karar verici ile problem çözmeye uygun çok esnek bir yöntem olduğu için bu çalışmada tercih edilmiştir [26].

Bulanık TOPSİS yönteminde, problemlerin çözümü sırasına sözel değişkenlerinde kullanılabilmesi önemli bir alternatif oluşturmaktadır. Sözel veya dilsel değişkenler, günlük konuşmada kullanılan kelimelerden oluşur. Kelimeler genellikle sayısal ifadelerden daha belirsizdir. Sözel değişkenler bu nedenle nicel olarak tam olarak açıklanamayan ve net olmayan karmaşık sistemleri tanımlamak için kullanılır. Bazı durumlarda, gözlemlenen sorunları modellemek için kullanılan kesin veriler yeterli değildir. Bireysel tercihleri yansıtan kararlar ve yargılar belirsiz olma eğilimindedir ve kesin sayısal verilerden ziyade sözlü ifadeler daha açıklayıcı olmaktadır. Bu nedenle problemler içerisinde bulunan kriterlerin dereceleri ve ağırlıkları sözel ifadelerle açıklanmaktadır. Sözel değişkenler, bulanık bir ortamda kriterlerin ağırlıklarını belirlemek ve kriterlere göre alternatifleri belirlemek için kullanılır [27].

Bulanık TOPSİS yöntemi gerçekleştirilirken ilk olarak karar verici konumundaki kişiler, karar kriterlerinin önem derecelerini subjektif olarak değerlendirirler. Karar vericiler daha sonra alternatifleri karar kriterlerine göre değerlendirir. Karar vericiler, sözel değişkenleri kullanarak karar kriterlerini ve alternatifleri değerlendirir. Son olarak dilsel değişkenlerle yapılan tahminler üçgen veya yamuk bulanık sayılara dönüştürülerek gerekli hesaplamalar yapılır [28].

Bulanık ortamlarda grup kararı verilirken bulanık TOPSİS yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem ÇKKV problemlerinde nitel ve nicel verilere uygulanabilir ve anlaşılabilir. Bulanık TOPSİS yöntemi, bulanık ortamlarda çok sayıda kriter, alternatif grup ve az sayıda karar verici ile problem çözmeye uygun çok esnek bir yöntem olarak tanımlanmaktadır [26]. Bulanık TOPSİS yöntemi sayesinde alternatiflerin değerlendirilmesi yapılırken doğru bir biçimde kararların alınmasına olanak sağlamaktadır [29]. Bulanık TOPSİS yönteminin adımları aşağıdaki gibidir [30].

**1. Aşama:** Karar verici gruplar oluşturularak kriterler belirlenir. Karar vericilerden bir komite oluşturulur ve değerlendirme kriterleri belirlenir.

$\tilde{a}_{ij}^T = i$ . alternatifin kriter değerini ifade etmektedir. T tane karar vericiden meydana gelmiş olan grupta, alternatiflerin kriter değerleri;

$$\tilde{a}_{ij} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \tilde{a}_{ij}^T \tag{1}$$

eşitliği kullanılarak hesaplanır.

**2. Aşama:** Karar kriterlerinin ağırlıkları için uygun olan dilsel değişkenler belirlenerek alternatiflerin değerlendirilmesi yapılır.

$\tilde{n}_j^T = j$ . karar kriterinin önem ağırlığını belirtmek üzere, T tane karar vericiden meydana gelen grupta, karar kriterlerinin önem ağırlıkları

$$\tilde{n}_j = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \tilde{n}_j^T \tag{2}$$

eşitliği kullanılarak hesaplanır.

Bulanık TOPSİS yönteminin matris olarak gösterimi ise aşağıdaki gibidir. İlk önce m\*n boyutlarında Denklem 3'tekine benzer bir karar matrisi oluşturulmalıdır.

$$\tilde{O} = \begin{matrix} & T_1 & T_2 & \dots & T_p \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} \tilde{a}_{11} & \tilde{a}_{12} & \dots & \tilde{a}_{1p} \\ \tilde{a}_{21} & \tilde{a}_{22} & \dots & \tilde{a}_{2p} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \tilde{a}_{m1} & \tilde{a}_{m2} & \dots & \tilde{a}_{mp} \end{bmatrix} & & & \end{matrix} \tag{3}$$

$$\tilde{N} = [\tilde{n}_1, \tilde{n}_2, \dots, \tilde{n}_p]$$

Burada  $\tilde{a}_{ij}$  ve  $\tilde{n}_j$  dilsel değişkenlerini,  $T_1, T_2, \dots, T_p$  karar kriterlerini,  $A_1, A_2, \dots, A_m$  alternatiflerini,  $\tilde{a}_{ij} = T_j$  kriterine göre  $A_i$  alternatifinin bulanık kriter değerini ve  $\tilde{n}_j = T_j$  kriterinin bulanık önem ağırlığını ifade etmektedir. Dilsel değişkenler,

$\tilde{a}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$  ve  $\tilde{n}_j = (a_{j1}, b_{j2}, c_{j3})$  şeklinde ifade edilmektedir.  $\tilde{O}$  matrisi bulanık karar matrisi ve  $\tilde{N}$  matrisi ise bulanık ağırlıklar matrisi olarak ifade edilmektedir.

**Tablo 1.** Kriterlerin değerlendirilmesinde kullanılan dilsel ifadeler ve bulanık sayı değer karşılıkları [26].

Dilsel İfadeler	Bulanık Sayı Değer Karşılıkları
Oldukça Önemsiz	0.0, 0.1, 0.3
Önemsiz	0.1, 0.3, 0.5
Orta	0.3, 0.5, 0.7
Önemli	0.5, 0.7, 0.9
Oldukça Önemli	0.7, 0.9, 1.0

**Tablo 2.** Alternatif değerlendirilmesinde kullanılan dilsel ifadeler ve bulanık sayı değer karşılıkları [26].

Dilsel İfadeler	Bulanık Sayı Değer Karşılıkları
Çok Düşük	0,1,3
Düşük	1,3,5
Yeterli	3,5,7
Yüksek	5,7,9
Çok Yüksek	7,9,10

**3. Aşama:** Karar vericilerin belirlediği sözel değişkenler üçgen veya yamuk bulanık sayılara dönüştürülür.

$\tilde{U} = [\tilde{u}_{ij}]_{m \times n}$  normalize edilmiş bulanık karar matrisinin matematiksel ifadesi.

$\tilde{u}_{ij}$  aşağıda gösterilmiş olan iki yöntemle hesaplanmaktadır.

$$\tilde{u}_{ij} = \left( \frac{a_{ij}}{c_j^*}, \frac{b_{ij}}{c_j^*}, \frac{c_{ij}}{c_j^*} \right), j \in B, c_j^* = \max_i c_{ij} \tag{4}$$

$$\tilde{u}_{ij} = \left( \frac{a_j^-}{c_{ij}}, \frac{a_j^-}{b_{ij}}, \frac{a_j^-}{a_{ij}} \right), j \in B, a_j^- = \min_i a_{ij} \tag{5}$$



B fayda kriteri kümesini ifade ederken, C maliyet kriterini ifade etmektedir. Normalize olmuş bulanık karar matrisinin hesaplanmasında, karar kriteri fayda kriteri tüm sütunda bulunan elemanların, bu sütunda bulunan en büyük değere oranlaması yapılır. Karar kriteri maliyet kriteri hesaplanmasında ise her sütundaki ilk elemanların minimum değeri alınır. Normalizasyon işleminde üçgen bulanık sayıların  $[0,1]$  aralığında olması gerekmektedir [31].

**4. Aşama:** Bulanık karar matrisinden normalize edilmiş bulanık karar matrisi elde edilir.

$\tilde{I} = [\tilde{i}_{ij}]_{m \times n}$ ,  $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$  normalize olmuş bulanık karar matrisini hesaplanması.

$\tilde{i}_{ij} = \tilde{u}_{ij} \times \tilde{n}_j$  bulanık ağırlık matrisi ile bulanık karar matrisinin çarpımı, ağırlıklı normalize bulanık karar matrisi olarak ifade edilmektedir.

**5. Aşama:** Pozitif ve negatif ideal çözümlerin ifade edilmesi

$A^* = (\tilde{i}_1^*, \tilde{i}_2^*, \dots, \tilde{i}_n^*)$  pozitif ideal çözümün ifade edilmesi.

$A^- = (\tilde{i}_1^-, \tilde{i}_2^-, \dots, \tilde{i}_n^-)$  negatif ideal çözümün ifade edilmesi.

$\tilde{i}_j^* = (1, 1, 1)$  ve  $\tilde{i}_j^- = (0, 0, 0)$  olarak kabul edilmektedir.

**6. Aşama:** Alternatiflerin bulanık negatif ve pozitif uzaklıklarının hesaplanması.

$$d_i^* = \sum_{j=1}^n d(\tilde{i}_{ij}, \tilde{i}_j^*) \quad i = 1, 2, 3 \dots, m; j = 1, 2, 3 \dots, n \quad (6)$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n d(\tilde{i}_{ij}, \tilde{i}_j^-) \quad i = 1, 2, 3 \dots, m; j = 1, 2, 3 \dots, n \quad (7)$$

**7. Aşama:** Yakınlık katsayılarının hesap edilmesi.

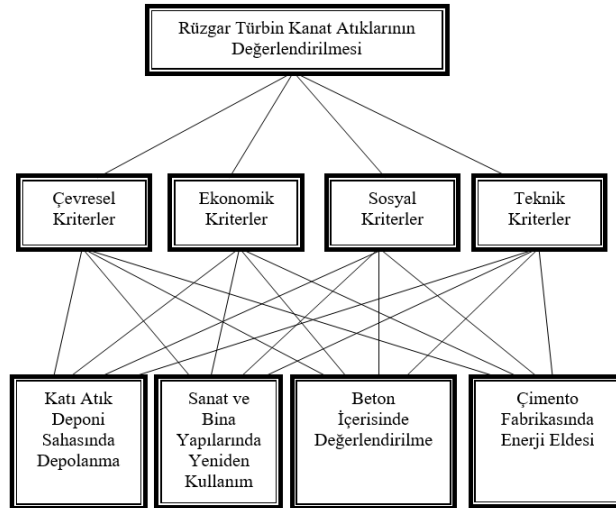
$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^* + d_i^-}$   $i = 1, 2, 3 \dots, m$  yakınlık katsayısı  $[0, 1]$  arası değer almaktadır. Bu katsayılar kullanılarak alternatiflerin sıralamaları yapılır.

**8. Aşama:** Yakınlık katsayıları azdan çoğa doğru sıralama yapılır. Alternatiflerin tercihleri de buna göre belirlenir.

$$CC_n > CC_m > CC_k > \dots > CC_x$$

### 3.2. Karar Verme Sürecini Oluşturan Faktörler

Bu çalışmada rüzgar türbin santrallerinde kullanım ömrünü tamamlamış olan kanatların değerlendirilmesi amacıyla, beş uzman karar verici tarafından, 14 kriter baz alınarak 4 farklı alternatif arasından anket yöntemiyle en uygun olanının seçimi yapılmıştır. Karar verme sürecinde uzman karar vericilerin genel bilgi edinmesi için aşağıdaki şekil oluşturulmuştur.



Şekil 2. Bu çalışma için uygulanan karar ağacı.

Karar verme sürecinde beş uzman karar verici tarafından anket sorularına göre değerlendirmeler yapılmıştır. Karar vericilerin Tablo 3'te özellikleri belirtilmiştir.

Yapılan bu çalışma kapsamında türbin kanat atıklarının yeniden değerlendirilme alternatiflerinin kıyaslanması için karar verme kriterleri literatürde bahsedilen kriterlerden faydalanılarak belirlenmiştir [8, 20-21]. Bu kriterler; çevresel kriterler, ekonomik kriterler ve sosyal kriterler ve teknik kriterlerden oluşmaktadır. Bu kriterlerin altında toplamda on dört alt-kriter bulunmaktadır.

#### Çevresel Kriterler

**Çevresel Sürdürülebilirlik ( $Ç_{kl}$ ):** Doğal kaynakları tüketmeden, verimlilik ve sürekliliğin çevre ile uyumlu bir şekilde günümüz ihtiyaçlarının karşılanmasıdır.

**Tablo 3.** Uzmanların özellikleri.

Uzman Karar Vericiler	Uzmanlık alanı	Tecrübe
Uzman Karar Verici 1	İnşaat Mühendisi - Doktora	Katı atık yönetim uzmanı, 5 yıl
Uzman Karar Verici 2	Çevre Mühendisi	Atık yönetimi, 10 yıl
Uzman Karar Verici 3	Çevre Mühendisi	Biyogaz-Katı atık entegre tesislerinin işletilmesi, bakım-onarım, projelendirme ve kurulum, 9 yıl
Uzman Karar Verici 4	Çevre Yüksek Mühendisi	Katı atık yönetimi, 4 yıl
Uzman Karar Verici 5	Çevre Yüksek Mühendisi	Çevre danışmanlık, 3 yıl

*Hava Kirliliği, Su, Toprak Kirliliğine Etki (Ç<sub>k2</sub>):* Alternatiflerin faaliyeti sırasında hava, su ve toprağa kirleticilerin salınımı ile ekosisteme ve yaşayan canlılara zarar vermesidir.

*Biyçeşitliliğe etki (Ç<sub>k3</sub>):* İnsanların yaşamını devam ettirebilmesi için yaşanan çevrede temiz su kaynakları, temiz hava, elverişli toprak ve besinlerin bulunması gerekmektedir. Kirlilik, iklim değişikliği ve doğal kaynakların düşünülmenden tüketilmesi biyçeşitliliği azaltmaktadır.

*Arazi Alan Kullanımı (Ç<sub>k4</sub>):* Alternatiflerin kurulacağı alan ve faaliyetin içeriğine bağlı olarak gerekli olabilecek arazi alanını ifade etmektedir.

### Ekonomik Kriterler

*İlk Yatırım Maliyeti (E<sub>k1</sub>):* Tesiste kullanılacak olan makine ve ekipmanların maliyeti, tesisin kurulacağı alanın maliyeti, eğer kurulu bir tesis ise işletme faaliyete başlamadan önce yapılacak olan onarım maliyetleri vb. ilk yatırım maliyetlerini kapsamaktadır.

*İşletme ve Bakım Maliyeti (E<sub>k2</sub>):* Tesiste çalışacak olan işçi sayısı, rüzgar türbin kanat atıklarının işletmeye taşınması, yakıt ihtiyacı, kat edilen mesafe, çalıştırılacak işçilerin ücretleri, işletme sırasında kullanılan malzemelerin bakım ve onarımı, işletme masraflarını kapsamaktadır.

*Karlılık Oranı (E<sub>k3</sub>):* Alternatifler arasında işletmenin faaliyeti sonucunda elde edilen ürünün piyasaya sürülmesiyle elde edilen kar.

### Sosyal Kriterler

*Mevzuata Uygunluk (S<sub>k1</sub>):* İşletme faaliyetlerinin yasalar, normlar, kanunlar, yönetmelikler, genelgeler, tebliğ ve tüzükler vb. açısından uygunluğunu ifade etmektedir.

*İstihdam (S<sub>k2</sub>):* Alternatiflerin uygulanması halinde oluşturulacak iş gücü miktarını ifade etmektedir.

*Kamuoyu Tepkisi (S<sub>k3</sub>):* Uygulanacak olan alternatiflerde halkın olumlu ya da olumsuz tepkisini ifade etmektedir.

### Teknik Kriterler

*Uygulama Kolaylığı (T<sub>k1</sub>):* Alternatiflerin hayata geçirilmesi sırasında karşılaşılan zorluk derecesini ifade etmektedir.

*Ulaştırılmaya (Ulaşım) Yakınlık (T<sub>k2</sub>):* Alternatifin faaliyeti sonucunda oluşturduğu ürün, malzeme, enerji vb. alıcıya transferi sırasında kat edilen mesafedir.

*Süreklilik (T<sub>k3</sub>):* İşletmenin faaliyet ömrünün devamlılığını belirtmektedir.

*Kullanım Yaygınlığı (T<sub>k4</sub>):* Gerçekleşecek olan faaliyetten elde edilen ürünün kullanım yaygınlığını ifade etmektedir.

### 3.3. Alternatifler ve Çalışma Alanı

Bu çalışma kapsamında literatürde en çok belirtilen ve sahada uygulanan alternatiflerin temel alındığı örnek bir çalışma yapılmıştır. Çalışma alanı olarak yıllık ortalama rüzgar hızı 10 m/s civarında olan Balıkesir ilinin Bandırma ilçesinde bulunan bir rüzgar santrali temel alınmıştır [32]. Rüzgar türbinlerinin faydalı ömürleri ortalama 20 yıl olarak bilinmektedir. Bu çalışma için ömrünü tamamlamaya en yakın olan bir santral seçilmiştir. Bahse konu rüzgar santrali 2006 yılında üretimi geçmiş olduğundan 2026 yılında ömrünü tamamlaması öngörülmektedir. Rüzgar türbin kanatları da rüzgar türbininin bir parçası olarak ömrünü tamamladığında türbinden ayrıştırılarak atık hale dönüşmektedir. Bahse konu rüzgar santrali yaklaşık (40.36, 28.05) koordinatları dolaylarında bulunmaktadır. Bu santralde 20 adet 1,5 MW kapasiteli rüzgar türbini ve toplamda 60 adet rüzgar türbin kanadı bulunmaktadır. Her bir türbin kanadının yaklaşık 5 ton ağırlığında olduğu düşünülmektedir. Yakın gelecekte bu santralden yaklaşık olarak toplamda 300 ton rüzgar türbin kanat atığı çıkması beklenmektedir. Bu atığın büyük bir bölümünü cam fiber, geri kalan kısımlarını termosetplastik atık oluşturacaktır.

Rüzgar türbin kanatlarının kullanım ömrü sonunda bertaraf edilmesi için belirlenen kriterlerin de dikkate alınmasıyla birlikte dört farklı alternatif belirlenmiştir. Bunlar; katı atık deponi sahasında depolama, sanat ve bina yapılarında yeniden kullanım, beton içerisinde değerlendirilme ve çimento fabrikasında enerji eldesidir.

*Katı Atık Deponi Sahasında Depolama (A<sub>1</sub>):* Rüzgar türbini kanadının atık bir malzeme olduğu düşünüldüğünde, bunların bertarafı için ilk alternatif düzenli depolamadır. Rüzgar türbini kanat atığını bertaraf etmek için düzenli depolama alanı kullanmak, arazi edinimi, atık malzemenin sınıflandırılması, çevre yasaları, izin süreci, vergiler ve hibeler vb. gibi çeşitli değerlendirmelerin yapılması gerekmektedir.

Rüzgar türbin kanat atıklarının katı atık deponi sahalarında depolanması için geniş bir alana ihtiyaç vardır. Ayrıca kanat atıkları termoplastik malzemeden yapıldığından dolayı yıllarca deforme olmadan kalabilmektedir. Bu da katı

atık deponi sahalarının kısa sürede dolmasına ve yeni alan ihtiyacının oluşmasına neden olacaktır. Bandırma'da bulunan rüzgar santralinden çıkabilecek rüzgar türbin kanat atıkları için iki adet depolama sahası alternatifi bulunmaktadır. Bunlar Balıkesir ilinde bulunan Balıkesir katı atık deponi sahası ve Bursa ilinde bulunan Hamitler katı atık deponi sahalarıdır. Her iki depolama sahası da Bandırma'daki örnek rüzgar santraline yaklaşık 110 km civarında bir mesafede bulunmaktadır.

**Enerji Kazanımı ( $A_2$ ):** Rüzgar türbin kanatlarını bertaraf yöntemlerinden bir diğeri de yakmadır. Özellikle, çimento fabrikalarında çimento üretimi sırasında yüksek oranda enerji tüketimi mevcuttur. Bu yüzden çimento fabrikalarında alternatif yakıt olarak rüzgar türbin kanatlarının kullanılması dikkate alınacak bir husustur. Rüzgar türbin kanat atıklarının çimento fabrikalarında alternatif yakıt olarak kullanılması fosil yakıtların tüketimini azaltmakla birlikte atığın değerlendirilmesini ve çevrenin korunmasına katkı sağlamaktadır. Rüzgar türbin kanat atıklarının materyal olarak kalori değerinin yüksek olması (11-14 kJ/kg) avantaj sağlamaktadır [33]. Ancak, kanat atıklarının yakılması sonrasında oluşan suyla hemen reaksiyona girebilen içerisinde kalsiyum oksit bulunan küller çevresel risk oluşturmaktadır. Oluşan külün içerisinde bulunan tehlikeli maddelerin buharı çalışanların sağlığı açısından tehlike oluşturmaktadır [34]. Bandırma'da bulunan örnek rüzgar santralinden çıkacak kanat atıklarının değerlendirilebileceği bir adet çimento üretim tesisi bulunmakta olup santrale olan mesafesi 108 km civarındadır (Tablo 4).

**Sanat ve Bina Yapılarında Yeniden Kullanım ( $A_3$ ):** Rüzgar türbin kanat atıklarının yeniden kullanımı atık hiyerarşisindeki adımlardan birisidir. Rüzgar türbin kanat atığının oyun alanlarında, mobilyalarda, bisiklet koyma alanları oluşturmada, yürüyüş yollarında, köprü vb. alanlarda kullanımı söz konusudur [16]. Bu uygulamada maliyet açısından büyük bir ihtiyaç söz konusu olmayıp rüzgar türbin kanat atığı yeniden değer kazandırılarak ekonomiye katma değer sağlayacaktır. Bandırma'da bulunan rüzgar santrali için yeniden kullanımı gerçekleştirebilecek bir firma bulunmaktadır ve santrale olan mesafesi 11,6 km'dir (Tablo 4).

**Beton İçerisinde Değerlendirilme ( $A_4$ ):** Rüzgar türbin kanat atıklarının bir diğeri değerlendirme yöntemi de beton içerisinde katkı maddesi olarak kullanılmasıdır. Rüzgar türbin kanat atıklarının betonda kullanılacak büyük parçalar halinde kesilmesi, kanat atığını öğütmek ve toz haline getirmekten daha az enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Kanat atıklarının yapılan bazı çalışmalarda 6 mm çapında ve 100 mm uzunluğunda betona ilave edilmesi ile betonun çekme mukavemetinde % 22 ile % 33 civarında artışa neden olmuştur [18]. Ayrıca rüzgar türbin kanat atıklarının betonda toz, agrega ve lif halinde kullanıldığında eğilme kapasitesinde, mukavemetinde ve basınç dayanımında artışlara neden olmaktadır [18]. Rüzgar türbin kanat atıklarının beton içerisinde kullanımı hem atığın tamamen geri kazanılmasına hem de betona katı sağladığından önemli bir bertaraf alternatiftir. Bandırma'da örnek olarak alınan rüzgar santraline yakın mesafede altı adet beton üretim tesisi bulunmakta olup ortalama mesafeleri 20 km civarındadır (Tablo 4).

Tablo 4'te Bandırma'daki örnek rüzgar santralinde kanat atıklarının değerlendirilebileceği alternatifler ve alternatiflerin santrale olan mesafeleri gösterilmiştir.

**Tablo 4.** Örnek santralden çıkacak türbin kanat atıkları için alternatifler ve örnek santrale olan mesafeleri.

Alternatifler	Firmalar	Mesafe (km)
Katı Atık Deponi Sahasında Depolanma	Hamitler Kent Çöplüğü	113 km
	Balıkesir Katı Atık Deponi Sahası	111 km
Çimento Fabrikasında Enerji Eldesi	Çimento Fabrikası	108 km
Sanat ve Bina Yapılarında Yeniden Kullanım	Bandırma Yapı Üretim Tesisi	11,3 km
Beton İçerisinde Değerlendirme	Beton Üretim Tesisi 1	22,5 km
	Beton Üretim Tesisi 2	17,9 km
	Beton Üretim Tesisi 3	23,9 km
	Beton Üretim Tesisi 4	15,2 km
	Beton Üretim Tesisi 5	14,8 km
	Beton Üretim Tesisi 6	20,2 km

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma ile rüzgar türbin kanat atıklarının en uygun şekilde bertaraf edilmesinin Bulanık TOPSİS yöntemiyle gerçekleştirilmesi konu edilmiştir. Örnek bir çalışma olarak da ömrünü tamamlamaya yakın olan Bandırma'daki bir rüzgar santrali temel alınmıştır. Bulanık TOPSİS uygulanarak elde edilen kriter ağırlıkları, beş uzmanın değerlendirmeleri sonucu ortaya konulmuştur. Tablo 5 kriterlerin uzmanlar tarafından belirlenen ortalama ağırlıklarını göstermektedir. Buna göre en yüksek etkiye sahip olan kriterlerin çevresel sürdürülebilirlik, hava, su ve toprak kirliliğine etki ve biyoçeşitliliğe etki kriterleri olduğu görülmektedir. Mevzuata uygunluk, uygulama kolaylığı ve ulaştırmaya yakınlık kriterleri ise orta yüksek ağırlığa sahip olarak bulunmuştur. Geriye kalan kriterlerin tümü olan arazi alan kullanımı, ilk yatırım maliyeti, işletme ve bakım maliyeti, karlılık oranı, istihdam, kamuoyu tepkisi ve süreklilik gibi kriterler ise orta önemli olarak bulunmuştur. Belirlenen kriterlerinin hiçbirinin düşük önem değerini almaması dikkat edilen bir husus olmuştur. Ayrıca, çevresel kriterlerin ağırlıklarının ekonomik, sosyal ve teknik kriterlere göre daha yüksek bulunması önemli bir diğeri bulgudur. Bandırma'daki santral için alternatiflerin kriterlere göre uzmanlar tarafından değerlendirilmesinin sonucundaki bulanık sayı

**Tablo 5.** Kriter ağırlıkları.

Kriterler	Dilsel İfadeler	Bulanık Sayı Değerleri
Çevresel Sürdürülebilirlik (K1)	Yüksek	(0,7, 0,9, 1,0)
Hava, Su ve Toprak Kirliliğine Etki (K2)	Yüksek	(0,7, 0,9, 1,0)
Biyçeşitliliğe Etki (K3)	Yüksek	(0,7, 0,9, 1,0)
Arazi Alan Kullanımı (K4)	Orta	(0,3, 0,5, 0,7)
İlk Yatırım Maliyeti (K5)	Orta	(0,3, 0,5, 0,7)
İşletme ve Bakım Maliyeti (K6)	Orta	(0,3, 0,5, 0,7)
Karlılık Oranı (K7)	Orta	(0,3, 0,5, 0,7)
Mevzuata Uygunluk (K8)	Orta Yüksek	(0,5, 0,7, 0,9)
İstihdam (K9)	Orta	(0,3, 0,5, 0,7)
Kamuoyu Tepkisi (K10)	Orta	(0,3, 0,5, 0,7)
Uygulama Kolaylığı (K11)	Orta Yüksek	(0,5, 0,7, 0,9)
Ulaştırılmaya Yakınlık (K12)	Orta Yüksek	(0,5, 0,7, 0,9)
Süreklilik (K13)	Orta	(0,3, 0,5, 0,7)
Kullanım Yaygınlığı (K14)	Orta	(0,3, 0,5, 0,7)

değerleri Tablo 6'da gösterilmiştir. Buna göre katı atık deponi sahalarında depolanma hiçbir kriter bazında en yüksek değere sahip olamamış iken, işletme ve bakım maliyeti kriterine göre yüksek bir bulanık değer elde ettiği görülmüştür. Çimento fabrikasında enerji üretimi ise arazi alan kullanımı, ilk yatırım maliyeti, istihdam, süreklilik ve kullanım yaygınlığı kriterlerinde en yüksek değerlere sahip iken hava, su ve toprak kirliliğine etki ve ulaştırmaya yakınlık anlamında düşük değerler almıştır. Sanat ve bina yapılarında yeniden kullanım alternatifi ise hava, su ve toprak kirliliğine etki, biyçeşitliliğe etki, işletme ve bakım maliyeti, mevzuata uygunluk, kamuoyu tepkisi ve ulaştırmaya yakınlık kriterlerinde en yüksek değerlere sahip iken istihdam, süreklilik ve kullanım yaygınlığı kriterlerinde düşük değerler almıştır. Son olarak beton içerisinde değerlendirme alternatifi çevresel sürdürülebilirlik, karlılık oranı, uygulama kolaylığı ve ulaştırmaya yakınlık kriterlerinde en yüksek değerleri elde ederken süreklilik ve kullanım yaygınlığı kriterlerinden düşük değerler almıştır.

Tablo 7'de Bandırma'da bulunan örnek santraldeki rüzgar türbin kanat atıkları için en uygun bertaraf alternatiflerinin ağırlık değerleri ve sıralamaları verilmiştir. Bu değerler alternatiflerin Bulanık TOPSIS yöntemi sonucunda sıralanmasını temsil etmektedir. Buna göre sanat ve bina yapılarında yeniden kullanım 0,766 ile en yüksek değeri olarak ilk alternatif olarak belirlenmiştir. Bu yüksek değer elde edilmesinin sebebi çevresel kriterlerin ağırlıklarının yüksek olmasıyla beraber sanat ve bina yapılarında yeniden kullanım alternatifinin çevresel kriterlere göre en yüksek ağırlık değerlerine sahip olmasından ileri gelmektedir. Beton içerisinde değerlendirme sanat ve bina yapılarında yeniden kullanım az bir farkla 0,757 değeri ile takip etmekte olduğu saptanmıştır. Bu alternatif için de yüksek değer elde edilmesinin sebebi ilk yatırım maliyeti, karlılık oranı ve ulaştırmaya yakınlık gibi kriterlerin değerlerinin yüksek olmasından dolayıdır. Çimento fabrikasında rüzgar türbin kanat atıklarından enerji eldesi alternatifi 0,551 ağırlık değeri ile üçüncü alternatif olarak belirlenmiştir. Katı atık sahalarında depolama ise 0,051 değeri ile açık bir farkla sonuncu alternatif olarak belirlenmiştir.

**Tablo 6.** Alternatiflerin kriterlere göre aldığı bulanık sayı değerleri.

Alternatifler	Katı Atık Deponi Sahasında Depolanma	Çimento Fabrikasında Enerji Eldesi	Sanat ve Bina Yapılarında Yeniden Kullanım	Beton İçerisinde Değerlendirme
Çevresel Sürdürülebilirlik (K1)	(0, 2, 7)	(3, 7, 6, 10)	(5, 8, 6, 10)	(5, 9, 10)
HavaSu ve Toprak Kirliliğine Etki (K2)	(0, 3, 10)	(0, 5, 8, 10)	(5, 8, 4, 10)	(3, 8, 2, 10)
Biyçeşitliliğe Etki (K3)	(0, 5, 4, 10)	(1, 6, 2, 10)	(5, 9, 10)	(3, 8, 6, 10)
Arazi Alan Kullanımı (K4)	(0, 0, 4, 3)	(7, 9, 6, 10)	(3, 8, 8, 10)	(5, 9, 10)
İlk Yatırım Maliyeti (K5)	(0, 6, 6, 10)	(7, 9, 6, 10)	(7, 9, 4, 10)	(7, 9, 2, 10)
İşletme ve Bakım Maliyeti (K6)	(1, 7, 5, 10)	(7, 9, 2, 10)	(7, 9, 6, 10)	(5, 8, 6, 10)
Karlılık Oranı (K7)	(0, 3, 2, 10)	(3, 7, 10)	(1, 8, 4, 10)	(7, 9, 6, 10)
Mevzuata Uygunluk (K8)	(0, 4, 2, 10)	(0, 7, 10)	(7, 9, 4, 10)	(1, 7, 4, 10)
İstihdam (K9)	(0, 1, 4, 7)	(3, 7, 4, 10)	(0, 5, 10)	(3, 6, 2, 10)
Kamuoyu Tepkisi (K10)	(0, 2, 4, 10)	(1, 5, 10)	(5, 8, 8, 10)	(1, 8, 2, 10)
Uygulama Kolaylığı (K11)	(0,7,10)	(1, 8, 10)	(3, 6, 8, 10)	(3, 7, 4, 10)
Ulaştırılmaya Yakınlık (K12)	(0, 3, 9)	(0, 5, 6, 10)	(7, 9, 2, 10)	(7, 9, 2, 10)
Süreklilik (K13)	(0, 2, 2, 10)	(0, 7, 25, 10)	(0, 5, 8, 10)	(0, 6, 4, 10)
Kullanım Yaygınlığı (K14)	(0, 4, 2, 10)	(0, 6, 6, 10)	(0, 4, 2, 10)	(1, 4, 6, 10)

Bu çalışmada Bulanık TOPSIS yöntemiyle elde edilen bulgular literatürde yapılan benzer çalışmalarla kıyaslanmıştır. Yapılan bir başka çalışma sonucunda rüzgar türbin kanat atıklarının en uygun bertaraf alternatifi olarak beton içerisinde değerlendirme bulunmuşken onu deponi sahalarında bertaraf, geri dönüşüm/kazanım ve çimento fabrikasında enerji eldesi alternatifleri sırasıyla takip ettiği görülmüştür [8]. Fayyaz vd. (2023) ÇKKV yönteminin rüzgar türbin kanat atıkları için en uygun bertaraf yöntemini belirlemek için uygulanması gerektiğini belirtirken buna dair bir sıralama ortaya koymamıştır [35]. İzmir Kalkınma Ajansı (2021) rüzgar türbin kanat atıklarının bertarafı için potansiyel bertaraf yöntemlerini incelemiş ve İzmir için atıkların çimento üretim tesislerinde yakıt olarak kullanılmasının ekonomik olarak avantajlı olduğu belirtilmiştir [4]. Deeney vd. (2021)

rüzgar türbin kanat atıkları alternatiflerinin kıyaslanmasını sürdürülebilirlik indeksi kullanarak gerçekleştirmiş olup sonuç olarak sanat ve bina yapılarında yeniden kullanım en iyi alternatif olarak ve depolama sahalarında değerlendirme ise en kötü alternatif olarak bulunmuştur [36]. Bu çalışmadaki sonuçların Deeney vd. çalışması ile örtüşmekte olduğu belirlenmiştir.

**Tablo 7.** Bandırma’da ömrünü tamamlayacak örnek santral için rüzgar türbin kanat atığı bertaraf alternatif sıralamaları.

Alternatifler	CC <sub>i</sub>	Sıralama
Katı Atık Sahasında Depolama-A1	0,051139	4
Çimento Fabrikasında Enerji Eldesi-A2	0,5511623	3
Sanat ve Bina Yapılarında Yeniden Kullanım-A3	0,7658335	1
Beton İçerisinde Değerlendirme-A4	0,7565195	2

## 5. SONUÇ

Rüzgar türbin kanat atıklarının rüzgar santrallerinin ömrünü tamamlamaya başlaması nedeniyle çevresel bir sorun teşkil etmeye başlaması katı atık depolama sahalarına alternatif bertaraf yöntemlerinin araştırılmasına yol açmıştır. Bu çalışmada rüzgar türbin kanat atıklarının bertarafı için dört alternatif bertaraf yöntemi on dört ilgili kritere göre değerlendirilmiş olup, Balıkesir ili Bandırma ilçesinde ömrünü tamamlamaya yakın bir rüzgar santrali için uygulama yapılmıştır. Çalışma sonucunda, rüzgar türbin kanat atıklarının bertaraf yöntemlerinin uygunlukları sırasıyla, sanat ve binalarda yeniden kullanım, betonda agrega olarak kullanım, çimento fabrikalarında enerji üretimi ve düzenli depolama alanlarında bertaraf edilmesi olarak tespit edilmiştir. Bu çalışma ile depolama sahalarında bertaraf metodunun uzmanlar tarafından en düşük değer verilmesi oldukça önemlidir. Çünkü mevcut durumda Türkiye’de kanat atıklarının bertarafıyla ilgili herhangi bir yönetmelik bulunmamakla beraber, en yüksek orandaki katı atık bertarafı depolama sahalarında gerçekleşmektedir. Sonuçlara göre rüzgar türbin kanat atıklarının depolama sahalarında bertarafı çevresel açıdan uygun görülmediği düşünülmektedir. Ayrıca bu atıkların ekonomiye tekrardan kazanılması mümkün olduğundan ekonomik potansiyelinden de faydalanılmamasının büyük bir hata olacağı not edilmiştir. Geri kazanımı ve yeniden kullanımı mümkün bir atık malzemesi olan rüzgar türbin kanatlarının beton içerisinde değerlendirilmesi, sanat ve bina yapılarında kullanım ve enerji geri kazanımı için kullanım gibi yöntemlerle değerlendirilmesi hem ekonomik hem de çevresel açıdan önemli olacağı kanaati oluşmuştur. Bu çalışma sonucunda elde edilen bir başka çıkarım ise literatürde farklı bölgeler için yapılan çalışmalarda farklı bertaraf alternatiflerinin ön plana çıkıyor oluşudur. Bu da bölgesel bazda kanat atıklarının sanat ve bina yapılarında geri kazanım, beton içerisinde değerlendirme veya enerji geri kazanımı alternatifleri için detaylı analiz yapıldıktan sonra uygulamaya geçilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu çalışmanın rüzgar santral işletmecilerine, belediyelere ve türbin kanat üreticilerine faydalı olacağı düşünülmektedir.

## Yazar Katkıları

Samet Öztürk: Makale konu fikri, analitik işlemler, yazımı; Kübra Atalay: Veri toplama, analitik işlemler ve yazımı.

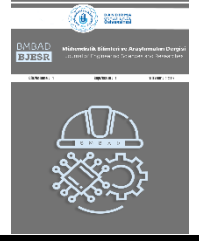
## Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler. Bu çalışma Kübra Atalay’ın Yüksek Lisans tez çalışmasından türetilmiştir.

## KAYNAKÇA

- [1] GWEC. Global Wind Report 2023.
- [2] TÜREB. Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu. 2023.
- [3] TEİAŞ. Kurulu Güç Raporları. 2022.
- [4] İzmir Kalkınma Ajansı “İzmir İli Rüzgâr Türbini Kanadı Geri Dönüşüm Tesisi Ön Fizibilite Raporu”. 2021.
- [5] Wind Europe  
<https://windeurope.org/newsroom/press-releases/wind-industry-calls-for-europe-wide-ban-on-landfilling-turbine-blades/>. [Accessed: May 1 2023]
- [6] Psomopoulos, Constantinos S., et al "A review of the potential for the recovery of wind turbine blade waste materials", Recycling vol. 4, no. 1. 2019.
- [7] L. Pu, and C.Y. Barlow, "Wind turbine blade waste in 2050", Waste Management vol. 62, pp. 229-240, 2017.
- [8] S. Ozturk, F. Karipoglu "Investigation of the best possible methods for wind turbine blade waste management by using GIS and FAHP: Turkey case", Environ Sci Pollut Res vol. 30, pp. 15020–15033, 2023.
- [9] J.P. Jensen, and K. Skelton "Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and possibilities in a circular economy", Renewable and Sustainable Energy Reviews vol. 97, pp. 165-176, 2018.

- [10] K. Ramirez-Tejeda, D.A. Turcotte, and S. Pike "Unsustainable wind turbine blade disposal practices in the United States: A case for policy intervention and technological innovation", *New Solutions: A Journal of Environmental and Occupational Health Policy* vol. 26, no. 4, pp. 581-598, 2017.
- [11] Nagle, J. Angela et al. "A Comparative Life Cycle Assessment between landfilling and Co-Processing of waste from decommissioned Irish wind turbine blades", *Journal of Cleaner Production* vol. 277 p. 123321, 2020.
- [12] R. Fonte, and G. Xydis "Wind turbine blade recycling: An evaluation of the European market potential for recycled composite materials," *Journal of environmental management* vol. 287, p. 112269, 2021.
- [13] A. Yazdanbakhsh "Concrete with discrete slender elements from mechanically recycled wind turbine blades." *Resources, Conservation and Recycling* vol. 128, pp. 11-21, 2018.
- [14] M. Yağlıkçı, and M.S. Çeliktaş "Kompozit Rüzgâr Türbin Kanatlarının Yorulma Ömrüne ve Dayanımına Bağlı Olarak Malzeme Seçimi ve Gelecek Projeksiyonu." *Mühendis ve Makina* vol. 59, no. 690, pp. 27-44, 2018.
- [15] D.S. Cousins, et al. "Recycling glass fiber thermoplastic composites from wind turbine blades." *Journal of cleaner production* vol. 209, pp. 1252-1263, 2019.
- [16] S.H. Mamanpush, H. Li, K. Englund, and A.T. Tabatabaei "Recycled wind turbine blades as a feedstock for second generation composites". *Waste Management*, vol. 76, pp. 708-714, 2018.
- [17] M.C.S. Ribeiro, et al. "Re-use assessment of thermoset composite wastes as aggregate and filler replacement for concrete-polymer composite materials: A case study regarding GFRP pultrusion wastes." *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 104, pp. 417-426, 2015.
- [18] D. Baturkin, O.A. Hisseine, R. Masmoudi, A. Tagnit-Hamou, and L. Massicotte "Valorization of recycled FRP materials from wind turbine blades in concrete". *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 174, p. 105807. 2021.
- [19] C. Korkmaz "Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemleri İle Atık Bertaraf Firması Seçimi", *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir*, 2015.
- [20] D. Hanan, S. Burnley, and D. Cooke "A Multi-Criteria Decision Analysis Assessment Of Waste Paper Management Options", *Waste Management*, pp. 1-8, 2012.
- [21] M. Ekmekçioğlu, T. Kaya, ve C. Kahraman "Fuzzy Multicriteria Disposal Method And Site Selection For Municipal Solid Waste", *Waste Management*, vol. 30, pp. 1729-1736, 2010.
- [22] M. Eskandari, M. Homae, and S. Mahmodi "An Integrated Multi Criteria Approach For Landfill Siting In A Conflicting Environmental, Economical And Socio-Cultural Area", *Waste Management*, vol. 32, pp. 1528-1538, 2012.
- [23] B. Doğan "Anaytic Hierarchy Process as a Multi Criteria Approach Model in Decision Making and Application of AHP Method For Selection of Mine Hunting Ship", *Naval Academy Command Naval Sciences And Engineering Institute*, 2004.
- [24] H. Güner "Fuzzy AHP and the Application for A Company's Supplier Selection Problem". *Denizli: Pamukkale University Institute of Science and Technology*, 2005.
- [25] A. Öztel "Çok kriterli karar verme sürecinde yeni bir yaklaşım". *Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi*, 156 sayfa, Ankara, 2016.
- [26] Y. Wang, and T.M.S. Elhag "Fuzzy TOPSIS method based on alpha level sets with an application to bridge risk assessment." *Expert systems with applications* vol. 31, no. 2, pp. 309-319. 2006.
- [27] Z. Başkaya, ve B. Öztürk "Bulanık TOPSIS Algoritması ile Yamuk Bulanık Sayıların Satış Elemanı Seçiminde Kullanılması", *Business and Economics Research Journal*, vol. 2, no. 2, pp. 84-85, 2011.
- [28] F. Ecer "Bulanık Ortamlarda Grup Kararı Vermeye Yardımcı Bir Yöntem: Fuzzy Topsis ve Bir Uygulama", *Dokuz Eylül Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi*, vol. 7, no. 2, p. 78, 2006.
- [29] C. Chen "Extensions of the TOPSIS for Group Decision-Making under Fuzzy Environment", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 114, no. 2, p. 10447997, 2000.
- [30] H. Yılmaz "Bulanık TOPSIS ve bulanık veri zarflama analizi yöntemleri ile performans ve etkinlik değerlemesi: BISTte faaliyet gösteren işletmeler üzerine bir uygulama". *Doktora Tezi. Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, 2020.
- [31] T. Paksoy, N. Yapıcı Pehlivan, ve E. Özceylan "Bulanık Küme Teorisi", (1. Baskı), *Nobel Yayınevi, Ankara*, pp. 157-158, 2013.
- [32] *Global Wind Atlas*. <https://globalwindatlas.info/en> [Accessed July 31 2023]
- [33] *The Engineering Toolbox. Tools and Basic Information for Design, Engineering and Construction of Technical Application*. [http://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d\\_169.html](http://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html). [Accessed May 1 2023].
- [34] Sponberg, E. "Recycling Dead Boats". *Professional Boat Builder Magazine*. 1999.
- [35] Fayyaz, Samaneh, et al. "Sustainable end-of-life value chain scenarios for wind turbine blades." *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2507, no. 1. IOP Publishing, 2023.
- [36] Deeney, Peter, et al. "End-of-Life alternatives for wind turbine blades: Sustainability Indices based on the UN sustainable development goals." *Resources, Conservation and Recycling* vol. 171, p. 105642, 2021.



## CEC 2019 Problemleri İçin Kendinden Uyarlamalı Bir Diferansiyel Gelişim Algoritması

### A Self-Adaptive Differential Evolution Algorithm for CEC 2019 Problems

<sup>1</sup>Hatem DUMLU , <sup>2</sup>Gürcan YAVUZ 

<sup>1</sup>Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kütahya, Türkiye

<sup>2</sup>Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kütahya, Türkiye

<sup>1</sup>hatem.dumlu@dpu.edu.tr, <sup>2</sup>gurcan.yavuz@dpu.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 8 June 2023

Accepted : 6 September 2023

##### Keywords:

Self-Adaptive Differential Evolution Algorithm, CEC 2019, Differential Evolution Algorithm, Optimization

#### ABSTRACT

In this study, a variant of the Differential Evolution algorithm enhanced for global optimization has been proposed. It differentiates from the original Differential Algorithm in terms of the mutation step. This variant, named KU-DGA, operates with a large number of randomly selected mutation equations. The performance of the KU-DGA algorithm has been tested using the CEC 2019 benchmark suite. The results obtained by the algorithm have been compared with WOAmM (Wider Optimization with Artificial Whales), WOA (Whale Optimization Algorithm), MFO (Moth Flame Optimization Algorithm), BOA (Butterfly Optimization Algorithm), SCA (Sine Cosine Algorithm), and JAYA algorithms in the literature. The obtained results have been analyzed using the Friedman test. As a result, in terms of the "average" value results, the proposed KU-DGA algorithm has outperformed its competitors in seven out of ten functions included in CEC 2019. Furthermore, in the "best" results category, the proposed variant has achieved the most successful outcomes in seven out of ten functions, surpassing rival algorithms.

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 8 Haziran 2023

Kabul : 6 Eylül 2023

##### Anahtar Kelimeler:

Kendinden Uyarlamalı Diferansiyel Gelişim Algoritması, CEC 2019, Diferansiyel Gelişim Algoritması, Optimizasyon

#### ÖZET

Bu çalışmada, Global optimizasyon için geliştirilmiş bir Diferansiyel Gelişim algoritması varyantı önerilmiştir. Orijinal Diferansiyel Algoritmasından mutasyon adımı ile farklılaşmaktadır. KU-DGA adını verdiğimiz bu varyant rastgele çok sayıda belirlenmiş mutasyon denklemleri ile çalışmaktadır. KU-DGA algoritmasının başarımı CEC 2019 ölçüt seti ile test edilmiştir. Algoritmanın elde ettiği sonuçlar literatürdeki WOAmM (Genişletilmiş WOA), WOA (Balina Optimizasyon Algoritması), MFO (Güve Alevi Optimizasyon Algoritması), BOA (Kelebek Optimizasyon Algoritması), SCA (Sinüs Kosinüs Algoritması) ve JAYA algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Friedman testi ile analiz edilmiştir. Sonuç olarak önerilen KU-DGA algoritmasının karşılaştırılan algoritmalara kıyasla "ortalama" değer sonuçları baz alındığında CEC 2019' da yer alan on fonksiyonun yedisinde rakiplerini geçmiştir. Ayrıca önerilen varyant "en iyi" sonuçlarda da on fonksiyonun yedisinde en başarılı sonuçları alarak rakip algoritmaları geride bırakmıştır.

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

## 1. GİRİŞ

Son yıllarda optimizasyon algoritmaları büyük gelişme göstermiştir. Bu optimizasyon algoritmalarının bir kısmını da Evrimsel Algoritmalar temsil eder. Doğadan ilham alan mekanizmaları kullanan ve canlı organizmaların davranışlarını taklit eden süreçleri kapsayarak sorunları çözen Evrimsel Algoritmalar, optimizasyon algoritmaları arasında büyük öneme sahiptir. Evrimsel algoritmalarından birisi de Diferansiyel Gelişim (DE) algoritmasıdır.

DE algoritması güçlü bir meta sezgisel algoritma olmasına rağmen algoritma yerel optimuma takılma gibi, çeşitli problemleri de mevcuttur. Bu problemlerin üstesinden gelebilmek için araştırmacılar, DE algoritmasının adımlarına, çeşitli iyileştirmeler önermişlerdir. İyileştirme yapılan adımlardan birisi de DE algoritmasının mutasyon adımıdır. Araştırmacılar bu adımda yeni mutasyon operatörü önererek algoritmada iyileştirmeye gitmişler ve daha iyi sonuçlar elde etmişlerdir.

Meng vd. iki Aşamalı Diferansiyel Gelişim algoritması (Two-Stage Differential Evolution (TDE)) adını verdikleri varyantlarında DE evrimsel sürecini iki safhaya ayırmışlardır [1]. Bu iki safha birbirlerinden farklı mutasyon stratejilerine sahiptir. Bunlara ek olarak algoritmalarında Kesirsel Ölçek F (Scaling Factor F- Kesirsel Ölçek) ve Çaprazlama Katsayısı (Crossover Rate CR- Çaprazlama Katsayısı) parametrelerini belirlemek için kontrol stratejileri önermişlerdir. Algoritmalarının performansını CEC 2013, CEC 2014 ölçüt setlerinde test etmişlerdir. Zhang vd. ise” DE/current-to-pbest” mutasyon stratejisini kullanan ve F ve CR parametrelerini Cauchy ve Gaussian dağılım ile belirleyen JADE algoritmasını geliştirmişler ve birçok algoritmanın temelini oluşturmuşlardır [2]. Tanabe ve Fukunaga JADE algoritmasını temel alan ve tarihsel bellek depolama mekanizmasını parametre belirleme yöntemi olarak kullanan DE varyantı olan SHADE algoritmasını sunmuşlardır [3]. Daha sonra, SHADE algoritmasının popülasyon boyutunu zamana göre azaltılmasını sağlayan stratejiyi ekleyerek L-SHADE algoritmasını önermişlerdir [4]. Houssein vd. popülasyonu çeşitlendirilmesi için üç tane mutasyon mekanizması ile uyarlamalı parametre yöntemini DE algoritmasına entegre ederek Uyarlanabilir Güdümlü Diferansiyel Gelişim (Adaptive Guided Differential Evolution) Algoritmasını mühendislik problemlerine uygulamıştır [5]. Deng vd. Komşuluk Mutasyonu (Neighborhood Mutation - Komşuluk Mutasyonu) mekanizmasını DE algoritmasına eklemiştir [6]. Tan vd. Fitness Landscape yaklaşımını temel alan uyarlamalı mutasyon stratejisini DE algoritmasına dahil etmişlerdir [7].

Araştırmacılar bir diğer iyileştirme kategorisi olarak ise mutasyon denklem havuzu yaklaşımını önermişlerdir. Örneğin Qin vd., Self-Adaptive DE (SaDE) adını verdikleri “DE/rand/1”, “DE/rand-to-best/2”, “DE/rand/2” ve “DE/current-to-rand/1” mutasyon stratejilerini önceki başarılarına göre bir havuzdan seçen bir DE varyantı önermişlerdir [8]. Wang vd., large scale feature selection problemi için multi-popülasyon stratejisini, F ve CR parametrelerini dinamik olarak belirlemek için kendinden uyarlamalı (Self-Adaptive - Kendinden Uyarlamalı) yöntemini, mutasyon denklemi için sekiz adet mutasyon denklemi ile doldurulmuş olan havuz stratejisini ve son olarak özellik belirlemek için ağırlıklandırılmış model (Weighted Model – Ağırlıklandırılmış Model) yöntemini DE’ye uyarlayarak bir varyant önermişlerdir [9]. Ayrıca Wang vd., üç parametre ayarı ve üç mutasyon stratejisini içeren aday havuzuna sahip bir DE varyantı (Composite DE (CoDE)) önermişlerdir [10]. Bu algoritmaya göre, üç parametre ayarı ve mutasyon stratejileri rastgele seçilerek belirlenmektedir.

Literatürde çok sayıda çok sayıda metasezgisel algoritma yer almaktadır. Algoritmayı öneren araştırmacılar algoritmalarını test etmek için ölçüt setlerine başvurmuşlardır. Bu ölçüt setlerinden bir tanesi de IEEE evrimsel algoritmalar 2019 oturumuna ait CEC 2019 ölçüt setidir. Bu ölçüt seti de literatürde yoğun olarak kullanılmaktadır. Örneğin; Sağ Vortex arama algoritması, Sulaiman vd. evrimsel çifleşme algoritması, Ekinci vd. otomatik voltaj regülatörü için bir aquila optimizasyon algoritması önermişler ve algoritmalarının başarımını CEC 2019 ölçüt seti ile test etmişlerdir [11] [12] [13]. Duan ve Yu mühendislik problemleri için önerdikleri hibrit Gri kurt-Sinüs Cosinüs algoritmasının mühendislik problemlerine uygulamadan önce CEC 2019 ölçüt setinde algoritmanın başarımını test etmişlerdir [14]. Yine Shen vd. gerçek dünya problemlerini çözmeden önce ilk olarak algoritmalarını CEC 2019 ile sınamışlardır [15].

Bu çalışmada, Diferansiyel Gelişim Algoritmasının arama gücünü oluşturan mutasyon adımı için farklı bir yaklaşım önerilmektedir. Orijinal DE algoritmasında mutasyon adımı algoritma tasarlanırken belirlenmektedir ve evrimsel arama sürecine devam ettiği müddetçe bu adım değiştirilmez aynı kalır. Algoritmanın çözüm arama yeteneklerini önemli ölçüde etkileyen bu adımın sürekli aynı denklemi kullanarak değişmemesi algoritmanın farklı problem türleri ile karşılaştığında yetersiz kalmasına yol açmaktadır. Önerilen iyileştirme ile DE’nin sahip olduğu bu yetersizliğin üstesinden gelinmeye çalışılmaktadır. Bu iyileştirme, tek bir sabit mutasyon denklemi yerine içerisinden çok sayıda rastgele üretilmiş bir denklem havuzundan seçilmesine dayanan bir yaklaşıma sahiptir. Böylelikle algoritma karşılaşılabileceği farklı türde problemleri havuzdan elde edeceği mutasyon denklemleri ile aşabilecektir. Önerilen algoritma CEC 2019 ölçüt seti ile başarımı test edilmiş olup literatürde yer alan çeşitli metasezgisel algoritmalar sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir: Bölüm 2’de Orijinal Diferansiyel Gelişim ve önerilen algoritmanın detayları ile deneylerde kullanılan CEC 2019 ölçüt seti özelliklerini içeren Materyal ve Metot kısmı verilmiştir. Bölüm 3’de ise önerilen algoritma ve literatürde yer alan algoritmaların CEC 2019 sonuçları listelenmiştir. Bölüm 4 ile çalışma özetlenmiştir.



## 2. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, ilk olarak Orijinal Diferansiyel Gelişim Algoritmasına değinilecek ve daha sonra da önerilen algoritma detaylandırılacaktır. Bölümün sonunda da deneylerde kullanılan CEC 2019 ölçüt setinin özelliklerinden bahsedilecektir.

### 2.1. Diferansiyel Gelişim Algoritması

Diferansiyel Gelişim Algoritması (DE), R. Storn ve K. Price tarafından optimizasyon problemlerinin çözülmesi için önerilmiş olan popülasyon tabanlı bir algoritmadır [16], [17]. Orijinal DE algoritması, ilklendirme, mutasyon, çaprazlama ve seçme adımlarından oluşmaktadır [18] ve sözde kodu Algoritma 1'de verilmiştir.

---

#### Algoritma 1: Diferansiyel Gelişim Algoritması sözde kodu

---

```

1: İlklendirme adımı
2: iter ← 0
3: while Sonlandırma Kriteri Karşılanmaz İse do
4:   Mutasyon adımı
5:   Çaprazlama adımı
6:   Seçme adımı
7:   iter ← iter + 1

```

---

#### 2.1.1. İlklendirme

Mühendislik ve DE algoritması optimizasyon işlemine, D boyutlu çözümleri rastgele üretmek Np boyutlu popülasyon ile başlar. Bu popülasyona ilklendirme popülasyonu adı verilir ve aşağıda yer alan denklem ile üretilmektedir:

$$x_{ij} = x_L + rand(x_U - x_L) \quad (1)$$

Burada  $x_U$  ve  $x_L$  problemin en büyük ve en küçük sınır değerlerini göstermektedir. rand, tekdüze dağılım kullanılarak [0,1] aralığından üretilmiş olan rastgele bir sayıdır.

#### 2.1.2. Mutasyon

Her iterasyonda  $t$ 'de, her birey  $X_i$ 'ye -hedef birey olarak tanımlanır- mutasyon operatörü adı verilen bir işlem uygulanır. Bu işlemin sonucunda hedef bireye ait olan bir mutant birey adı verilen bir birey  $V_i$  üretilir. Bunun için literatürde araştırmacıların önerdiği çok sayıda mutasyon operatörü mevcuttur. Bunlardan bazıları aşağıdaki gibidir [19]:

DE\rand\1:

$$V_i = X_{r1} + F(X_{r2} - X_{r3}) \quad (2)$$

DE\rand\2:

$$V_i = X_{r1} + F(X_{r2} - X_{r3} + X_{r4} - X_{r5}) \quad (3)$$

#### 2.1.3. Çaprazlama

Çaprazlama katsayısı (CR-Crossover Rate), geçici çözümü uygulamak için kullanılır.

$$u_{ij} = \begin{cases} V_{ij}, & \text{if } rand_j < CR \text{ or } j == j_{rand} \\ X_{ij}, & \text{diğer durumda} \end{cases} \quad (4)$$

$u_{ij}$ , i. geçici, çözümü temsil etmektedir. Bu çözüm,  $X_i$  ve  $V_i$ 'nin çaprazlanması sonucunda oluşmaktadır. CR çaprazlama oranı olarak bilinmektedir ve algoritmanın, çalışmasının başında kullanıcı tanımlı olarak belirlenen bir parametredir. Geçici çözümün oluşumunda hangi elemanın geleceğinin belirlenmesinde kullanılmaktadır.  $j_{rand}$ , D boyutu göstermek üzere [1, D] aralığından rastgele seçilen bir sayıdır.

#### 2.1.4. Seçme

Diferansiyel Gelişim algoritmasındaki son adımdır. Bu adımda üretilmiş olan geçici çözüm ile mevcut çözüm arasında karar verilmektedir. Hangi çözüm daha iyi ise bir sonraki iterasyondaki popülasyona dahil olur.

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} X_i^t, & \text{if } f(X_i^t) < f(u_i^t) \\ X_i^t, & \text{diğer durumda} \end{cases} \quad (5)$$

## 2.2. Kendinden Uyarlamalı Diferansiyel Gelişim Algoritması (Ku-Dga)

Kendinden denklemler uyarlamalı bir diferansiyel Gelişim Algoritması önerilmiştir ve önerilen algoritmanın sözde kodu Algoritma 2’de verilmiştir.

DE’nin performansı sahip olduğu mutasyon, çaprazlama ve seçme adımlarına bağlıdır. Bu adımlar birbirini takip eden adımlar olduğu için özellikle mutasyon adımının başarısı diğerlerini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, burada seçilen mutasyon operatörü algoritmanın en önemli safhasını oluşturmaktadır. Bu çalışmada, literatürde yer alan yaklaşımlar tek mutasyon operatöründen veya birkaç mutasyon operatöründen oluşan yaklaşımın aksine terim bazlı oluşturulan kendinden uyarlamalı bir yöntem tercih edilmiştir.

Bu çalışmada, terim bazlı olarak operatörler oluşturularak mutasyon havuzuna (MP) doldurulmaktadır. Bu operatörler, Algoritma 3 [20], [21], şablonu kullanılarak algoritma başlangıcında rastgele üretilmektedir. Bu şablon kullanılarak üretilen denklemler bir ile dört terimli olabilmektedir. Her bir terim Tablo 1’den [20] ilgili terim sütunundaki seçeneklerden bir tanesi rastgele olarak seçilmektedir. Bu denklem üretilme işlemi, algoritma başlangıcında belirtilen denklem sayısı kadar yapılır. Üretilen her bir denkleme karşılık, denklemin kalitesini gösteren bir başarı sayısı atanır. Mutasyon stratejisi sözde kodu Algoritma 4’ de gösterilmiştir.

---

### Algoritma 2: KU-DGA sözde kodu

---

```

1: Algoritma parametrelerini belirle (NP, Ps, maxFes, MPS)
2: MP denklem havuzunu rastgele denklemler ile doldur.
3: OldBestArchive ← 1
4: equationCounter ← 1
5: while Sonlandırma Kriteri Karşılanmaz İse do
6:   for i = 1 to NP do
7:     KendindenUyarlamalıMutasyonStratejisiniUygula(CR, i, EquCount)
8:     EquCount ← EquCount + 1
9:     if EquCount == MPS then
10:      Başarı oranlarına göre denklemleri sırala
11:      MP havuzunun boyutunu küçült.
12:      EquCount ← 1
13:     if OldBestArchive > NP then
14:       OldBestArchive arşivindeki çözümleri amaç fonksiyonuna göre sırala
15:       İlk Np kadarını sakla. Geri kalan bireyleri havuzdan çıkar.
16:     iter ← iter + 1

```

---



---

### Algoritma 3: KU-DGA Mutasyon Operatörü Üretim Şablonu

---

1:  $X_{i,j} = \text{terim}_1 + \text{terim}_2 + \text{terim}_3 + \text{terim}_4$

---

**Tablo 1.** Algoritmanın genelleştirilmiş arama denklemindeki her bir bileşen için alternatif seçenekler

terim <sub>1</sub>	terim <sub>2</sub>	terim <sub>3</sub>	terim <sub>4</sub>
$X_{i,j}$	$\text{rand}(-1, 1)(X_{best,j} - X_{i,j})$	$\text{rand}(-1, 1)(X_{best,j} - X_{i,j})$	$\text{rand}(-1, 1)(X_{best,j} - X_{i,j})$
$X_{G,j}$	$\text{rand}(-1, 1)(X_{best,j} - X_{r1,j})$	$\text{rand}(-1, 1)(X_{best,j} - X_{r1,j})$	$\text{rand}(-1, 1)(X_{best,j} - X_{r1,j})$
$X_{r1,j}$	$\text{rand}(-1, 1)(X_{best,j} - X_{wo,j})$	$\text{rand}(-1, 1)(X_{best,j} - X_{wo,j})$	$\text{rand}(-1, 1)(X_{best,j} - X_{wo,j})$
	$\text{rand}(-1, 1)(X_{r1,j} - X_{r2,j})$	$\text{rand}(-1, 1)(X_{r1,j} - X_{r2,j})$	$\text{rand}(-1, 1)(X_{r1,j} - X_{r2,j})$
	$\text{rand}(-1, 1)(X_{r1,j} - X_{i,j})$	$\text{rand}(-1, 1)(X_{r1,j} - X_{i,j})$	$\text{rand}(-1, 1)(X_{r1,j} - X_{i,j}) \text{rand}(-1,$
	$\text{rand}(-1, 1)(X_{pbestTop,j} - X_{i,j})$	$\text{rand}(-1, 1)(X_{pbestTop,j} - X_{i,j})$	$1)(X_{pbestTop,j} - X_{i,j})$
	0	0	0

---

Evrimsel süreç boyunca her iterasyonda denklem havuzundan sırası ile rastgele üretilmiş olan bir denklem alınır ve mutasyon operatörü olarak kullanılır. Eğer ki bu denklem mevcut bireyi iyileştirmede başarılı olursa denklemin başarı değeri artırılır. Denklem havuzundaki bütün denklemler kullanıldıktan sonra, havuz içindeki denklemler başarı değerine göre sıralanır ve başarısız olan denklemler havuzdan çıkarılır. Böylelikle denklem havuzunun boyutu MPS küçültülür. Çalıştırma bütçesinin sonuna doğru denklem havuzunda çok az sayıda başarılı denklem kalır. Mutasyon denkleminin başarısı, başarılı olan güncellemesi ile hesaplanmaktadır.

$$MPS = \frac{MPS^2}{itr_{MAX}} \quad (6)$$

$itr_{MAX}$  maksimum iterasyon sayısını göstermektedir.  $MAXFES$  maksimum fonksiyon çağrım sayısı ( $itr_{MAX} \times NP$ )

## 2.3. CEC 2019

CEC (Constrained Evolutionary Competition) ölçüt setleri, genetik algoritmalar ve evrimsel hesaplama alanında kullanılan bir test kümeleridir. CEC ölçüt setleri, optimizasyon problemlerinin çözülmesinde algoritmaların performansını değerlendirmek için standartlaştırılmış bir ortam sağlar. CEC 2019, 2019 yılında düzenlenen bir CEC yarışmasının bir parçası olarak oluşturulan, 100 basamak problemi olarak da bilinen bir ölçüt setidir [22]. Bu

ölçüt seti, karmaşık optimizasyon problemlerini temsil eden 10 adet test fonksiyonundan oluşur. Tablo 2’de CEC 2019 fonksiyonları listelenmiştir [23].

**Algoritma 4:** KU-DGA mutasyon stratejisi sözde kodu

```

1: procedure KendindenUyarlamalıMutasyonStratejisiniUygula(CR,i,EquCount)
2: for d=1 to Dim do
    $u_{i,j}^t = \begin{cases} MP(EquCount) & \text{if}(rand \leq CR \parallel d = rand[1, D]) \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$ 
3: if  $f(u^t) \leq f(x^t)$  then
4:    $X_i^{t+1} = u_i^t$ 
5:    $X_i^t \rightarrow OldBestArchive$ 
6:   MP (EquCount) başarı artırma
7: else
8:    $X_i^{t+1} = X_i^t$ 

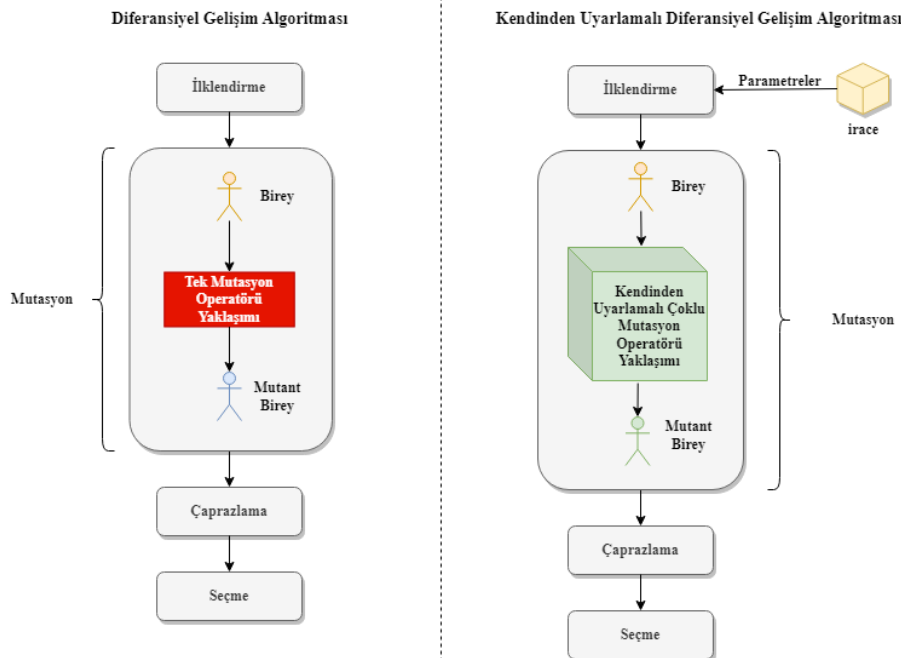
```

**Tablo 2.** CEC 2019 ölçüt setindeki fonksiyonlar.

Fonksiyon No	Fonksiyonlar	Boyut	Aralık
1	Storn’s Chebyshev Polynomial Fitting Problem	9	[-8192, 8192]
2	Inverse Hilbert Matrix Problem	16	[-16384, 16384]
3	Lennard-Jones Minimum Energy Cluster	18	[-4, 4]
4	Rastrigin’s Function	10	[-100, 100]
5	Griewangk’s Function	10	[-100, 100]
6	Weierstrass Function	10	[-100, 100]
7	Modified Schwefel’s Function	10	[-100, 100]
8	Expanded Schaffer’s F6 Function	10	[-100, 100]
9	Happy Cat Function	10	[-100, 100]
10	Ackley Function	10	[-100, 100]

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, yapılan deneylerin sonuçları verilecektir. KU-DGA bir DE varyantı algoritmadır. KU-DGA, IEEE’nin 2019 Evrimsel Hesaplama konferansının ölçüt seti CEC 2019 [22], [23] ile algoritmanın performansı test edilmiş ve elde edilen sonuçlar literatürdeki diğer çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca önerilen algoritmanın akış diyagramı Şekil 1’de verilmiştir.



**Şekil 1.** Önerilen algoritmanın akış diyagramı ve orijinal diferansiyel gelişim algoritması arasındaki farklar.

Şekil 1’de görüldüğü üzere orijinal diferansiyel gelişim algoritmasının mutasyon evresine yapılan değişiklik ile, tek mutasyon operatörü yaklaşımı önerilen algorithmda kendinden denklem uyarlamalı çoklu mutasyon operatörü ile değiştirilmiştir. Ayrıca iklendirme aşamasında en iyi parametrelerle algoritmayı başlatmak için irace parametre belirleme aracı kullanılmıştır. Yapılan değişiklik ve önerilen yaklaşım bölüm 2.2’de detaylandırılmıştır. Bu yaklaşımın mutasyon evresinde tek bir mutasyon operatörü yerine denklem havuzundan seçilen birden fazla mutasyon operatörü ile mutant bireyler elde edilmekte, en iyi mutant bireyleri elde eden denklemlerin skoru

artırılarak mutasyonda kullanılan mutasyon operatörlerinin en iyi operatörlerden seçilmesi sağlanmakta ve kötü denklemlerde denklem havuzundan atılarak en iyi denklemlerin kullanılmasının önünü açmaktadır. Böylece daha güçlü bir diferansiyel gelişim algoritması elde edilmiştir.

### 3.1. Irace

Önerilen KU-DGA’da seçilen parametreler algoritmanın performansını doğrudan etkilemektedir. Dolayısıyla bu parametre değerlerinin doğru seçilmesi uygulamanın performansını gerçekçi bir şekilde yansıtması için elzemdir. Bu sebeple deneyde kontrol parametrelerini belirlemek için bir otomatik yapılandırma aracı olan irace (iterative racing) kullanılmıştır [24]. Irace, bir R paketidir. Irace, parametre ayarlaması için yarışma (racing) tabanlı bir yaklaşım kullanır. Bu yaklaşım, bir dizi aday parametre konfigürasyonunu birbiriyle karşılaştırarak en iyi konfigürasyonu belirlemeyi amaçlar. Irace algoritması, iteratif bir şekilde aday parametre konfigürasyonlarını oluşturur, bu konfigürasyonları değerlendirir ve en iyi sonuçları veren konfigürasyonları bir sonraki iterasyona taşır. Bu işlem, birçok iterasyon sonunda en iyi parametre ayarlarını elde etmek için tekrarlanır.

### 3.2. Deneysel Ayarlar

Önerilen algoritma 50 popülasyon boyutu ve iterasyonu 1000 olacak şekilde CEC 2019 problemlerinde çalıştırılmıştır. Adil bir karşılaştırma yapılması için Chakraborty vd. çalışma koşullarına uygun olarak deneyler gerçekleştirilmiştir [25]. Popülasyon boyutu 50 ve iterasyonu 1000 olarak belirlenmiştir ve Chakraborty vd. yapmış olduğu çalışmanın sonuçları da deneylere dahil edilmiştir [25]. Ölçüt setinde yer alan her fonksiyon önerilen algoritma ile 30 defa çalıştırılarak her fonksiyon için 30 sonuç elde edilmiştir. Ortalama, standart sapma ve en iyi değerleri hesaplanmıştır. Önerilen KU-DGA algoritması için Çaprazlama Oranı 0.4 ve denklem havuzu boyutu 200 seçilmiştir. CEC 2019 fonksiyon deneyleri Ubuntu Linux 18.04 işletim sistemine sahip Intel Xeon E5 2670 işlemcili ve 64 GB hafızaya sahip bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir.

### 3.3. CEC 2019 Sonuçları ve Diğer Metasezgiseller ile Karşılaştırılması

Chakraborty vd. önerdikleri WOAmM algoritmasını JAYA, SCA, BOA MFO, WOA algoritmaları ile kıyaslamışlar ve önerdikleri WOAmM algoritmasının rakiplerine kıyasla üstün geldikleri sonuçları çalışmalarında göstermişlerdir [25]. Parametre değerleri olarak ilgili makalelerin [26]–[30] parametre değerlerini kullanmışlardır. Bizim önerdiğimiz KU-DGA algoritmasının sonuçları ve karşılaştırma metrikleri, Chakraborty vd. önerdiği WOAmM algoritması ve karşılaştırılan diğer algoritmaların sonuçları ile birleştirilip Tablo 3’de verilmiştir [25]. Buna ek olarak KU-DGA algoritması ve diğer algoritmaları sıralamak için istatistiksel test olarak Friedman testi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 4’te verilmiştir.

**Tablo 3.** Önerilen algoritma ile diğer algoritmaların CEC 2019 karşılaştırma sonuçları.

No		KU-DGA	WOAmM	WOA	MFO	BOA	SCA	JAYA
F1	Ortalama	1.77x10 <sup>6</sup>	1	3.35x10 <sup>6</sup>	1	1	1	8.39x10 <sup>6</sup>
	Std. Sapma	1.93x10 <sup>6</sup>	≈0	3.94x10 <sup>6</sup>	0	4.13x10 <sup>-8</sup>	0	3.12x10 <sup>6</sup>
	En İyi	<b>1.50x10<sup>-1</sup></b>	1	4.54x10 <sup>2</sup>	1	1	1	3.87x10 <sup>6</sup>
F2	Ortalama	4.17x10 <sup>3</sup>	4.31	7.71x10 <sup>3</sup>	5	5.01	5	5.35x10 <sup>3</sup>
	Std. Sapma	9.59x10 <sup>2</sup>	9.04x10 <sup>-2</sup>	2.73x10 <sup>3</sup>	0	3.47x10 <sup>-3</sup>	0	9.02x10 <sup>2</sup>
	En İyi	2.12x10 <sup>3</sup>	4.23	3.56x10 <sup>3</sup>	5	5	5	3.71x10 <sup>3</sup>
F3	Ortalama	4.01	2.88	4.11	7.43	4.77	6.12	9.24
	Std. Sapma	1.6	1.11	1.82	5.02x10 <sup>-2</sup>	9.38x10 <sup>-1</sup>	1.45	9.91x10 <sup>-1</sup>
	En İyi	1.49	1.41	1.43	7.33	3.28	4.41	6.40
F4	Ortalama	<b>2.57x10<sup>1</sup></b>	3.42x10 <sup>1</sup>	5.04x10 <sup>1</sup>	7.80x10 <sup>1</sup>	9.88x10 <sup>1</sup>	7.52x10 <sup>1</sup>	3.71x10 <sup>1</sup>
	Std. Sapma	<b>4.05</b>	8.42	2.09x10 <sup>1</sup>	7.84	1.17x10 <sup>1</sup>	1.52x10 <sup>1</sup>	5.05
	En İyi	1.77x10 <sup>1</sup>	1.89x10 <sup>1</sup>	1.30x10 <sup>1</sup>	7.11x10 <sup>1</sup>	7.85x10 <sup>1</sup>	4.69x10 <sup>1</sup>	2.61x10 <sup>1</sup>
F5	Ortalama	<b>7.16x10<sup>-1</sup></b>	1.60	2.05	5.48x10 <sup>1</sup>	1.18x10 <sup>2</sup>	1.49x10 <sup>1</sup>	2.70
	Std. Sapma	<b>2.06x10<sup>-1</sup></b>	2.48x10 <sup>-1</sup>	4.55x10 <sup>-1</sup>	1.09x10 <sup>1</sup>	2.19x10 <sup>1</sup>	9.61	2.38x10 <sup>-1</sup>
	En İyi	<b>3.26x10<sup>-2</sup></b>	1.25	1.45	3.79x10 <sup>1</sup>	7.42x10 <sup>1</sup>	4.33	2.22
F6	Ortalama	<b>3.44</b>	5.55	8.13	1.05x10 <sup>1</sup>	1.12x10 <sup>1</sup>	8.62	7.67
	Std. Sapma	8.64x10 <sup>-1</sup>	1.56	1.83	3.87x10 <sup>-1</sup>	1.22	1.54	1.06
	En İyi	<b>6.50x10<sup>-1</sup></b>	3.33	3.85	1.04x10 <sup>1</sup>	6.66	6.54	5.81
F7	Ortalama	<b>7.78x10<sup>2</sup></b>	1.14x10 <sup>3</sup>	1.30x10 <sup>3</sup>	1.69x10 <sup>3</sup>	2.81x10 <sup>3</sup>	2.6x10 <sup>3</sup>	1.22x10 <sup>3</sup>
	Std. Sapma	<b>1.62x10<sup>2</sup></b>	2.62x10 <sup>2</sup>	3.5x10 <sup>2</sup>	1.81x10 <sup>2</sup>	2.07x10 <sup>2</sup>	3.88x10 <sup>2</sup>	1.82x10 <sup>2</sup>
	En İyi	<b>3.69x10<sup>2</sup></b>	4.9x10 <sup>2</sup>	5.42x10 <sup>2</sup>	1.59x10 <sup>3</sup>	1.65x10 <sup>3</sup>	1.44x10 <sup>3</sup>	9.03x10 <sup>2</sup>
F8	Ortalama	<b>2.99</b>	4.19	4.53	4.49	4.96	5.16	4.45
	Std. Sapma	2.33x10 <sup>-1</sup>	3.67x10 <sup>-1</sup>	3.29x10 <sup>-1</sup>	4.66x10 <sup>-4</sup>	2.08x10 <sup>-1</sup>	1.57x10 <sup>-1</sup>	1.58x10 <sup>-1</sup>
	En İyi	<b>2.49</b>	3.23	3.93	4.49	4.42	4.74	4.08
F9	Ortalama	<b>3.26x10<sup>-1</sup></b>	1.34	1.36	2.32	4.52	1.93	1.6
	Std. Sapma	<b>6.29x10<sup>-2</sup></b>	1.2x10 <sup>-1</sup>	1.78x10 <sup>-1</sup>	9.3x10 <sup>-1</sup>	4.62x10 <sup>-1</sup>	2.15x10 <sup>-1</sup>	1.17x10 <sup>-1</sup>
	En İyi	<b>1.31x10<sup>-1</sup></b>	1.06	1.11	1.52	3.23	1.48	1.36
F10	Ortalama	<b>2.01x10<sup>1</sup></b>	2.11x10 <sup>1</sup>	2.12x10 <sup>1</sup>	2.13x10 <sup>1</sup>	2.15x10 <sup>1</sup>	2.20x10 <sup>1</sup>	2.14x10 <sup>1</sup>
	Std. Sapma	<b>4.24x10<sup>-2</sup></b>	7.36x10 <sup>2</sup>	1.05x10 <sup>-1</sup>	8.55x10 <sup>-2</sup>	8.73x10 <sup>-2</sup>	1.78x10 <sup>-1</sup>	8.64x10 <sup>-2</sup>
	En İyi	<b>2.00x10<sup>1</sup></b>	2.1x10 <sup>1</sup>	2.1x10 <sup>1</sup>	2.13x10 <sup>1</sup>	2.13x10 <sup>1</sup>	2.16x10 <sup>1</sup>	2.12x10 <sup>1</sup>

Önerilen KU-DGA'nın rakiplerinden başarılı olan değerleri koyu olarak yazılmıştır.

**Tablo 4.** Friedman testi ile genel sıralama.

No	KU-DGA	WOAmM	WOA	MFO	BOA	SCA	JAYA
F1	5	2.5	6	2.5	2.5	2.5	7
F2	5	1	7	2.5	4	2.5	6
F3	2	1	3	6	4	5	7
F4	1	2	4	6	7	5	3
F5	1	2	3	6	7	5	4
F6	1	2	4	6	7	5	3
F7	1	2	4	5	7	6	3
F8	1	2	5	4	6	7	3
F9	1	2	3	6	7	5	4
F10	1	2	3	4	6	7	5
Ortalama sıralama	1.9	1.9	4.2	4.8	5.8	5.0	4.5

Önerilen KU-DGA algoritması Tablo 3'de görüldüğü üzere CEC 2019 fonksiyonlarının “ortalama” sonuçları baz alındığında F1, F2, F3 fonksiyonları hariç diğer tüm fonksiyonlarda rakiplerini geride bırakarak birinci sırada gelmiştir. “En iyi” sonuçlarda F2, F3, F4 fonksiyonları hariç tüm fonksiyonlarda önerilen algoritma KU-DGA, rakiplerini geride bırakarak birinci olmuştur. “En iyi” ve “ortalama” sonuçlarda toplamda CEC 2019 on test fonksiyonunun yedisinde, önerilen algoritma birinci gelmiştir. Tablo 4 incelendiğinde KU-DGA algoritmasının sonuçları karşılaştırıldığı algoritmalara göre oldukça rekabetçidir. F4-F10 aralığında bütün algoritmaların önünde yer aldığı görülmektedir. Önerilen algoritmanın elde ettiği ortalama sıralama değerini ilk iki test fonksiyonunda aldığı kötü sıralamaların etkilediği görülmektedir.

#### 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada yeni bir algoritma önerilmiştir. Önerilen algoritma bir DE varyantı olup, farklı bir mutasyon stratejisi uygulanmış, CEC 2019 fonksiyonlarında test edilmiştir. Ayrıca literatürde yer alan diğer metasezgiseller ile sonuçlar karşılaştırılmıştır. Önerilen algoritma KU-DGA diğerlerine göre daha zor olan toplamda yedi fonksiyonda (F4-F10) “ortalama” sonuçlarda rakiplerini geride bırakmıştır. Ayrıca “en iyi” sonuçlarda CEC 2019'un on fonksiyonunun yedisinde en başarılı sonuca sahiptir. KU-DGA algoritması CEC 2019 fonksiyonları kendi sonuçları içerisinde karşılaştırıldığında en başarılı “ortalama” değerini F9 test fonksiyonunda, en başarılı “en iyi” değerini F5 fonksiyonunda almıştır.

Sonraki çalışmalarda KU-DGA algoritmasına yeni stratejiler eklenerek performansı artırılabilir. Farklı DE varyantları ve diğer meta sezgisel algoritmalarla da karşılaştırılabilir.

#### Yazar Katkıları

Yazarlar makaleye eşit derecede katkı sağlamıştır.

#### Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler

#### KAYNAKÇA

- [1] Z. Meng and C. Yang “Two-stage differential evolution with novel parameter control,” *Inf Sci (NY)*, vol. 596, pp. 321–342, 2022.
- [2] J. Zhang and A. C. Sanderson “JADE: adaptive differential evolution with optional external archive,” *IEEE Transactions on evolutionary computation*, vol. 13, no. 5, pp. 945–958, 2009.
- [3] R. Tanabe and A. Fukunaga “Evaluating the performance of SHADE on CEC 2013 benchmark problems,” in *2013 IEEE Congress on evolutionary computation, IEEE, 2013*, pp. 1952–1959.
- [4] R. Tanabe and A. S. Fukunaga “Improving the search performance of SHADE using linear population size reduction,” in *2014 IEEE congress on evolutionary computation (CEC)*, IEEE, 2014, pp. 1658–1665.
- [5] E.H. Houssein, H. Rezk, A. Fathy, M. A. Mahdy, and A. M. Nassef “A modified adaptive guided differential evolution algorithm applied to engineering applications,” *Eng Appl Artif Intell*, vol. 113, p. 104920, 2022.
- [6] W. Deng, S. Shang, X. Cai, H. Zhao, Y. Song, and J. Xu “An improved differential evolution algorithm and its application in optimization problem,” *Soft comput*, vol. 25, pp. 5277–5298, 2021.
- [7] Z. Tan, K. Li, and Y. Wang, “Differential evolution with adaptive mutation strategy based on fitness landscape analysis,” *Inf Sci (NY)*, vol. 549, pp. 142–163, 2021.
- [8] A.K. Qin, V.L. Huang, and P.N. Suganthan “Differential evolution algorithm with strategy adaptation for global numerical optimization,” *IEEE transactions on Evolutionary Computation*, vol. 13, no. 2, pp. 398–417, 2008.

- [9] X. Wang, Y. Wang, K.-C. Wong, and X. Li “A self-adaptive weighted differential evolution approach for large-scale feature selection,” *Knowl Based Syst*, vol. 235, p. 107633, 2022.
- [10] Y. Wang, Z. Cai, and Q. Zhang “Differential evolution with composite trial vector generation strategies and control parameters,” *IEEE transactions on evolutionary computation*, vol. 15, no. 1, pp. 55–66, 2011.
- [11] T. Sağ “PVS: a new population-based vortex search algorithm with boosted exploration capability using polynomial mutation”, *Neural Comput and Applic*, vol. 34, pp. 18211-18287, 2022.
- [12] S. Ekinci, D. Izci, E. Eker, and L. Abualigah “An effective control design approach based on novel enhanced aquila optimizer for automatic voltage regulator”, *Springer Netherlands*, vol. 56, no. 2, 2023.
- [13] M.H. Sulaiman, Z. Mustafa, M.M. Saari, H. Daniyal, and S. Mirjalili “Evolutionary mating algorithm,” *Neural Comput Appl*, vol. 35, no. 1, pp. 487–516, 2023.
- [14] Y. Duan and X. Yu “A collaboration-based hybrid GWO-SCA optimizer for engineering optimization problems,” *Expert Syst Appl*, vol. 213, no. PB, p. 119017, 2023.
- [15] B. Shen, M. Khishe, and S. Mirjalili “Evolving Marine Predators Algorithm by dynamic foraging strategy for real-world engineering optimization problems,” *Eng Appl Artif Intell*, vol. 123, p. 106207, 2023.
- [16] R. Storn, “Differential evolution-a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces, Technical report,” *International Computer Science Institute*, vol. 11, 1995.
- [17] R. Storn and K. Price “Differential evolution-a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces,” *Journal of global optimization*, vol. 11, no. 4, p. 341, 1997.
- [18] S. Das and P. N. Suganthan “Differential evolution: A survey of the state-of-the-art,” *IEEE transactions on evolutionary computation*, vol. 15, no. 1, pp. 4–31, 2010.
- [19] C.-W. Chiang, W.-P. Lee, and J.-S. Heh “A 2-Opt based differential evolution for global optimization,” *Appl Soft Comput*, vol. 10, no. 4, pp. 1200–1207, 2010.
- [20] D. Aydın, G. Yavuz, and T. Stützle “ABC-X: a generalized, automatically configurable artificial bee colony framework,” *Swarm Intelligence*, vol. 11, pp. 1–38, 2017.
- [21] G. Yavuz and D. Aydın “Improved self-adaptive search equation-based artificial bee colony algorithm with competitive local search strategy,” *Swarm Evol Comput*, vol. 51, p. 100582, 2019.
- [22] K.V. Price, N.H. Awad, M.Z. Ali, and P.N. Suganthan “Problem definitions and evaluation criteria for the 100-digit challenge special session and competition on single objective numerical optimization,” in *Technical Report*, Nanyang Technological University Singapore, 2018.
- [23] G. Yavuz “100 Basamak Probleminin JADE Algoritması ile Çözülmesi,” *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, no. 21, pp. 493–500, 2021.
- [24] M. López-Ibáñez, J. Dubois-Lacoste, L. P. Cáceres, M. Birattari, and T. Stützle “The irace package: Iterated racing for automatic algorithm configuration,” *Operations Research Perspectives*, vol. 3, pp. 43–58, 2016.
- [25] S. Chakraborty, A. K. Saha, S. Sharma, S. Mirjalili, and R. Chakraborty “A novel enhanced whale optimization algorithm for global optimization,” *Comput Ind Eng*, vol. 153, p. 107086, 2021.
- [26] R. Rao “Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems,” *International Journal of Industrial Engineering Computations*, vol. 7, no. 1, pp. 19–34, 2016.
- [27] S. Mirjalili “SCA: a sine cosine algorithm for solving optimization problems,” *Knowl Based Syst*, vol. 96, pp. 120–133, 2016.
- [28] S. Arora and S. Singh, “Butterfly optimization algorithm: a novel approach for global optimization,” *Soft comput*, vol. 23, pp. 715–734, 2019.
- [29] S. Mirjalili “Moth-flame optimization algorithm: A novel nature-inspired heuristic paradigm,” *Knowl Based Syst*, vol. 89, pp. 228–249, 2015.
- [30] S. Mirjalili and A. Lewis, “The whale optimization algorithm,” *Advances in engineering software*, vol. 95, pp. 51–67, 2016.



## Derin Öğrenme Kullanılarak Fundus Görüntülerinden Katarakt ve Diyabetik Retinopati Tespiti

### Detection of Cataract and Diabetic Retinopathy from Fundus Images Using Deep Learning

<sup>1</sup>Şükrü AYKAT , <sup>2</sup>Sibel SENAN 

<sup>1</sup>Mardin Artuklu Üniversitesi, Midyat Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Mardin, Türkiye

<sup>2</sup>İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

<sup>1</sup>sukruaykat@gmail.com, <sup>2</sup>ssenan@iuc.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 25 July 2023

Accepted : 13 October 2023

##### Keywords:

Retinal Diseases, Deep Learning, Convolutional Neural Networks, Cataract, Diabetic Retinopathy

#### ABSTRACT

The aim of this study is to use deep learning-based methods for the detection of retinal diseases. In the study, Kaggle dataset, which was created by taking fundus images from IDRID (The Indian diabetic retinopathy image), ODIR (Ocular Disease Intelligent Recognition) and HRF (High-Resolution Fundus) datasets, was used to detect retinal diseases. This data set consists of fundus images of healthy individuals and diabetic retinopathy and cataract patients. In the study, first a pre-processed data set was created by applying the histogram equalization method on the Kaggle data set. Then, trainings were carried out on the data sets by adjusting the hyperparameters of the traditional deep learning models of RestNet50, InceptionV3, MobileNet, Xception and EffcientNetV2S. Finally, a MobileNet-based hybrid model with the highest success on datasets has been developed. The proposed hybrid model achieved 99% accuracy on the preprocessed dataset. It has been observed that the classification success of the hybrid model is higher than the success of the deep learning models considered.

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 25 Temmuz 2023

Kabul : 13 Ekim 2023

##### Anahtar Kelimeler:

Retina Hastalıkları, Derin Öğrenme, Evrişimli Sinir Ağları, Katarakt, Diyabetik Retinopati

#### ÖZET

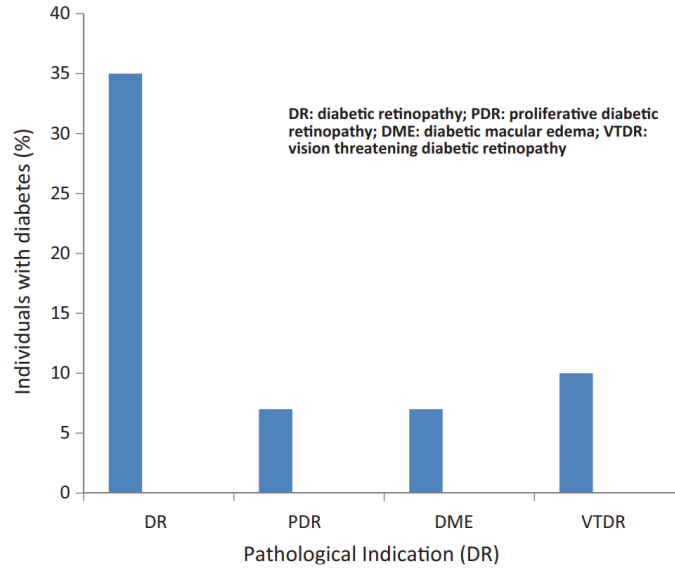
Bu çalışmanın amacı, retina hastalıklarının tespiti için derin öğrenme tabanlı yöntemlerin kullanılmasıdır. Çalışmada retina hastalıklarının tespit etmek için IDRID (The Indian diabetic retinopathy image), ODIR (Ocular Disease Intelligent Recognition) ve HRF (High-Resolution Fundus) veri setlerinden fundus görüntüleri alınarak oluşturulmuş olan Kaggle veri seti kullanılmıştır. Bu veri seti sağlıklı bireyler ile diyabetik retinopati ve katarakt hastalarının fundus görüntülerinden oluşmaktadır. Çalışmada ilk önce Kaggle veri seti üzerinde histogram eşitleme yöntemi uygulanarak ön işlenmiş bir veri seti oluşturulmuştur. Ardından RestNet50, InceptionV3, MobileNet, Xception ve EffcientNetV2S geleneksel derin öğrenme modellerinin hiperparametre ayarı yapılarak veri setleri üzerinde eğitimler gerçekleştirilmiştir. Son olarak veri setleri üzerinde en yüksek başarıya sahip MobileNet tabanlı bir hibrit model geliştirilmiştir. Önerilen hibrit model, ön işlenmiş veri seti üzerinde %99 doğruluk oranı elde etmiştir. Hibrit modelin sınıflandırma başarısının ele alınan derin öğrenme modellerinin başarısından daha yüksek olduğu görülmüştür.

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayımlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

## 1. GİRİŞ

Diyabetik retinopati (DR) daha çok uzun süreli diyabetli hastalarda yaygın olarak görülen bir retina hastalığıdır [1]. Diyabet hastası olan yaklaşık 285 milyon kişinin üçte birinde DR belirtileri olup, bunların da üçte birinde görmeyi tehdit eden DR hastalığı bulunmaktadır [2]. Şekil 1, H. Ahsan [3] tarafından 2015 yılında yapılan çalışmaya göre diyabetli insanlar içinde DR, PDR (proliferatif diyabetik retinopati), DME (diyabetik maküler ödem), VTDR (görmeyi tehdit eden diyabetik retinopati), retina hastalarının oranlarını göstermektedir. Şekil 1 incelendiğinde retina hastalıkları içinde DR hasta oranının oldukça fazla olduğu görülmektedir. Yine 2015 senesinde R.Varma ve ark. [4] tarafından yapılmış çalışmaya göre DR hastalarının sayısının 2050'ye kadar üç katına çıkacağı tahmin edilmektedir.

Diyabetik hastalarda herhangi bir klinik retinopati semptomunun ortaya çıkması birkaç yıl almaktadır [5]. İstatistiksel verilere dayanarak 5 yıl diyabet hastası olan bireylerde DR gelişme riski yaklaşık %17 iken, 15 yıl veya daha uzun süre diyabet tanısı olan hastalarda ise DR gelişme riski yaklaşık %97,5 olmaktadır [6]. Uzun süreli tedavi edilmeyen diyabetin sonuçları çok ağır olduğundan ve şiddetli DR yaygınlaşmasına yol açabileceğinden, diyabet hastalığının uygun ve erken tedavisi çok önemlidir [7, 8]. Önlenebilir görme bozukluğunun ortadan kaldırılması, uzman doktor sayısına ve gözün tedavisi için gerekli olan temel sağlık hizmetleri altyapısına bağlı olmaktadır [9, 10]. Hindistan'da, göz sağlığı uzmanlarının nüfusa oranı 1:107.000 iken bazı bölgelerde 608.000 nüfus için sadece bir göz sağlığı uzmanı bulunmaktadır [11, 12]. Sürekli takip gerektiren çok sayıda insan ve göz doktoru eksikliği nedeniyle, DR tespiti için bilgisayar destekli tanı aracı geliştirme ihtiyacı ortaya çıkmaktadır [13, 14].



Şekil 1. Diyabet hastası olan kişilerde retina hastalıkları oranı [3].

Katarakt, merceği bulanıklaştıran proteinin birikmesiyle ortaya çıkmaktadır [15]. Katarakt hastalığı gelişimsel anormallikler, travma, metabolik bozukluklar, genetik, ilaca bağlı değişiklikler, yaş vb. gibi birçok faktörle ilişkili olmaktadır [16]. Ayrıca diyabetik hastalarında da katarakt görme bozukluğunun başlıca nedenlerinden biridir [17]. Katarakt nedenlerine göre yaşa bağlı katarakt, doğumsal katarakt ve ikincil katarakt olarak sınıflandırılmaktadır [16, 18]. Kristal lens opaklığının konumuna bağlı olarak nükleer katarakt, kortikal katarakt ve posterior subkapsüler katarakt olarak gruplandırılmaktadır [19, 20]. Nükleer katarakt, nükleer bölgede kademeli bulutlanmayı ve kademeli sertleşmeyi ifade etmektedir. Kortikal katarakt, beyaz kama şeklinde ve radyal olarak yönlendirilmiş opasitelerin şeklidir ve merceğin dış kenarından merkeze doğru kol benzeri bir tarzda gelişmektedir [16, 21]. Posterior subkapsüler katarakt, granüler opasitelerdir ve semptomu, lens kapsülünün altına serpilmiş küçük kırıntılar veya kum parçacıklarını içermektedir [19]. Katarakt, çoğunlukla gelişmekte olan ülkelerde, küresel körlüğün önemli bir nedeni olmaya devam etmektedir [22]. Genel yaygınlık azalıyor olsa da, dünya çapında 10 milyondan fazla insanın katarakta ikincil olarak kör olduğu ve 35 milyondan fazla insanın orta veya ciddi görme bozukluğu olduğu tahmin edilmektedir [23]. Teknolojideki son gelişmelere ve artan küresel farkındalık ve erişime rağmen, katarakt büyük bir küresel sağlık yükü olmaya devam etmektedir [15, 24].

Retina hastalıklarının ilerlemesi ve saptanması, gözün retinasının optik disk, kan damarları ve fovea gibi farklı retinal kısımlarında veya yakınındaki bozukluklar aracılığıyla gözlemlenmektedir [25]. Bu gözlemleri yapmak için retina görüntülerine ihtiyaç bulunmaktadır. Retina görüntülerinin doğru analiz edilebilmesi için retinanın doğal yapısında bulunan optik disk ve makula gibi yapıların doğru tanınması ve dejenerasyonlardan ayırt edilmesi gerekmektedir [26]. Göz doktorları bu görüntüleri analiz ederek retina hastalığını teşhis etmektedir. Ancak bazı çalışmalara göre gelecekte sınırlı sayıda göz doktorunun retina hastalarına bakamayacak durumda olacağı öngörülmektedir [27]. Retina hastaları ile göz hekimi sayısı arasındaki bu büyük orantısız durum hizmetlerde



gecikmelere yol açacaktır. Böyle bir senaryoda göz doktorlarının iş yükünü hafifletmek için göz hastalıklarını otomatik olarak tespit eden sistemlere büyük ihtiyaç olacaktır.

Geçmişten günümüze araştırmacılar, matematiksel morfoloji görüntü işleme [28], şablon eşleştirme [29], piksel sınıflandırma [30], dalgacık analizi [31], bulanık C-ortalama kümeleme [32] yöntemlerini kullanarak görüntülerden farklı özellikleri tanımlamışlardır. Bu yöntemler ile mikroanevrizma, eksuda, kırmızı lezyon ve anormal damar özellikleri saptamak için kullanılmışlardır. Son yıllarda tıp alanında yapay zekaya dayalı yöntemler kullanılarak yapılan analiz çalışmalarında önemli sonuçlar elde edilmiştir [33].

Bu çalışmanın amacı, derin öğrenme yaklaşımları kullanılarak DR ve katarakt retina hastalıkları tespitini yüksek başarı oranı ile gerçekleştirmektir. Bu amaçla, hastalık tespit başarı sonuçlarını analiz etmek için beş farklı hiperparametre ayarlı derin öğrenme modeli ve derin öğrenme tabanlı hibrit bir model önerilmiştir. Kullanılan derin modellerin doğruluk yüzdeleri sunularak performans değerlendirmeleri yapılmıştır.

Çalışma 5 adımda değerlendirilebilir:

1. IDRID (Indian Diabetic Retinopathy Image Dataset), ODIR (Ocular Disease Intelligent Recognition) ve HRF (High-Resolution Fundus) veri setlerinden fundus görüntüleri alınarak oluşturulmuş Kaggle veri seti içerisinde sağlıklı bireyler ile DR ve katarakt hasta görüntülerinden yaklaşık 1000'er adet örnek alınarak bir veri seti oluşturulmuştur.
2. Oluşturulan yeni veri seti görüntülerine histogram eşitleme işlemi uygulanarak yeni bir ön işlenmiş veri seti elde edilmiştir.
3. Evrişimli sinir ağı (ESA) modellerinin (ResNet50, InceptionV3, MobileNet, Xception, EfficientNetV2S) sınıflandırma performanslarını artırmak için hiperparametre ayarlı sürümleri elde edilmiş ve veri setleri üzerinde orijinal ve hiperparametre ayarlı versiyonları eğitilmiştir.
4. Eğitilen modellerden en başarılı sonucu veren hiperparametre ayarlı MobileNet tabanlı bir hibrit model geliştirilmiştir. Geliştirilen hibrit model ham veri seti ve ön işlenmiş veri seti üzerinde eğitilerek model performansı bu çalışmada kullanılan diğer modellerin performansı ile karşılaştırılmıştır.
5. Hiperparametre ayarlı ESA modellerinin ve önerilen hibrit yöntemin performans sonuçları literatürdeki benzer çalışmaların performansı ile karşılaştırılmıştır. Hibrit yöntemin literatürdeki bu çalışmalara göre daha başarılı sonuçlar elde ettiği görülmüştür.

Makalenin ikinci bölümünde literatür araştırması; üçüncü bölümünde kullanılan yöntemler, önerilen model ve veri kümesi hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Deneysel bulgulara ve tartışmaya dördüncü bölümde yer verilmiştir. Makalenin son bölümünde nihai sonuçlara değinilmiştir.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Günümüzde derin öğrenme modelleri kullanılarak retina görüntülerinin analizi için birçok çalışma yapılmıştır. Bu bölümde derin öğrenme yöntemleri kullanılarak DR ve katarakt sınıflandırılması ile ilgili çalışmalar ele alınmıştır. DR hastalık seviyelerini tespit etmek için literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Tariq ve ark. [34] makalede derin transfer öğrenmesi kullanmışlardır. Beş evrişimsel sinir ağı tabanlı tasarım kullanmışlardır (AlexNet, GoogleNet, Inception V4, Inception ResNetV2 ve ResNeXt-50). Veri setini DR hastalığın şiddetine göre farklı kategorilerde sınıflandırmışlardır. Deneysel sonuçlara göre önceden eğitilmiş model ResNeXt-50'nin, çalışmada kullandıkları önceden eğitilmiş modeller arasında %97,53 ile en iyi sınıflandırma doğruluğunu elde etmişlerdir. Pava Rodriguez [35], çalışmalarında fundus görüntüleri kullanarak DR'nin otomatik olarak sınıflandırılması için iki yaklaşım sunmuşlardır. İlki, DR ile ilgili ana oküler lezyonları tanımlamak ve hastalığı teşhis etmek için ESA'yı, transfer öğrenmeyi, sığ makine öğrenimi sınıflandırıcılarını kullanmışlardır. İkincisi ise aynı anda oküler lezyonları ve DR'yi teşhis eden çok görevli bir modeldir. Kaggle EyePACS ve Messidor-2 veri kümelerinden bir göz doktoru tarafından oküler lezyonlar etiketlenerek alt kümeler oluşturmuşlardır. Kaggle EyePACS alt kümesini eğitim seti olarak, Messidor-2 alt kümesini ise hem lezyonlar hem de DR sınıflandırma modelleri için test seti olarak kullanmışlardır. Sonuçlar, her iki yöntemin de son teknoloji performanslarla karşılaştırılabilir sonuçlar elde ettiğini göstermişlerdir. Vinayaki ve Kalaiselvi [36], çalışmalarında DR tespiti ve sınıflandırması için yeni bir çerçeve önermişlerdir. Ön işleme, bölütleme, özellik çıkarma ve sınıflandırma olmak üzere dört aşamadan oluşan bir çalışma önermişlerdir. İlk olarak görüntü ön işlemesi yapılmış ve ardından çoklu eşik tabanlı remora optimizasyon algoritması ile damar bölütlemesi gerçekleştirmişlerdir. Özellik çıkarma ve sınıflandırma için Wild Geese algoritması ile Region-based Convolution Neural Network (R-CNN) kullanmışlardır. Sonuç olarak, R-CNN modeli ile DR olmayan, proliferatif DR, şiddetli DR, orta dereceli DR, hafif DR dahil olmak üzere DR'nin farklı seviyelerini etkili bir şekilde sınıflandırmışlardır. Chilukoti ve ark. [37], çalışmada önceden eğitilmiş ResNet, VGG ve EfficientNet modelleri kullanmışlardır. Diyabetik retinopatinin farklı evrelerini şiddetine göre sınıflandırmak için doğruluk, f1 puanı, kesinlik ve hatırlama gibi en yaygın kullanılan metriklerin yanında kuadratik ağırlıklı kappayı kullanmışlardır. EfficientNet-B3 ağını kullanarak ikinci dereceden ağırlıklı kappaya skorunu 0,85 elde ederek performans olarak destek vektör makineleri, karar ağaçları, ESA ve önceden eğitilmiş DenseNet modeli gibi mevcut modelleri geride bırakmışlardır. Nhut Huynh ve ark. [38], DR'nin beş aşamalı durumunu (sağlıklı, hafif, orta, şiddetli ve çoğalan) derin öğrenme tekniği kullanılarak sınıflandırmışlardır. Veri kümesinde 5.590 görüntü üzerinde çapraz doğrulama eğitimi ve testinden sonra, diyabetik retinopatinin aşamalarının sınıflandırılmasında önceden eğitilmiş MobileNetV2 modelini kullanmışlardır. Modelin ortalama doğruluğunu %94,00 olarak bulmuşlardır.

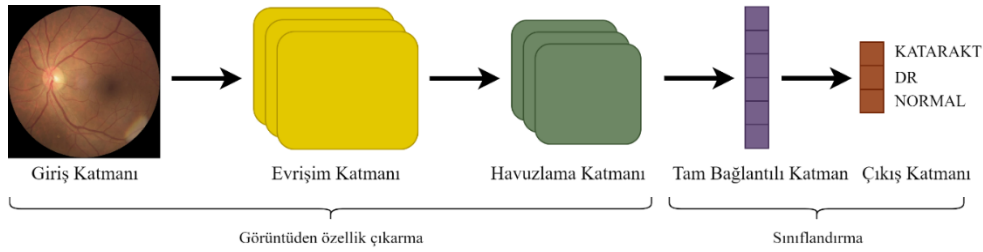
Katarakt hastalığını tespit etmek için literatürde çalışmalar bulunmaktadır. Zhang ve ark. [39] çalışmada, kataraktı otomatik olarak tespit etmek ve derecelendirmek için derin ESA'yı kullanarak performans ve verimliliği araştırmayı amaçlamışlardır. Çalışmalarında ESA sınıflandırmasına önemli bir katkı sağlayan G-filtresinden sonra retina fundus görüntüleri kullanılarak gözlerin yansımaları kaldırılmışlardır. Ayrıca mevcut örnek miktarının artırılmasıyla ESA sınıflandırma doğruluğunun %93'e ulaşmasını sağlamışlardır. Pratap ve Kokil [40] önerdikleri yöntemde, otomatik katarakt sınıflandırmasını gerçekleştirmek için transfer öğrenimi için önceden eğitilmiş ESA kullanmışlardır. Fundus katarakt görüntülerini, çeşitli açık erişim veri setlerinden toplamışlar ve oftalmoloji uzmanlarının yardımıyla dört gruba ayırmışlardır. ESA modeli kullanarak çıkarılan özellikler destek vektör makinesi ile sınıflandırmışlardır. Dört sınıf için model doğruluğunu %92,91 olarak elde etmişlerdir. Hossain ve ark. [41], doğruluğu %95,77 olan ResNet'e dayalı bir sınıflandırıcı modeli kullanan otomatik bir katarakt tespit sistemi önermişlerdir. Imran ve ark. [42] çalışmalarında fundus görüntü tabanlı katarakt sınıflandırması için yeni bir hibrit evrişimli ve tekrarlayan sinir ağı (CRNN) sağlamayı amaçlamışlardır. Önerilen yöntemin dört sınıflı katarakt sınıflandırması için ortalama %97,39 doğrulukla en yeni yöntemlerden daha iyi performans göstermişlerdir. Kant ve ark. [43], fundus görüntülerinin özellik çıkarımı için transfer öğrenme yaklaşımıyla birlikte hibrit bir yöntem kullanan bir sistem önerdiler. Özellik çıkarımı için, AlexNet, VGGNet ve ResNet gibi önceden eğitilmiş birkaç CNN modeli uyguladılar ve kataraktları hafif, orta, hayır ve şiddetli olmak üzere dört sınıfa sınıflandırmak için bir destek vektör makinesi (DVM) sınıflandırıcısı kullanmışlardır.

### 3. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada katarakt ve DR hastalarını saptamak için oluşturduğumuz fundus retina görüntü veri setleri üzerinde hiperparametre ayarlı ESA modelleri ve hibrit model eğitilmiş ve bu modellerin performans sonuçları analiz edilmiştir. Çalışmada ele alınan ESA modelleri; ResNet50, InceptionV3, MobileNet, Xception, EfficientNetV2S'dir.

#### 3.1. Evrişimli Sinir Ağı

ESA mimarisi, görüntüler gibi birçok veri içeren uygulamalarda sınıflandırma için sıklıkla kullanılan bir derin öğrenme modelidir. ESA, geleneksel sinir ağlarına benzer bir şekilde eğitilmesi gereken ağırlıklara sahip nöronlardan oluşmaktadır. Her nöronda girdilerin ve ağırlıkların çarpımı uygulanmaktadır [44]. ESA mimarisi, birbirini izleyen bir dizi katmanın birleşiminden oluşmaktadır. Şekil 2'de gösterildiği gibi genişlik ve yüksekliğe sahip bir görüntünün kullanıldığı giriş katmanından sonra üç ana katman vardır: tam bağlantılı, havuzlama ve evrişim. Bu katmanlar birbiri ardına eklenerek bir ESA mimarisi oluşturulmuştur [45].



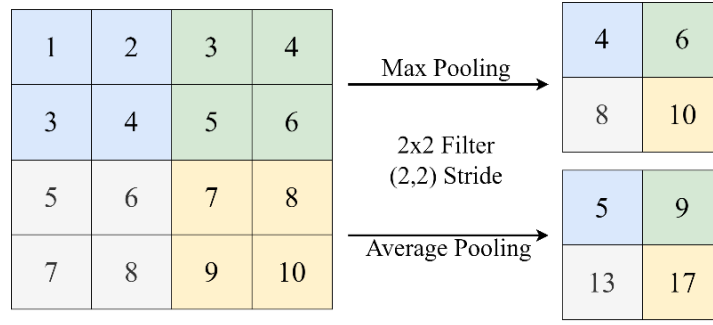
Şekil 2. Evrişimli sinir ağı katmanları.

##### 3.1.1. Evrişim Katmanı

Evrişimli katmanda görüntülerin çizgiler, kenarlar, renk damlaları gibi özellikleri algılanmaktadır. Evrişimli katmanda, her döngüde görüntünün tüm piksellerine bir filtre uygulayan ve görüntü özelliklerine dayalı olarak sınıf olasılıklarını tahmin eden bir özellik haritası oluşturulur. Filtre, istenen özelliğin mevcut olup olmadığını kontrol etmek için görüntüyü oluşturan parçalara etki etmektedir [46–48].

##### 3.1.2. Havuzlama Katmanı

Havuzlama veya alt örnekleme katmanı, Şekil 3'te gösterildiği gibi aktivasyon haritasının genişliğini ve yüksekliğini azaltmak için kullanılmaktadır. Genel olarak, evrişimli katmanların sayısı arttıkça, ağıdaki parametre ve hesaplama sayısını azaltmaktadırlar [49–51]. Havuzlama işlemi, bir filtrenin özellik haritasının üzerinde kaydırılarak özet bir özellik haritası oluşturmaktadır. Ortalama ve maksimum değerlerin alındığı özel havuzlama türleridir. Maksimum ve ortalama havuzlama türleri, bilgisayarlı görme dünyasında en yaygın kullanılan ve uygulanan havuzlama katmanlarıdır [52]. Şekil 3'te görüldüğü gibi maksimum havuzlamada, özellik haritası üzerindeki filtrenin kapsadığı alan içindeki maksimum değer seçilmektedir. Bu sayede özellik haritasının en belirgin özellikleri korunmaktadır. Ortalama havuzlamada ise özellik haritası üzerindeki filtrenin kapsadığı alan içindeki özelliklerin ortalaması alınmaktadır.



Şekil 3. Maksimum havuzlama ve ortalama havuzlama filtresi.

### 3.1.3. Tam Bağlantılı Katman

Havuzlama katmanlarını tamamen bağlı katman takip etmektedir. Nitelikler, giriş görüntülerinden havuzlama ve evrişim katmanlarının çıktılarında elde edilmektedir. Tamamen bağlı katman, görüntüyü önceden belirlenmiş bir sınıfa sınıflandırmak için bu özellikleri kullanmaktadır.

## 3.2. Evrişimli Sinir Ağı Modelleri

### 3.2.1. ResNET50 Modeli

He ve diğ. [53] ImageNet Büyük Ölçekli Görsel Tanıma Mücadelesinde (ILSVRC 2015) birinci olan, artık sinir ağı adlı bir ağ yapısı kullanmışlardır. ResNet ile bilgi kazanımını korumaya, kaybı azaltmaya ve eğitim sırasında performansı artırmaya yardımcı olan katmanlar arasında artık bağlantıları önermişlerdir. Artık ağlar çok derin sinir ağlarında kaybolan gradyan problemini çözmek için geliştirilen mimaridir. Bu ağda atlama bağlantısı adı verilen bir teknik kullanılmıştır. Atlama bağlantısı, bir katmanın aradaki bazı katmanları atlayarak diğer katmanlara bağlanmaktadır. Bu atlama bağlantısının avantajı, herhangi bir katmanın mimarinin performansını düşürmesi durumlarında bu katmanın atlanmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla kaybolan gradyan probleminin neden olduğu sorunlar ortadan kaldırılarak çok derin sinir ağlarının eğitilmesi sağlanmaktadır. ResNet50, 48 evrişim katmanı, 1 Ortalama Havuzlama katmanı ve 1 Max Havuzlama katmanı olmak üzere 50 katmandan oluşmaktadır.

### 3.2.2. InceptionV3 Modeli

Inception ağı, Google tarafından 2014 yılında kullanıma sunulan önceden eğitilmiş bir modeldir [54]. Bu ağ, maksimum havuzlama ve çeşitli ölçeklerde öznelikleri çıkarmak için kullanılan farklı boyutlarda filtreler içeren 22 katmandan oluşmaktadır. Hesaplamalarda zaman kazanmak için küçük filtreler kullanılmaktadır. 2015 yılında Google, Inception modelindeki parametreleri azaltmak için evrişim katmanlarının hesaba katıldığı 48 katmanlı InceptionV3'ü [55] piyasaya sürmüştür. Ağların performansını etkilemeden hesaplamayı azaltmak için 5×5 evrişimli filtreler yerine iki adet 3×3 filtre kullanmışlardır. Ağ parametrelerinin miktarını azaltmakla kalmayıp aynı zamanda ağ derinliğini de artıran Inception ağ yapısını benimsemektedir. Bu nedenle görüntü sınıflandırmada yaygın olarak kullanılmaktadır [56].

### 3.2.3. MobileNet Modeli

MobileNet günümüz uygulamalarına uygun bir ESA mimarisidir [57]. MobileNet, derinlemesine ayrılabilir kıvrımlar kullanan hafif, derin evrişimli sinir ağlarından oluşmaktadır. MobileNet'in derinlemesine ayrılabilir evrişim modülü, nokta evrişim filtrelerinden ve derin evrişim filtrelerinden oluşmaktadır. MobileNet, derin ve nokta evrişimler hariç 28 katmana sahiptir [58]. Derinlemesine ayrılabilir evrişim modülü, hem hesaplama karmaşıklığını hem de parametreleri sıkıştırılmaktadır. Gömülü ve mobil cihazların GPU ve CPU'nun işlem gücünden tam olarak yararlanmasını sağladığından, doğruluk kaybı olmadan görüntü tanımayı hızlandırmaktadır [59]. MobileNet ağında bir görüntünün her pikseli, filtre kanalı sayısı ile çarpılır ve görüntünün tüm giriş kanalları boyunca kayan filtre tarafından işlenen giriş piksellerinin toplamını alır. Görüntü özellikleri yalnızca giriş kanalları kullanılarak öğrenilir ve dolayısıyla çıkış katmanı, giriş kanallarıyla eşit sayıda kanala sahiptir. Derinlemesine ayrılabilir evrişiminde standart evrişim işlemine göre parametrelerinin hesaplanma maliyetinin 8-9 kat azaldığı gösterilmiştir [60].

### 3.2.4. Xception Modeli

Francois Chollet tarafından tanımlanan Xception mimarisi [61], InceptionV3'ün geliştirilmiş bir sürümüdür [55]. Xception modeli [61], sıradan evrişimi uzamsal evrişime ve nokta evrişimine bölen derinden ayrılabilir evrişime dayanmaktadır. Uzamsal evrişim, her giriş kanalında bağımsız olarak gerçekleşmektedir. Noktadan noktaya evrişim, noktadan noktaya gelişmek için 1x1 çekirdek kullanılmaktadır. Parametre sayısı azaldıkça hesaplama sayısı da azalmaktadır. Xception, 36 evrişim katmanına sahip 14 modülden oluşmaktadır. İlk ve son modüller dışında diğer modüller doğrusal artık bağlantılar içermektedir. Nesne tanıma veya görüntü sınıflandırmada tespit edilecek

nesne bazı görüntülerde büyük, bazı görüntülerde ise küçük olabilir. Farklı nesne boyutları, evrişim işlemi için filtre boyutunun belirlenmesini zorlaştırabilir. Görsellerde büyük görünen objeler için büyük filtre boyutu tercih edilmeli, küçük objeler için ise küçük filtre boyutu tercih edilmelidir. Inception mimarisi, girişte birden fazla farklı büyüklükteki filtre kullanılmasını önererek, farklı büyüklükteki nesnelerin neden olduğu sorunlara çözüm sunmaktadır [62].

### 3.2.5. EfficientNet Modeli

Tan ve Le [63] CNN'lerden daha yüksek hassasiyet gösteren ve daha esnek olan EfficientNet modelini önermişlerdir. Yazarlar, EfficientNet modellerinin derinlik, genişlik ve çözünürlük boyutlarını eşit şekilde ölçeklendirmek için verimli ve basit bileşik katsayılar kullanmışlardır. Bu, ağına daha yüksek performans elde etmek için sabit bir kaynak bütçesi kullanmasını sağlamışlardır. EfficientNet ailesi, EfficientNetB0'dan EfficientNetB7'ye kadar adlandırılan sekiz CNN modelinden oluşmaktadır. EfficientNetB0'dan EfficientNetB7'ye çözünürlük, genişlik, derinlik, model boyutu ve doğruluk artmaktadır.

Tan ve Le [64], tarafından önerilen EfficientNetV2, daha yüksek performansa ve daha kısa eğitim süresine sahiptir. Eğitimi ve verimliliği artırmak için EfficientNet'te kullanılan bazı MBConv katmanları yerine Fused MBConv katmanını kullanılmış ve mevcut modellerden 6,8 kata kadar daha hızlıdır. EfficientNetV2 mimarisi, EfficientNetV2S, EfficientNetV2M ve EfficientNetV2L olmak üzere üç versiyonda mevcuttur.

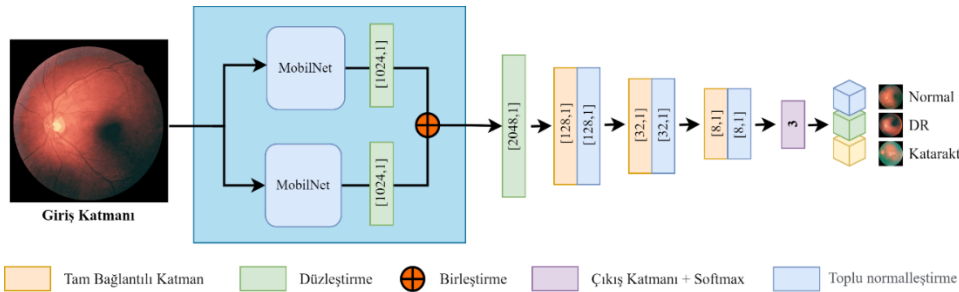
### 3.3. Önerilen Model

Bu çalışmada ilk önce ResNet50, InceptionV3, MobileNet, Xception ve EfficientNetV2S ESA öğrenme modellerinin orijinal ve hiperparametre ayarlı sürümleri kullanılmıştır. Beş ESA öğrenme modeli hem ham veri seti hem de ön işlenmiş veri seti üzerinde eğitilmiştir. Tablo 1'de derin öğrenme modellerinin ve önerilen hibrit modelin parametre değerleri verilmiştir.

**Tablo 1.** Kullanılan derin öğrenme modellerinin ve önerilen hibrit modelin parametre değerleri.

Parametre	Değeri
Giriş katmanı görüntü boyutu	224px * 224px
Aktivasyon fonksiyonu	ReLU, Softmax (Çıkış katmanı)
Optimizasyon algoritması	Adam
Eğitim sayısı	200
Küme boyutu (batch size)	4
Eğitimi erken durdurma kuralı	Eğitim doğruluk oranı > %99
Öğrenme oranı	0.001 (Her eğitimde yarıya indirilmiştir.)

Önerdiğimiz hibrit modelin yapısı Şekil 4'te gösterilmiştir. Önerilen hibrit model iki MobileNet modeli, üç düzleştirme katmanı, üç tam bağlantılı katman ve softmax fonksiyonunun kullanıldığı bir çıkış katmanından oluşmaktadır. Hibrit model eğitimi daha hızlı ve daha kararlı hale getirmek için tam bağlantılı katmanlardan sonra toplu normalleştirme kullanılmıştır. İlk bölümde veri setleri üzerinde eğitilen hiperparametre ayarlı modeller arasında en yüksek performansı gösteren MobileNet olduğu için hibrit modelde kullanılması tercih edilmiştir. Veri setlerinin eğitimi sırasında MobileNet modellerinden elde edilen özellikler birleştirilmiştir. Özelliklerin birleştirilmesi sonucunda sınıflandırma performansında yüksek başarı elde edilmiştir. Geliştirilen hibrit model ile hem orijinal veri seti hem de ön işlenmiş veri seti eğitilmiştir. En sonda test veri seti ile modellerin performansları değerlendirilmiştir.



**Şekil 4.** Önerilen model mimarisi.

#### 3.3.1. Hiperparametre Ayarı

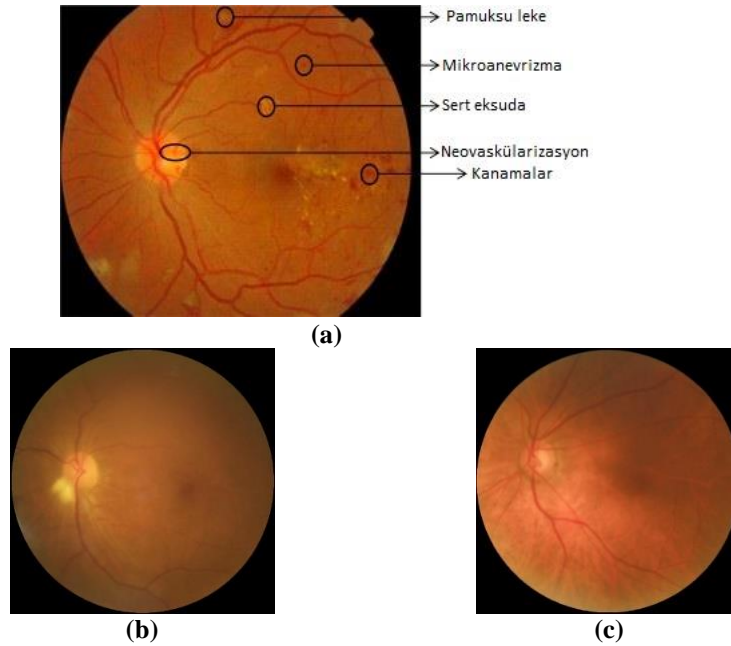
Ağın eğitiminden önce ayarlanan hiperparametreler, ağın yapısını ve ağın nasıl eğitileceğini belirleyen değişkenlerdir. Gizli katman sayısı, dropout, toplu normalleştirme, aktivasyon fonksiyonu, öğrenme oranı, eğitim sayısı ve parti boyutu hiperparametrelerden bazılarıdır. Uygun hiperparametre seçimi ile ESA eğitiminin yüksek başarıyla ve daha az maliyetle gerçekleşmesini sağlamaktadır. Bengio [65] öğrenme oranının, genellikle en

önemli hiperparametre olduğunu ve her zaman ayarlanması gerektiğini belirtmiştir. Hem önerilen hibrit modelde hem de bu çalışmada kullanılan derin öğrenme modellerinde öğrenme oranı eğitim boyunca değiştirilerek hiperparametre ayarlaması yapılmıştır. Öğrenme oranı, çok büyük olduğunda global optimuma ulaşamayabilir hatta çok uzaklaşabilir. Çok küçük seçildiğinde ise model her döngüde çok küçük adımlarla ilerleyeceği için yerel optimuma takılabilir ve yakınsama çok uzun sürecektir [66].

Adam optimizasyon her dönemde azalan öğrenme oranıyla kullanılmıştır. Eğitim başlangıcında öğrenme oranı 0.001 iken, devir sayısı arttıkça öğrenme oranı yarıya düşürülmüştür. Bunu yapmamızın nedeni başlangıçta öğrenme oranının çok düşük olması yerel optimum değere takılıp optimum global optimum değere hiç ulaşamamasına neden olabilmektedir.

### 3.4. Veri Seti

Retinanın dijital fundus görüntüleri, DR'nin şiddetini teşhis etmesi ve derecelendirmesi için göz doktorlarına önemli bir tarama platformu olarak hizmet etmektedir. Fundus görüntüsünde, küçük ve yuvarlak koyu kırmızı noktalar olarak görünen mikroanevrizma, kanama ve salgı gibi anormal DR özellikleri, DR'yi saptamak için kullanılan yaygın özelliklerdir [28]. Retina bölgesindeki anormalliklerin sayısı, hastalığın evresi ile birlikte artmaktadır [67]. Fundus görüntüsü katarakt tanısında yaygın olarak kullanılır ve retina hakkında yeterli bilgi sağlayabilir [68]. Şekil 5'te normal gözler ve DR ile katarakt hastalarının fundus görüntüleri gösterilmektedir.



Şekil 5. (a) Diyabetik retinopati, (b) katarakt ve (c) normal birey fundus görüntü özellikleri.

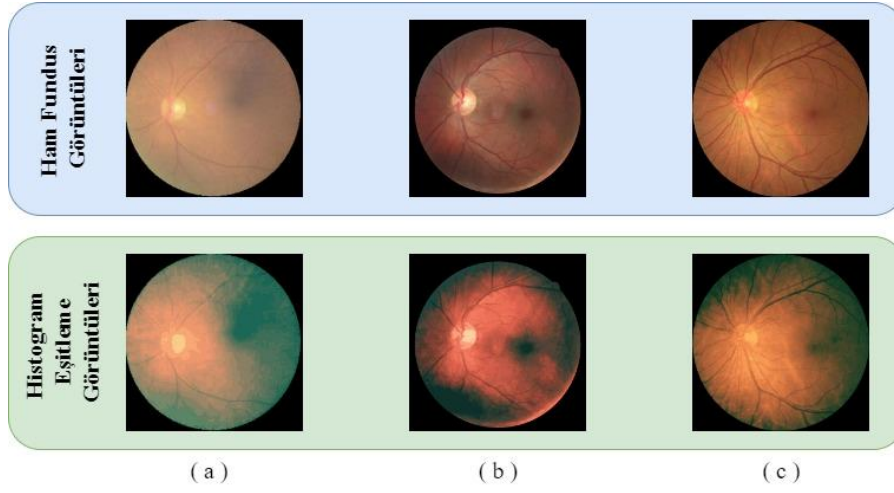
Bu çalışmada, retina hastalıkları teşhisinde Python programlama dili kullanılarak tensorflow ve opencv kütüphanelerinden yararlanılmıştır. Deneyler Windows 11 işletim sistemli, 16 GB RAM ve Intel (R) Core(TM) i7-11800H @ 2.30GHz işlemcili bir bilgisayarda Python'un 3.9.7 sürümü kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada retina hastalıklarını tespit etmek için fundus görüntüleri içeren Kaggle [69] veri seti kullanılmıştır. Bu veri seti IDRID (The Indian diabetic retinopathy image), ODIR (Ocular Disease Intelligent Recognition) ve HRF (High-Resolution Fundus) veri setlerinden görüntüler alınarak oluşmaktadır. Görüntüler 512\*512 piksel boyutlarında ve .jpg dosya formatındadır. Her sınıftan yaklaşık 1000 fundus görüntüsü alınarak sağlıklı bireyler ile DR ve katarakt hastalarının retina görüntülerinden oluşan bir veri seti oluşturulmuştur. Ayrıca daha iyi bir sınıflandırma başarısı elde etmek için ham veri seti üzerinde histogram eşitleme işlemi uygulanarak ön işlenmiş yeni bir veri seti oluşturulmuştur. Bu veri setlerindeki görüntüler eğitim, doğrulama ve test verilerine ayrılmıştır. Tablo 2'de veri setlerinin dağılımı gösterilmiştir.

Tablo 2. Ham ve önışlenmiş veri setlerinin dağılımı.

Sınıf	Toplam	Eğitim	Doğrulama	Test
Normal	1074	674	200	200
DR	1098	698	200	200
Katarakt	1038	638	200	200

Çalışmada kullanılan veri setlerinin bazı örnekleri Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Fundus veri setlerinin örnek görüntüleri. a) Katarakt, b) DR, c) Normal.

### 3.5. İstatistiksel Analiz

Çalışmamızda modellerin başarısını değerlendirmek için karışıklık matrisi kullanılmıştır. Doğruluk, hatırlama, kesinlik ve F1-skor metrikleri performans ölçütleri olarak kullanılmıştır. Performans metriklerinin hesaplanmasında Yanlış Negatif (FN), Yanlış Pozitif (FP), Gerçek Negatif (TN) ve Gerçek Pozitif (TP) endeksleri kullanılmıştır. TP, aslında pozitif bir durumu ifade eden ve sınıflandırıcı tarafından pozitif olarak tahmin edilen numuneleri ifade etmektedir. FP, aslında negatif bir durumu ifade eden ve sınıflandırıcı tarafından pozitif olarak tahmin edilen numuneleri ifade etmektedir. FN, aslında negatif bir durumu ifade eden ve sınıflandırıcı tarafından pozitif olarak tahmin edilen numuneleri ifade etmektedir. TN, gerçekte negatif bir durumu temsil eden ve sınıflandırıcı tarafından negatif olarak tahmin edilen numuneleri belirtmektedir.

Doğruluk, sınıflandırıcının doğru olarak tahmin ettiği doğru ve yanlış veri sayısının toplam veri sayısına oranıdır.

$$\text{Doğruluk} = \frac{(TP + TN)}{(TP + TN + FP + FN)} \quad (1)$$

Hatırlama, gerçek sınıftaki örneklerin doğru tahmin edilme oranıdır.

$$\text{Hatırlama} = \frac{TP}{(TP + FN)} \quad (2)$$

Kesinlik, sınıflandırıcının doğru tahmin ettiği veri sayısının gerçek veri sayısına oranıdır.

$$\text{Kesinlik} = \frac{TP}{(TP + FP)} \quad (3)$$

F1-skor değeri bize kesinlik ve hatırlama değerlerinin harmonik ortalamasını göstermektedir.

$$F1 - \text{Skor} = 2 * \frac{\text{Hatırlama} * \text{Kesinlik}}{\text{Hatırlama} + \text{Kesinlik}} \quad (4)$$

## 4. BULGULAR

Bu bölümde, fundus veri setleri üzerinde ESA modellerinin performansları karşılaştırılarak analizler yapılmıştır. Fundus veri setleri üzerinde beş ESA modelinin hem orijinal hem de hiperparametre ayarlı sürümleri ile eğitimler gerçekleştirilmiştir. Hiperparametre ayarlı modellerde her eğitimde öğrenme oranı yarıya indirilmiştir. Öğrenme oranının çok büyük olması hata değerinin artmasına sebep olabilmektedir. Aynı zamanda model eğitime başladığında öğrenme oranının çok düşük olması global minimuma ulaşamamasına neden olabilmektedir. Veri setinin ham hali üzerinde eğitilen beş ESA modelinin orijinal ve hiperparametre ayarlı sürümlerinin performansları Tablo 3'te gösterilmiştir. Veri setinin ön işlenmiş hali üzerinde eğitilen beş ESA modelinin orijinal ve hiperparametre ayarlı sürümlerinin performansları Tablo 4'te gösterilmiştir.

**Tablo 3.** Ham veri seti için ESA modellerinin orijinal ve hiperparametre ayarlı sürümlerinin performansları.

Model	Orijinal Model				Hiperparametre Ayarlı Model			
	D (%)	K (%)	H (%)	S (Sn)	D (%)	K (%)	H (%)	S (Sn)
ResNet50	63,83	63,83	63,83	30	79,83	79,83	79,83	31
InceptionV3	55,17	55,11	54,83	28	91,00	91,00	91,00	32
MobileNet	74,00	74,20	73,83	18	<b>97,50</b>	<b>97,50</b>	<b>97,50</b>	<b>18</b>
Xception	<b>77,00</b>	<b>77,05</b>	<b>76,67</b>	<b>40</b>	96,17	96,48	96,00	40
EfficientNetV2S	63,83	64,46	63,17	45	95,17	95,31	94,83	52

\*D:Doğruluk, K:Kesinlik, H:Hatırlama; S: Eğitim aşaması dönem başına çalışma süresi, sn:Saniye, %:Yüzde

Tablo 3 incelendiğinde ham veri seti üzerinde hiperparametre ayarlı modellerin daha yüksek performansa sahip olduğu görülmektedir. Orijinal derin öğrenme modelleri arasında Xception modelinin, hiperparametre ayarlı modeller arasında MobileNet modelinin en yüksek başarıya ulaştığı görülmektedir. Ham veri seti üzerinde Xception modeli ile %77,00 doğruluk oranı, hiperparametre ayarlı MobileNet modeli ile %97,50 doğruluk oranı elde edilmiştir. Orijinal derin öğrenme modelleri arasında InceptionV3 modeli, hiperparametre ayarlı modeller arasında RestNet50 modeli en düşük performansa sahip olmuştur. Dönem başına çalışma süresi açısından değerlendirildiğinde, ham veri seti üzerinde hem orijinal hem de hiperparametre ayarlı MobileNet modeli 18 saniye ile en iyi performansı göstermiştir.

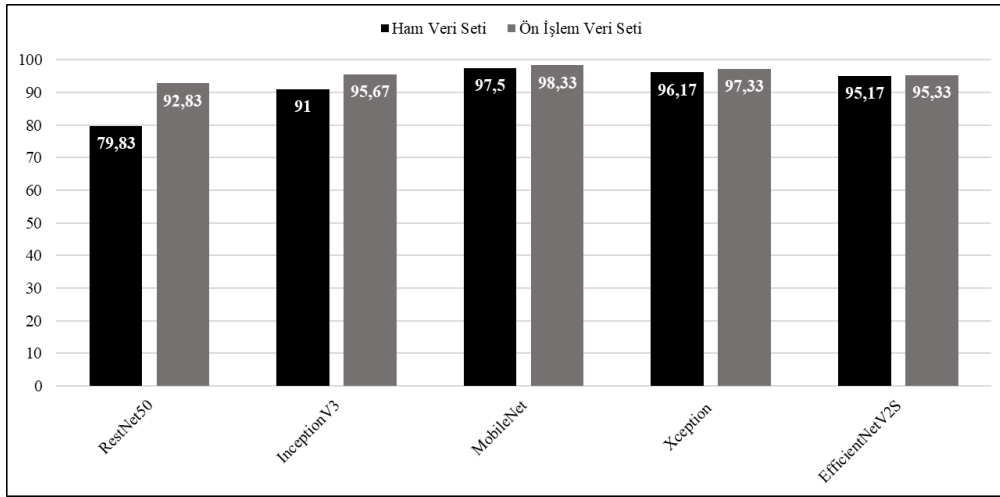
**Tablo 4.** Ön işlenmiş veri seti için ESA modellerinin orijinal ve hiperparametre ayarlı sürümlerinin performansları.

Model	Orijinal Model				Hiperparametre Ayarlı Model			
	D (%)	K (%)	H (%)	S (Sn)	D (%)	K (%)	H (%)	S (Sn)
RestNet50	74,67	75,47	73,83	28	92,83	93,14	92,83	28
InceptionV3	72,83	76,25	71,17	28	95,67	95,83	95,67	26
MobileNet	74,50	74,50	74,50	15	<b>98,33</b>	<b>98,33</b>	<b>98,33</b>	<b>15</b>
Xception	69,50	69,50	69,50	38	97,33	97,33	97,33	37
EfficientNetV2S	<b>79,50</b>	<b>78,50</b>	<b>79,50</b>	<b>45</b>	95,33	95,33	95,33	45

\*D:Doğruluk, K:Kesinlik, H:Hatırlama; S: Eğitim aşaması dönem başına çalışma süresi, sn:Saniye, %:Yüzde

Tablo 4 incelendiğinde ön işlenmiş veri seti üzerinde hiperparametre ayarlı modellerin daha yüksek performansa sahip olduğu görülmektedir. Orijinal derin öğrenme modelleri arasında EfficientNetV2S modelinin, hiperparametre ayarlı modeller arasında MobileNet modelinin en yüksek başarıya ulaştığı görülmektedir. Ön işlenmiş veri seti üzerinde EfficientNetV2S modeli ile %79,50 doğruluk oranı, hiperparametre ayarlı MobileNet modeli ile %98,33 doğruluk oranı elde edilmiştir. Orijinal derin öğrenme modelleri arasında Xception modeli, hiperparametreli ayarlı modeller arasında RestNet50 modeli en düşük performansa sahip olmuştur. Dönem başına çalışma süresi açısından değerlendirildiğinde, ön işlenmiş veri seti üzerinde hem orijinal hem de hiperparametre ayarlı MobileNet modeli 15 saniye ile en iyi performansı göstermiştir.

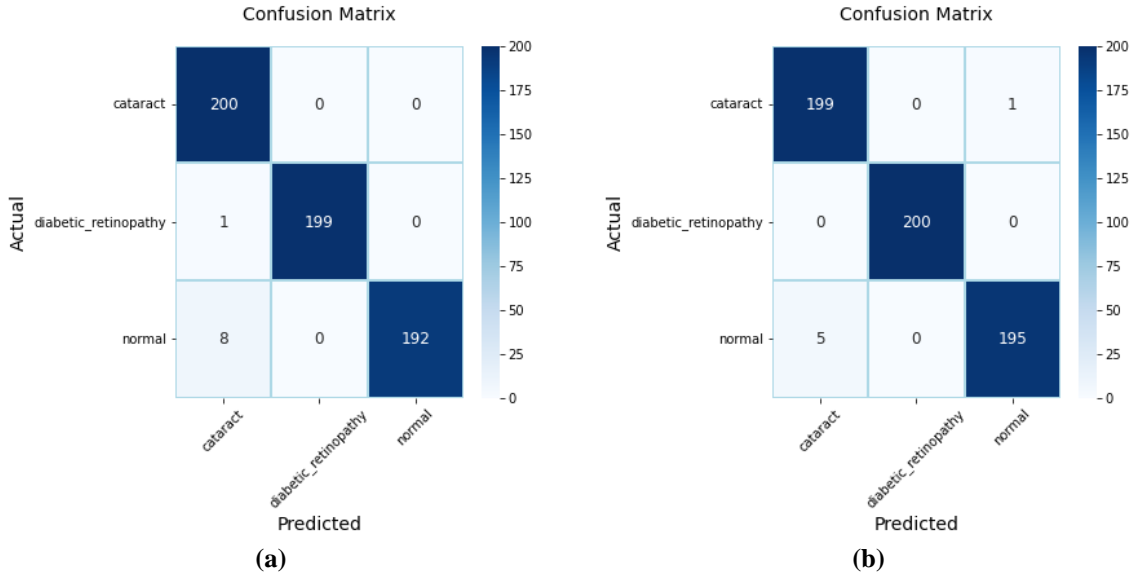
Şekil 7'de ön işlenmiş veri seti üzerinde yapılan eğitimlerde ham veri setine göre daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Hiperparametreli ayarlı MobileNet modeli hem ham veri seti hem de ön işlenmiş veri seti üzerinde en yüksek başarıyı elde edildiği görülmektedir.



**Şekil 7.** Hiperparametre ayarlı modellerin veri setleri üzerindeki doğruluk performansları.

Çalışmanın son analizinde geliştirilmiş olan hibrit modelin performans değerlendirmesi yapılmıştır. Hibrit model için hem ham veri seti üzerinde hem de ön işlenmiş veri seti üzerinde yüksek performans gösteren hiperparametre ayarlı MobileNet model paralel bir şekilde eğitilerek çıkış özellikleri birleştirilmiştir. Şekil 4'te önerilen model incelendiğinde her bir MobileNet modelinden elde edilen 1.024 özellik birleştirilerek 2.048 özellik elde edilmiştir. Hibrit model ham veri seti ve ön işlenmiş veri seti üzerinde eğitilmiştir. Önerilen hibrit modele ait karışıklık matrisleri ise Şekil 8'de gösterilmiştir. Şekil 8 incelendiğinde hibrit modelin ön işlem uygulanmış veri seti üzerinde retina hastalıklarını daha iyi tahmin ettiği görülmektedir.

Ham veri setinde katarakt görüntülerinin tümü (200), DR görüntülerinin 199'u ve Normal görüntülerin 192 tanesi doğru tahmin edilmiştir. Bir DR görüntüsü ve 8 normal görüntü katarakt olarak tahmin edilmiştir. Ön işlenmiş veri setinde katarakt görüntülerinin 199'u, DR görüntülerinin tümü (200) ve Normal görüntülerin 195 tanesi doğru tahmin edilmiştir. Bir katarakt görüntüsü normal olarak ve 5 normal görüntü katarakt olarak tahmin edilmiştir. Hibrit modelin performans sonuçları ise Tablo 5'te verilmiştir. Tablo 5 incelendiğinde önerilen hibrit modelin hem



Şekil 8. Hibrit modelin karışıklık matrisi; a) ham veri seti, b) ön işlenmiş veri seti.

ham veri seti hem de ön işlenmiş veri seti üzerinde hiperparametre ayarlı derin öğrenme modellerine göre daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. En yüksek başarıyı, ön işlenmiş veri seti üzerinde %99 doğruluk oranı ile önerilen hibrit model tarafından elde edilmiştir. Ayrıca önerilen model F1-skorlara göre her iki veri setinde DR hastalarını tahmin etmede büyük başarı elde etmiştir.

Tablo 5. Hibrit modelin performans sonuçları.

Sınıf	Ham Veri Seti			Genel Doğ.	Ön İşlenmiş Veri Seti			Genel Doğ.
	Kesinlik	Hatırlama	F1-Skor		Kesinlik	Hatırlama	F1-Skor	
Katarakt	0,96	1,00	0,98	%98,50	0,98	0,99	0,99	%99,00
DR	1,00	0,99	1,00		1,00	1,00	1,00	
Normal	1,00	0,96	0,98		0,99	0,97	0,98	

Tablo 6'da önerilen model ve literatürdeki çalışmalarda kullanılan modellerin doğruluk ölçümlerinin karşılaştırılması gösterilmektedir. Literatürde fundus görüntüleri üzerinden katarakt ve DR hastalarının sınıflandırıldığı sınırlı sayıda çalışma bulunmakta ve bu çalışmalarda üç sınıflı (sağlıklı-DR-katarakt) tespit sunulmamaktadır. Çalışmalar iki sınıf üzerinden (sağlıklı-DR/sağlıklı-katarakt) hastalıkların seviyeleri sınıflandırmaya dahil edilerek sunulmaktadır. Bu nedenle, sunduğumuz çalışma literatüre katarakt, DR ve sağlıklı birey sınıflarını tespit eden derin öğrenme modelinin öne sürülmesi ile de katkı sağlamaktadır.

Tablo 6. Önerilen modelin literatürdeki diğer çalışmalar ile karşılaştırılması.

Çalışma	Sınıflar	ESA Modeli	Doğruluk
Pava Rodriguez [35]	Sağlıklı ve DR	MLP	%94,82
Tariq vd. [34]	Sağlıklı ve dört DR seviyesi	ResNeXt-50	%97,53
Vinayaki ve Kalaiselvi [36]	Sağlıklı ve dört DR seviyesi	R-CNN	%91,70
Chilukoti ve diğ. [37]	Sağlıklı ve dört DR seviyesi	EfficientNet-B3	%87,00
Nhut Huynh ve diğ. [38]	Sağlıklı ve dört DR seviyesi	MobileNetV2	%94,00
L. Zhang ve diğ. [39]	Sağlıklı ve üç katarakt seviyesi	DCNN	%93,52
Pratap ve Kokil [40]	Sağlıklı ve üç katarakt seviyesi	CNN + SVM	%92,91
Imran vd. [42]	Sağlıklı ve üç katarakt seviyesi	CRNN	%97,39
Hossain ve diğ. [41]	Sağlıklı ve katarakt	DCNN	%95,77
<b>Önerilen Model</b>	Sağlıklı, katarakt ve DR	<b>Hibrit Model</b>	<b>%99,00</b>

Tablo 6'da yer alan çalışmalardaki modeller fundus veri kümeleri ile eğitilmiştir. Önerilen modelin ele alınan diğer çalışmalara göre en iyi performansı gösterdiği görülmektedir.

## 5. SONUÇ

- Bu makale, fundus görüntülerini kullanarak sağlıklı birey (normal), DR ve katarakt hastalarını ayırmak için derin öğrenme tabanlı yeni sonuçlar ortaya koymaktadır. DR, katarakt ve sağlıklı bireyleri sınıflandırmak için öncelikle hiperparametre ayarlı beş ESA modeli kullanılmıştır. Bu ESA modellerinin hiperparametre ayarlı sürümlerinin fundus veri setleri üzerinde daha iyi performanslar sergilediği görülmüştür.



Hiperparametre ayarlı modeller arasında sınıflandırma başarısı en yüksek olan model MobileNet modeli olmuştur.

- Daha sonra, MobileNet tabanlı bir hibrit model geliştirilerek çalışmada ele alınan modellere göre ~~çok~~ daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, literatürdeki derin öğrenme tabanlı katarakt, DR hastalıkları tespiti çalışmaları ile kıyaslandığında da önerilen modelin daha geniş kapsamda, daha etkin performans sergilediği görülmüştür. Bununla birlikte, literatürde katarakt, DR ve normal bireylerin sınıflandırıldığı çalışmaların seyrekliği göz önüne alındığında, bu konuda da literatüre katkı sağlanmıştır.
- Sunulan çalışma, ele alınan retina hastalıklarını hızlı ve yüksek bir doğrulukla tespit ettiği için, retina hastaları ve göz hekimi sayısı arasındaki orantısız durumun oluşturduğu hizmet gecikmelerini ortadan kaldırmaya yardımcı sistemlerin geliştirilmesine ışık tutması beklenmektedir. Gelecekte tıp bölümlerindeki uzmanların kullanabileceği ve uzmanlara fikir verebilecek yazılımlara dönüştürülebilir. Ayrıca pratisyen hekimlerin retina hastalıkları konusunda hızlı karar vermelerine yardımcı olacak mobil uygulamalar geliştirilebilir.
- Bundan sonraki çalışmalarda daha büyük bir veri seti ve farklı retina hastalıkları ile derin öğrenme temelli çalışmaların yapılması planlanmaktadır.

## Yazar Katkıları

**Şükrü AYKAT:** Deneyleri yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir. Literatür taraması çalışmasını gerçekleştirmiştir. Makalenin yazım işlemine katkı sağlamıştır.

**Sibel SENAN:** Model performans sonuçlarını analiz etmiştir. Çalışmanın sunumu konusunda makalenin yazım sürecine katkı sağlamıştır.

## Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler

## KAYNAKÇA

- [1] P.H. Scanlon, S.J. Aldington, and I.M. Stratton "Epidemiological Issues in Diabetic Retinopathy," Middle East Afr. J. Ophthalmol, vol. 20, no. 4, pp. 293, 2013.
- [2] R. Lee, T.Y. Wong, and C. Sabanayagam "Epidemiology of diabetic retinopathy, diabetic macular edema and related vision loss," Eye Vis. (London, England), vol. 2, no. 1, 2015.
- [3] H. Ahsan "Diabetic retinopathy--biomolecules and multiple pathophysiology," Diabetes Metab. Syndr. vol. 9, no. 1, pp. 51–54, 2015.
- [4] R. Varma, N.M. Bressler, Q.V. Doan, M. Danese, C.M. Dolan, A. Lee, and A. Turpcu "Visual Impairment and Blindness Avoided with Ranibizumab in Hispanic and Non-Hispanic Whites with Diabetic Macular Edema in the United States," Ophthalmology, vol. 122, no. 5, pp. 982–989, 2015.
- [5] M.S. Ola, M.I. Nawaz, M.M. Siddiquei, S. Al-Amro, and A.M. Abu El-Asrar "Recent advances in understanding the biochemical and molecular mechanism of diabetic retinopathy," J. Diabetes Complications, vol. 26, no. 1, pp. 56–64, 2012.
- [6] T. Behl, I. Kaur, H. Goel, and R. Pandey "Diabetic nephropathy and diabetic retinopathy as major health burdens in modern era," World J. Pharm, vol. 3, no. 7, pp. 370–387, 2014.
- [7] T. Kauppi, V. Kalesnykiene, J.K. Kamarainen, L. Lensu, I. Sorri, A. Raninen, R. Voutilainen, J. Pietilä, H. Kälviäinen, and H. Uusitalo "The DIARETDB1 diabetic retinopathy database and evaluation protocol." Proc. Br. Mach. Vis. Conf. vol. 1, pp. 15.1-15.10, 2007.
- [8] N.B.A. Mustafa, W.M.D.W. Zaki, and A. Hussain "A review on the diabetic retinopathy assessment based on retinal vascular tortuosity," Proc. - 2015 IEEE 11th Int. Colloq. Signal Process. Its Appl. CSPA, pp. 127–130, 2015.
- [9] S. Jones and R.T. Edwards "Diabetic retinopathy screening: a systematic review of the economic evidence," Diabet. Med. vol. 27, no. 3, pp. 249–256, 2010.
- [10] S. Lin, P. Ramulu, E.L. Lamoureux, and C. Sabanayagam "Addressing risk factors, screening, and preventative treatment for diabetic retinopathy in developing countries: a review," Clin. Experiment. Ophthalmol, vol. 44, no. 4, pp. 300–320, 2016.
- [11] R. Raman, L. Gella, S. Srinivasan, and T. Sharma "Diabetic retinopathy: An epidemic at home and around the world." Indian J. Ophthalmol, vol. 64, no. 1, pp. 69, 2016.
- [12] P. Porwal, S. Pachade, M. Kokare, G. Deshmukh, and V. Sahasrabudhe "Automatic Retinal Image Analysis for the Detection of Diabetic Retinopathy." Biomedical Signal and Image Processing in Patient Care, pp. 146–161, 2018.
- [13] D.S.W. Ting, G.C.M. Cheung, and T.Y. Wong "Diabetic retinopathy: global prevalence, major risk factors, screening practices and public health challenges: a review." Clin. Experiment. Ophthalmol, vol. 44, no. 4, pp. 260–277, 2016.
- [14] T. Walter, J.C. Klein, P. Massin, and A. Erginay "A contribution of image processing to the diagnosis of diabetic retinopathy--detection of exudates in color fundus images of the human retina," IEEE Trans. Med. Imaging, vol. 21, no. 10, pp. 1236–1243, 2002.
- [15] D. Allen and A. Vasavada "Cataract and surgery for cataract." BMJ, vol. 333, no. 7559, pp. 128–132, 2006.

- [16] Y.C. Liu, M. Wilkins, T. Kim, B. Malyugin, and J.S. Mehta “Cataracts.” *Lancet*, vol. 390, no. 10094, pp. 600–612, 2017.
- [17] J.J. Drinkwater, W.A. Davis, and T.M.E. Davis “A systematic review of risk factors for cataract in type 2 diabetes.” *Diabetes. Metab. Res. Rev.* vol. 35, no. 1, pp. e3073, 2019.
- [18] P.A. Asbell, I. Dualan, J. Mindel, D. Brocks, M. Ahmad, and S. Epstein “Age-related cataract.” *Lancet (London, England)*, vol. 365, no. 9459, pp. 599–609, 2005.
- [19] H. Li, J.H. Lim, J. Liu, D.W.K. Wong, Y. Foo, Y. Sun, and T.Y. Wong “Automatic detection of posterior subcapsular cataract opacity for cataract screening.” *2010 Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. EMBC’10*, pp. 5359–5362, 2010.
- [20] H. Li, J.H. Lim, J. Liu, D.W.K. Wong, N.M. Tan, S. Lu, Z. Zhang, and T.Y. Wong “An automatic diagnosis system of nuclear cataract using slit-lamp images.” *Proc. 31st Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. Eng. Futur. Biomed*, pp. 3693–3696, 2009.
- [21] M. Chew, P.P.C. Chiang, Y. Zheng, R. Lavanya, R. Wu, S.M. Saw, T.Y. Wong, and E.L. Lamoureux “The impact of cataract, cataract types, and cataract grades on vision-specific functioning using rasch analysis.” *Am. J. Ophthalmol.*, vol. 154, no. 1, pp. 29–38.e2, 2012.
- [22] C.M. Lee and N.A. Afshari “The global state of cataract blindness.” *Curr. Opin. Ophthalmol.*, vol. 28, no. 1, pp. 98–103, 2017.
- [23] M. Khairallah, R. Kahloun, R. Bourne, H. Limburg, S.R. Flaxman, J.B. Jonas, J. Keeffe, J. Leasher, K. Naidoo, K. Pesudovs, H. Price, R.A. White, T.Y. Wong, S. Resnikoff, and H.R. Taylor “Number of People Blind or Visually Impaired by Cataract Worldwide and in World Regions, 1990 to 2010” *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* vol. 56, no. 11, pp. 6762–6769, 2015.
- [24] D. Pascolini and S.P. Mariotti: “Global estimates of visual impairment: 2010.” *Br. J. Ophthalmol.*, vol. 96, no. 5, pp. 614–618, 2012.
- [25] S. Farsiu, S.J. Chiu, R. V. O’Connell, F.A. Folgar, E. Yuan, J.A. Izatt, and C.A. Toth “Quantitative Classification of Eyes with and without Intermediate Age-related Macular Degeneration Using Optical Coherence Tomography.” *Ophthalmology*, vol. 121, no. 1, pp. 162, 2014.
- [26] Z. Yavuz, C. İkibaş, U. Şevik, and C. Köse: “Retinal Görüntülerde Optik Diskin Otomatik Olarak Çıkarılması için Bir yöntem.” *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, IATS’09*, 2009.
- [27] Y. Peng, S. Dharssi, Q. Chen, T.D. Keenan, E. Agrón, W.T. Wong, E.Y. Chew, and Z. Lu “DeepSeeNet: A deep learning model for automated classification of patient-based age-related macular degeneration severity from color fundus photographs.” *Ophthalmology*, vol. 126, no. 4, pp. 565, 2019.
- [28] M. Patil “An Approach for the Detection of Vascular Abnormalities in Diabetic Retinopathy.” *Int. J. Data Min. Tech. Appl.* vol. 2, no. 2, pp. 55–58, 2013.
- [29] M.D. Abramoff, J.M. Reinhardt, S.R. Russell, J.C. Folk, V.B. Mahajan, M. Niemeijer, and G. Quellec “Automated early detection of diabetic retinopathy.” *Ophthalmology*, vol. 117, no. 6, pp. 1147–1154, 2010.
- [30] M. Niemeijer, M.D. Abramoff, and B. Van Ginneken “Information fusion for diabetic retinopathy CAD in digital color fundus photographs.” *IEEE Trans. Med. Imaging*, vol. 28, no. 5, pp. 775–785, 2009.
- [31] G. Quellec, M. Lamard, P.M. Josselin, G. Cazuguel, B. Cochener, and C. Roux “Optimal wavelet transform for the detection of microaneurysms in retina photographs.” *IEEE Trans. Med. Imaging*, vol. 27, no. 9, pp. 1230–1241, 2008.
- [32] A. Osareh, M. Mirmehdi, B. Thomas, and R. Markham “Automated identification of diabetic retinal exudates in digital colour images.” *Br. J. Ophthalmol.*, vol. 87, no. 10, pp. 1220, 2003.
- [33] N. Ghaffar Nia, E. Kaplanoglu, and A. Nasab “Evaluation of artificial intelligence techniques in disease diagnosis and prediction.” *Discov. Artif. Intell.* *2023 31.* vol. 3, no. 1, pp. 1–14, 2023.
- [34] H. Tariq, M. Rashid, A. Javed, E. Zafar, S.S. Alotaibi, and M.Y.I. Zia “Performance Analysis of Deep-Neural-Network-Based Automatic Diagnosis of Diabetic Retinopathy.” *Sensors 2022*, vol. 22, no. 1, pp. 205, 2021.
- [35] M.D. La Pava Rodriguez: “Automatic retinopathy detection using deep learning and medical findings.” 2021.
- [36] V.D. Vinayaki and R. Kalaiselvi “Multithreshold Image Segmentation Technique Using Remora Optimization Algorithm for Diabetic Retinopathy Detection from Fundus Images.” *Neural Process. Lett.* vol. 54, no. 3, pp. 2363–2384, 2022.
- [37] S. Venkatesh Chilukoti, A.S. Maida, and X. Hei “Diabetic Retinopathy Detection using Transfer Learning from Pre-trained Convolutional Neural Network Models.” 2022.
- [38] H. Nhut Huynh, M. Thanh Do, G. Thinh Huynh, A. Tu Tran, T. Nghia Tran, M. City, H. Chi Minh City, L. Trung Ward, T. Duc District, T. Truong, T. Tran, T. Nguyen, and Q. Le “Classification of Stages Diabetic Retinopathy Using MobileNetV2 Model.” *Kalpa Publ. Eng.* vol. 4, pp. 147–157, 2022.
- [39] L. Zhang, J. Li, I. Zhang, H. Han, B. Liu, J. Yang, and Q. Wang: “Automatic cataract detection and grading using Deep Convolutional Neural Network.” *Proc. 2017 IEEE 14th Int. Conf. Networking, Sens. Control*, pp. 60–65, 2017.
- [40] T. Pratap and P. Kokil: “Computer-aided diagnosis of cataract using deep transfer learning.” *Biomed. Signal Process. Control.* vol. 53, pp. 101533, 2019.
- [41] M.R. Hossain, S. Afroze, N. Siddique, and M.M. Hoque: “Automatic Detection of Eye Cataract using Deep Convolution Neural Networks (DCNNs).” *2020 IEEE Reg. 10 Symp. TENSYP*, pp. 1333–1338, 2020.
- [42] A. Imran, J. Li, Y. Pei, F. Akhtar, T. Mahmood, and L. Zhang “Fundus image-based cataract classification using a hybrid convolutional and recurrent neural

- network.” *Vis. Comput.*, vol. 37, no. 8, pp. 2407–2417, 2021.
- [43] J. Kant, P. Singh, Y.S. Yadav, A.P.J. Abdul, and A.P.J.A. Kalam “Computer-aided diagnosis of cataract severity using retinal fundus images and deep learning.” *Comput. Intell.* vol. 38, no. 4, pp. 1450–1473, 2022.
- [44] Y.-H. Chen, T. Krishna, J.S. Emer, and V. Sze: “Eyeriss: An Energy-Efficient Reconfigurable Accelerator for Deep Convolutional Neural Networks.” *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 52, no. 1, pp. 127–138, 2017.
- [45] J. Salamon and J.P. Bello “Deep Convolutional Neural Networks and Data Augmentation for Environmental Sound Classification.” *IEEE Signal Process. Lett.* vol. 24, no. 3, pp. 279–283, 2017.
- [46] M.A.H.A. Bakr, H.M. Al-Attar, N.K. Mahra, and S.S. Abu-Naser “Breast Cancer Prediction using JNN.” *Int. J. Acad. Inf. Syst. Res.* vol. 4, pp. 1–8, 2020.
- [47] A.M. Barhoom, A.J. Khalil, B.S. Abu-Nasser, M.M. Musleh, and S.S. Abu-Naser “Predicting Titanic Survivors using Artificial Neural Network.” *Int. J. Acad. Eng. Res.* vol. 3, no. 9, pp. 8–12, 2019.
- [48] H.Z. Belbeisi, Y.S. Al-Awadi, M.M. Abbas, and S.S. Abu-Naser “Effect of Oxygen Consumption of Thylakoid Membranes (Chloroplasts) From Spinach after Inhibition Using JNN.” *Int. J. Acad. Heal. Med. Res.* vol. 4, no. 11, pp. 1–7, 2020.
- [49] M.A. Dalffa, B.S. Abu-Nasser, and S.S. Abu-Naser “International Journal of Engineering and Information Systems (IJEAIS) Tic-Tac-Toe Learning Using Artificial Neural Networks.” *Int. J. Eng. Inf. Syst.* vol. 3, no. 2, pp. 9–19, 2019.
- [50] I.M. Dheir, Alaa Soliman Abu Mettleq, Abeer A. Elsharif, and Samy S. Abu-Naser “Classifying Nuts Types Using Convolutional Neural Network.” *Int. J. Acad. Inf. Syst. Res.*, vol. 3, no. 12, pp. 12–18, 2019.
- [51] K. Jamal Dawood, M. Hussam Zaqout, R. Mohammed Salem, and S.S. Abu-Naser “Artificial Neural Network for Mushroom Prediction.” *Int. J. Acad. Inf. Syst. Res.* vol. 4, pp. 9–17, 2020.
- [52] E.N. Arrofiqoh and H. Harintaka “IMPLEMENTASI METODE CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK UNTUK KLASIFIKASI TANAMAN PADA CITRA RESOLUSI TINGGI.” *GEOMATIKA.* vol. 24, no. 2, pp. 61, 2018.
- [53] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun “Deep Residual Learning for Image Recognition.” *IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.* pp. 770–778, 2016.
- [54] C. Szegedy, W. Liu, Y. Jia, P. Sermanet, S. Reed, D. Anguelov, D. Erhan, V. Vanhoucke, and A. Rabinovich “Going deeper with convolutions; Going deeper with convolutions”, 2015.
- [55] C. Szegedy, V. Vanhoucke, S. Ioffe, and J. Shlens: “Rethinking the Inception Architecture for Computer Vision; Rethinking the Inception Architecture for Computer Vision.” 2016 *IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.* pp. 2818–2826, 2016.
- [56] N. Dong, L. Zhao, C.H. Wu, and J.F. Chang “Inception v3 based cervical cell classification combined with artificially extracted features.” *Appl. Soft Comput.* vol. 93, pp. 106311, 2020.
- [57] G. Hinton, L. Deng, D. Yu, G. Dahl, A. Mohamed, N. Jaitly, A. Senior, V. Vanhoucke, P. Nguyen, T. Sainath, and B. Kingsbury: “Deep Neural Networks for Acoustic Modeling in Speech Recognition: The Shared Views of Four Research Groups.” *IEEE Signal Process. Mag.* vol. 29, no. 6, pp. 82–97, 2012.
- [58] S. Ghoury, C. Sungur, and A. Durdu “Real-Time Diseases Detection of Grape and Grape Leaves using Faster R-CNN and SSD MobileNet Architectures.” *Int. Conf. Adv. Technol. Comput. Eng. Sci.*, 2019.
- [59] X. Liu, Z. Jia, X. Hou, M. Fu, and L. Ma “Real-time Marine Animal Images Classification by Embedded System Based on Mobilenet and Transfer Learning; Real-time Marine Animal Images Classification by Embedded System Based on Mobilenet and Transfer Learning.” *OCEANS 2019 - Marseille* (2019).
- [60] K.D. Kadam, S. Ahirrao, and K. Kotecha “Efficient Approach towards Detection and Identification of Copy Move and Image Splicing Forgeries Using Mask R-CNN with MobileNet V1.” *Comput. Intell. Neurosci.* vol. 2022, 2022.
- [61] F. Chollet “Xception: Deep Learning with Depthwise Separable Convolutions.” 2017.
- [62] Ö. Polat “Detection of Covid-19 from Chest CT Images using Xception Architecture: A Deep Transfer Learning based Approach.” *Sak. Univ. J. Sci.* vol. 25, no. 3, pp. 800–810, 2021.
- [63] M. Tan and Q. V. Le “EfficientNet: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks.” 36th *Int. Conf. Mach. Learn.* pp. 10691–10700, 2019.
- [64] M. Tan and Q. V. Le “EfficientNetV2: Smaller Models and Faster Training.” 2021.
- [65] Y. Bengio “Practical recommendations for gradient-based training of deep architectures.” *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 7700, pp. 437–478, 2012.
- [66] S. Haykin “Neural networks and learning machines, 3/E.” Pearson Education India, 2009.
- [67] R.J. Fante, V.D. Durairaj, and S.C.N. Oliver “Diabetic retinopathy: An update on treatment.” *Am. J. Med.* vol. 123, no. 3, pp. 213–216, 2010.
- [68] M.D. Abramoff, M.K. Garvin, and M. Sonka “Retinal imaging and image analysis.” *IEEE Rev. Biomed. Eng.* vol. 3, pp. 169–208, 2010.
- [69] G.V. DODDI “eye\_diseases\_classification | Kaggle,” <https://www.kaggle.com/datasets/gunavenk/atdoddi/eye-diseases-classification>.



## Şizofreni Tanısında Beyin Dalgalarının Derin Öğrenme Yöntemleri ile İncelenmesi

### Analysis of the Brainwaves for the Diagnosis of Schizophrenia with Deep Learning Methods

<sup>1</sup>Berkay SERİN , <sup>2</sup>Sevcan EMEK 

<sup>1,2</sup>Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği, 45140 Manisa, Türkiye

<sup>1</sup>berkayserin@cbu.edu.tr, <sup>2</sup>sevcan.emek@cbu.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 25 July 2023

Accepted : 20 September 2023

##### Keywords:

Brainwaves, Classification, Deep Learning, CNN, RNN

#### ABSTRACT

This study offers an alternative approach to diagnosing schizophrenia. In this study, data obtained from 14 schizophrenic patients and 14 healthy individuals, using standard 10-20 EEG montages with 19 EEG channels are used. These data are classified in different ways and the findings obtained from the experimental studies are compared in terms of accuracy and time spent. Although the first approach is to conduct the brainwaves with Convolutional Neural Networks (CNN) without processing, it is observed that it does not yield an efficient result, because CNN forgets the wave data associated with each other between each neuron layer. As an alternative approach to the developed models, Recurrent Neural Network (RNN) is used to maintain the integrity of the data. While the maximum accuracy is 0.94 with the improved RNN, it reaches 0.93 accuracy with the proposed CNN model. It is observed that the learning time increases in the CNN model compared to the RNN model. Throughout the study, brainwaves are classified with suggested deep learning methods and it is tried to reach the most efficient one.

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 25 Temmuz 2023

Kabul : 20 Eylül 2023

##### Anahtar Kelimeler:

Beyin Dalgası, Sınıflama, Derin Öğrenme, CNN, RNN

#### ÖZET

Bu çalışmada şizofreni hastalığının teşhis edilmesine yönelik alternatif bir yaklaşım sunulmaktadır. Çalışmada, 14 şizofreni hastası ve 14 sağlıklı bireyden alınmış, 19 EEG kanalıyla standart 10-20 EEG montajı kullanılarak 250 Hz örnekleme frekansı ile elde edilen veriler kullanılmaktadır. Çalışma boyunca, bu veriler farklı şekillerde sınıflandırılmakta ve deneysel çalışmalarla elde edilen bulgular doğruluk ve harcanan süre açısından karşılaştırılmaktadır. İlk yaklaşım olarak, beyin dalgalarının işlenmeden evrimsel sinir ağları (Convolutional Neural Network -CNN) ile yürütmek olsa da CNN her nöron katmanı arasında birbiriyle ilişkili dalga verilerini unuttuğu için verimli bir sonuç vermediği gözlemlenmektedir. Geliştirilen modellere alternatif bir yaklaşım olarak, verilerin bütünlüğünü koruyacak tekrarlayan sinir ağları (Recurrent Neural Network -RNN) önerilmektedir. Elde edilen maksimum doğruluk değeri geliştirilen RNN ile 0.94 olurken, yapılandırılmış CNN modeli ile 0.93 doğruluk seviyesine erişmektedir. Başarıyı artırılmada CNN modelinde, RNN modeline kıyasla öğrenme süresinin arttığı gözlemlenmektedir. Çalışma boyunca, önerilen derin öğrenme yöntemleriyle beyin dalgaları sınıflandırılarak en verimli olanına ulaşılmaya çalışılmaktadır.

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

## 1. GİRİŞ

Şizofreni tanısı psikiyatristler tarafından bazı gözlemler sonucunda ortaya konmaktadır. Tek bir test şizofreniyi teşhis edemez. Bir hastanın yaşayabileceği farklı semptomlar nedeniyle, bir psikiyatrist kapsamlı bir klinik muayeneden sonra tanı koyabilmektedir. Muayenenin bir parçası olarak, bir psikiyatrist hastanın davranışlarında ve biyolojik işleyişinde (uykusuzluk, yemeğe veya sosyalleşmeye ilgi eksikliği) değişiklikler olup olmadığını kontrol etmektedir veya hasta davranışındaki sapmalar hakkında aile üyelerinden bilgi alabilmektedir [1-6]. Bu hastalığın pratikte daha kolay teşhisini sağlayabilecek teknik ve teknolojilerin gelişimi son yıllarda hız kazanmıştır. İnsan beyninin matematiksel modellenmesi ve derin öğrenme yöntemlerinin özellik tabanlı yöntemlere alternatif olarak kullanılmasına yönelik artan bir ilgi vardır. Derin öğrenme algoritmaları, önemli özellikleri otomatik olarak çıkarabilir ve bunları doğrudan verilerden sınıflandırabilir [7-11]. Bu yöntemler, veri işleme ve karar-verme kullanım modellerini oluşturmada insan beyninin işleyişini taklit ederek geliştirilmektedir. Sinir ağı mimarisi tasarımı ve eğitimindeki son gelişmeler, araştırmacıların daha önce zor olan derin öğrenme yöntemlerinin öğrenme görevlerini çözmelerini sağlamıştır. Birçok araştırma, derin öğrenmenin makine öğreniminde uygulanmasına, özellikle tıbbi uygulamalarda elektroensefalografi (EEG) sinyallerini başarılı bir şekilde işlemek için bilgisayarlı görü çalışmalarına odaklanmıştır [12-17]. Hastalıkların tanısında veya bir problemin çözüm sürecinde bir karar-verme mekanizması sunan yapay zeka yöntemleri yazılım geliştirme sürecinde önemli bir potansiyel güç oluşturmaktadır. Yapay zeka yöntemlerinde derin öğrenme alanında yapılan çalışmalar incelendiğinde, verilerin analizi ve işleyişi için kullanılan yöntemlerin ve algoritmaların karar-verme mekanizmasında verdiği sonuçlar hayati öneme sahip olabilmektedir. Geleneksel sınıflandırmada örneğin özellik çıkarma, özellik seçimi gerçekleştirme gibi yöntemlerin yanı sıra derin öğrenme algoritmaları ile önemli özellikler otomatik çıkarılmakta ve bunları doğrudan verilerden sınıflandırabilmektedir. Buradaki en önemli güç insan beyninin işleyiş modelini ortaya koymaktır [7, 18]. Birçok araştırma makalesi, derin öğrenmenin makine öğreniminde önemli bir teknoloji (state-of-the-art technology) olarak uygulanmasına, özellikle CNN'nin geniş yer bulduğu tıbbi uygulamalara yönelmiştir [19-24]. Benzer çalışmalar daha detaylı incelendiğinde mevcut sinir ağı modelleri ile geliştirilen ve başarıyı önemli derecede arttıran yöntem ve yaklaşımlar dikkat çekmektedir.

Literatürde bir durum çalışması olarak geniş yer bulan şizofreni karmaşık ve ciddi bir ruhsal bozukluktur. Dünya Sağlık Örgütü'ne göre şizofreni yüksek sağlık harcamalarına yol açan ciddi sakatlıklarla bağlantılıdır, uzun süreli ilaçlar kullanılarak tedavi edilebilir ve yönetilebilir [25, 26]. Dünya nüfusunun yaklaşık 24 milyon fazla insanı etkileyen bu hastalığın erken tanısında geliştirilen yöntemlere alternatif çözüm arayışları sürmektedir [26-30]. Şizofreni hastalığının derin öğrenme ile teşhisinde, son 3 yılda yapılan çalışmalara ait güncel literatür incelendiğinde; Shalhaf ve ekibi [16] çalışmalarında şizofreni tanısında CNN ve EEG sinyallerinin önerilen metotlarla kullanıldığı çalışmalara atıf yapmışlardır. Bu çalışmalarda ne tür yöntemler geliştirildiği örnek verilerle sunulmaktadır. Çalışmalarında, Sürekli Dalgacık Dönüşümü (SDD) (Continuous Wavelet Transform – CWT), önceden eğitilmiş dört popüler derin CNN (AlexNet, ResNet-18, VGG-19 ve Inception-v3) ile transfer öğrenme ve destek vektör makinesi kombinasyonu ile beyin işlev bozukluğunu modellemek için daha geliştirilmiş bir yaklaşım ortaya koymuşlardır. Siuly ve ekibi [26], EEG sinyal verilerini kullanarak şizofreninin tespiti için derin artık ağı (deep residual network -ResNet) modelini kullanan derin öğrenmeye dayalı bir özellik çıkarma yöntemini önermektedir. Aslan ve Akın [31] çalışmalarında, EEG kayıtlarından şizofreniyi otomatik olarak tespit etmeyi amaçlayan bir yöntem önermektedir. İki farklı veri setinde farklı CNN algoritmaları yürüterek deneysel bulgular ortaya koymaktadır. Ko ve Yang [28], zaman serisi görüntü dönüştürme algoritmaları, Recurrence Plot (RP) ve Gramian Angular Field (GAF) kullanarak görüntüye dönüştürülen EEG verilerini VGGNet temel alınarak oluşturulan Evrimsel Sinir Ağı (CNN) modelleri ile öğrenmesini çalışmalarında göstermektedir. Sobahi ve ekibi [32], EEG kayıtlarının her kanalını EEG ritimlerine ayırtan bir yöntem ortaya koymaktadır. Yeni bir haritalama prosedürü ile çalışmanın etkinliği deneysel olarak incelenmektedir. Şeker ve Özerdem [33] çalışmalarında şizofreni tanısında kullanılan yöntemleri inceleyen güncel çalışmaları ve bu çalışmalardaki bulguları paylaşmışlardır. Emre ve ekibi [6], psikiyatride makine öğrenmesi yöntemlerinin kullanıldığı çalışmalara dikkat çekmektedir. Bu alanda makine öğrenmesi ve EEG verisi ile yapılan çalışmalarda kullanılan yöntemler karşılaştırmalı olarak anlatılmaktadır. Khare ve ekibi [29], EEG sinyallerini SDD, kısa zamanlı Fourier dönüşümü ve Wigner-Ville dağılımı (SPWVD) ile işleyerek, dört evrimsel katmana sahip CNN modeli önermektedir. 11 katmanlı CNN modeli geliştiren Oh ve ekibi, subjektif olmayan (non subjective) ve subjektif (subjective) tabanlı testler ortaya koymaktadır. Sharma ve Acharya [34] tek kanallı EEG'den elde edilen optimal dalgacık tabanlı 11-norm özelliklerini kullanarak şizofreniyi tespit eden yöntem önermektedir.

Belirtilen çalışmalarda da görüleceği üzere, hastalıklı ve sağlıklı bireylerin görüntü ve sinyal işleme metotları ile beyin dalgalarının bilgisayar tabanlı hesaplamalı yöntemlerle sınıflandırılması sonucunda önemli bulgular tespit edilmektedir. Bu tür çalışmalarda EEG önemli bir görüntüleme aracı olmaktadır ve klinik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [12-17, 35-39]. Ancak mevcut literatürde, geliştirilen yöntemlerin şizofreni tespitinin etkinliğini ve doğruluğunu dengeleme ölçütlerinin hala sınırlı olduğu çalışmalarda vurgulanmaktadır [26, 28]. Çalışmalarda bazı derin öğrenme modellerin nasıl tahmin yaptığını ve tahminleri etkileyen faktörlerin veya varsayımların nasıl tanımladığını anlamak zor olabilmektedir. Çalışmalarda çok fazla vurgulanmayan diğer faktör, modelin eğitim sırasında harcadığı zaman ve maliyettir, bu durum güçlü GPU'lar ve büyük miktarda

bellek dahil olmak üzere önemli hesaplama kaynakları gerektirmektedir. Açık erişimli benzer veri kümelerinin birçok çalışmada sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Aynı veri kümesi üzerinden eğitilen modellerin sonuçlarının karşılaştırmalı olarak gösterildiği çalışmalar mevcut literatürde az sayıdadır. Çalışmaların sonuçlarında gözlemlenen yüksek başarı oranları gerçek yaşam/dünya uygulamalarında gözlemlenme imkanı bulmalıdır, çünkü analiz, doğrulama ve ölçeklendirmeye yönelik test teknikleri büyük ölçüde farklılık gösterebilmektedir. Çalışmalarda bir modelin işlevselliği tek bir durum çalışmasına bağlı olarak gözlemlenmektedir, ancak farklı problemlere adapte olabilecek karmaşık yapıdan uzak bir modelin geliştirmeye açık olan yönlerinin vurgulanması gerekmektedir. Optimizasyon tekniklerinin daha fazla kullanılması veya mevcut yöntemler üzerinden yapılandırılmış yeni çalışmaların sunulması daha iyi sonuçların elde edilmesinde mevcut literatüre daha fazla katkı sunmalıdır.

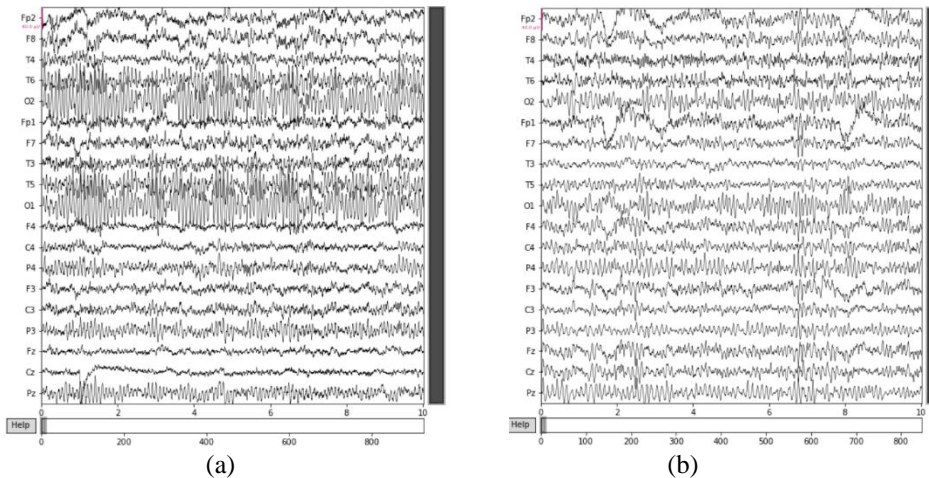
Bu çalışmanın mevcut duruma katkısı olarak; 1) EEG verileri kullanılarak yeniden yapılandırılmış karşılaştırmalı modeller üzerinden şifozreni tanısına yönelik literatürde mevcut çalışmalara alternatif çözüm sunulmaktadır, 2) Yapılan deneysel çalışmaların yazılımı Pyhton kütüphanesi kullanılarak oluşturulmuş, kütüphane ve fonksiyonları net olarak sunulmaktadır, 3) Modellerin eğitim ve test sürecinde, Intel Coffee Lake Core i7-9750H CPU ve 6GB GDDR6 Nvidia GTX1660Ti 192-Bit GPU kullanılarak zaman karşılaştırması yapılmaktadır, 4) Literatürde aynı veri kümesi ile işlenen benzer çalışmaların sonuçları bu çalışma sonunda değerlendirilmektedir, 5) Önerilen modeller, sadece şifozreni tanısında değil, diğer nörolojik ve psikiyatrik hastalıkların teşhisine de taşınabilir bir modül olma potansiyeline sahiptir. Bu çalışmada literatürde yer alan çalışmalar referans alınarak, diğer çalışmalarda da kullanılan açık erişimli veri kümelerinden örnekler işlenerek, beyin dalgalarının derin öğrenme yöntemleri ile karşılaştırmalı ve önerilen modeller üzerinde incelenmesi ele alınmaktadır. EEG verileri üzerinden RNN yöntemi ile çeşitli bulguların saptandığı çeşitli durum çalışmaları ve çözümler literatürde görülmektedir. Bu çalışmada sunulan RNN modeli, geliştirilen çözümlere paralel bir alternatif yaklaşım getirmektedir. Bu önerilen modelde, mevcut RNN mimarisinde bulunan birleştirme öncesinde paralel bir şekilde gerçekleştirilen evrişim katmanlarına, filtre boyutu 16 olan ve 32 filtre içeren bir katman daha eklenmiş ve bu birleştirme işlemi Kapı Özyinelemeli Geçitler (Gated Recurrent Unit -GRU) katmanlarına gelmeden önce bir kez daha gerçekleştirilmiştir. Bunların dışında mevcut RNN mimarisinde bulunan GRU katmanlarının çıktı uzayının boyutluluğu 64 olarak değiştirilmiş ve çıktı katmanının aktivasyon fonksiyonu sınıflandırılacak iki sınıf bulunduğundan sigmoid olarak değiştirilmiştir. Verilerin işleme süreçleri, mimaride kullanılan parametre ve kütüphaneler, deneysel çalışmalar ve sonuçların analizi çalışma boyunca ayrıntıları ile sunulmaktadır.

Çalışmanın içeriği 5 bölümden oluşmaktadır; çalışma kapsamında verilerin nasıl işlendiği ve analizi Bölüm 2’de anlatılmaktadır. Bölüm 3’de, kullanılan yöntemler ile elde edilen bulguların doğrulanması ve geçerliliği gösterilmektedir. Çalışmanın karşılaştırmalı sonuçları Bölüm 4’de değerlendirilmektedir. Son bölümde ise bu çalışmanın genel bir değerlendirilmesi ile geliştirilmeye açık olan kısımları tartışılmaktadır.

## 2. VERİLERİN İŞLENMESİ

Bu çalışmada, 14 şifozreni hastası ve 14 sağlıklı bireyden, 19 EEG kanalıyla standart 10-20 EEG montajı kullanılarak 250 Hz örnekleme frekansı ile elde edilen veriler kullanılmaktadır. Bu veriler IBIB PAN - Beyin Görüntüleme Yöntemleri ve Sinir Sisteminin İşlevsel Araştırma Departmanı’ndan alınmaktadır [40]. Katılımcılardan elde edilen beyin dalgası verileri dışında başka bir veri kullanılmamaktadır.

.edf dosyası halinde tutulan veriler (Şekil 1), çalışma boyunca ham .edf dosyaları içindeki dalga verileri halinde, mevcut .edf verilerinin kanal-saniye bazında .csv dosyalarına ve zaman-frekans bazında SDD kullanılarak temsili görsellere dönüştürülmektedir.

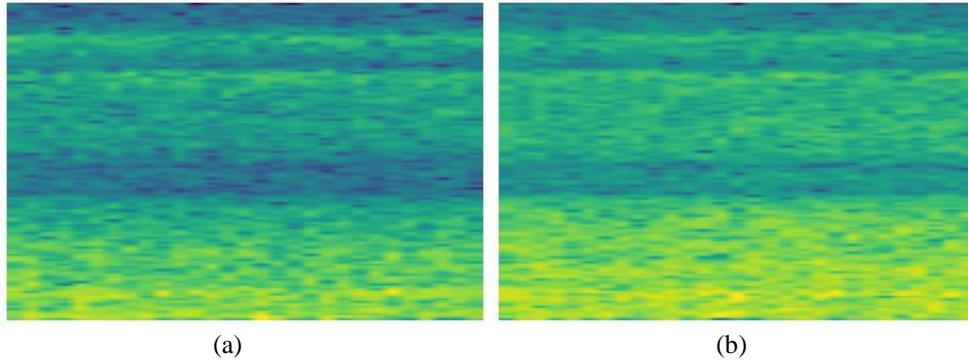


Şekil 1. Beyin sinyallerinin .edf verileri; a) Sağlıklı birey, b) Hastalıklı birey.

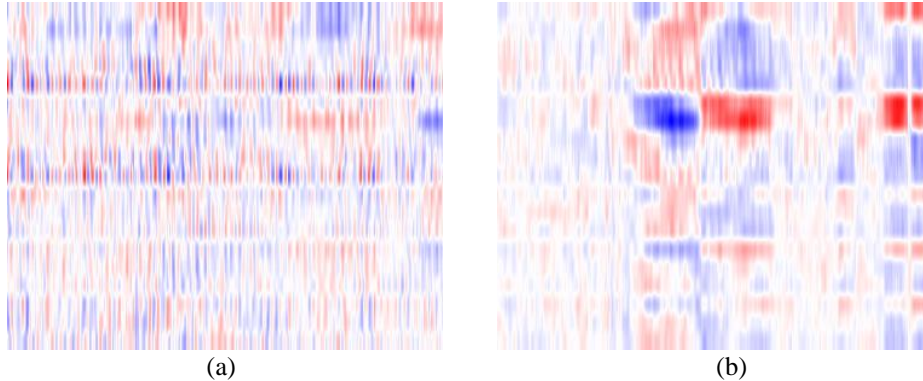
SDD, değişken sinyallerin varyasyonunun özelliklerini haritalamak için kullanılan bir yöntemdir, spektral

analizlerde Fourier analizler yerine kullanılabilir. Bu çalışmada CNN kullanımında veri çeşidi olarak dalga verisini haritalamak için kullanılmaktadır. EEG sinyalleri SDD yöntemiyle skalogram görüntülerine dönüştürülmektedir. Parametre olarak 19 elektrottan alınmış EEG kayıtları (Fp2, F8, T4, T6, O2, Fp1, F7, T3, T5, O1, F4, C4, P4, F3, C3, P3, Fz, Cz, Pz) kullanılmaktadır.

Her katılımcıya ait .edf dosyalarının içindeki dalga verileri kanal-saniye bazında .csv belgesine dönüştürülmektedir. Bu dönüşümler veri çerçevelerine (frame) aktararak çeyrekler arası aralık yöntemiyle temizlenip ölçeklendirilmektedir. Katılımcıların sinyalleri 12 – 15 dakika aralıklarında kaydedilmekte ve bu verileri pencereleme işlemi uygulanırken öncelikle her bir katılımcının her bir kanalından her saniye elde edilen verileri dikey bir şekilde sıralanarak katılımcının durumu için 0 veya 1 olacak şekilde ek bir sütunda gösterilmektedir. Tüm katılımcılar için bu işlem gerçekleştirildikten sonra bütün veriler dikey düzlemle birleştirilerek tek bir pencere haline getirilmektedir. Hasta ile sağlıklı bireylere ait veri çerçevelerinin yanına temsili 0 ve 1'lerden oluşan durum değişkenleri eklendikten sonra eğitim ve test kümeleri olarak ayrılarak çeşitli sınıflandırma metodlarıyla öğrenme sağlanmaktadır. Sıralı verilerin sınıflandırılmasında ve öğrenilmesinde kullanılan GRU katmanlarına sahip tekrarlı bir yapay sinir ağı (Recurrent Neural Network –RNN) kullanılmaktadır. Eldeki .edf dosyalarının içindeki dalga verileri okunarak, hasta ve sağlıklı bireyler bir önceki yöntemdeki gibi belirtildikten sonra veriler eğitim ve test kümeleri olarak ayrılmakta ve oluşturulan yapay sinir ağı ile eğitilmektedir. Python kullanılarak oluşturulan sağlıklı ve hasta bireylere ait spektrogramlar Şekil 2'de sunulmaktadır.



Şekil 2. Spektrogram görüntü; a) Sağlıklı birey, b) Hastalıklı birey

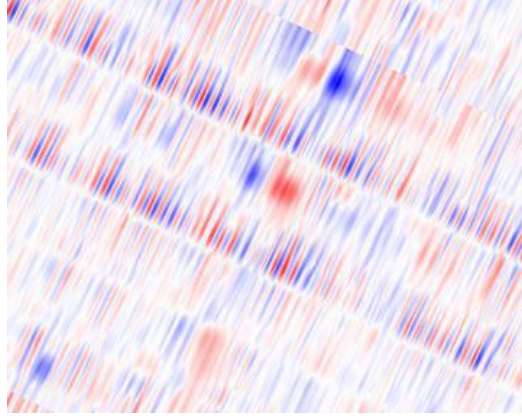


Şekil 3. Beyin sinyallerinin SDD uygulanarak elde edilmiş temsili görsel verileri; a) Sağlıklı birey, b) Hastalıklı birey.

Elde edilen görsel verileri (Şekil 3) CNN üzerinde denemek için eğitim, test ve validasyon kümelerine %10 test, %10 validasyon ve %80 eğitim kümesi olacak şekilde rastgele dağıtılmıştır. Bu dağılımdan sonra hastalıklı katılımcıların verilerinin eğitim kümesinde sağlıklı katılımcıların verilerinden daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Eğitim setinde sağlıklı bireylerde 2606 kare (frame) ve hasta bireylerde 3165 kare elde edilmiştir. Bu gözlem sonucunda veri kümesi kopyalanarak aynı veri kümesi üzerinde sağlıklı katılımcıların eğitim kümesindeki görsel verilerini rastgele seçip, rastgele bir derecede döndürülüp, döndürme işlemi sonucunda kenarda oluşan boşlukları da döndürülmüş ana görsel ile kaplayarak eğitim kümeleri arasındaki dengesizliğin olmadığı yeni bir veri kümesi elde edilmiştir (Şekil 4). İlk veri kümesi tekrar kopyalanarak fazla olan hastalıklı katılımcı verileri rastgele olacak şekilde silinerek dengesizliğin eksi yönde giderildiği başka bir veri kümesi oluşturulmuştur.

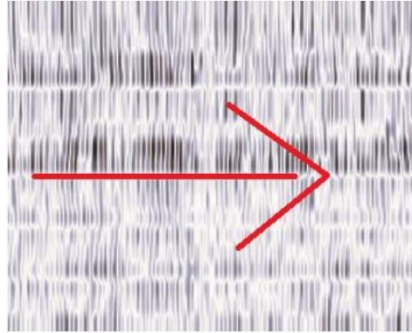
Eldeki veri kümesi, oluşturulan CNN ile sınıflandırılmıştır. Oluşturulan sinir ağı optimize edilip, katman sayıları, aktivasyon fonksiyonları, filtre boyutları, filtre işlemleri ve öğrenme oranı gibi parametrelerin değerleri belirlenmiştir. Yapılan işlemlerden sonra elde edilen CNN üzerinde, oluşturulan veri kümeleri denenmiştir. Test

kümesi kullanılarak elde edilen en yüksek doğruluk değeri, artı yönde yapılan veri eşitleme sonucu elde edilen veri kümesi ile sağlandığı gözlemlenmiştir.

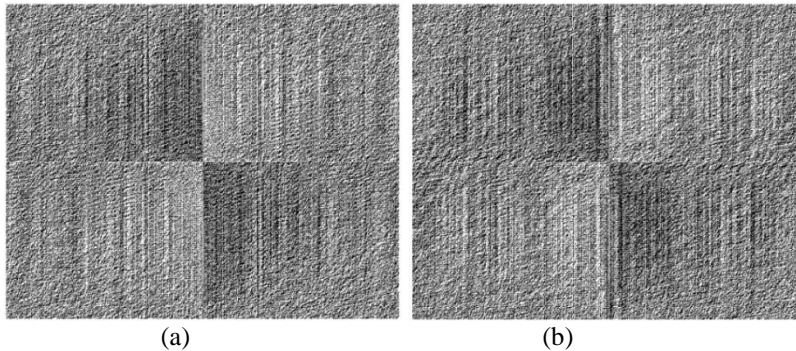


Şekil 4. Veri artırımı (data augmentation) sonucu elde edilen görüntü örneği.

Görsele dönüştürülen verileri içeren veri kümeleri ile CNN üzerinde çalışırken bu görsel verilerinin yatay ekseninde tekrar eden bir örüntüye sahip olduğu fark edilmiştir. Üzerinde belirli bir düzlemde ve frekans şeklinde olan renk geçişlerine sahip görsellere Fourier Dönüşümü uygulanmıştır. Frekans alanının görsel ile ifade edilmiş halinde belirli noktalarda çıkacak parlaklıklar varsayılacağından, elde edilen görsel verilerden yeni bir veri kümesi oluşturulmuştur. Ancak elde edilen verilerin birbirlerinden ayırt edilmesinin zor olması, beklenildiği gibi parlak noktaların çeşitli frekans değişimlerinden dolayı elde edilememesi ve asıl verilere göre renk bazında ayırt edilmek için sadece siyah ve beyaz renkleri içerdikleri için hedeflenen doğruluk değerlerine ulaşamamış, %60-%70 doğruluk değerlerinin üzerinde bir başarı elde edilememiştir. Bunun sebebi olarak, görüntü alanındaki görüntülerin üzerindeki tekrarlayarak aynı düzlemde gerçekleşen renk geçişleri, görüntüye Fourier dönüşümü uygulanarak elde edilecek olan frekans alanındaki görüntünün merkezinde ana görüntüdeki renk geçişleriyle aynı doğrultuda bir parlaklık olarak temsil edileceği bilinmektedir. SDD uygulanarak elde edilmiş görüntüler üzerinde de Şekil 5'deki gibi düzlemsel geçişler fark edildiği için SDD uygulanarak elde edilen görüntüler önce filtrelenecek gri tonlarına dönüştürülmüş sonrasında bu dönüşüme laplace filtresi uygulanarak geçişler daha kalın hale getirilerek uygun bir dolgulama (padding) belirlendikten sonra Fourier dönüşümü uygulanmıştır. Fourier dönüşümü sonrası elde edilen görüntüler Şekil 6'da gösterilmektedir. SDD uygulanarak elde edilen görüntüler daha önceden test, eğitim ve validasyon gruplarına ayrıldığından Fourier dönüşümü işlemi de bu gruplar üzerinden doğrudan gerçekleştirilmiştir. Ancak elde edilen görüntülerde beklenildiği gibi bir parlaklık ifadesi ile karşılaşmamıştır.



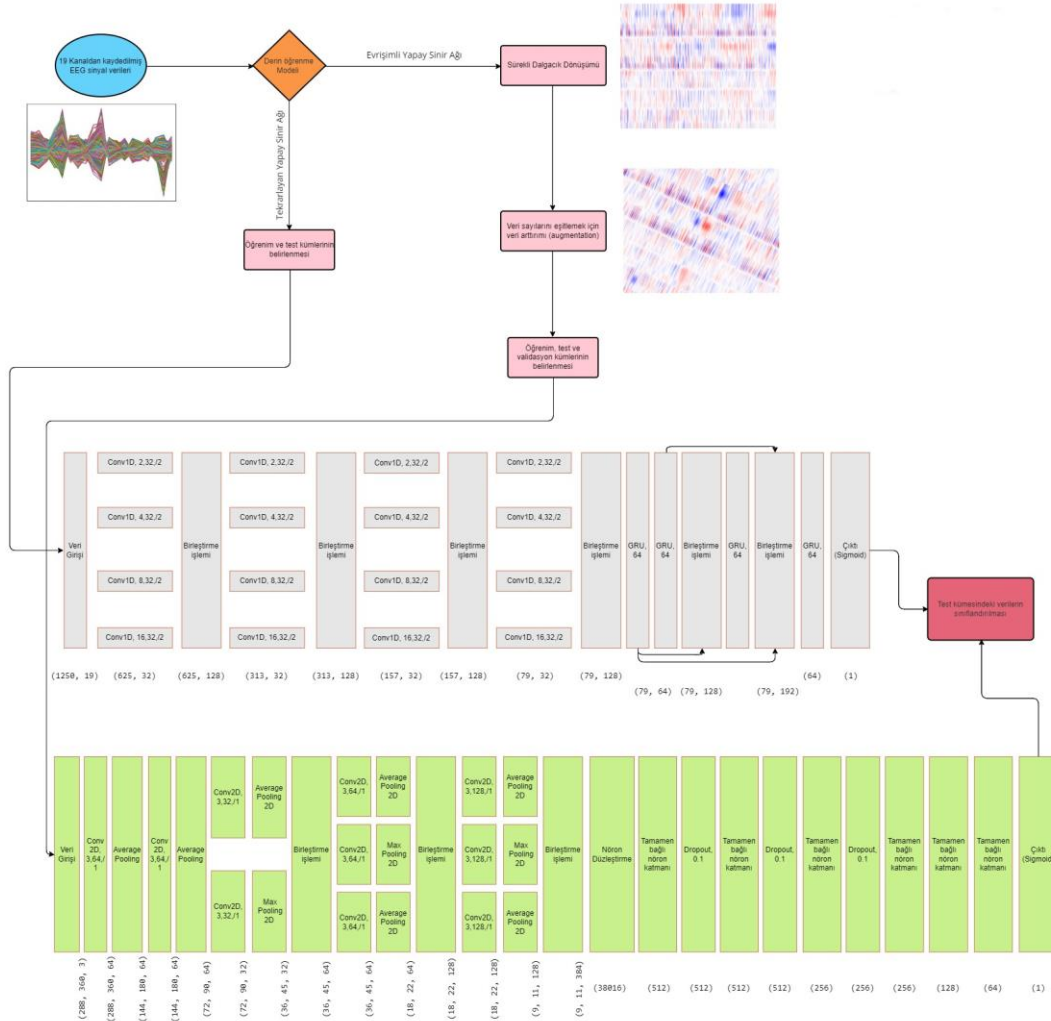
Şekil 5. Farkedilen sürekli geçişler.



Şekil 6. Fourier Dönüşümü sonucunda elde edilen görüntüler; a) Sağlıklı birey, b) Hastalıklı birey



Son olarak görsel verilerinin sınıflandırılması için yeniden bir CNN oluşturulmuştur. Bu aşda ortaklama (pooling) yapılırken sadece ortalama (average pooling) yerine paralel olarak hem ortalama hem de maksimum ortaklama (max pooling) yapılmış sonrasında bu işlemlerin çıktıları birleştirilip tekrar paralel olacak şekilde ortaklama işlemleri yapılmıştır. Üç adet birleştirilme katmanı oluşturulmuş ve ilk katmanda paralel olarak bir ortalama, bir maksimum ortaklama yapıp birleştirilmiş, diğer ikisinde ise iki ortalama bir maksimum ortaklama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bir önceki CNN’de olduğu gibi, yeniden oluşturulan CNN’de eldeki veri kümesinin eğitim ve validasyon kümeleri ile model eğitilip test kümesi ile test edilmiştir. Katman sayıları, parametre değerleri, aktivasyon fonksiyonları gibi bütün değerleri optimum seviyeye getirdikten sonra devamlı verilerin sınıflandırılmasında kullanılan ve kullanılması istenilen RNN’nin doğruluk değerine yakın bir değer elde edilmiştir. Önerilen modellere ait akış diyagramı Şekil 7’de sunulmaktadır. Verilerin işlenmesinde kullanılan kütüphaneler ve çalışmadaki fonksiyonları Tablo 1’de sunulmaktadır.



Şekil 7. Önerilen metotlara ait akış diyagramı.

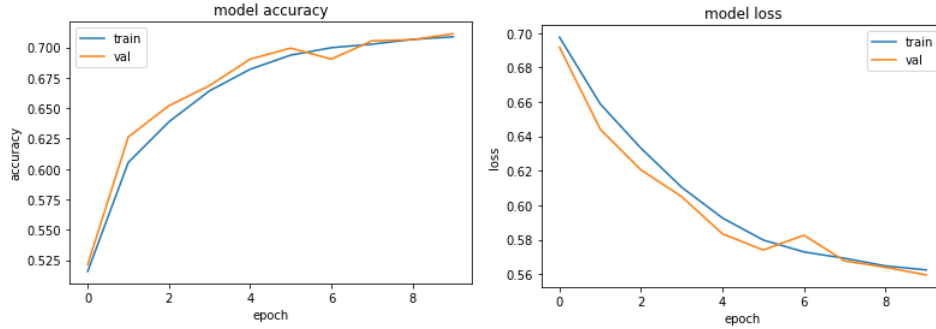
Tablo 1. Kütüphaneler

Kütüphaneler	Açıklama
pandas	.csv dosyasına dönüştürülen .edf dosyalarının işlenmesi
numpy	Diziler üzerinde matematiksel işlemlerin gerçekleştirilmesi
seaborn	.csv dosyasına çevirilmiş verilerin ısı haritalarının elde edilmesi
sklearn	Veri artırımı (data augmentation)
keras	Derin öğrenme modellerinin oluşturulması
visualker	Oluşturulan derin öğrenme modellerinin üç boyutlu olarak görselleştirilmesi
matplotlib	Derin öğrenme modellerinin öğrenme süreçlerindeki doğruluk oranlarının ve elde edilen sonuç verilerinin grafikleştirilmesi
mne	.edf dosyalarının program tarafından okunması, görselleştirilmesi ve analiz edilmesi
glob	.edf dosyalarına bilgisayar üzerinde kaydedildiği yerden ulaşılması
ssqueezepy	Sinyal alanında bulunan verileri zaman-frekans ilişkisi kullanarak görsele dönüştürerek görsel alanına getirilmesi
splitfolders	Görsele dönüştürülen sinyal verilerini eğitime, test, doğrulama verileri olarak ayrılması
os	İşletim sistemi ile etkileşim kurulması
PIL	Visualker kütüphanesinin font parametresinin ayarlanması
Paddedsiz	Görsele dönüştürülmüş sinyal verilerine Fourier Dönüşümü uygulanması

### 3. DOĞRULAMA VE GEÇERLİLİK

#### 3.1. Yapay Sinir Ağı

.csv dosyalarından elde edilen veri çerçevelerini eğitim ve test kümelerine ayırdıktan sonra eğitim kümesiyle eğitmek için basit bir sinir ağı oluşturulmuştur. Ancak elde edilen doğruluk değerleri veri çerçevelerindeki frekans değerlerinin aralarında herhangi bir ilişkisel bağlantı bulunmadığından istenilen değerlere ulaşamamıştır. Ulaşılan maksimum doğruluk değeri 0.71 olmuştur, doğruluk ve kayıp oranları Şekil 8'de belirtilmektedir.



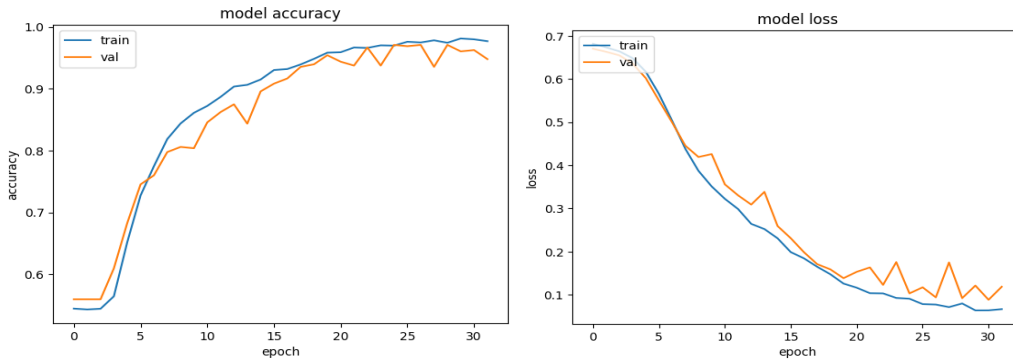
Şekil 8. Yapay sinir ağına ait validasyon ve eğitim işlemindeki doğruluk ve kayıp grafikleri.

#### 3.2. Lojistik Regresyon

Mevcut veri kümesinde bulunan şizofreni hastası ve sağlıklı bireyler olmak üzere iki adet sınıf bulunduğundan .csv dosyalarından elde edilen veri çerçeveleri yapay sinir ağlarının yanında, sınıflandırma işlemlerinde kullanılan lojistik regresyon eğitim kümesi verileri ile eğitilmiştir. Ancak test verilerini tahmin etmekte başarılı olamamış, elde edilen maksimum doğruluk değeri 0.52 olmuştur.

#### 3.3. Tekrarlayan Sinir Ağı (Recurrent Neural Network -RNN)

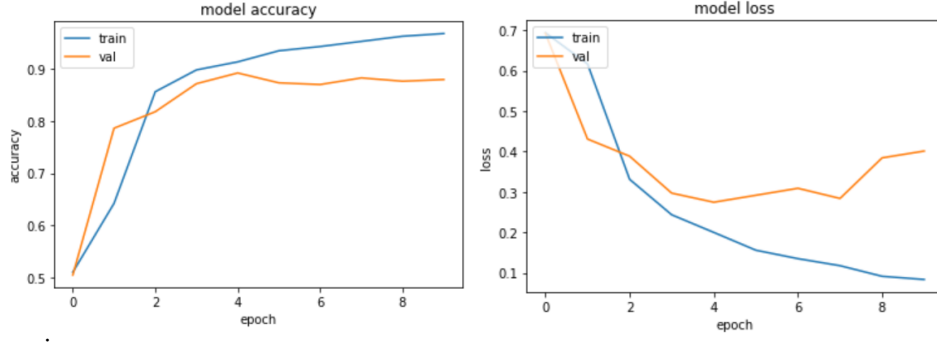
Sinyal verileri gibi sürekli verilerin öğrenilmesinde/sınıflandırılmasında kullanılan tekrarlayan sinir ağı yapısı, tekrarlayan birimler kullanılarak oluşturulmuş, gizlenmiş durumlar (veriler) oluşturularak uzun süreli hafıza elde edilmiştir. Bu uzun süreli hafıza kullanılarak dalga verilerinin saniyeler arasındaki frekanslarının bağlantıları öğrenme aşamasında unutulmadığından test kümesi tahmininde 0.94 doğruluk değerlerine ulaşılmıştır. Chrononet [17] mimarisinin parametreleri (nöron sayıları, filtre boyutları) ayarlanarak, birleştirilme işlemine uygulanacak evrişim katmanları sayısı dörde çıkarılıp birleştirilme işleminin sayısı artırılmıştır. Modelin doğruluk ve kayıp değerleri Şekil 9'da gösterilmektedir.



Şekil 9. RNN modeline ait validasyon ve eğitim işlemindeki doğruluk ve kayıp grafikleri.

#### 3.4. Evrişimli Sinir Ağı, LeNet-5

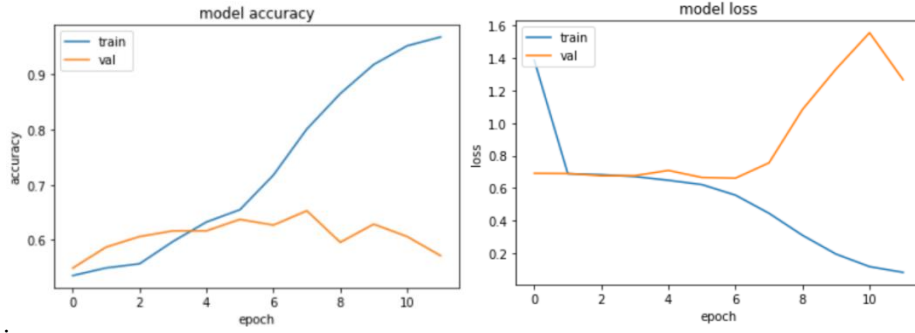
LeNet-5 baz alınarak oluşturulmuştur. Sinyal verilerinin ilişkisel bağlantıları bu tarz kısa süreli hafızaya sahip derin öğrenme ağlarında unutulduğu için sinyal verileri ile bu ağı eğitmenin mümkün olmadığı gözlemlenmiştir. Test kümesi için ayrılan görsellerin hastalıklı veya sağlıklı şeklinde tahmin edilmesinde 0.89 doğruluk oranı elde edilmiştir, doğruluk ve kayıp değerleri Şekil 10'da gösterilmektedir.



Şekil 10. İlk evrişimsel sinir ağına ait validasyon ve eğitim işlemindeki doğruluk ve kayıp grafikleri.

### 3.5. Evrişimli Sinir Ağı, LeNet-5 ve Fourier Dönüşümü

LeNet-5 baz alınarak oluşturulmuştur. Beyin dalgalarını SDD kullanarak görüntü halinde ifade ettikten sonra bu görüntülere Fourier Dönüşümü uygulanmaktadır. Ancak dönüşüm sonucu oluşan görsellerin önceden bulundukları çeşitli renk geçişlerindeki verileri siyah ve beyaz olacak şekilde kaybettiğinden, aynı zamanda elde edilen çıktılar birbirlerinden farkları ayırt edilemeyeceği için test kümesini tahmin etme işleminde en çok 0.60 doğruluk oranına yaklaşmıştır, doğruluk ve kayıp değerleri Şekil 11'de gösterilmektedir.

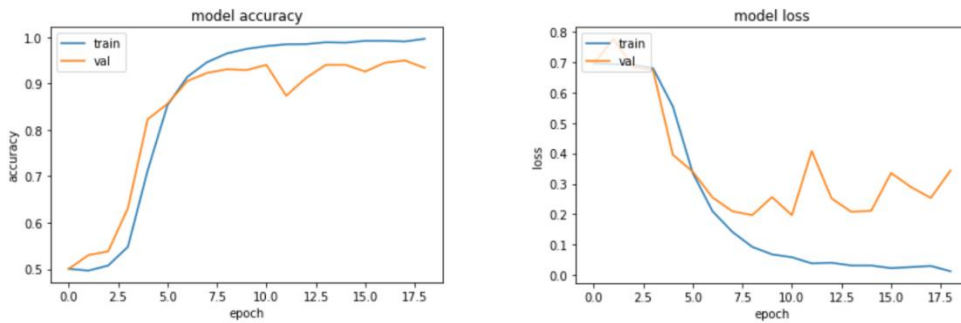


Şekil 11. İlk evrişimsel sinir ağına Fourier Dönüşümü uygulanmış veriler ile yapılan validasyon ve eğitim işlemindeki doğruluk ve kayıp grafikleri.

Fourier dönüşümü SDD yönteminde olduğu gibi beyin dalgalarına doğrudan uygulandığında, elde edilecek spektrogramlar evrişimli sinir ağlarını kullanarak sınıflandırıldığında başarı oranının artması beklenmektedir.

### 3.6. Önerilen Yapılandırılmış Evrişimli Sinir Ağı

Görsel alana çekilen verilerin daha önce geliştirilen evrişimli sinir ağına test kümesindeki verilerin sınıflarını tahmin etmede elde ettiği doğruluk oranından daha fazla bir doğruluk oranına erişmek için, daha karmaşık ve daha kapsamlı yeni bir CNN oluşturulmuştur. Elde edilen bu sinir ağına karmaşık yapısı çalışma zamanında dezavantaj getirirse de, test kümesindeki verilerin tahmininde diğer geliştirilen CNN'den fazla ve asıl verileri sınıflandırmak için kullanılması gereken RNN doğruluk oranına yakın olmaktadır. Bu model için gözlemlenen doğruluk oranı 0.93 olmaktadır, doğruluk ve kayıp değerleri Şekil 12'de gösterilmektedir.



Şekil 12. Yapılandırılmış evrişimsel sinir ağına ait validasyon ve eğitim işlemindeki doğruluk ve kayıp grafikleri.

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada kullanılan tüm modeller için model ve eğitim parametreleri Tablo 2’de karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

**Tablo 2. Modellerin eğitim parametreleri.**

Derin Öğrenme Modeli	Parametreler
Yapay Sinir Ağı	Dense(64,input_shape=(19,),activation = 'sigmoid') Dense(128,activation = 'sigmoid') Dense(256,activation = 'sigmoid') Dense(512,activation = 'sigmoid') Dense(512,activation = 'sigmoid') Dense(1,activation = 'sigmoid') optimizer='adam',loss='binary_crossentropy',metrics=['accuracy'] validation_split = 0.1, epochs=10,batch_size=10025
Lojistik Regresyon	penalty='l2', dual=False, tol=0.0001, C=1.0, fit_intercept=True, intercept_scaling=1, class_weight=None, random_state=None, solver='lbfgs', max_iter=100, multi_class='auto', verbose=0, warm_start=False, n_jobs=None, l1_ratio=None
Tekrarlayan Sinir Ağı	Conv1D(filters=32, kernel_size=2, strides=2, activation = 'relu', padding = 'causal') Conv1D(filters=32, kernel_size=4, strides=2, activation = 'relu', padding = 'causal') Conv1D(filters=32, kernel_size=8, strides=2, activation = 'relu', padding = 'causal') Conv1D(filters=32, kernel_size=12, strides=2, activation = 'relu', padding = 'causal') Dropout(0.5) GRU(units = 64,return_sequences = True) x4 w/Concat Dense(1,activation='sigmoid') optimizer=keras.optimizers.Adam(learning_rate = 0.0001),loss='binary_crossentropy',metrics = ['accuracy'] validation_split = 0.1,shuffle=True, epochs = 32, batch_size = 32, callbacks =[keras.callbacks.EarlyStopping(monitor='val_loss',patience=8,restore_best_weights=True)]
Evrişimli Sinir Ağı (LeNet-5)	layers.Conv2D(filters=6, kernel_size=(3, 3), activation='relu', padding = 'same') layers.AveragePooling2D() layers.Conv2D(filters=16, kernel_size=(3, 3), activation='relu', padding = 'same', strides =1) layers.AveragePooling2D() layers.Conv2D(filters=32, kernel_size=(3, 3), activation='relu', padding = 'same', strides =1) layers.AveragePooling2D() layers.Conv2D(filters=32, kernel_size=(3, 3), activation='relu', padding = 'same', strides =1) layers.AveragePooling2D() layers.Flatten() layers.Dense(units=512, activation=keras.layers.LeakyReLU(alpha=0.5)) Dropout(0.10) layers.Dense(units=512, activation=keras.layers.LeakyReLU(alpha=0.5)) Dropout(0.10) layers.Dense(units=256, activation=keras.layers.LeakyReLU(alpha=0.5)) Dropout(0.10) layers.Dense(units=128, activation=keras.layers.LeakyReLU(alpha=0.5)) Dropout(0.10) layers.Dense(units=64, activation=keras.layers.LeakyReLU(alpha=0.5)) layers.Dense(units=1, activation = 'sigmoid') loss='binary_crossentropy', optimizer=keras.optimizers.Adam(learning_rate = 0.0001), metrics=['accuracy'] epochs=64,batch_size=6, callbacks =[keras.callbacks.EarlyStopping(monitor='val_loss',patience=5,restore_best_weights=True)]
Önerilen Evrişimli Sinir Ağı	Conv2D(filters=64, kernel_size=(3, 3), activation='relu', padding = 'same') AveragePooling2D() Conv2D(filters=64, kernel_size=(3, 3), activation='relu', padding = 'same') AveragePooling2D()  Conv2D(filters=32, kernel_size=(3, 3), activation='relu', padding = 'same') MaxPooling2D() Conv2D(filters=32, kernel_size=(3, 3), activation='relu', padding = 'same') AveragePooling2D() Concatenate()  Conv2D(filters=64, kernel_size=(3, 3), activation='relu', padding = 'same') MaxPooling2D() Conv2D(filters=64, kernel_size=(3, 3), activation='relu', padding = 'same') AveragePooling2D() Concatenate()  Conv2D(filters=128, kernel_size=(3, 3), activation='relu', padding = 'same') MaxPooling2D() Conv2D(filters=128, kernel_size=(3, 3), activation='relu', padding = 'same') AveragePooling2D() Conv2D(filters=128, kernel_size=(3, 3), activation='relu', padding = 'same') AveragePooling2D() Concatenate()  Flatten() Dense(units=512, activation=keras.layers.LeakyReLU(alpha=0.5)) Dropout(0.25) Dense(units=512, activation=keras.layers.LeakyReLU(alpha=0.5)) Dropout(0.25) Dense(units=256, activation=keras.layers.LeakyReLU(alpha=0.5)) Dropout(0.25) Dense(units=256, activation=keras.layers.LeakyReLU(alpha=0.5)) Dropout(0.50) Dense(units=128, activation=keras.layers.LeakyReLU(alpha=0.5)) Dropout(0.50) Dense(units=64, activation=keras.layers.LeakyReLU(alpha=0.5)) Dense(units = 1, activation = 'sigmoid')

Yapay sinir ağı modeli, lojistik regresyon, tekrarlayan sinir ağı, LeNet-5 baz alınarak oluşturulmuş CNN, LeNet-5 baz alınarak ve Fourier Dönüşüm sonucu elde edilen görseller kullanılarak oluşturulmuş evrişimli sinir ağı ve önerilen yapılandırılmış yeni bir CNN modeli ile yapılan deneysel çalışmaların başarı oranları Tablo 3’de sunulmaktadır.

**Tablo 3.** Deneysel çalışmalar sonucu derin öğrenme modellerinin doğruluk oranları.

Derin Öğrenme Modeli	Test İşleminin Doğruluk Oranı
Yapay Sinir Ağı	0.71
Lojistik Regresyon	0.52
Tekrarlayan Sinir Ağı	0.94
Evrişimli Sinir Ağı (LeNet-5)	0.89
Evrişimli Sinir Ağı (LeNet-5, Fourier Dönüşüm)	0.60
Önerilen Evrişimli Sinir Ağı	0.93

Başarının yüksek olduğu önerilen CNN ve RNN modellerde yapılandırılmış bir ağ yapısı görülmektedir. Doğrulama oranında artış gösteren CNN, karmaşık bir ağ yapısı gibi görünse de test kümesindeki verilerin tahmininde RNN doğruluk oranına yaklaşmıştır. Yapılandırılmış RNN modelinde, mevcut RNN mimarisinde bulunan birleştirme öncesinde paralel bir şekilde gerçekleştirilen evrişim katmanlarına, filtre boyutu 16 olan ve 32 filtre içeren bir katman daha eklenmiş ve bu birleştirme işlemi GRU katmanlarına gelmeden önce bir kez daha gerçekleştirilmiştir. Bunların dışında mevcut RNN mimarisinde bulunan GRU katmanlarının çıktı uzayının boyutluluğu 64 olarak değiştirilmiş ve çıktı katmanının aktivasyon fonksiyonu sınıflandırılacak iki sınıf bulunduğundan sigmoid olarak değiştirilmiştir. RNN’in bu yapısı ile başarı oranında artış sağladığı gözlemlenmiştir.

Referans olarak verilen aynı veri kümesi (14 sağlıklı birey, 14 hasta birey) ile yürütülen çalışmalardaki yöntem ve başarı oranları Tablo 4’de sunulmaktadır.

**Tablo 4.** Derin öğrenme ile şizofreni tanısı yapılan çalışmaların başarı oranı karşılaştırması.

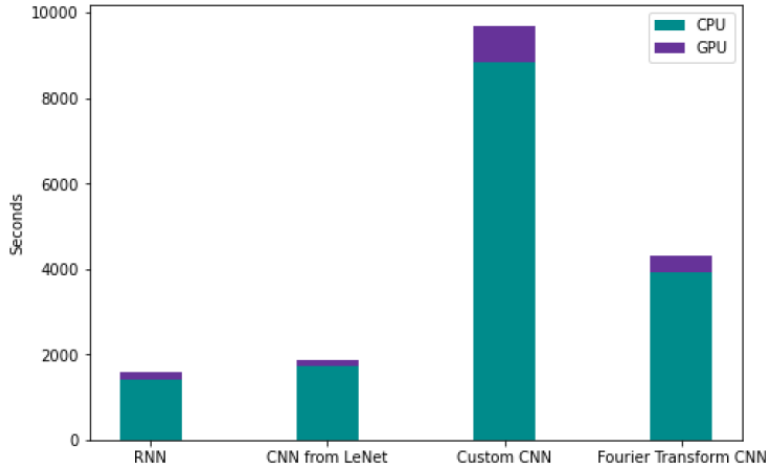
Referans	Metod	Başarı oranı
Oh ve ekibi (2019) [30]	CNN -subjektif olmayan test (non subject base testing)	%98,07
	CNN - subjektif test (subject base testing)	%81,26
Jahmunah ve ekibi (2019) [41]	Doğrusal olmayan özellik çıkarım (nonlinear feature extraction)	%92,91
Shalbf ve ekibi (2020) [16]	CNN	%98.60%±2.29
Phang ve ekibi (2020) [42]	CNN	%91,69
Sharma ve Acharya 2020 [34]	Optimal dalgacık tabanlı L1-norm (optimal wavelet-based L1-norm)	%99,2
Aslan ve Akın 2020 [43]	CNN	%97
Chandran ve ekibi (2021) [44]	LSTM (long short-term memory)	%99
Aslan ve Akın 2022 [31]	CNN	%99,5

Tablo 4’de belirtilen çalışmalar incelendiğinde, başarı oranlarının karşılaştırılması yapılırken kullanılan yöntemlere ait birçok özellik ve parametrenin dikkate alınması gerekir. 11 katmanlı CNN modeli geliştiren Oh ve ekibi [30], subjektif olmayan (non subjective) ve subjektif (subjective) tabanlı testler ortaya koymaktadır. CNN modelini doğrudan EEG kanallarından gelen verilerle işledikleri görülmektedir. Jahmunah ve ekibi [41] doğrusal olmayan özellik çıkarma ve sınıflandırma tekniklerini kullanmaktadır. Bu çalışmaları 12 özellik ve Destek Vektör Makineleri (Support-Vector-Machine –SVM) sınıflandırıcıyla %92,91 oranında doğruluk sağladığı belirtilmektedir. Shalbf ve ekibi [16], hastaların otomatik tespiti için CNN ile SDD ve SVM yöntemleriyle transfer öğrenmeyi kullanmaktadır. EEG sinyallerinin frontal, santral, parietal ve oksipital bölgelerinin birleşiminden oluşan skalogram görüntülerinde ResNet-18-SVM mimarisi için %98,60±2,29 doğruluk değerine ulaştıklarını belirtmektedir. Phang ve ekibi [42], EEG’den türetilen beyin konektomunun sınıflandırılması için bir CNN modeli önermektedir, ancak beyin bağlantı grafik yapısı özellikleri gibi bir takım sınırlamaların olduğu çalışma sonunda ifade edilmektedir. Sharma ve Acharya [34], tek kanallı EEG’den elde edilen optimal dalgacık tabanlı L1-norm özelliklerini %99’un üzerinde bir doğrulukla hastalığı tespit etmektedir. Optimal dalgacık tabanlı özellik, k-en yakın komşu (kNN) sınıflandırıcısı ile sınıflandırıldığı görülmektedir. Aslan ve Akın [43] çalışmalarında iki ayrı veri kümesi kullanmaktadır, elde ettikleri spektrogram görüntülerini CNN derin öğrenme ağı ile eğiterek %97 doğrulukla sınıflandırma işlemi gerçekleştirdikleri belirtilmektedir. Diğer çalışmalarında [31] ise boyut arıtma yöntemlerini kullanarak, her kanaldan alınan EEG kayıtlarını 5’er saniyelik segmentlere bölüp skalogram görüntüleri elde etmişlerdir. Farklı CNN algoritmaları ile deneysel çalışmalar yaparak en iyi başarı oranını %99,5 ile VGG-16’da sağladıklarını çalışmalarında belirtmişlerdir.

Chandran ve ekibi [44], uzun kısa süreli hafıza (LSTM) yöntemi ile EEG sinyalinden özellikler çıkarılarak şizofreninin tespit edilmesine yönelik çalışmalarını sunmaktadır. Katz fraktal boyutu (KFD) ve yaklaşık entropi (ApEn) gibi doğrusal olmayan özellikler ve varyans değerlerinin zaman alanı ölçümlerini EEG sinyalinden hesaplamaktadır, yüksek başarı oranı gözlemledikleri belirtilmektedir.

Tablo 4’de karşılaştırılan çalışmalar her ne kadar aynı veri kümesini işlese de kullanılan sınıflandırıcılar ve genelinde gözlemlenen hibrit yaklaşımlar ile farklı yöntemleri ortaya çıkarmaktadır. Bu yöntemlerden elde edilen bulgulara ve başarı oranlarına bakıldığında, şizofreni tanısında her ne kadar yüksek başarı oranları görülse de bir takım varsayımlar ve sınırlamaların mutlaka bu oranda etkili olduğu vurgulanmaktadır. Bu çalışmada elde edilen başarı sonuçlarının bu hastalığın tanısına alternatif bir çözüm sunması amaçlanmaktadır. Diğer çalışmalarla kıyaslandığında başarı oranlarında her ne kadar hata payı farklılıkları olsa da, önerilen modellerin yapısal özellikleri, işleyiş süreçleri, verilerin doğru yöntemlerle işlenmesi, sonuçların yorumlanabilir bulgular içermesi gibi birçok faktörün birlikte değerlendirilmesi çalışmanın başarısının artmasına ve geliştirilmesine imkan sağlamaktadır.

Derin öğrenme modelleri çok fazla sinir ağı katmanına sahip olduğu için CPU’nun ilişkili tüm görevleri yönetmesi zor olabilir. Derin öğrenme ağlarını büyük veri kümeleri ile eğitmek doğruluk oranlarını arttırdığı gibi çalışma süresini uzatabilir. Derin öğrenme, çok fazla hız ve yüksek performans gerektirmektedir, tüm işlemler aynı anda işlendiğinde daha hızlı öğrenme gerçekleşmektedir. GPU’lar derin öğrenme modellerini eğitmek için optimize edilmiştir ve birden çok paralel görevi bir CPU’dan üç kata kadar daha hızlı işleyebilmektedir [45, 46]. Modellerin eğitim ve test sürecinde CPU ve GPU karşılaştırması Şekil 13’deki grafikte gösterilmektedir.



Şekil 13. Modellerin eğitim ve test süresinin CPU ve GPU ile karşılaştırılması.

## 5. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu çalışmada ele alınan yöntemlerle, şizofreni hastalığının tanısının uzman kişilere karar-verme mekanizması oluşturacak bir yaklaşımı sunulmaktadır. Bireylerin EEG sinyallerinin işlenmesi ve derin öğrenme yöntemleri ile verilerin sınıflandırılması üzerine birtakım bulgular ortaya konmaktadır. Beyin dalgalarında olduğu gibi sürekli verilerin sınıflandırılmasında, aralarındaki zamansal bağlantıyı unutmayacak uzun zamanlı bir hafızaya sahip olan derin öğrenme yöntemlerinin yanında, daha çok görsel verileri sınıflandırmak için kullanılan evrişimli sinir ağları oluşturulmaktadır. Yapılan deneysel analizlerle derin öğrenme yöntemleri sonucunda elde edilen benzer doğruluk seviyesine erişilmekte ve var olan çözüm yöntemine alternatif bir yaklaşım sunulmaktadır. Bu çalışma sonucunda gözlemlenen değerlere göre, derin öğrenme yöntemlerini farklı yönlerden deneyerek doğruluk değerlerini onaylamak mümkün olmaktadır. Geliştirilen evrişimli sinir ağı ve tekrarlayan sinir ağı sadece şizofreni hastalığının tanısında değil, bu modellerin sınıflandırmayı öğrendiği veriler; insanların aynı durumlar altında üreteceği beyin dalgaları ve farklı frekansta beynin herhangi bir yerinde üretilen beyin dalgaları olduğundan, bu sınıflara ait verilerin oluşmasını sağlayacak durumlarda da kullanılabilir. Örneğin dinlenme durumunda beyin dalgalarında bozulmaya yol açan herhangi bir hastalık, yeterli verinin toplanması sonucunda bu derin öğrenme modelleri ile ayırt edilebilecektir. Model üzerindeki geliştirmeler ile çıktı katmanı olarak sigmoid fonksiyonu yerine softmax fonksiyonu kullanılarak birden çok sınıf içerisinde beyin dalgalarının hangi sınıftan olduğunu ayırt etmesi sağlanabilir. Bu durumda sınıflandırılacak beyin dalga çeşidi sayısı artacağı için, ilgili süreçler için yapılabilecek işlemler de artarak modellerin kullanım alanlarının esnek hale dönüşebileceği tahmin edilmektedir. Çok sınıflı durumlara insan beyninin kaslarını hareketlendirmek için üreteceği dalgalar örnek olarak verilebilir. Bu modellerin geliştirilmesi durumunda bu dalgaları birbirinden ayırt etmenin mümkün olabileceği varsayılabilir. Bunların yanında parametrelerin öğrenim süresinin kısaltması güçlü ekran kartı ve uzun zamanda daha iyi optimize edilmiş model parametreleri ile mümkün olacaktır. Derin öğrenme yöntemlerine uygulanacak yaklaşımların, bu çalışmada da görüldüğü üzere Fourier Dönüşümünün SDD ile oluşturulan görsel veriler yerine, doğrudan beyin dalga verilerine uygulanması daha başarılı doğruluk değerlerine ulaşılmasını sağlamaktadır.

## Not

Bu çalışma, 12. Genç Beyinler Yeni Fikirler (GBYF'12) proje yarışmasında Akademik ve Diğer Bilişim Uygulamaları kategorisinde birinci olarak seçilmiştir. Erişim linki: gbyf.org.tr

## Yazar Katkıları

Sevcan Emek, bu çalışmanın konusunun ve kapsamının detaylarını inceleyerek, deneysel analiz sürecinin gözlemlenmesine ve sonuçların yorumlanmasına katkı sağlamıştır. Berkay Serin, bu çalışmada sunulan ilgili yöntemlerin yürütülmesine ve çalışmanın anlatılmasına katkıda bulunmuştur.

## Veri Kullanılabilirliği

Kullanılan veri kümesi [40] erişim linki:

<https://reprod.icm.edu.pl/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.18150/repod.0107441>

## Çıkar Çatışması

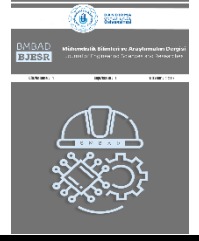
Makale yazarları, aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

## KAYNAKÇA

- [1] P. Fusar-Poli, G. Salazar de Pablo, R.P. Rajkumar, A. López-Díaz, S. Malhotra, S. Heckers, S.M. Lawrie, and F. Pillmann “Diagnosis, prognosis, and treatment of brief psychotic episodes: a review and research agenda”, *Lancet. Psychiatry*, vol. 9, no. 1, pp. 72–83 2022.
- [2] R.L. Spitzer, and J.L. Fleiss “A re-analysis of the reliability of psychiatric diagnosis”, *The British journal of psychiatry : the journal of mental science*, vol. 125, no. 0, pp. 341–347, 1974.
- [3] W. Gaebel, A. Kerst, and J. Stricker “Classification and Diagnosis of Schizophrenia or Other Primary Psychotic Disorders: Changes from ICD-10 to ICD-11 and Implementation in Clinical Practice”, *Psychiatria Danubina*, vol. 32, no. 3-4, pp. 320–324, 2020.
- [4] S.B. Guze “Diagnostic and statistical manual of mental disorders: DSM-IV”, American Psychiatric Association, Washinton D.C., 4th Ed., 1994.
- [5] W. Fenton, L. Mosher, and S. Matthews “Diagnosis of Schizophrenia: A Critical Review of Current Diagnostic Systems Schizophrenia Bulletin”, vol. 7, pp.452–476, 1981.
- [6] İ.E. Emre, C. Taş, and Ç. Erol, “Psikiyatride Makine Öğrenmesi Yöntemlerinin Kullanımı”, *Psikiyatride Güncel Yaklaşımlar-Current Approaches in Psychiatry*, vol. 13, no. 2, pp. 332-353, 2021.
- [7] Y. Bengio, I. Goodfellow, and A. Courville “Deep learning”, MIT press, Cambridge, 2017.
- [8] G. Litjens, T. Kooi, B.E. Bejnordi, A.A.A. Setio, F. Ciompi, M. Ghafoorian, and et al. “A survey on deep learning in medical image analysis”, *Med Image Anal*, vol. 42, pp. 60–88, 2017.
- [9] Ö. İnik, and E. Ülker “Derin Öğrenme ve Görüntü Analizinde Kullanılan Derin Öğrenme Modelleri”, *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi (GBAD)*, vol. 6, no. 3, pp. 85-104, 2017.
- [10] S. Dong, P. Wang, and K. Abbas “A survey on deep learning and its applications”, *Computer Science Review*, vol. 40, p. 100379, 2021.
- [11] L. Deng “A tutorial survey of architectures, algorithms, and applications for deep learning”, *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*, vol. 3, 2014.
- [12] M.A. Jatoui, F.A. Dharejo, and S.H. Teevino “Comparison of machine learning techniques based brain source localization using eeg signals”, *Curr Med Imaging*, 2020.
- [13] R. Buettner, D. Beil, S. Scholtz, and A. Djemai “Development of a machine learning based algorithm to accurately detect schizophrenia based on one-minute EEG recordings”, In: *Proceedings: 53rd Hawaii International Conference on System Sciences, Maui, Hawaii*, pp 7–10, 2020.
- [14] U.R. Acharya, S.L. Oh, Y. Hagiwara, J.H. Tan, and H. Adeli “Deep convolutional neural network for the automated detection and diagnosis of seizure using EEG signals”, *Comput Biol Med*, vol. 100, pp. 270–278, 2018.
- [15] Y. Roy, H. Banville, I. Albuquerque, A. Gramfort, T.H. Falk, and J. Faubert “Deep learning-based electroencephalography analysis: a systematic review”, *J Neural Eng* vol. 16, no. 5, 2019.
- [16] A. Shalhaf, S. Bagherzadeh, and A. Maghsoudi “Transfer learning with deep convolutional neural network for automated detection of schizophrenia from EEG signals”, *Physical and Engineering Sciences in Medicine*, vol. 43, pp. 1229–1239, 2020.
- [17] S. Roy, I. Kiral-Kornek, and S. Harrer “ChronoNet: A Deep Recurrent Neural Network for Abnormal EEG Identification”, arXiv:1802.00308, 2018.
- [18] Y. Guo, Y. Liu, A. Oerlemans, S. Lao, S. Wu, and M.S. Lew “Deep learning for visual understanding: a review”, *Neurocomputing*, vol. 187, pp. 27–48, 2016.
- [19] G. Litjens, F. Ciompi, J.M. Wolterink, B.D. de Vos, T. Leiner, J. Teuwen, and I. Išgum “State-of-the-art deep learning in cardiovascular image analysis”, *JACC Cardiovasc Imaging*, vol. 12, no. 8, pp. 1549–1565, 2019.
- [20] J. Chai, H. Zeng, A. Li, and E.W.T. Ngai “Deep learning in computer vision: A critical review of emerging techniques and application scenarios”, *Machine Learning with Applications*, vol. 6, 2021.

- [21] H. Greenspan, B. van Ginneken, and R.M. Summers "Guest editorial deep learning in medical imaging: overview and future promise of an exciting new technique", *IEEE Trans Med Imaging*, vol. 35, no. 5, pp. 1153–1159, 2016.
- [22] X. Zhang, L. Yao, X. Wang, J. Monaghan, and D. Mcalpine "A survey on deep learning based brain computer interface: recent advances and new frontiers", *arXiv:1905.04149* 2019.
- [23] K. Simonyan, and A. Zisserman "Very deep convolutional networks for large-scale image recognition", *arXiv preprint arXiv:1409.1556*, 2014.
- [24] C. Szegedy, V. Vanhoucke, S. Ioffe, J. Shlens, and Z. Wojna "Rethinking the inception architecture for computer vision", In: *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 2818–2826, 2016.
- [25] T.H. McGlashan "Early detection and intervention of schizophrenia: rationale and research", *The British journal of psychiatry. Supplement*, vol. 172, no. 33, pp. 3–6, 1998.
- [26] S. Siuly, Y. Guo, O. F. Alcin, Y. Li, P. Wen, and H. Wang "Exploring deep residual network based features for automatic schizophrenia detection from EEG", *Physical and Engineering Sciences in Medicine*, vol. 46, pp. 561–574, 2023.
- [27] World Health Organization (WHO), "Schizophrenia", 2022, <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/schizophrenia>. Accessed 6 Sep 2023
- [28] D-W. Ko, and J-J. Yang "EEG-Based Schizophrenia Diagnosis through Time Series Image Conversion and Deep Learning", *Electronics*, vol. 11, no. 14, 2265, 2022,
- [29] S.K. Khare, V. Bajaj, and U.R. Acharya "SPWVD-CNN for Automated Detection of Schizophrenia Patients Using EEG Signals," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1-9, 2021.
- [30] S.L. Oh, J. Vicnesh, E.J. Ciaccio, R. Yuvaraj, and U.R. Acharya "Deep Convolutional Neural Network Model for Automated Diagnosis of Schizophrenia Using EEG Signals", *Applied Sciences*, vol. 9, no. 14, p. 2870, 2019.
- [31] Z. Aslan, and M. Akin "A deep learning approach in automated detection of schizophrenia using scalogram images of EEG signals", *Physical and Engineering Sciences in Medicine*, vol. 45, pp. 83–96, 2022.
- [32] N. Sobahi, B. Ari, H. Cakar, O.F. Alcin, and A. Sengur "A New Signal to Image Mapping Procedure and Convolutional Neural Networks for Efficient Schizophrenia Detection in EEG Recordings," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 8, pp. 7913-7919, 2022.
- [33] M. Şeker, and M.S. Özerdem "EEG based Schizophrenia Detection using SPWVD-ViT Model", *European Journal of Technique (EJT)*, vol. 12, no. 2, pp. 137-144, 2022.
- [34] M. Sharma, and U.R. Acharya "Automated detection of schizophrenia using optimal wavelet-based 11 norm features extracted from singlechannel EEG," *Cognit. Neurodynamics*, pp. 1–4, Dec. 2020.
- [35] A. Savio, J. Charpentier, M. Termenón, A.K. Shinn, and M. Grana "Neural classifiers for schizophrenia diagnostic support on diffusion imaging data", *Neural Netw World*, vol. 20, no. 7, p. 935, 2010.
- [36] F. Afshani, A. Shalbaf, R. Shalbaf, and J. Sleight "Frontal-temporal functional connectivity of EEG signal by standardized permutation mutual information during anesthesia", *Cognitive Neurodyn*, vol. 13, no. 6, pp. 531–540, 2019.
- [37] A. Saeedi, M. Saeedi, A. Maghsoudi, and A. Shalbaf "Major depressive disorder diagnosis based on effective connectivity in EEG signals: a convolutional neural network and long short-term memory approach", *Cognitive Neurodyn*, vol. 15, pp. 239-252, 2021.
- [38] Z. Dvey-Aharon, N. Fogelson, A. Peled, and N. Intrator "Schizophrenia detection and classification by advanced analysis of EEG recordings using a single electrode approach", *PLoS ONE* 10:e0123033, 2015.
- [39] J.W. Kim, Y.S. Lee, D.H. Han, K.J. Min, J. Lee, and K. Lee "Diagnostic utility of quantitative EEG in un-medicated schizophrenia", *Neurosci Lett*, vol. 589, pp. 126–131, 2015.
- [40] E. Olejarczyk, and W. Jernajczyk "EEG in schizophrenia", 2017.
- [41] V. Jahmunah, S.L. Oh, V. Rajnikanth, E.J. Ciaccio, K. H. Cheong, N. Arunkumar, and U.R. Acharya "Automated detection of schizophrenia using nonlinear signal processing methods", *Artificial Intelligence in Medicine*, vol. 100, 2019,
- [42] C.R. Phang, F. Noman, H. Hussain, C.M. Ting, and H. Ombao "A Multi-Domain Connectome Convolutional Neural Network for Identifying Schizophrenia From EEG Connectivity Patterns," in *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, vol. 24, no. 5, pp. 1333-1343, May 2020,
- [43] Z. Aslan, and M. Akin "Automatic detection of schizophrenia by applying deep learning over spectrogram images of EEG signals", *Traitement du Signal*, vol. 37, no. 2, pp. 235-244, 2020.
- [44] A.N. Chandran, K. Sreekumar, and D.P. Subha "EEG-Based Automated Detection of Schizophrenia Using Long Short-Term Memory (LSTM) Network", In: Patnaik, S., Yang, X.S., Sethi, I. (eds) *Advances in Machine Learning and Computational Intelligence. Algorithms for Intelligent Systems*. Springer, Singapore, 2021.
- [45] T. Çetinkaya Saray, and A. Sertbaş "Derin Öğrenme Algoritmalarının GPU ve CPU Donanım Mimarileri Üzerinde Uygulanması ve Performans Analizi: Deneysel Araştırma", *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, vol. 33, pp. 10-19, 2022.
- [46] M. Pandey, M. Fernandez, F. Gentile, and et al. "The transformational role of GPU computing and deep learning in drug discovery", *Nat Mach Intell* 4, pp. 211–221, 2022.





## Tedarik Esnekliği, Teslimat Esnekliği, Planlama Süreci ve Tedarik Süreci Arasındaki Doğrudan ve Dolaylı İlişkilerin İncelenmesi

### Examination of Direct and Indirect Relationships Between Supply Flexibility, Delivery Flexibility, Planning Process, and Procurement Process

<sup>1</sup>Metin BAYRAM , <sup>2</sup>Hasan ŞAHİN , <sup>3</sup>Bayram TOPAL 

<sup>1</sup>Sakarya Üniversitesi, İşletme Fakültesi, İşletme Bölümü, 54000, Sakarya, Türkiye

<sup>2</sup>Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 16200, Bursa

<sup>3</sup>Sakarya Üniversitesi, İşletme Fakültesi, İşletme Bölümü, 54000, Sakarya

[metinbayram@sakarya.edu.tr](mailto:metinbayram@sakarya.edu.tr), [h.sahin@btu.edu.tr](mailto:h.sahin@btu.edu.tr), [btopal@sakarya.edu.tr](mailto:btopal@sakarya.edu.tr)

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 1 August 2023

Accepted : 27 September 2023

##### Keywords:

Planning Process, Supply Flexibility, Supply Process, Delivery Flexibility, Supply Chain Management

#### ABSTRACT

This research aims to analyze the supply chain management processes and investigate the relationships between supply flexibility, delivery flexibility, planning process, and supply process. The study was conducted on ISO 1000 registered firms with the Istanbul Chamber of Industry, and data from 203 firms were analyzed using the Partial Least Squares-Structural Equation Modeling method. The findings reveal that supply flexibility directly influences delivery flexibility and the planning process, and delivery flexibility and planning process also positively affects the supply process. The study provides valuable insights for supply chain management and logistic strategies, emphasizing the significance of understanding flexibility and relationships within the supply chain to enhance operational performance and gain a competitive advantage. Future research could extend the analysis to Small and Medium-sized Enterprises and make cross-sectoral comparisons for a comprehensive understanding.

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 1 Ağustos 2023

Kabul : 27 Eylül 2023

##### Anahtar Kelimeler:

Planlama Süreci, Tedarik Esnekliği, Tedarik Süreci, Teslimat Esnekliği, Tedarik Zinciri Yönetimi

#### ÖZET

Bu araştırma, tedarik zinciri yönetimi süreçlerinden tedarik esnekliği, teslimat esnekliği, planlama süreci ve tedarik süreci arasındaki ilişkileri analiz ederek aralarındaki doğrudan ve dolaylı etkileri incelemeyi amaçlamaktadır. İstanbul Sanayi Odası'na kayıtlı ISO 1000 firmaları üzerinde gerçekleştirilen çalışmada, 203 firmadan elde edilen veriler yapısal eşitlik modeli yöntemiyle analiz edilmiştir. Bulgular, tedarik esnekliğinin teslimat esnekliği ve planlama sürecini etkilediğini ortaya koymaktadır. Teslimat esnekliği de tedarik sürecini olumlu yönde etkileyebilmektedir. Çalışma, tedarik zinciri yönetimi ve lojistik stratejileri için önemli iç görüler sağlamaktadır. Tedarik zincirindeki esneklik ve ilişkilerin anlaşılması, işletmelerin operasyonel performanslarını artırma ve rekabet avantajı elde etme konusunda değerli bilgiler sunmaktadır. Gelecekteki çalışmalarda, KOBİ tarzı işletmelerde benzer analizlerin yapılması ve sonuçların karşılaştırılmasıyla daha kapsamlı bir anlayış elde edilebilir.

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

ORCID ID: <sup>1</sup>0000-0002-9483-7850

<sup>2</sup>0000-0002-8915-000X

<sup>3</sup>0000-0002-3521-4266

## 1. GİRİŞ

Tedarik zinciri yönetimi, günümüzde işletmelerin rekabet avantajını sürdürmek ve operasyonel etkinliklerini artırmak için büyük önem taşıyan kritik bir işlev haline gelmiştir [24]. Tedarik zinciri, mal ve hizmetlerin üretiminden tüketiciye ulaşana kadar olan tüm süreçleri kapsayan karmaşık bir yapıyı ifade etmektedir [10]. Tedarik zinciri yönetimi ise tedarikçilerden başlayarak üretim, depolama, dağıtım ve müşterilere kadar uzanan tüm süreçlerin koordinasyonunu ve yönetimini içeren bir stratejik yaklaşımdır [6].

Tedarik zinciri yönetimi, tedarikçilerle iş birliği yapma, lojistik süreçleri optimize etme, stok düzeylerini yönetme ve müşteri taleplerine hızlı ve etkili bir şekilde yanıt verme gibi pek çok önemli unsuru içermektedir [6]. Bu yönetim yaklaşımı, müşteri taleplerine uygun ve zamanında yanıt verme, stok düzeylerini optimize etme ve maliyetleri düşürme gibi hedefleri gerçekleştirerek işletmelerin rekabet avantajını artırmasına yardımcı olmaktadır [41, 43].

Tedarik zinciri yönetimi ve lojistik süreçleri, günümüz rekabetçi ortamında ve Covid-19 sürecinde tedarik zincirinin kırılması göz önünde bulundurulduğunda işletmelerin başarılı olabilmeleri için güncel bir konu olmaya devam etmektedir. Tedarik zinciri performansının önemli bir ölçüsü olan esneklik, bir şirketin verimliliğini artırmanın yollarından bir olarak kabul edilmektedir [13]. Tedarik esnekliği üzerine yapılan çalışmaların çoğu, üretim ve tedarikçi esnekliği arasındaki ilişki ile tedarikçi esnekliğinin alıcının performansı üzerindeki etkiye odaklanmıştır [40] ve tedarik esnekliği ve teslimat esnekliği gibi faktörlerin, tedarik zincirinin performansı üzerinde etkili olduğunu göstermiştir [3, 13, 25, 27]. Üstündağ ve Ungan [40] ise tedarikçi esnekliğinin tedarikçi performansı üzerinde güçlü bir etkisi olduğunu bulmuştur. Bu çalışmanın amacı, tedarik zinciri yönetimi süreçlerinden tedarik esnekliği, teslimat esnekliği, planlama süreci ve tedarik süreci arasındaki nedensellik ilişkilerini yapısal eşitlik modeli ile incelemek ve analiz etmektir. Ayrıca, teslimat esnekliği ve planlama sürecinin tedarik esnekliği ve tedarik süreci üzerindeki dolaylı etkisinin olup olmadığını araştırmaktır. Bu bağlamda tedarik zinciri yönetimi uygulamaları ve stratejileri için değerli bilgiler sunarak, işletmelerin tedarik zinciri süreçlerini optimize etmelerine ve rekabet avantajı elde etmelerine katkı sağlamak amaçlanmaktadır. Mevcut çalışmalarda genellikle tedarik zinciri süreçleri ayrı ayrı ele alınırken, bu çalışma, tedarik zinciri süreçlerinin nedensellik ilişkileri tasarlanan bir yapısal eşitlik modeli ile dört ana hipotez oluşturularak incelenmiştir.

Hipotez1: Tedarik esnekliği ile teslimat esnekliği arasında anlamlı bir ilişki vardır.

Hipotez2: Tedarik esnekliği, planlama sürecini anlamlı bir şekilde etkilemektedir.

Hipotez3: Teslimat esnekliği, tedarik sürecini anlamlı bir şekilde etkilemektedir.

Hipotez4: Planlama süreci, tedarik sürecini anlamlı bir şekilde etkilemektedir.

Bu çalışmada teslimat esnekliği ve planlama sürecinin tedarik esnekliği ve tedarik süreci üzerindeki dolaylı etkisi ayrıca araştırılmaktadır.

Literatür, tedarik esnekliği ile teslimat esnekliği arasındaki ilişkiye inceleyen kısıtlı sayıda çalışma olduğunu göstermektedir. Bu çalışmanın öne çıkan yönü, tedarik esnekliği ile teslimat esnekliği arasındaki ilişkiyi incelemesi ve bu ilişkinin tedarik zinciri paydaşları arasındaki etkileşimlerle şekillendiğinin ortaya konulmasıdır. Ayrıca bu çalışma; tedarik esnekliği, teslimat esnekliği, planlama ve tedarik süreçleri arasındaki nedensellik ilişkilerini bir yapısal model bakış açısıyla ele alarak, işletmelerin tedarik zinciri yönetimini optimize etme ve rekabet avantajı elde etme amacına hizmet etmektedir. Bu itibarla, çalışmanın literatüre katkısı iki başlık altında ele alınabilir;

- Tedarik esnekliği ile teslimat esnekliği arasındaki ilişkiyi inceleyerek bu konudaki boşluğu doldurmak,
- Tedarik süreci üzerinde tedarik esnekliği, teslimat esnekliği ve planlama sürecinin rolünün etkisini göstermek.

Çalışmada öncelikle kavramsal çerçeve ve hipotez geliştirme sürecine yer verilmiştir. Devamında çalışmanın yöntemi izah edildikten sonra tasarlanan modelin analiz ve bulguları paylaşılmaktadır. Çalışma sonuç ve tartışmalar kısmıyla son bulmaktadır. Son kısımda tedarik zinciri yönetimi ve lojistik alanında çalışma yapmak isteyen çalışmacılara ve işletmelere tedarik zinciri süreçlerini daha etkin bir şekilde yönetmeleri ve rekabet avantajı elde etmeleri için bazı önerilerde de bulunmaktadır.

## 2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE HİPOTEZLERİN GELİŞTİRİLMESİ

### 2.1. Kavramsal Çerçeve

Bu kısımda tedarik zinciri yönetiminde öne çıkan tedarik esnekliği, teslimat esnekliği, planlama süreci ve tedarik süreci kavramları ele alınarak incelenecektir.

#### 2.1.1. Tedarik Esnekliği

İşletmelerde daha hızlı uyum sağlama ve karar verme açısından pek çok belirsizlik durumu vardır [40]. Bunlar işletme içi ve dışında gerçekleştirilen en az etkilenen kararlara kadar pek çok nedenden kaynaklanabilmektedir [38]. Talepteki dalgalanmalar, tedarikçi değişiklikleri, fiyat dalgalanmaları veya beklenmeyen olaylar vb. bunlardan bazılarıdır [35]. Bu belirsizliklerle başa çıkmak için esneklik kavramı geliştirilmiştir [4]. Tedarik esnekliği, tedarik zincirinin değişen koşullara uyum sağlama kabiliyeti olarak tanımlanmaktadır [27]. Tedarik esnekliği, tedarik zincirinin karşılaştığı belirsizlik ve risklerle başa çıkma

yeteneğini artırmak suretiyle, müşterilere sürekli, kesinti olmadan bir hizmet sunulmasına imkân tanımaktadır [38].

Küresel pazarlarda artan rekabet ve müşteri beklentilerindeki değişimler nedeniyle, işletmeler tedarik esnekliğini sağlamak ve sürekli olarak iyileştirmek zorundadır [37]. Stok düzeylerini ayarlamak, alternatif tedarikçileri arayıp bulmak, üretim süreçlerini hızlı bir şekilde değiştirmek veya lojistik süreçlerini esnek hale getirmek gibi yöntemlerle tedarik esnekliği sağlanabilmektedir [7]. Dolayısıyla, tedarik zinciri yönetimi içinde tedarik esnekliği, işletmelerin başarı ve sürdürülebilirlikleri için kritik bir öneme sahiptir.

### **2.1.2. Teslimat Esnekliği**

Hızlı teknolojik değişiklikler, küresel pazarlardaki talep dalgalanmaları ve beklenmedik olaylar vb. unsurlar, teslimat süreçlerini olumsuz olarak etkileyebileceğinden teslimat esnekliği, günümüzde rekabetçi iş ortamında işletmeler için hayati bir öneme sahiptir [44]. Teslimat esnekliği, bu tür belirsizliklerle başa çıkma ve müşterilere sürekli olarak üstün hizmet sunma yeteneği sayesinde işletmelerin rekabet avantajını artırmasına yardımcı olmaktadır [3, 18]. İşletmeler, değişen koşullara hızlı ve etkili bir şekilde uyum sağlama yeteneği sayesinde başarılı bir tedarik zinciri yönetimi ile sürdürülebilir büyümeye ulaşabilirler [17].

Tedarik zinciri yönetimi içinde teslimat esnekliği, müşteri taleplerine hızlı ve etkili bir şekilde yanıt verebilme yeteneği olarak tanımlanmaktadır [35]. Teslimatların müşteriye esnek olarak sunulması, müşterilere istedikleri ürünleri, doğru zamanda ve uygun fiyatlarla sunabilmek anlamına gelmektedir [38]. Teslimat esnekliği, tedarik zinciri içindeki tüm süreçleri ve işletmeler arasındaki ilişkileri yöneterek, müşterilere tatmin edici bir lojistik deneyimi sunma kapasitesine sahiptir [36].

Tedarik zinciri içindeki süreçlerin optimize edilmesi ve lojistik operasyonlarının etkin bir şekilde yönetilmesi, teslimat süreçlerinin verimliliğini artırabilir [12]. Literatürde yapılan çalışmalar, tedarik zincirindeki teslimat esnekliğinin, müşteri memnuniyetini artırdığını ve işletmelerin rekabet avantajını sürdürmede kritik bir rol oynadığını göstermektedir [11, 23].

### **2.1.3. Planlama Süreci**

Etkin bir planlama süreci, tedarik zincirinin başarısı için önemli bir temel oluşturmakta ve müşteri taleplerine hızlı ve etkili bir şekilde yanıt verme kabiliyetini artırmaktadır [7, 26]. Planlama süreci, tedarik zincirinin tüm bileşenlerini ve süreçlerini koordine etmeyi, kaynakları optimize etmeyi ve gelecekteki talepleri karşılamak için stratejiler belirlemeyi amaçlamaktadır [36]. Planlama süreci talep tahminleri, stok yönetimi, üretim programlaması ve tedarikçi işbirliği gibi unsurları içermektedir [6, 22].

### **2.1.4. Tedarik Süreci**

Tedarik süreci, mal ya da hizmetin sipariş edilmesi veya alımının planlamasından teslimatına kadar geçen süreci [36], bir başka deyişle üretim veya hizmetlerin sağlanması için gerekli olan malzemelerin ve kaynakların temin edilmesini kapsamaktadır [23]. Tedarik süreci, stratejik tedarikçi ilişkilerinin geliştirilmesini, ürün geliştirme sürecinde tedarikçilerin katılımını, tam zamanında teslimat sağlanmasını ve tedarikçilerin performansının ölçülmesini içermektedir [8]. Tedarik zinciri yönetimi, belirli tedarikçilerle uzun vadeli stratejik ortaklıklar kurmayı ve sürdürmeyi içermektedir [17]. Bu kapsamda tedarikçilerle karşılıklı güvene ve faydaya dayalı ilişki kurulması, risklerin birlikte paylaşılması ve işbirliğinin artırılması gerekmektedir [22]. Stratejik tedarikçi ilişkilerinin geliştirilmesi, ürün geliştirme sürecinde tedarikçilerin katılımı, tam zamanında teslimatın sağlanması ve tedarikçi performansının ölçülmesi ve tedarikçilerin performanslarını iyileştirmeleri için onlara geri bildirim yapılması etkin bir tedarik zinciri yönetimi için temel unsurlardır [6, 26].

## **2.2. Model Tasarımı ve Hipotez Geliştirme**

Tedarikçi esnekliği, tedarikçi organizasyonunun teslimat, miktar ve çeşit konularında alıcının değişen taleplerine yanıt verebilme yeteneği olarak tanımlanmakta iken [4], teslimat esnekliği ise, müşterilere zamanında ve talep edilen ürünleri veya hizmetleri sağlama kabiliyetini ifade etmektedir [25]. Ancak bu çalışma için yapılan literatür taramasında tedarik esnekliği ile teslimat esnekliği arasındaki ilişkiyi inceleyen kısıtlı çalışmalar olduğu görülmektedir.

Tedarik zinciri içindeki tüm paydaşlar arasındaki etkileşimler tedarik esnekliği ile teslimat esnekliği arasındaki bağı ortaya koymaktadır [15]. Yüksek tedarik esnekliğine sahip olan işletmeler, aynı zamanda teslimat süreçlerinde de esneklik gösterebilmekte ve böylece müşteri taleplerine daha hızlı yanıt verebilmektedir [24]. Tedarik esnekliği sayesinde, stokların daha iyi yönetilmesi ve ihtiyaç duyulduğunda hızlı bir şekilde teslim edilmesi mümkün olmaktadır. Tedarik esnekliği, lojistik planlama ve dağıtım süreçlerini verimli hale getirmektedir. Böylece, ürünlerin daha hızlı ve etkin bir şekilde müşterilere ulaştırılması sağlanmaktadır [9]. Farklı tedarikçilerle çalışma ve alternatif kaynaklardan malzeme tedarik etme olasılığı, tedarik esnekliği ile mümkün hale gelmektedir. Bu sayede, tedarikçi kaynaklı sorunlar veya kesinti durumunda, işletmeler diğer tedarikçilerden hammadde ve malzemeler temin ederek teslimatları aksamadan sürdürebilmektedirler. Tedarik esnekliği stratejisini uygulayan firmalar üretim süreçlerini de esnek hale getirmek zorunda olduklarından, değişen taleplere

uyum sağlamak için üretim kapasitesini artırma veya azaltma imkânı sağlayarak teslimat süreçlerinin etkinliğini artırabilmektedir [36].

Bu itibarla;

Hipotez1: Tedarik esnekliği ile teslimat esnekliği arasında doğrudan bir ilişki bulunmaktadır.

Tedarik planlama süreçleri, işletmenin tedarik zinciri içindeki kaynakları ve süreçlerini etkin bir şekilde yönetmesi için talep tahmini, işletmenin ihtiyaçlarını belirleme, tedarikçi seçimi, stok yönetimi ve sipariş yerleştirme gibi süreçleri içermektedir [6, 7, 22, 36]. Tedarik esnekliğinin, tedarikçilerle olan iş birliği ve tedarik süreçlerinin etkin yönetimi ile ilişkili olduğu yazarlar [5, 14] tarafından vurgulanmaktadır. Bir işletmenin tedarikçileriyle güçlü bir ilişki kurması, talep dalgalanmalarına ve diğer dış etkenlere daha hızlı ve esnek bir şekilde yanıt vermesine katkı sağlayabilmektedir [6]. Aynı şekilde, tedarik planlama sürecinin etkin bir şekilde yönetilmesi, tedarikçi performansını iyileştirebilir ve tedarik süreçlerinin daha verimli çalışmasını sağlayabilir [29]. Dolayısıyla, tedarik esnekliği, tedarik planlama süreçlerinin daha verimli ve etkili bir şekilde uygulanmasını sağlayabileceği ve işletmelerin talep değişikliklerine uyum sağlama kabiliyetini artırabileceği öngörülmektedir.

Bu itibarla;

Hipotez2: Tedarik esnekliği ile planlama süreci arasında doğrudan bir ilişki bulunmaktadır.

Tedarik süreci, ürünlerin veya hizmetlerin tedarikçilerden tedarik edilmesini ve tedarik zinciri boyunca taşınmasını içermektedir [8, 23]. Teslimat esnekliği sayesinde, işletmelerin müşteri taleplerine hızlı ve etkili bir şekilde yanıt verilerek tedarik süreçlerinin performansı artırabilmektedir [12]. Lojistik ve dağıtım ağlarının etkin bir şekilde yönetilmesi ve tedarikçilerle iş birliğinin güçlendirilmesi de teslimat esnekliğini artırmada önemli bir rol oynamaktadır [14].

Bu itibarla;

Hipotez3: Teslimat esnekliği ile tedarik süreci arasında doğrudan bir ilişki bulunmaktadır.

Choi ve Krause [5] bir tedarik süreci planlamasının etkin bir şekilde yönetilmesinin tedarik süreçleri üzerinde olumlu etkisi olduğunu bildirmektedir. Özdemir [29]'de benzer şekilde iyi yönetilen planlama sürecinin tedarikçi performansını ve tedarik süreçlerinin verimliliğini artırabileceğini söylemektedir. Araştırmalar, tedarikçilerin ve iş ortaklarının planlama sürecine katılımını, tedarik zincirinin performansının iyileştirilmesinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir [45, 46]. Planlama sürecinin etkin bir şekilde yönetilmesi, tedarikçi performansını ve tedarik süreçlerini olumlu yönde etkileyebilmektedir [5]. Tedarik zinciri planlaması, tedarikçi işbirliği ve koordinasyonu açısından da kritik öneme sahiptir [8]. Tedarik zincirindeki tüm paydaşlar arasında etkin bir iletişim ve işbirliği sağlanması, tedarik zincirinin bütünlüğünü ve verimliliğini artırmaktadır [36].

Bu itibarla;

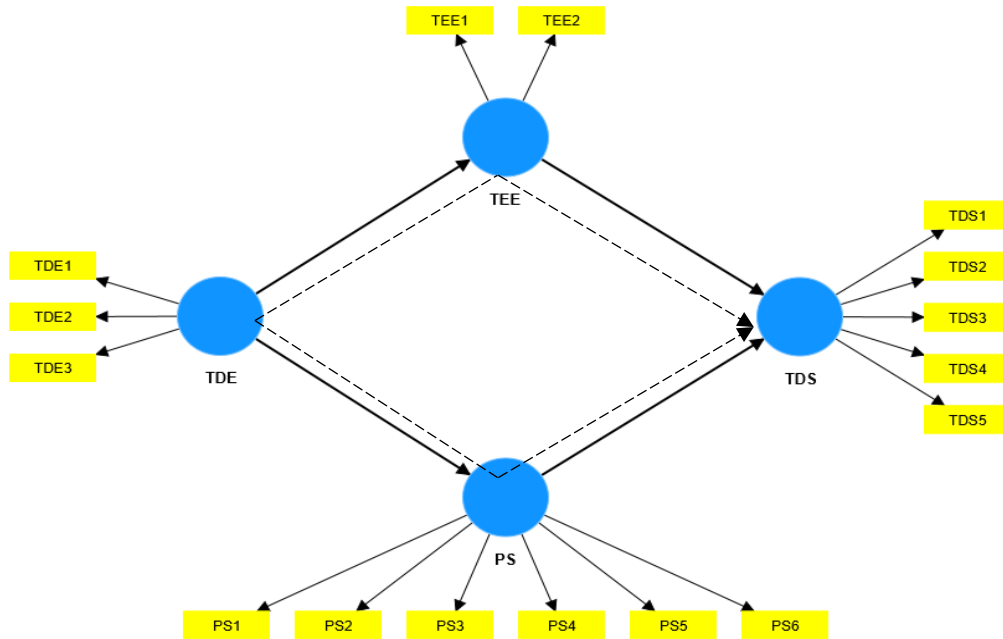
Hipotez4: Planlama süreci ile tedarik süreci arasında doğrudan bir ilişki bulunmaktadır.

Bu hipotezleri test etmek üzere Şekil 1'de sunulan yapısal eşitlik modeli (YEM) tasarlanmıştır. Bu dört yapı arasındaki nedensellik ilişkisine göre tasarlanan Şekil 1'deki çalışma modelinde dolaylı ilişkilerde ortaya çıkmış ve bu dolaylı ilişkiler de analiz edilmiştir.

Bu itibarla;

Hipotez5: Tedarik esnekliği ile tedarik süreci arasında teslimat esnekliği üzerinden dolaylı bir ilişki vardır.

Hipotez6: Tedarik esnekliği ile tedarik süreci arasında planlama süreci üzerinden dolaylı bir ilişki vardır.



Şekil 1. Araştırmanın yapısal eşitlik modeli.

**Not:** Sürekli çizgiler doğrudan etki, kesikli çizgiler dolaylı etki, TDE Tedarik Esnekliği, TEE Teslimat Esnekliği, PS Planlama Süreci, TDS Tedarik Süreci.

### 3. YÖNTEM

#### 3.1. Evren Örneklem ve Veri Toplama

Bu çalışma İstanbul Sanayi Odası'na kayıtlı ISO 1000 firmaları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Verileri toplamak için tasarlanan anket formu 1000 firmaya da gönderilmiş ancak 231 firmadan (%23.1) dönüş sağlanmıştır. Kullanışlı olmayan 28 anket formu hariç tutulmak zorunda kalındığından 203 firmadan sağlıklı veri toplanmıştır. Toplam 203 firmadan toplanan veri seti analiz yapılabilmesi için yeterlidir. Çünkü modelimizde 16 değişken bulunmakta olup çok değişkenli analiz yapılabilmesi için örneklem büyüklüğünün gözlenen değişken sayısının en az on katı olması şartını sağlamaktadır [2].

#### 3.2. Araştırmada Kullanılan Ölçekler

Araştırma modelini oluşturan Planlama Süreci (PS), Teslimat Esnekliği (TDE), Tedarik Süreci (TDS) ve Teslimat Esnekliği (TEE) boyutları Zhou [44] tarafından geliştirilmiş ve Şahin [36] tarafından Türkçeye tercüme edilmiştir. (Bakınız EK1). Katılımcıların planlama süreci ve tedarik süreci boyutlarını oluşturan değişkenleri için "1=uygulanmadı, ..... 7=yaygın olarak uygulanan" aralığında 7'li Likert ölçeğine göre algıları ölçülmüştür. Tedarik esnekliği ve teslimat esnekliği boyutlarını oluşturan değişkenleri için ise "1=kesinlikle karşıyım, ..... 7=tamamen katılıyorum" şeklinde 7'li Likert ölçeğine göre algılarını belirtmeleri istenmiştir.

#### 3.3. Verilerin Analizi

Veri analizinde Kısmi En Küçük Kareler – Yapısal Eşitlik Modeli (KEKK-YEM) yöntemi kullanılmıştır [19]. Smart PLS versiyon 4.0. Yazılımında [30] ölçüm modeli ve yapısal model sırasıyla KEKK algoritması ve önyükleme algoritması çalıştırılarak veriler analiz edilmiştir.

### 4. BULGULAR

#### 4.1. Demografik Bulgular

Araştırmaya katkı sağlayan firmaların demografik bulguları Tablo 1'de gösterilmektedir. Buna göre en çok enerji, gıda, inşaat, metal dışı sanayi, tekstil, metal ve metal eşya sanayi firmalarından katılım sağlanmıştır (%65.5). Çalışan sayısı bakımından 99 ve üstü çalışanı olan firmalar araştırmaya ilgi göstermişlerdir (%95.1). Katılımcı firmaların daha çok 4-10 yıl arasında (%78.2) tedarik zinciri çabası içinde olduğu bulunmuştur.

**Tablo 1.** Demografik bulgular.

	Frekans	Yüzde (%)
<b>Sektör</b>	203	100.0
Enerji, Gıda	39	19.2
İnşaat, Metal Dışı Sanayi	37	18.2
Tekstil	29	14.3
Metal ve Metal Eşya Sanayi	28	13.8
Kimya, Madencilik	20	9.8
Ağaç, Ambalaj, Mobilya	16	7.9
Otomotiv	13	6.4
Beyaz Eşya, Elektronik Sanayi	8	3.9
Diğer	13	6.4
<b>Firma Büyüklüğü</b>	203	100.0
1 – 99 arası çalışan	10	4.9
99 – 499 arası çalışan	100	49.3
500'den fazla çalışan	93	45.8
<b>Tedarik Zinciri Çabası</b>	203	100.0
1 – 3 yıl arasında	10	4.9
4 – 10 yıl arasında	136	67.0
Tedarik zincirimiz yok	28	13.8
Ankete cevap vermeyen	29	14.3

#### 4.2. Dış Ölçüm Modelinin Değerlendirilmesi

Ölçüm Modeli değerlendirilmesinde Sönmez Çakır [34] tarafından izlenen (1) model faktör analizi ve (2) yapılar arasındaki ayrışma geçerliliği analizleri yapılmıştır. Bunun için Smart PLS versiyon 4.0 yazılımında KEKK Algoritması (PLS Algorithm) çalıştırılmıştır.

Model faktör analizi için ana kriterler ve test bulguları Tablo 2'de verilmektedir. Buna göre model faktör analizi için ana kriterler; faktör yükleri, faktör güvenirliği, Cronbach's Alfa'nın katsayısı, ortalama açıklanan varyans (AVE) değeri, rho\_A katsayısı, bileşik güvenirlik (CR) katsayısı, R<sup>2</sup> değeri, T- istatistiği ve varyans büyüme faktörü (VIF) değerleridir [33, 34].

Faktör yüklerin karesi alındığında gösterge güvenilirliği değerleri elde edilmektedir. Faktör yüklerinin en az 0.700 olması, gösterge güvenilirliğinin ise minimum 0.400 olması tercih edilmektedir [31, 34]. İlk analiz sonucunda PS1 ve TDS2 değişkenlerinin faktör yükü eşik değer 0.700'un altında sırasıyla 0.537 ve 0.673 olarak bulunduğundan veri setinden çıkarılmış ve analiz tekrarlanmıştır. Tekrar analiz sonucunda tüm kriterler sağlanmıştır. İstisna olarak PS4'ün faktör yükü eşik değer sınırında (0.699) kalmıştır. KEKK-YEM algoritması ikinci kez çalıştırılınca faktör yükleri 0.699 ile 0.918 arasında olduğundan gösterge güvenilirlikleri ise 0.489 ile 0.843 arasında bulunmuştur (Tablo 2). Dolayısıyla modeli oluşturan dört boyutun bireysel gösterge güvenilirlik değerlerine sahip olduğu bulgusuna ulaşılmıştır.

İçsel tutarlılığı veren Cronbach's Alfa'nın 0.700, veri tutarlılığını görebilmek için hesaplanan rho\_A katsayısının 0.700, model güvenilirliğini veren CR değerlerinin 0.700 ve uyum geçerliliğini veren AVE'nin 0.500 eşik değerlerinin üzerinde olması önerilmektedir [31]. KEKK-YEM algoritması çalıştırılınca Cronbach's Alfa katsayıları 0.696 ile 0.800, rho\_A katsayıları 0.700 ile 0.801, CR değerleri 0.813 ile 0.895 ve AVE değerleri 0.521 ile 0.809 arasında yani önerilen eşik değerlerin üzerinde bulunmuştur (Tablo 2). Dolayısıyla modelin tatminkâr içsel tutarlığa, tatminkâr veri tutarlılığına, tatminkâr model güvenilirliğine ve tatminkâr uyum geçerliliğine sahip olduğu söylenebilir.

R<sup>2</sup> değeri her bir içsel yapı tarafından açıklanan değişkenliği ölçmekte olduğundan modelin açıklama gücünün bir ölçüsüdür [47]. R<sup>2</sup> değerleri içsel gizil değişkenlerin dışsal değişkenler tarafından açıklanma gücünü göstermektedir. R<sup>2</sup> değeri 0 ile 1 arasında değişmekte olup yüksek değerler daha fazla açıklama gücü olduğunu göstermektedir [48]. R<sup>2</sup> değeri 0.75 ise önemli, 0.50 ise orta ve 0.25 ise zayıf derecede açıklama gücü olarak değerlendirilmektedir [49]. Diğer taraftan, 0.10 gibi düşük bir R<sup>2</sup> değeri dahi tatmin edici kabul edilebilmektedir. Çünkü, R<sup>2</sup> değeri öngörücü yapıların sayısına bağlı olarak düşük veya yüksek olabilmektedir. Öngörücü yapıların sayısı ne kadar fazlaysa, R<sup>2</sup> değeri de o kadar yüksek çıkmaktadır (Hair vd., 2019). Analiz sonucunda R<sup>2</sup> değeri 0.468 olarak bulunan TEE içsel değişkeni, TDE dışsal değişkeni tarafından %46.8 (orta), R<sup>2</sup> değeri 0.102 olarak bulunan PS içsel değişkeni, TDE dışsal değişkeni tarafından %10.2 (zayıf) ve R<sup>2</sup> değeri 0.452 olarak bulunan TDS içsel değişkeni, TEE ve PS dışsal değişkenleri tarafından %45.2 (orta) derecede açıklama gücüne sahiptir (Bakınız Tablo 2). PS içsel değişkeninin sadece bir öngörücü yapısı (TDE) olduğundan R<sup>2</sup> değeri (0.102) tatminkâr olarak değerlendirilmiştir.

Çoklu Doğrusal Bağlantı Probleminin tespit edilebilmesi bağımsız değişkenlere ait varyans büyütme faktörleri (VIF) değerlerine bakılmaktadır. Çoklu doğrusallık problemi olmaması için gözlenen değişkenlere ait VIF değerlerinin 10'u aşmaması gerekmektedir [1]. Ancak zayıf modellerde; 2.500'ün üzerindeki değerler de endişe kaynağı olabilmektedir [28]. Test bulguları gözlenen değişkenlere ait VIF değerlerinin 1.313 ile 2.328 arasında değiştiğini göstermiştir (Tablo 2). Dolayısıyla bağımsız değişkenler arasında çoklu doğrusal bağlantı sorunu tespit edilmemiştir.

Tüm değişkenlerin istatistiksel olarak anlamlılığı t testi sonucunda değerlendirilebilmektedir. Modeli oluşturan değişkenlerin T istatistik değerlerinin 1.96'dan büyük olması durumunda bu değişkenlerin istatistiksel olarak model için anlamlı olduğu sonucuna varılmaktadır [34]. Tablo 2'de görüleceği üzere T istatistik değerleri eşik değerin çok üzerinde 11.934 ile 52.283 arasında sıralanmaktadır. Dolayısıyla modeli oluşturan değişkenlerin tümünün istatistiksel olarak anlamlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

**Tablo 2.** Model faktör analizi bulguları.

Boyut	Değişken	Faktör Yükleri > 0.70	Faktör Güvenirliği > 0.40	Cronbach's alpha > 0.50	rho_A > 0.70	CR > 0.70	AVE > 0.50	R <sup>2</sup> > 0.26	T Değeri > 1.96	VIF < 2.50
PS	PS2	0.723	0.523	0.696	0.700	0.813	0.521	0.102	12.894	1.313
	PS3	0.761	0.580						15.377	1.356
	PS4	0.699	0.488						11.934	1.414
	PS5	0.702	0.492						11.958	1.362
TDE	TDE1	0.851	0.724	0.800	0.801	0.882	0.714	30.172	1.744	
	TDE2	0.846	0.715					20.177	1.782	
	TDE3	0.839	0.703					20.334	1.632	
TDS	TDS1	0.746	0.556	0.759	0.761	0.846	0.579	14.522	1.445	
	TDS3	0.737	0.543					12.239	1.468	
	TDS4	0.765	0.585					13.500	2.271	
	TDS5	0.796	0.633					18.328	2.328	
TEE	TEE1	0.881	0.776	0.766	0.783	0.895	0.809	29.729	1.628	
	TEE2	0.918	0.843					52.283	1.628	

**Not:** TDE Tedarik Esnekliği, TEE Teslimat Esnekliği, PS Planlama Süreci, TDS Tedarik Süreci. Değişken kodları için Bakınız EK1.

Yapılar arasındaki ayrışma geçerliliği için Fornell ve Larcker kriteri ve Heterotrait-monotrait (HTMT) oranı testleri gerçekleştirilmiştir. Fornell ve Larcker'a [16] göre yeterli ayrışma geçerliliği olması için her bir boyutun AVE kareköklerinin diğer boyutların arasındaki korelasyondan büyük olması gerekmektedir. İkili gizil yapılar

arasındaki HTMT oranının 0.900 eşik değerinin altında ise ayrışma geçerliliği tesis edilmiş sayılmaktadır [21]. Analiz bulguları ikili gizil yapılar arasındaki HTMT oranlarının 0.252 ile 0.731 değiştiğini göstermektedir (Tablo 3). Bu itibarla konuya daha ihtiyatlı yaklaşan Sarstedt vd. [31] tavsiye ettiği ikili gizil yapılar arasındaki HTMT oranları 0.850'nin altında bulunarak ayrışma geçerliliği tatminkâr bulunmuştur.

**Tablo 3.** Boyutlar arası korelasyonlar ve ayrışma geçerlilikleri bulguları.

Boyut	Korelasyonlar			Fornell-Larcker Kriteri			HTMT Oranları		
	PS	TDE	TDS	PS	TDE	TEE	PS	TDE	TEE
PS	1.000			0.722					
TDE	0.319	1.000		0.319	0.845		0.423		
TDS	0.640	0.398	1.000	0.640	0.398	0.761	0.855	0.504	
TEE	0.285	0.684	0.381	1.000	0.285	0.684	0.381	0.900	0.383

**Not:** TDE Tedarik Esnekliği, TEE Teslimat Esnekliği, PS Planlama Süreci, TDS Tedarik Süreci.

### 4.3. Yapısal Modelin Değerlendirilmesi

Yapısal Modelin testi için ana kriterler; SRMR ve GoF uyum iyiliği indeksleri ve hipotez testleridir. Modelin uyum iyiliği SRMR, NFI ve GoF endekslerine bakılarak değerlendirilmiştir. SRMR değeri ilk defa Henseler vd. [20] tarafından Smart PLS programında uyum iyiliğinin bir ölçütü olarak tanıtılmıştır. Modelin iyi bir uyum iyiliğine sahip olabilmesi için SRMR değerinin 0,100'un altında olması önerilmektedir [32]. Yapısal modelin uyum iyiliği ölçütlerinden biri olan GoF indeksi ilk defa Tenenhaus vd. [39] tarafından tanıtılmıştır. Modelin iyi bir uyum iyiliğine sahip olabilmesi için GoF değerinin 0.36'dan büyük olması önerilmektedir [42]. Analiz sonucunda SRMR değeri 0,095 ve NFI ise 0.633 olarak hesaplanmıştır (Tablo 4). Boyutların R<sup>2</sup> ortalaması 0.341 ve AVE ortalaması ise 0.656 olarak hesaplanmış olup buradan GoF indeksi 0.473 olarak bulunmuştur (Tablo 4). SRMR ve GoF endekslerine göre modelin iyi uyum iyiliğine sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

**Tablo 4.** Uyum indeksleri bulguları.

Kriter	Doymuş Model	Tahmin Edilmiş Model	Sonuç	
SRMR	< 1.000	0.095	0.097	İyi Uyumlu
NFI	> 0.900	0.633	0.634	Olumsuz
R <sup>2</sup> ortalaması	(0.102 + 0.452 + 0.468 / 3) = 0.341			
AVE ortalaması	(0.521 + 0.714 + 0.579 + 0.809) / 4 = 0.656			İyi Uyumlu
GoF	> 0.360	$\sqrt{0.386 \times 0.777} = 0.473$		

**Tablo 5.** Hipotez testi bulguları

	Yol Katsayısı (β)	Standard Sapma	T İstatistiği	P değeri	Hipotez %95 güven seviyesinde anlamlı mı?
<i>Doğrudan etkiler</i>					
H <sub>1</sub> : TDE → TEE	0.684	0.045	15.044	<0.001	Evet
H <sub>2</sub> : TDE → PS	0.319	0.083	3.844	<0.001	Evet
H <sub>3</sub> : TEE → TDS	0.216	0.072	2.998	0.003	Evet
H <sub>4</sub> : PS → TDS	0.578	0.075	7.748	<0.001	Evet
<i>Dolaylı etkiler</i>					
H <sub>5</sub> : TDE → TEE → TDS	0.148	0.052	2.847	0.004	Evet
H <sub>6</sub> : TDE → PS → TDS	0.185	0.054	3.396	0.001	Evet

**Not:** TDE Tedarik Esnekliği, TEE Teslimat Esnekliği, PS Planlama Süreci, TDS Tedarik Süreci

Araştırma hipotezleri bir önyükleme (bootstrapping) prosedürü çalıştırılmak suretiyle test edilmiştir. Hipotez testinde yapıların yol katsayısı β, T İstatistiği ve p değerlerine bakılarak karar verilmektedir. Hipotezleri oluşturan yapılar arasındaki β değerine ait hem T İstatistiği değerinin %95 güven seviyesinde 1.960 değerinden büyük hem de p değerinin 0.050 değerinden küçük olması hipotezin desteklendiğini göstermektedir [34]. Doğrudan ilişkileri test etmeleri için 5000 alt örneklemlerle bir önyükleme (bootstrapping) prosedürü çalıştırılınca yapısal modeldeki tüm doğrudan ilişkilere ilişkin hipotezler desteklenmiştir (Şekil 2 ve Tablo 5). Daha açık olarak;

TDE → TEE arasındaki yol katsayısına (β=0.684) ait t-istatistiği değeri 15.044 ve p<0.001 bulunmuş ve Hipotez1 %95 güven seviyesinde anlamlı bulunmuştur.

TDE → PS arasındaki yol katsayısına (β=0.319) ait t-istatistiği değeri 3.844 ve p<0.001 bulunmuş ve Hipotez2 %95 güven seviyesinde anlamlı bulunmuştur.

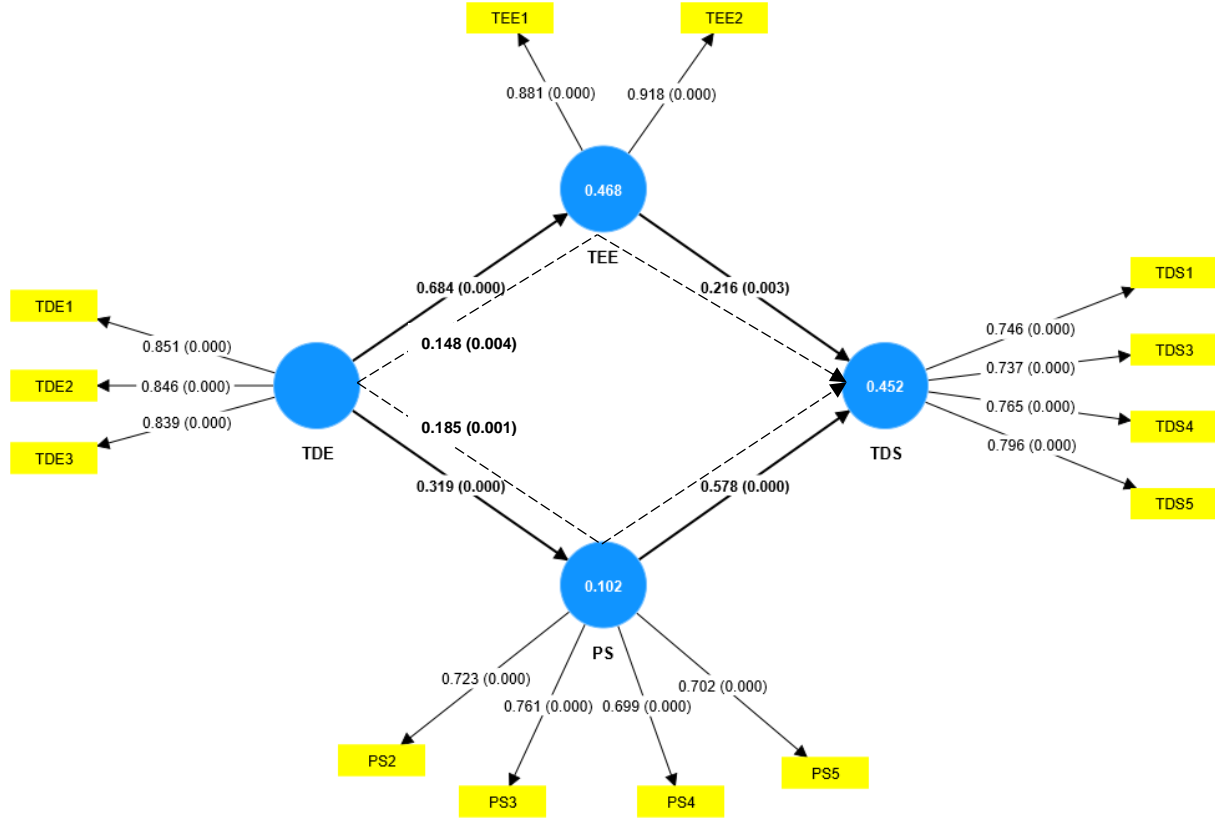
TEE → TDS arasındaki yol katsayısına (β=0.216) ait t-istatistiği değeri 2.998 ve p=0.003 bulunmuş ve Hipotez3 %95 güven seviyesinde anlamlı bulunmuştur.

PS → TDS arasındaki yol katsayısına (β=0.578) ait T istatistiği değeri 7.748 ve p<0.003 bulunmuş ve Hipotez4 %95 güven seviyesinde anlamlı bulunmuştur.

Tedarik esnekliği ile tedarik süreci arasındaki dolaylı ilişkide hem teslimat esnekliğinin hem de planlama sürecinin aracılık ilişkisi de test edilmiştir. Test sonucunda hem teslimat esnekliğinin hem de planlama sürecinin tedarik esnekliği ile tedarik süreci arasındaki ilişkiye aracılık ettiği sonucuna varılmıştır (Tablo 5). Daha açık olarak; TDE → TEE → TDS yolunda yol katsayısı  $\beta=0.148$  değerine ait T istatistiği değeri 2.847 ve  $p=0.004$  bulunmuş ve Hipotez5 %95 güven seviyesinde anlamlı bulunmuştur (Tablo 5).

TDE → PS → TDS yolunda yol katsayısı  $\beta=0.185$  değerine ait T istatistiği değeri 3.396 ve  $p=0.001$  bulunmuş ve Hipotez6 %95 güven seviyesinde anlamlı bulunmuştur (Tablo 5).

Araştırmanın KEKK-YEM modeli ve bu modele ait bulgular Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Araştırmanın KEKK-YEM modeli bulguları.

**Not:** Sürekli çizgiler doğrudan etki, kesikli çizgiler dolaylı etki, TDE Tedarik Esnekliği, TEE Teslimat Esnekliği, PS Planlama Süreci, TDS Tedarik Süreci.

## 5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Tedarik zinciri yönetimi alanında öne çıkan bu çalışmada, tedarik esnekliği, teslimat esnekliği, planlama süreci ve tedarik süreci arasındaki ilişkileri kapsamlı bir şekilde ele alınarak incelenmiş ve yapısal eşitlik modeli ile analiz edilmiştir. Bu model, tedarik zinciri süreçlerinin birbirleriyle olan nedensellik ilişkilerini anlamamıza yardımcı olurken, literatüre değerli bir katkı sunmaktadır. Özellikle tedarik esnekliği ile teslimat esnekliği arasındaki ilişkinin vurgulanması, bu alandaki eksikliği giderme amacını taşırken, tedarik zinciri paydaşlarının etkileşimleri ile şekillenen bu ilişkinin anlaşılması katkı sağlayacaktır. Bu çalışma, işletmelerin tedarik zinciri yönetimini optimize etmelerine ve rekabet avantajı elde etmelerine yönelik stratejiler sunarak, işletmelerin sürdürülebilirliklerini ve rekabetçi üstünlüklerini sağlama potansiyelini artırabilir. Literatürdeki tedarik esnekliği ve teslimat esnekliği ilişkisine yönelik sınırlı sayıda çalışma göz önüne alındığında, çalışmanın bu boşluğu doldurduğunu katkı vereceği söylenebilir. Ayrıca, tedarik süreci üzerinde tedarik esnekliği, teslimat esnekliği ve planlama sürecinin etkilerini derinlemesine analiz edilmesi, işletmelerin bu alanlardaki stratejilerini daha etkili bir şekilde yönlendirmelerine yardımcı olabilir. Bu sebeplerle, böyle bir çalışma, tedarik zinciri yönetimi alanında bilgi eksikliğini gidermeye, işletmelerin performansını artırmaya ve geleceğe yönelik stratejilerini şekillendirmeye yönelik önemli bir adım olarak değerlendirilebilir.

Bu çalışmada, tedarik esnekliği, teslimat esnekliği, planlama süreci ve tedarik süreci arasındaki ilişkileri incelemek için analizler ve istatistiksel değerlendirmeler yapılmıştır. Bulgular, bu dört boyut arasında nedensellik ilişkilerinin hem doğrudan hem de dolaylı olarak anlamlı olduğu görülmüştür. Şöyle ki;

İlk olarak, tedarik esnekliği ile teslimat esnekliği arasındaki doğrudan ilişkiyi araştırılmak için yapılan analizde, %95 güven seviyesinde anlamlı bir ilişki olduğu görülmüştür. Yüksek tedarik esnekliğine sahip olan işletmelerin, aynı zamanda teslimat süreçlerinde de esneklik gösterebileceği ve müşteri taleplerine daha hızlı yanıt verebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bu bulgu Lee [24] çalışması ile uyumludur.



İkinci olarak, tedarik esnekliği ile planlama süreci arasındaki doğrudan ilişkiyi belirlemek amacıyla yapılan analizler de %95 güven seviyesinde anlamlı bir ilişki olduğu görülmüştür. Yüksek tedarik esnekliğine sahip olan işletmelerin, aynı zamanda planlama sürecini de etkin bir şekilde yönetebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bu nedenle, tedarik esnekliği ile planlama süreci arasındaki ilişkinin anlaşılması, işletmelerin tedarik zinciri yönetimi stratejilerini geliştirmede önemli bir adım olacaktır.

Üçüncü olarak, teslimat esnekliği ile tedarik süreci arasındaki doğrudan ilişkinin varlığı için yapılan analizlerde, %95 güven seviyesinde anlamlı bir ilişki olduğu anlaşılmıştır. Bu bulgu teslimat esnekliğinin tedarik süreçlerinin performansının iyileşmesine yol açacağını bildiren Ellram vd. [12] ile tutarlıdır.

Dördüncü olarak, planlama süreci ile tedarik süreci arasındaki doğrudan ilişkiye yönelik yapılan analizlerde, %95 güven seviyesinde anlamlı bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgu iyi yönetilen planlama sürecinin tedarik süreçleri üzerinde olumlu etkisi olduğunu bildiren yazarların [5, 29, 36, 45, 46] söylemlerini ampirik olarak desteklemektedir.

Dolaylı etki analizi sonuçları da dikkate alındığında, teslimat esnekliği ve planlama sürecinin, tedarik esnekliği ile tedarik süreci arasındaki ilişkiye aracılık ettiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, literatürdeki benzer çalışmalarda bulunan bulguları desteklemektedir. Bu bağlamda Flynn vd. [15] tedarik zinciri yönetiminde dolaylı etkilerin de önemli olduğunu vurgulamaktadır.

Bu çalışma, tedarik zinciri yönetimi ve lojistik stratejilerin geliştirilmesinde önemli iç görüler sunmuştur. Tedarik esnekliği, teslimat esnekliği, planlama süreci ve tedarik süreci arasındaki karmaşık ilişkilerin analizi, işletmelerin operasyonel performanslarını artırmak ve rekabet avantajını sürdürmek için önemli bilgiler sağlamaktadır. Gelecekteki çalışmalarda, daha farklı sektörlerde ve ölçeklerdeki işletmelerde benzer analizlerin yapılması ve sonuçların karşılaştırılması yoluyla daha kapsamlı bir anlayış elde edilebilir. Araştırmanın ISO1000 kuruluşları dikkate alınarak yapıldığı düşünülürse özellikle KOBİ tarzı firmalar üzerinde benzer analizlerin yapılması ve büyük ölçekli firmalarla karşılaştırılması önerilebilir. COVID19 salgını nedeniyle gündemimize gelen bazı sektörlerde küresel tedarik zincirinin kırılması göz önüne alındığında olağanüstü kriz durumları ve risk yönetimi bağlamında küresel tedarik zincirleri ve tedarikçi ilişkilerinin analiz edilmesi konusunda çalışmalar yapılması da ilginç bir konu olabilir.

Bu araştırmadan elde edilen veriler ışığında çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- İşletmeler tedarik sürecinde esneklik sağlayacak stratejiler geliştirmelidir.
- İşletmeler teslimat süreçlerinde esnekliği artırarak müşteri taleplerine hızlı yanıt vermeli ve kesintileri minimize etmelidir.
- İşletmeler teslimat esnekliği ve tedarik esnekliği için etkin bir planlama süreci yürütmeli ve talep tahminlerini, stok yönetimini ve üretim planlamasını iyileştirmek için uygun planlama yöntemlerini benimsemelidir.
- Tedarik zinciri içindeki tüm aktörler arasındaki iletişim ve iş birliği güçlendirilmelidir.

Son olarak tedarik esnekliğini artırarak firma performansını iyileştirmek isteyen işletmelere önerilerimiz şunlardır;

- Tedarik süreçlerinde esnekliği sağlamak için yapay zeka, büyük veri analitiği ve otomasyon gibi son teknolojileri tedarik zinciri süreçlerine entegre etmeleri,
- Kriz durumlarına karşı dirençli olabilmek için etkili risk yönetimi stratejileri geliştirmeleri işletmelere önemli avantajlar sağlayacaktır.

Bu çalışmanın iki temel kısıtı bulunmaktadır. Birincisi araştırmanın kapsamını büyük ölçekli firmaların yer aldığı ISO 1000 firmaları oluşturmaktadır. İkincisi çok sayıda sektörde faaliyet gösteren firmalardan verini toplanmış olmasıdır. Dolayısıyla veriler firma büyüklüğü ve farklı sektörler arasındaki farkları göz önünde bulundurmadan geniş bir perspektifle toplanmıştır. Muhakkak ki firmaların büyüklüğüne ve faaliyet gösterdikleri sektör ayrımına göre veriler toplanmış olsaydı çok farklı sonuçlara ulaşmak mümkün olabilirdi. Kısaca bu iki kısıt örneklem seçimi ve sektör odaklı veri toplama zorluklarından kaynaklanmaktadır.

## Yazar Katkıları

Yazarlar makale çalışmasına eşit katkı vermiştir.

## Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler

## KAYNAKÇA

- [1] A.S. Albayrak "Çoklu doğrusal bağlantı halinde enküçük kareler tekniğinin alternatifi yanlı tahmin teknikleri ve bir uygulama", Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi, vol.1, no.1, pp. 105-126, 2005.
- [2] Ş. Büyüköztürk, E. Kılıç Çakmak, Ö.E. Akgün "Karadeniz, and F. Demirel, Örneklem Yöntemleri", Erişim adresi: w3.balikesir.edu.tr, 2012.
- [3] B.M. Beamon "Measuring supply chain performance", International Journal of Operations and Production Management, vol.19, no.3, pp. 275-292, 1999.
- [4] S. Chirra, and D. Kumar "Analysis of SCF under sales promotional schemes: an application of interpretive structural modelling approach",

- International Journal of Production Research, vol. 56, no.18, pp. 6015-6033, 2018.
- [5] T.Y. Choi and D.R. Krause “The supply base and its complexity: Implications for transaction costs, risks, responsiveness, and innovation”, *Journal of Operations Management*, vol. 24, no. 5, pp. 637-652, 2006.
- [6] S.Chopra, and P.Meindl “Tedarik Zinciri Yönetimi: Strateji, Planlama ve Uygulama”, (6. Baskı). Nobel Yayıncılık, 2021.
- [7] M. Christopher “Logistics and Supply Chain Management”, Pearson Education Limited. 2016.
- [8] M.C. Cooper, D.M. Lambert, and J.D. Pagh “Supply chain management: More than a new name for logistics”, *The International Journal of Logistics Management*, vol. 8, no.1, pp.1-14. 1997.
- [9] A. Çalışkan, M. Karacasulu, and Y. Öztürkoğlu “Hızlı moda markalarında çevik ve esnek tedarik zinciri yönetimi”, *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, vol. 14, no. 4, pp. 49-74, 2016.
- [10] E. Çiçek, and M. Bay “Stratejik küresel tedarik zinciri yönetimi ve lojistik”, *Sosyal Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, vol. 7, no. 13, pp. 91-117, 2007.
- [11] L.M. Ellram and M.C. Cooper “Supply chain management, partnerships and the shipper-third party relationship”, *International Journal of Logistics Management*, vol. 1, no.2, pp. 1-10, 1990.
- [12] L.M. Ellram, W.L. Tate, and K. J. Petersen “Offshore outsourcing of professional services: A transaction cost economics perspective”, *Journal of Operations Management*, vol. 31, no. 3, pp. 167-182, 2013.
- [13] A. Fantazy, V. Kumar, and U. Kumar “An empirical study of the relationships among strategy, flexibility, and performance in the supply chain context”, *Supply Chain Management: An International Journal*, vol. 14, no. 3, pp.177-188, 2009.
- [14] S.E. Fawcett, and G.M. Magnan “The rhetoric and reality of supply chain integration”, *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, vol. 32, no. 5, pp. 339-361, 2002.
- [15] B.B. Flynn, B. Huo, and X. Zhao “The impact of supply chain integration on performance: A contingency and configuration approach”, *Journal of Operations Management*, vol. 28, no. 1, pp. 58-71, 2010.
- [16] C. Fornel, and D.F. Larker “Evaluating structural equation models with unobservable variables and measurement error”, *Journal of Marketing Research*, vol. 18, no. 1, pp. 39-50, 1981.
- [17] Y. Gedik “Sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi ve sürdürülebilirliğin tedarik zincirleri üzerindeki etkileri: Kavramsal bir değerlendirme”, *International Journal of Management Economics and Business*, vol. 17, no.3, pp. 830-860, 2021.
- [18] D. Gerwin “Manufacturing flexibility: a strategic perspective”, *Management Science*, vol. 39, no. 4, pp. 395-410, 1993.
- [19] J.F. Hair, G.T.M. Hult, C. Ringle, et al. “A Primer on Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM)”, Thousand Oaks, CA: Sage, 2014.
- [20] J. Henseler, T.K. Dijkstra, M. Sarsted, C.M. Ringle A. Diamantopoulos, et al. “Common beliefs and reality about partial least squares: Comments on rönkkö ve evermann”, *Organizational Research Methods*, vol.17, no.2, pp. 182-209, 2014.
- [21] J. Henseler, C.M. Ringle, and R. Sinkovics “The use of partial least squares path modeling in international marketing”, *Advances in International Marketing*, no. 20, pp. 277–319, 2009.
- [22] M.H. Hugos “Essentials of Supply Chain Management”, John Wiley and Sons, 2018.
- [23] D.M. Lambert, and M.C. Cooper “Issues in supply chain management”, *Industrial Marketing Management*, vol. 29, no. 1, pp. 65-83, 2000.
- [24] H.L. Lee “The Triple-A Supply Chain”, *Harvard Business Review*, 2004.
- [25] S. Li, B. Ragu-Nathan, T.S. Ragu-Nathan, and S.S. Rao “The impact of supply chain management practices on competitive advantage and organizational performance”, *Omega*, vol. 34, no. 2, pp. 107-124, 2006.
- [26] J. Mangan, C. Lalwani, and T. Butcher “Global Logistics and Supply Chain Management”, John Wiley and Sons, 2016.
- [27] J.T. Mentzer, D.J. Flint, and G.T.M. Hult “Logistics service quality as a segment-customized process”, *Journal of Marketing*, vol. 65, no. 4, pp. 82-104, 2001.
- [28] H. Midi, S.K. Sarkar, and S. Rana “Collinearity diagnostics of binary logistic regression model”, *Journal Of Interdisciplinary Mathematics*, vol. 13, no. 3, pp. 253-267, 2010.
- [29] A.İ. Özdemir “Tedarik zinciri yönetiminin gelişimi, süreçleri ve yararları”, *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, no. 23, pp. 87-96, 2004.
- [30] C.M. Ringle, S. Wende, and J.-M. Becker “SmartPLS 4. Oststeinbek: SmartPLS GmbH”, <http://www.smartpls.com>, 2022.
- [31] M. Sarstedt, C.M. Ringle, and J.F. Hair “Partial Least Squares Structural Equation Modeling”, In C. Homburg and M. Klarmann (Edt.), *Handbook of Market Research*, (pp. 1–47). Springer, 2021.
- [32] K. Schermelleh-Engel, H. Moosbrugger, and H. Müller “Evaluating the fit of structural equation models: Tests of significance and descriptive goodness-of-fit measures”, *Methods of Psychological Research Online*, vol.8, no. 2. pp. 23-74, 2003.
- [33] N.A.M.R. Senaviratna, and T.M.J.A. Cooray “Diagnosing multicollinearity of logistic regression model”, *Asian Journal of Probability and Statistics*, vol. 5, no. 2, pp. 1-9, 2019.
- [34] F. Sönmez Çakır “Kısmi En Küçük Kareler Yapısal Eşitlik Modellemesi (PLS-SEM)”, Ankara: Gazi Kitabevi, 2020.

- [35] M. Stevenson, and M. Spring “Flexibility from a supply chain perspective: definition and review”, International Journal of Operations and Production Management, vol. 27, no. 7, pp. 685-713, 2007.
- [36] H. Şahin “Tedarik zincirinde bilgi paylaşımının işletme performansına etkileri (Basılmamış Doktora Tezi)”, Sakarya Üniversitesi, 2018.
- [37] C.S. Tang “Perspectives in supply chain risk management”, International Journal of Production Economics, vol. 103, no. 2, pp. 451-488, 2006.
- [38] M. Topoyan “İşletmeler arası bilgi sistemleri kullanmanın tedarik zinciri esnekliği üzerine etkisi (Basılmamış Doktora Tezi)”, Dokuz Eylül Üniversitesi, 2009.
- [39] M., Tenenhaus, V.E. Vinzi, Y.M. Chatelin, and C. Lauro “PLS path modeling”, Computational Statistics & Data Analysis, vol. 48, no. 1, pp. 159-205, 2005.
- [40] A. Üstündağ, and M.C. Ungan “Supplier flexibility and performance: an empirical research”, Business Process Management Journal, vol. 26, no. 7, pp. 1851-1870, 2020.
- [41] S.K. Vickery, J. Jayaram, C. Droge, and R. Calantone “The effects of an integrative supply chain strategy on customer service and financial performance: an analysis of direct versus indirect relationships”, Journal of Operations Management, vol. 21, no. 5, pp. 523-539, 2003.
- [42] M. Wetzels, G. Odekerken-Schröder, and C. van Oppen “Using PLS path modeling for assessing hierarchical construct models: Guidelines and empirical illustration”, MIS Quarterly, vol. 33, no. 1, pp. 177-195, 2009.
- [43] S.H. Youn, M.G. Yang, J.H. Kim, and P. Hong “Supply chain information capabilities and performance outcomes: An empirical study of Korean steel suppliers”, International Journal of Information Management, vol. 34, no. 3, pp. 369-380, 2014.
- [44] H. Zhou “The role of supply chain processes and information sharing in supply chain management (Basılmamış Doktora Tezi)”, The Ohio State University, 2003.
- [45] C. Prahinski, and W.C. Benton “Supplier evaluations: communication strategies to improve supplier performance”, Journal of operations management, vol. 22, no. 1, pp. 39-62, 2004.
- [46] K.A. Saeed “Information technology antecedents to supply chain integration and firm performance”, Unpublished Dissertation”, University of South Carolina, 2004.
- [47] G. Shmueli, and O.R. Koppius “Predictive analytics in information systems research”, MIS quarterly, pp.553-572, 2011.
- [48] J.F. Hair, J.J. Risher, M.Sarstedt, and C.M. Ringle, “When to use and how to report the results of PLS-SEM”, European Business Review, vol. 31, pp.2-24, 2019.
- [49] M. Sarstedt, C.M. Ringle, and J.F. Hair “Partial least squares structural equation modeling”, In Handbook of market research, pp. 587-632, 2021.

#### EK1. Araştırmanın boyut ve değişkenleri (Zhou, 2003).

Kodu	Açıklama
PS	PLANLAMA SÜRECİ
PS1	Tahminleri geliştirmede geçmiş verilerin kullanımı.
PS2	Üretim ve tedarik planları talep bilgisindeki anlık değişimler yeniden yapılandırır.
PS3	Talep yönetimi süreci, müşteri bilgileri ile çalıştırılır.
PS4	Tedarik zinciri talep gereksinimleri görünürlüğü onlinedir.
PS5	Bir tedarik zinciri planlama ekibi oluşturulmuştur.
PS6	Hem pazarlama hem de üretim fonksiyonları tedarik zinciri planlama sürecine katılır.
TDE	TEDARİK ESNEKLİĞİ
TDE1	Satın alınan ürünlerin çoğu için çok sayıda tedarik kaynağına sahibiz.
TDE2	Varolan tedarik kaynağını kısa bir sürede bir başkasıyla değiştirme yeteneğine sahibiz.
TDE3	Büyük tedarikçilerimiz istediğimiz değişiklikleri karşılayabilir
TDS	TEDARİK SÜRECİ
TDS1	Stratejik tedarikçileri ile uzun süreli ilişkiler geliştirilmiştir.
TDS2	Ürün geliştirme konusunda tedarikçilerin katılımı vardır.
TDS3	Tedarikçilerden tam zamanında teslimat sağlanır.
TDS4	Tedarikçilerin performansının ölçüm sıklığı nedir?
TDS5	Tedarikçilere performans geribildirim sıklığı nedir?
TEE	TESLİMAT ESNEKLİĞİ
TEE1	Olaya özgü müşteri gereksinimleri değişiminde çeşitli teslimat hacimlerini karşılayabilecek yeteneğe sahibiz.
TEE2	Özel müşterilerimizin taleplerinin teslimatını kapsamlı bir şekilde yerine getirebiliriz.



## ADHD ve Sağlıklı Bireylerin Tanısında Boyut Azaltan Zamansal Karakteristik Özellik Çıkarma Yaklaşımı ve 1D-CNN

### Low Dimensionality Temporal Characteristic Feature Extraction Approach and 1D-CNN for Diagnosing ADHD and Healthy Individuals

<sup>1</sup>Kutlucan GÖRÜR 

<sup>1</sup>Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, 10200 Bandırma, Balıkesir, Türkiye

[kgorur@bandirma.edu.tr](mailto:kgorur@bandirma.edu.tr)

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 2 August 2023

Accepted : 21 September 2023

##### Keywords:

ADHD, t-SNE Feature Extraction, Deep Learning, Diagnostic

#### ABSTRACT

Electroencephalography (EEG) signals can be reliably used to obtain critical information about ADHD/Attention Deficit Hyperactivity Disorder, a childhood neurodevelopmental disorder. Early detection of ADHD is important to reduce the development of this disorder and reduce its long-term impact. This study aims to achieve an approach with high prediction success that distinguishes between ADHD and healthy individuals with 1D-CNN (Convolutional Neural Network) after extracting time domain features with t-SNE (t-distributed Stochastic Neighbor Embedding). This study aims to define a high-performance temporal characteristic approach (1D-CNN and t-SNE) involving 61 ADHD patients and 60 healthy control individuals. These features are then used in 1D-CNN models to classify ADHD patients and healthy individuals. 1D-CNN deep model-2 (ACC: 81.82% and AUC: 0.834) showed more successful outcomes than 1D-CNN deep model-1 (ACC: 73.51% and AUC: 0.820). The study presents a novel supportive diagnostic approach using EEGs and 1D-CNN with a low-dimensional temporal characteristic feature extraction approach (t-SNE).

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 2 Ağustos 2023

Kabul : 21 Eylül 2023

##### Anahtar Kelimeler:

ADHD, t-SNE Özellik Çıkarma, Derin Öğrenme, Hastalık Teşhisi

#### ÖZET

Elektroensefalografi (EEG) sinyalleri, çocukluk çağı nörogelişimsel bir bozukluk olan ADHD/Dikkat Eksikliği Hiperaktivite Bozukluğu hakkında kritik bilgilerin elde edilmesi için güvenilir bir şekilde kullanılabilir. ADHD'nin erken tespiti, bu bozukluğun gelişimini azaltmak ve uzun vadeli etkisini azaltmak için önemlidir. Bu çalışma, t-SNE (t-dağılımlı Stokastik Komşu Gömme) ile zaman alanı özelliklerini çıkardıktan sonra 1D-CNN (Evrışimli Sinir Ağı) ile ADHD ve sağlıklı bireyleri birbirinden ayıran yüksek tahmin başarısına sahip bir yaklaşıma ulaşmayı amaçlamaktadır. Bu çalışma, 61 ADHD hastasını ve 60 sağlıklı kontrol bireyini içeren yüksek başarımlı bir zamansal karakteristik yaklaşım (1D-CNN ve t-SNE) tanımlamayı amaçlamaktadır. Bu özellikler daha sonra ADHD hastalarını ve sağlıklı bireyleri sınıflandırmak için 1D-CNN modellerinde kullanılır. 1D-CNN derin model-2 (ACC: 81.82% ve AUC: 0.834), 1D-CNN derin model-1'e (ACC: 73.51% ve AUC: 0.820) göre daha başarılı sonuçlar göstermiştir. Çalışma, düşük boyutlu zamansal karakteristik özellik çıkarma yaklaşımı (t-SNE) ile EEG'leri ve 1D-CNN'yi kullanan yeni bir destekleyici teşhis yaklaşımı sunmaktadır.

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

## 1. GİRİŞ

Dikkat eksikliği hiperaktivite bozukluğu (Attention Deficit Hyperactivity Disorder/ADHD), dünya çapında başlıca psikiyatrik ve nörogelişimsel bozukluklardan biridir. Dikkat eksikliği hiperaktivite bozukluğu (ADHD), dünya çapındaki çocukların %5'ini etkileyen, dünya çapındaki başlıca psikiyatrik ve nörogelişimsel bozukluklardan biridir. 4-17 yaş arası ABD'li çocukların yaklaşık %11'i ADHD'den etkilenmektedir [1]–[9]. Diğer bir çalışmada ADHD'nin çocuk ve ergenlerde küresel yaygınlığı yaklaşık %2.2, yetişkinlerde ise %2.8 olarak rapor edilmiştir. ADHD olan çocukların dikkatsizlik, dürtüsellik ve hiperaktivite gibi çeşitli sorunları vardır. ADHD genellikle 6 ila 12 yaşları arasındaki çocuklarda teşhis edilir ve yetişkinliğe kadar, intihar da dahil olmak üzere ciddi etkileri sürmektedir. ADHD'den mustarip çocukların ve daha küçük bireylerin %40'ından fazlası, yetişkin olma sürecine kadar ciddi sorunlara yol açan davranış sorunları geliştirir. ADHD aynı zamanda astım, depresyon, anksiyete ve öğrenme güçlükleri gibi sorunlarla da önemli ölçüde ilişkilidir. Erkeklerin kadınlara göre ADHD'ye sahip olma olasılığı daha yüksektir ve davranışları farklıdır [1], [2].

Günümüzde, ADHD'li çocukların etkili bir şekilde teşhis edilmesi hala önemli bir sorundur. ADHD'li çocukların erken teşhisi için otomatik bir sistem önermek için çeşitli araştırmalar yapılmıştır. ADHD'li çocukların erken tespiti ve sınıflandırılması için otomatik bir sistem önermek için hala bir kapsam vardır. ADHD'nin erken saptanması, hastaların uygun sağlık hizmetlerine ulaşmalarına, etkili tedavi görmelerine ve yaşamlarını sürdürme konusunda daha bilinçli olmalarına yardımcı olacaktır [1]–[9]. ADHD'nin beyin sinyalleri üzerindeki etkisini araştırmak için yaygın olarak kullanılan elektromiyografi (EMG), olayla ilgili potansiyeller (ERP) ve elektroensefalografi (EEG) gibi çeşitli nörogörüntüleme ve nörofizyolojik yöntemler vardır. Bunun dışında fMRI (Functional Magnetic Resonance Imaging) da ADHD'li bireyleri ayırmada kullanılmaktadır. Fonksiyonel manyetik rezonans görüntüleme (fMRI), insan beyni haritalaması üzerine araştırma yapmak için önde gelen yöntemlerden biri haline geldi. fMRI edinimleri, biliş veya görev performansının arkasındaki beyin süreçlerini anlamaya yardımcı olan beyin aktivasyon modellerinin keşfedilmesine olanak tanır. Bu paradigmada, beyindeki içsel işlevsel bağlantı, herhangi bir özel görev gerçekleştirme veya dinlenme esnasında incelenebilir [1]–[9].

Bu çalışmada, daha popüler, düşük maliyetli, non-invaziv ve taşınabilir bir teknik olduğu için ağırlıklı olarak EEG analizine odaklandık. EEG sinyalleri doğrudan insan beyninden alındığından, beynin iç fizyolojik koşullarını göstermede daha doğru ve geçerli bir tekniktir. Çeşitli çalışma türleri, farklı alanlarda farklı türde sonuçlar çıkarmak için EEG sinyallerini kullanmıştır. Örneğin, EEG kullanılarak nöbetin saptanması veya sınıflandırılması, EEG kullanılarak uyku skorlamasının otomatik aşaması, EEG kullanılarak taşınabilir bir kablosuz kapalı döngü nöbet denetleyicisi geliştirme [1]–[3]. Ayrıca, EEG tabanlı analiz, ADHD, Parkinson hastalığı vb. gibi çeşitli nörolojik bozuklukların tespiti için yaygın olarak kullanılmaktadır. EEG verileri, çok değişkenli ve çok kanaldan toplanan bir zaman serisi veri türüdür. Zamana bağlı özelliklerle bağlantılı ve zamana göre düzenlenmiş veri noktalarının bir koleksiyonundan oluşmaktadır. Yerel örüntüler, veri setinin ayırt edici özelliklerini tanımlarken, global örüntüler, veri setinin genel eğilimini gösterir. Günümüzde, EEG sinyallerinden etkili özellik çıkarımı ve özellik seçimi hala büyük bir zorluktur. Bu zorlukların üstesinden gelmek için, istatistiksel özellikler, frekans alanı özellik çıkarma, zaman-frekans alanı özellik çıkarma ve derin öğrenmeye dayalı özellikler çıkarma gibi çeşitli yöntemler mevcuttur [1]–[5]. Günümüzde, ADHD'li çocukların tanısında yaygın olarak kullanılan çeşitli doğrusal ve doğrusal olmayan özellikler vardır. Örneğin, Khaleghi ve ark., ADHD'li çocukları teşhis etmek için EEG sinyallerinden çeşitli morfolojik, zaman alanı, frekans ve doğrusal olmayan özellikleri çıkardı [10]. Altınkaynak ve ark. ayrıca ADHD'li çocukları teşhis etmek için morfolojik, doğrusal olmayan ve dalgacık özelliklerini çıkardı [11].

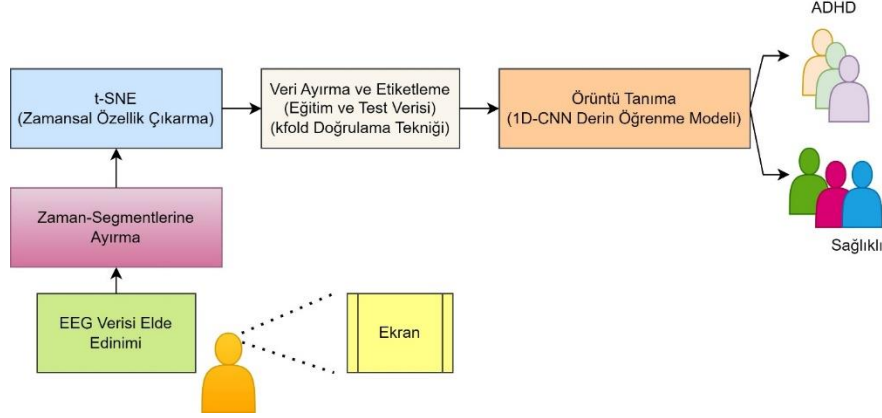
Mevcut çalışmamızda, önceki çalışmalara dayanarak zaman alanı ve doğrusal olmayan özellikleri t-SNE metodu ile gerçekleştirdik. t-dağılımlı stokastik komşu yerleştirme (t-SNE), yüksek boyutlu verileri düşük boyutlu bir temsile indirmek için bir yöntemdir ve çoğunlukla verileri görselleştirmek için kullanılır [12]–[18]. t-SNE, yüksek boyutlu uzaydaki bir veri noktasını 2 boyutlu veya 3 boyutlu öklid uzayındaki bir noktaya eşleyen, doğrusal olmayan bir boyutluluk azaltma tekniğidir. Diğer doğrusal olmayan boyut indirgeme yaklaşımlarından farklı olarak, t-SNE olasılıksal bir yapıya sahiptir. İlgili çalışmamızda t-SNE yöntemi EEG analizi ile beraber bu sinyallerden zaman alanında özellik çıkarılması için kullanılmıştır. Literatürde istatistiksel ve diğer frekans alanı özellik çıkarma yöntemlerinden hangisinin optimal olduğu bilinmemektedir [12]–[18]. Buna göre veriler genellikle önce bir dizi özelliğe dönüştürülür daha sonra 1D-CNN derin öğrenme yöntemleri kullanılarak ADHD ve sağlıklı bireyler arasında sınıflandırma işlemi yapılmıştır. Bununla beraber t-SNE yöntemi bu bireyler arasındaki ayrımı EEG verileri üzerinden grafiksel olarak ayırmanın ne kadar başarılı olduğunu göstermek için kullanılmıştır. Beyin haritalama ve fonksiyonel bağlantı grafikleri de çalışmaya eklenmiştir.

## 2. VERİ TOPLANMASI VE METOTLAR

ADHD'si olan bireylerin ve sağlıklı bireylerin EEG sinyalleri üzerinden tahmin edilmesi için önerilen makine öğrenimine dayalı yaklaşımın genel görünümü, Şekil 1'de gösterilmektedir. Çalışmanın ilk adımında, ADHD'li bireyler ve sağlıklı bireyleri içeren EEG verileri toplanmıştır. İkinci adımda toplanan bu verilerden t-SNE yöntemi ile zaman alanında özellik çıkarılmıştır. En son adımda örüntünün tanınması için ilgili bu özelliği çıkarılmış veriler derin öğrenme modellerine verilmiştir ve bireylerin ADHD/sağlıklı bireyler olup olmadığı sınıflandırılmıştır.

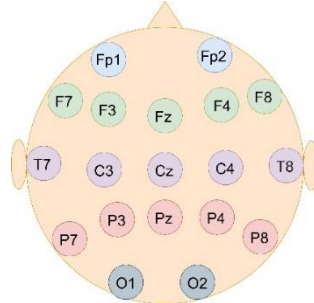
## 2.1. Veri Elde Edinimi

Deney için açık bir veri tabanı olan IEEE veri portundan ADHD ve sağlıklı bireylerden toplanan veri seti kullanılmıştır. Bu veri setinde toplanan EEG sinyalleri için örnekleme frekansı 128 Hz olarak belirtilmiştir. Veri seti içinde EEG sinyalleri, altmış sağlıklı çocuktan (erkek: 50 ve kız: 10) ve altmış bir ADHD'li çocuktan (erkek: 48 ve kız: 13) toplanmıştır. Bu bireylerin yaş ortalaması 7-12 arasındadır [19].



Şekil 1. ADHD ve sağlıklı bireyleri ayırmak için t-SNE ve derin öğrenme tabanlı sistem.

Her çocuk çizgi film karakterlerinin resimlerini izlemiş ve karakterleri sayması istenmiştir. Her resimde 5'ten 16'ya kadar farklı sayılar çizilmiştir ve resimlerin boyutu çocukların kolayca görüp sayılabileceği kadar büyüktür. Veri setinde elde edilen EEG sinyalleri şu kanallardan toplanmıştır; Fp1, Fp2, F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2, F7, F8, T7, T8, P7, P8, Fz, Cz, Pz. Bu çalışmada kullanılan elektrot dağılımı Şekil-2'de gösterilmektedir. Her çocuğun bilişsel etkinliklerdeki performansı farklıdır bu da EEG kayıtlarının toplam süresini ve veri kümesi boyunca değişiklik göstermesini sağlamıştır [19]. İlgili EEG sinyallerinin genlik ( $\mu V$ ) Recurrence Plot [20] ve güç spektrumu gösterimleri Şekil 3'de verilmiştir. Dikkat eksikliği hiperaktivite bozukluğu (ADHD), dikkat eksikliği ve hiperaktivite ile karakterize edilebilen yaygın bir nörogelişimsel mental bir hastalıktır [1]-[9]. ADHD bireylerin, sağlıklı bireylere göre nörolojik ve davranışsal farkları Tablo 1'de gösterilmiştir.



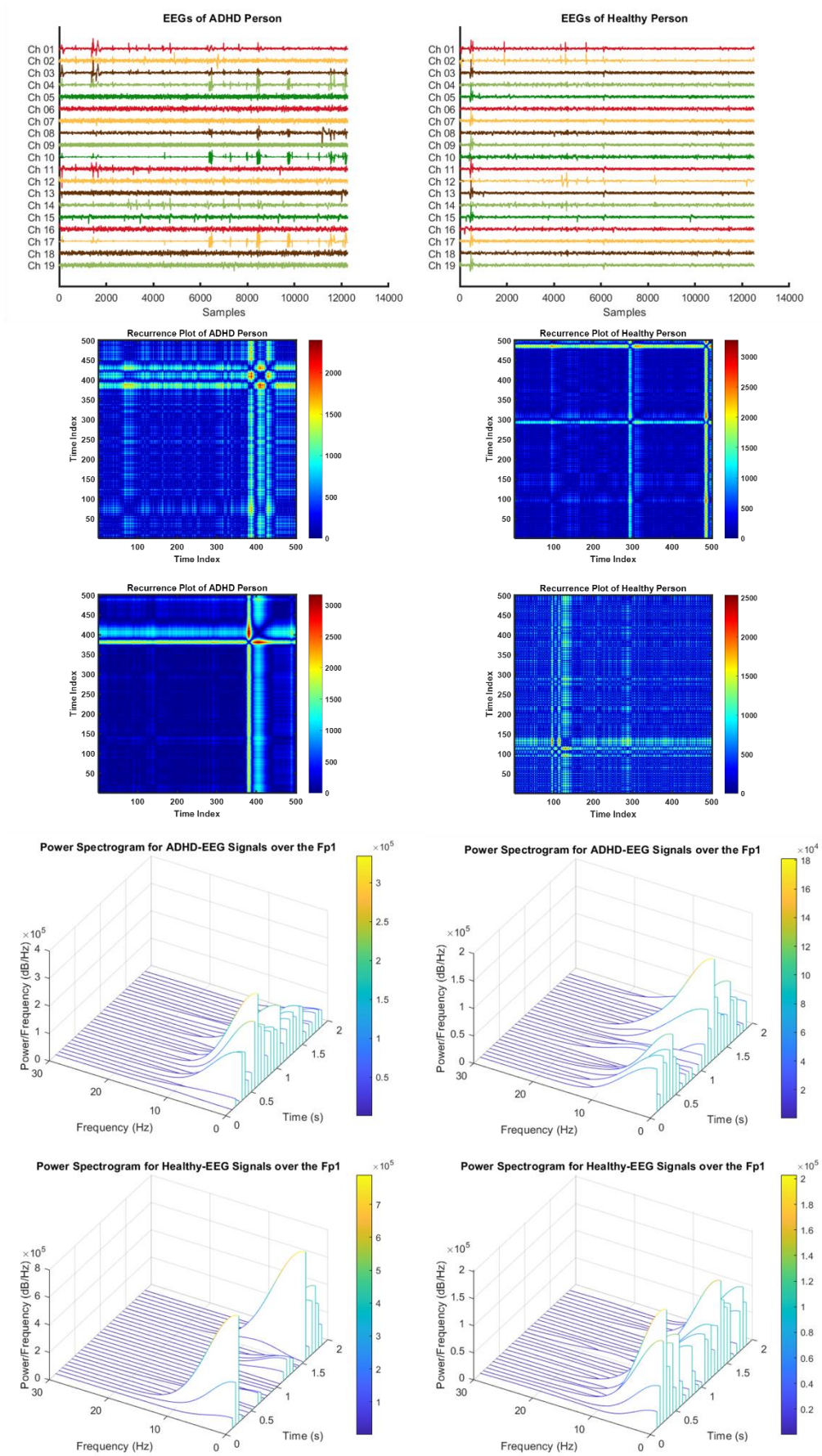
Şekil 2. EEG kanallarının yerleşimi.

Tablo 1. ADHD bireylerde nörolojik ve davranışsal farklar.

Nörolojik ve Davranışsal Farklar
Konsantrasyonda belirgin zorluk
Kısa dikkat süresi
Aceleci hareketler
Bireyin bilişsel, sosyal ve duygusal gelişimde önemli zorluklar yaşaması

## 2.2. 1D-CNN Derin Öğrenme Modeli

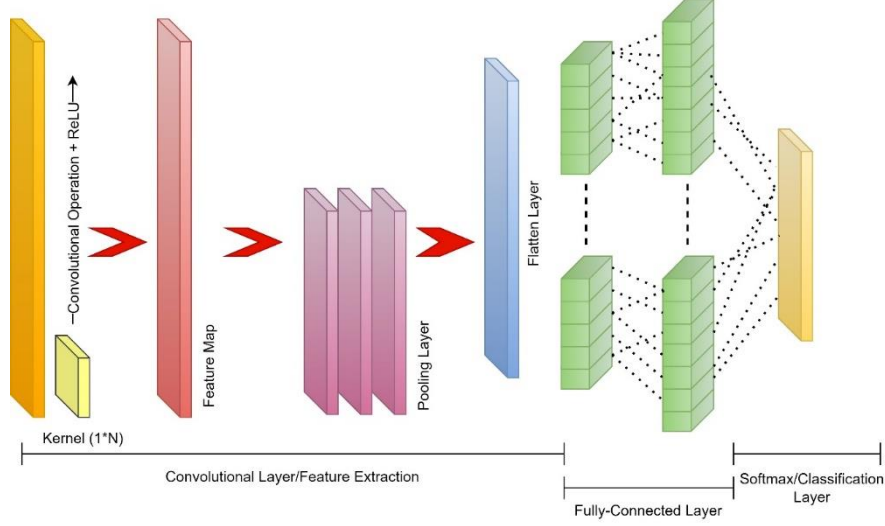
CNN modeli, görüntüleri sınıflandırma yeteneği ile iyi bilinmektedir ve bunun sonucunda yüz ve nesne tanımlama, uydu tahmini ve MRI, CT, X-RAY ve PET gibi tıbbi görüntülerin analizi gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. İlgili verisetlerinde farklı sınıflara ait görüntüleri tanımlamak için 2 boyutlu (2D) görüntülerin yanı sıra CNN modelleri EEG ve ECG gibi 1 boyutlu (1D) biyosinyallere de uygulanabilmektedir [21][22]. Bu nedenle çalışmamızda EEG zaman segmentlerine, t-SNE ile zamansal özellik çıkarma işlemi uyguladıktan sonra, ADHD ve sağlıklı bireylere ait sınıfları ayırmak için 1D-CNN derin öğrenme modelleri kullanılmıştır (bakınız; Şekil 4.). CNN modeli üç ana bileşenden oluşur; evrişimsel katman (convolutional layer), havuzlama katmanı (pooling layer) ve tam bağlantılı katman (fully-connected layer). Evrişim katmanı, çekirdek (kernel) ile ilgili veriyi evrişim



Şekil 3. ADHD ve sağlıklı bireylere (ADHD/ Healthy Person) ait EEG sinyalleri gösterimi, Recurrence grafiği (Recurrence Plot) gösterimleri ve güç spektrumları.

işlemine tabi tutuktan sonra ReLU aktivasyon fonksiyonu ile oluşan negatif değerleri 0 değerine dönüştürmektedir. Ayrıca, evrişim katmanı ve havuzlama katmanı, girdinin karmaşıklığını azaltırken önemli özelliklerin belirginliğini artırır ve modelin aşırı öğrenmesini önler. Evrişim katmanının çalışma mekanizması denklemde (Denk. 1) gösterilmektedir. Sırasıyla bu denklemde;  $S$  sinyal girdisidir,  $*$  ayrık evrişim işlemidir,  $W$  evrişim çekirdeğidir,  $i$  giriş sinyalinin uzunluğudur. Düzleştirici katman (flatten layer), çok boyutlu veri yapısını tek boyutlu bir vektöre dönüştürmektedir. Bununla beraber, sınıflandırma katmanı (softmax/classification layer) ise ilgili sınıflara ait olasılık değerlerini bulmaktadır [21], [22][23][24].

$$S * W = \sum_{i=1}^{|W|} WiSi \quad (1)$$



Şekil 4. 1D-CNN şematik gösterimi.

Bu çalışmada ilgili 1D-CNN derin öğrenme modelleri için oluşturulan hiper-parametreler ve mimari Şekil-5'te görülmektedir. Buna ek olarak ilk derin modelinde eğitim için gerekli olan epoch sayısı 220, ikinci derin öğrenme modeli için 250 belirlenmiştir. Bununla beraber ReLU aktivasyon fonksiyonu gerçekleştirilmiş ve eğitim algoritması olarak Adam kullanılmıştır.

1D-CNN Model-1			1D-CNN Model-2		
Name	Type		Name	Type	
1 sequenceinput Sequence input with 12 dimensions	Sequence Input		1 sequenceinput Sequence input with 12 dimensions	Sequence Input	
2 conv1d_1 120 10x12 convolutions with stride 1 and padding 'causal'	Convolution		2 conv1d_1 150 8x12 convolutions with stride 1 and padding 'causal'	Convolution	
3 relu_1 ReLU	ReLU		3 relu_1 ReLU	ReLU	
4 layernorm_1 Layer normalization with 120 channels	Layer Normalization		4 layernorm_1 Layer normalization with 150 channels	Layer Normalization	
5 conv1d_2 240 10x120 convolutions with stride 1 and padding 'causal'	Convolution		5 conv1d_2 300 8x150 convolutions with stride 1 and padding 'causal'	Convolution	
6 relu_2 ReLU	ReLU		6 relu_2 ReLU	ReLU	
7 layernorm_2 Layer normalization with 240 channels	Layer Normalization		7 layernorm_2 Layer normalization with 300 channels	Layer Normalization	
8 globalavgpool1d 1-D global average pooling	1-D Global Average ...		8 globalavgpool1d 1-D global average pooling	1-D Global Average...	
9 fc 2 fully connected layer	Fully Connected		9 fc 2 fully connected layer	Fully Connected	
10 softmax softmax	Softmax		10 softmax softmax	Softmax	
11 classoutput crossentropyx with classes '1' and '2'	Classification Output		11 classoutput crossentropyx with classes '1' and '2'	Classification Output	

Şekil 5. Çalışmada ADHD/sağlıklı bireyleri ayırmada kullanılan 1D-CNN modelleri.

### 2.3. Performans Metrikleri

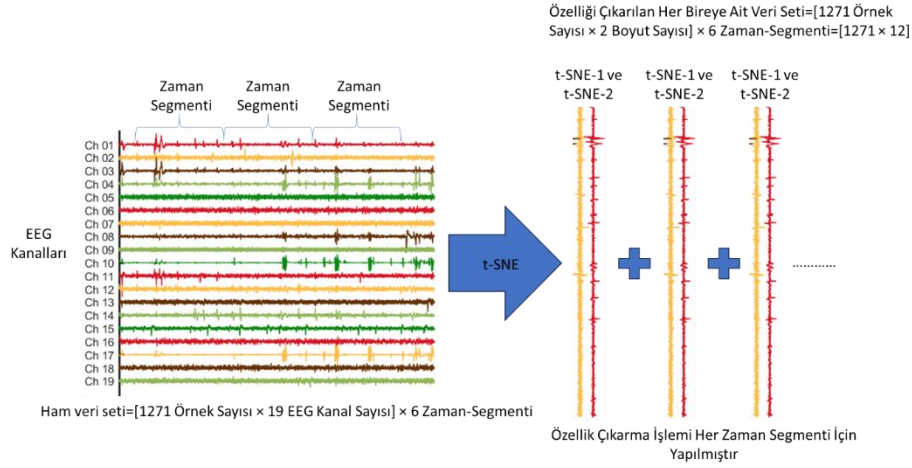
Örüntü tanıma için seçilen değerlendirme metrikleri, derin öğrenme modellerinin performanslarını ortaya çıkarmak için çok önemlidir. Bu çalışma için uygun metrikler; sınıflandırma doğruluğu (ACC), duyarlılık (SENS), özgüllük (SPEC), kesinlik (PREC), F-score, ve eğrinin altındaki alan (AUC). Bununla beraber alıcı çalışma özellikleri (ROC) de performans analizi için elde edilmiştir [25], [26]. Eğitim ve test veri setleri, kfold tekniği ile 3 parçaya ayrılmış ve doğrulama yöntemi bu teknik üzerinden uygulanmıştır.



## 2.4. t-SNE Özellik Çıkarma Yöntemi

t-SNE yöntemi, verilerin yüksek ve düşük boyutlu temsilde komşu olma olasılıklarının eşleşmesine dayanır. Önerilen yaklaşım, EEG verilerinin yüksek boyutlu bir temsili daha düşük bir temsile dönüştürerek özellik çıkarma işlemine dayanır. t-SNE, bir dizi yüksek boyutlu veriyi 2 boyutlu veya 3 boyutlu vektöre dönüştürmek için son derece uygun olan doğrusal olmayan bir boyut indirgeme tekniğidir [12]–[18]. Bu işlem özellik çıkarmanın yanında, birçok farklı ölçekte yapıyı ortaya çıkarmak için tek bir harita oluşturur ve önceki tekniklerle üretilenlerden çok daha iyi görselleştirmeler üretebilir. Bu çalışmada ADHD ve sağlıklı bireyleri ayırmada derin öğrenme modellerini eğitmek ve test etmek için zaman alanında özellik çıkarmak için kullanılmıştır. ADHD ve sağlıklı her bireye ait ham verisinde [1271 Örnek Sayısı×19 EEG Kanal Sayısı] × 6 zaman-segmenti alınmıştır. Bunun ardından, ilgili her bir birey için alınan verisetleri alt alta konularak, t-SNE ile zamansal örüntüyü bozmadan boyut azaltılarak özellik çıkarılmıştır. Yeni oluşan her bir kişiye ait veri seti [1271 Örnek Sayısı×2 Boyut Sayısı] × 6 zaman-segmenti olarak oluşturulmuştur. 1271 örnek sayısı, 128 örnekleme frekansında yaklaşık 10 saniyelik bir veri kaydına denk gelmektedir.

Zaman alanında, zamansal örüntüyü koruyarak özellik çıkaran t-SNE boyut azaltma tekniğinin, frekans düzlemine göre başlıca sağlayabileceği avantajlarından birisi de zamana bağlı bilgileri korumasıdır. Zaman alanı analizi, geçici davranış (transient response), zamanlama ve nedensellik gibi zamanla ilgili bilgileri koruyarak sinyallerin zaman boyutunda ayrıntılı bir temsili sağlayabilir. Ancak frekans alanında durağan olmayan sinyaller için sınırlıdır: Frekans alanı analizi özellik çıkarma yöntemleri ise durağan olmayan sinyaller (non-stationary) için sınırlıdır çünkü sinyalin analiz süresi boyunca sabit kaldığını varsayar. Durağan olmayan sinyaller için, kısa zamanlı Fourier dönüşümü (Short-Time Fourier Transform/STFT) veya dalgacık dönüşümü (Wavelet Transform/WT) gibi zaman-frekans analiz teknikleri daha uygun olabilir [27].



Şekil 6. t-SNE tekniği ile özellik çıkarma işlemi.

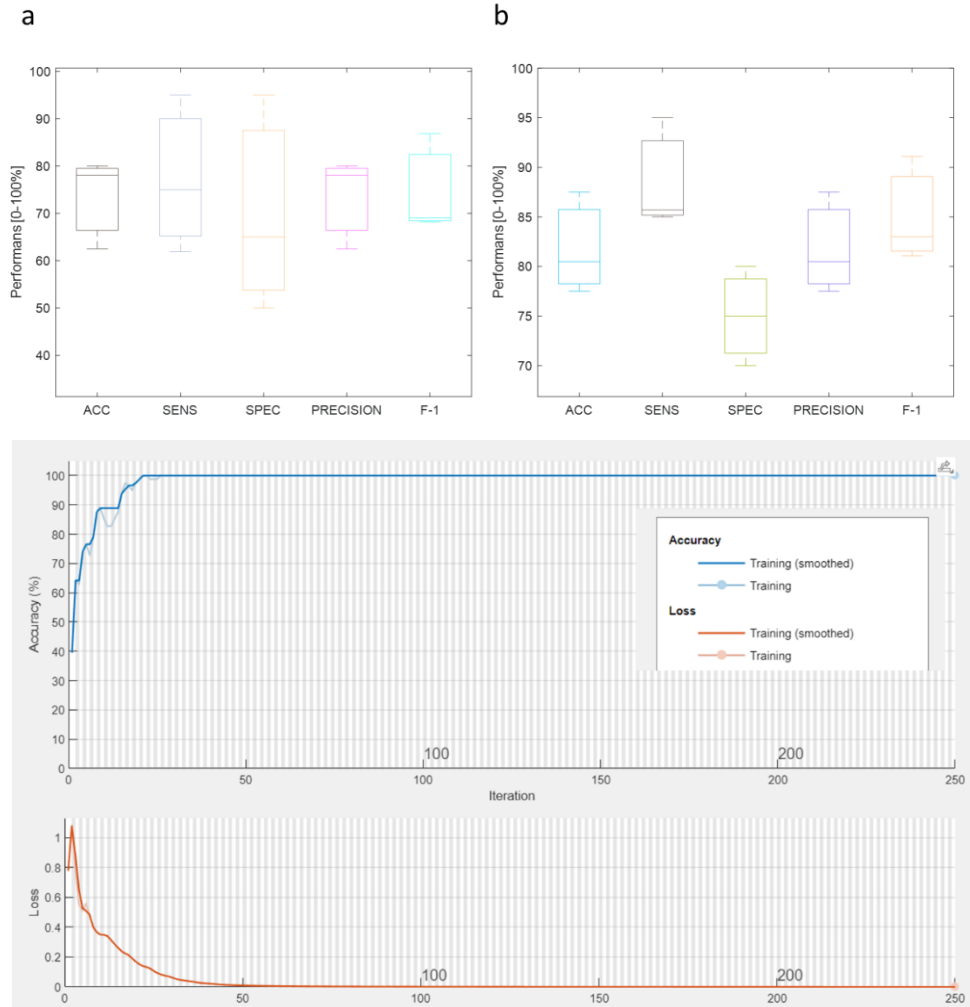
## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

ADHD ve sağlıklı bireyleri ayırmada (bakınız; Tablo 2) sınıflandırma performansının deneysel sonuçları önerilen 1D-CNN derin öğrenme modelinde (model-1) 3-fold için, doğruluk: 73.51%, duyarlılık: 77.30%, özgüllük: 70.00%, kesinlik: 73.51%, F-score: 74.69%'lik bir ortalama performans elde ettiğini göstermiştir. AUC değeri, ADHD ve sağlıklı bireyleri ayırmada 0.820 olarak hesaplanmıştır. Bu modeldeki bütün performans değerleri her fold için farklı çıkmakla beraber en iyi doğruluk değeri 80.00% ile fold-1'de elde edilmiştir. Hassasiyet değeri 95.00% ve F-score değeri ≥86% olarak hesaplanmıştır. AUC değeri de yine ≥0.8 olarak bulunmuştur. Bununla beraber fold-2 ayırmada verisetindeki test sonuçlarında en iyi ikinci sınıflandırma başarısı görülmektedir. Buna göre iki sınıfı (ADHD/Sağlıklı) ayırma başarısı doğruluk için 78.04%, duyarlılık için 61.90%, özgüllük için 95.00%, kesinlik için 62.50% ve F-score değeri için 68.18% hesaplanmıştır. AUC değeri ise 0.840 olarak bulunmuştur. Aynı derin öğrenme modelinde en düşük tahmin etme sonuçları ise fold-3 ayırmada hesaplanmıştır (ACC: ≥62.00).

Tablo 2. Sınıflandırma performans sonuçları (ADHD ve Sağlıklı Bireyler).

Perf.Metrik/1D-CNN Model (%)	Model-1				Average
	fold-1	fold-2	fold-3		
ACC	80.00	78.04	62.50	73.51	
SENS	95.00	61.90	75.00	77.30	
SPEC	65.00	95.00	50.00	70.00	
PRES	80.00	78.04	62.50	73.51	
F-score	86.85	69.04	68.18	74.69	
AUC	0.852	0.840	0.770	0.820	

Perf.Metrik: Performans Metriği, Average: Ortalama



Şekil 7. ADHD ve sağlıklı bireyleri sınıflandırma performans değişimlerinin boxplot gösterimi. a. 1D-CNN Model-1, b. 1D-CNN Model-2 (Üst Sıra), 1D-CNN eğitim süreci gösterimi (Alt Sıra).

Tablo 3. Sınıflandırma performans sonuçları (ADHD ve Sağlıklı Bireyler)

Perf.Metrik/1D-CNN Model	Model-2			Average
	fold-1	fold-2	fold-3	
(%)				
ACC	77.50	87.50	80.48	81.82
SENS	85.00	95.00	85.71	88.57
SPEC	70.00	80.00	75.00	75.00
PRES	77.50	87.50	80.48	81.82
F-score	81.07	91.09	83.01	85.05
AUC	0.787	0.912	0.804	0.834

Perf.Metrik: Performans Metriği, Average: Ortalama

Çalışmanın bir sonraki adımında, 1D-CNN derin öğrenme model-2 ile ADHD ve sağlıklı bireyleri tahmin etmek için örüntü tanıma sonuçları elde edilmiştir. Tablo 3' de elde edilen sınıflandırma sonuçlarına göre, en düşük sınıflandırma doğruluğu 77.50% ile fold-1'de aynı veri setinde (61 ADHD ve 60 sağlıklı birey) elde edilmiştir. Yine aynı fold-1/ayırma için 1D-CNN model-2 sırasıyla 85.00% hassasiyet ve 70.00% özgüllük oranlarına sahip sınıflandırma sonuçlarına ulaşmıştır. Duyarlılık, özgüllük, kesinlik ve F-score değerleri fold-3 için sırasıyla 80.48%, 85.71%, 75.00%, 80.48% ve 83.01% aralığında değerlere sahiptir. AUC sonucu ise aynı fold için 0.804 olarak hesaplanmıştır. En iyi performans metrikleri fold-2 için ACC:  $\geq 87.00\%$  üzerinde elde edilmiştir. Hassasiyet ve AUC değeri ise sırasıyla 95.00% ve 0.912'dir. Ortalama sınıflandırma doğruluğu ise 81.82% ve AUC değeri 0.834 olarak başarı elde etmiştir. Elde edilen bu bulgulara göre, ADHD ve sağlıklı bireyler farklı hiper parametrelere sahip 1D-CNN modellerinde (bakınız; Şekil-7), farklı tahmin performans değerlerine ulaştığı görülmektedir. Bununla beraber, model-1 ve model-2 derin öğrenme modellerinin, bütün fold ayırmalarında ve 121 katılımcı için AUC:  $\geq 0.770$  performans gösterdiği gözlenmiştir (bakınız; Tablo 2, Tablo 3 ve Şekil 8). ADHD ve sağlıklı bireylerin, t-SNE ile özellik çıkarıldıktan sonra yine aynı yöntemle 2D saçılım grafiği gösterimlerinde (bakınız; Şekil-9) bu sınıflara ait kümelerin yüksek bir başarı ile ayırt edilebildiği gözlenmiştir.



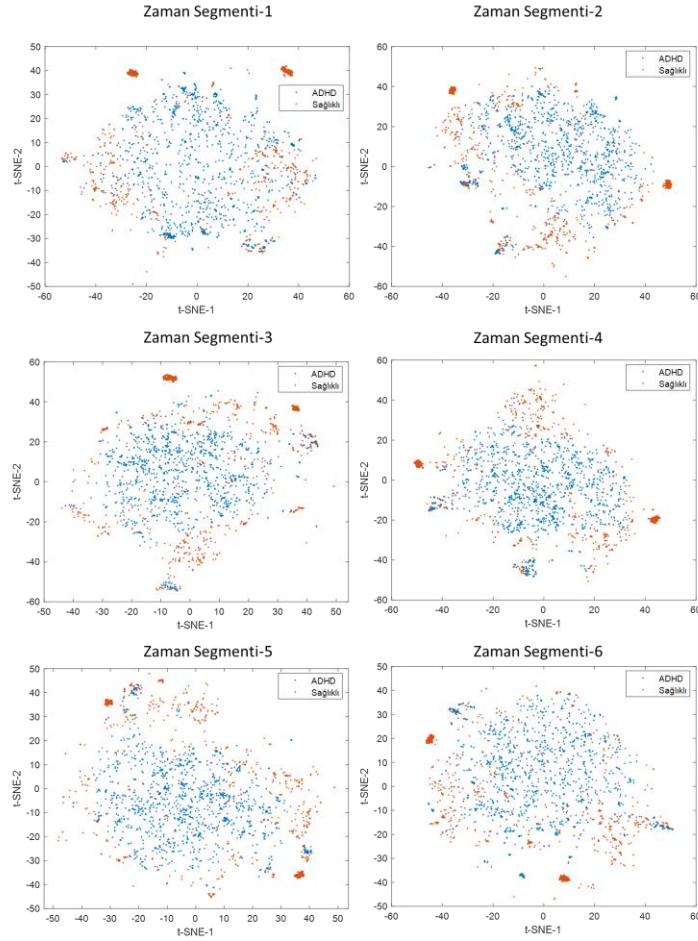
**Şekil 8.** ADHD ve Sağlıklı Bireyleri Sınıflandırma Performans Değerlerinin Confusion Matrisi Gösterimi (solda) ve ROC eğrisi grafiği (sağda) (ROC grafikleri her iki derin öğrenme modelinde en iyi kfold test sonucuna göre oluşturulmuştur).

Beynin ADHD'den etkilenen bölgesini ve ADHD'si olan bireyleri sağlıklı kontrol bireylerinden ayırmada önemli EEG kanallarını ve beyin kortikal bölgelerini incelemek için beyin haritalama (bakınız; Şekil-10) ve fonksiyonel bağlantı (bakınız; Şekil-11) grafikleri elde edilmiştir [28], [29]. Buna göre ADHD bireylerde, frontal lobe (frontal lobe) ve ön-frontal lobe (prefrontal lobe) üzerinde daha düzensiz bir güç yoğunluğu artışı sağlıklı bireylere kıyasla görülmektedir [30]–[32]. Bununla beraber ADHD bireylerde, anterior cingulate korteksinde (prefrontal korteks bölgesi) pozitif fonksiyonel bağlantı (positive functional connectivity) gözlenirken, posterior cingulate korteksinde (parietal bölgesi) negatif fonksiyonel bağlantı (negative functional connectivity) olduğu gözlenmiştir [1], [2] [30]–[32]. Bu açıdan literatürde belirtilen ADHD hastalığına sahip bireyler ve ilgili beyin korteksleri, elde edilen beyin haritalama ve fonksiyonel bağlantı grafiklerinde tutarlı sonuçlar üretildiği gözlenmiştir. Yine de bu bağlantısal grafikler üzerinden daha iyi yorumlamak için daha fazla katılımcının grafiksel sonuçlarını elde etmek gerektiği söylenebilir. Literatürdeki diğer çalışmalarla olan karşılaştırma Tablo 4'de verilmiştir.

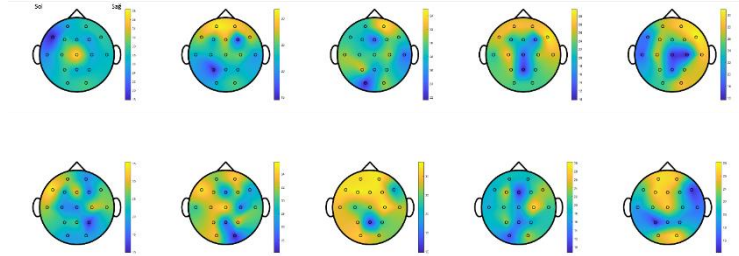
**Tablo 4.** Literatürdeki diğer çalışmalar ve karşılaştırmalı özet

Çalışma/Yıl	Katılımcı Sayısı	Sinyal	Özellik Çıkarma/Özellik Seçme/Sınıflandırıcı	Performans Değerleri
[11]/2020	46	EEG/ERP	Morfolojik/Nonlinear/ Wavelet Özellikleri ve SVM k-NN RF Adaboost MLP, NB, LR	ACC: 91.3% AUC: 0.910
[33]/2020	40	EEG	Spektrum/CNN	ACC: 88%
[34]/2021	120	EEG	AB, RF, SVM	ACC: 84.0%
[35]/2021	121	EEG	GA ve MLP	ACC: 89.7%
[36]/2022	121	EEG	Morfolojik/Zaman Alan Özellikleri ve t-test/LASSO Özellik Seçme ve MLP/SVM	ACC: 94.2% AUC: 0.964
[1]/2023	121	EEG	LASSO Özellik Seçme ve GPC, DT, RF, k-NN, MLP, and LR	ACC: 97.5% AUC: 0.999
[37]/2023	219	Functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI)	ICA/CNN/CorrAE/Deep Forest/SVM/Logistic Regression	ACC: 69%
[7]/2023	33	EEG	ITD ve Bağlantı Tabanlı Özellik/ DT, NB, SVM, kNN, Bagged Tree	ACC: 92.90-100%
<b>Bu Çalışmada</b>	30	EEG	t-SNE Özellik Çıkarma ve 1D-CNN Derin Öğrenme Modelleri	ACC: 81.82% SENS: 88.57% AUC: 0.834

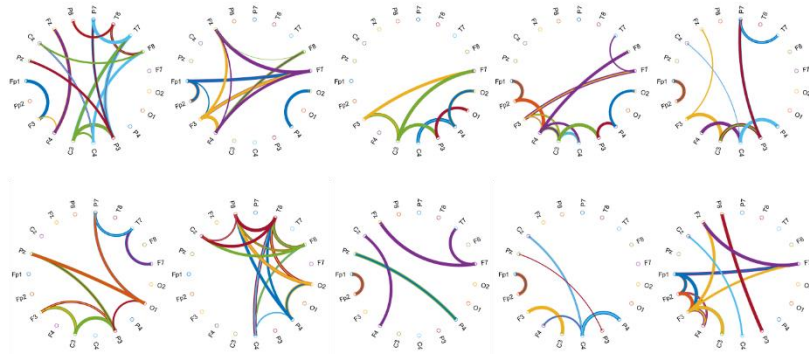
ERP: Event Related Potential, RF: Random Forest, MLP: Multilayer Perceptron, NB: Naive Bayes, LR: Logistic Regression, AB: Adaboost, SVM: Support Vector Machine, GA: Genetic Algorithm, GPC: Gaussian Process Classification, DT: Decision Tree, ITD: Intrinsic Time-Scale Decomposition, kNN: k-Nearest Neighbors



**Şekil 9.** t-SNE tekniği ile ADHD ve sağlıklı bireyleri ayırmada saçılım grafiği sonuçları (Sınıf 1: ADHD, Sınıf 2: Sağlıklı) (İlgili gösterimler her zaman segmenti için t-SNE ile özelliği çıkarılan ADHD ve sağlıklı birer bireye ait veri setleri için oluşturulmuştur. Veri setleri: 2 katılımcı  $\times$  [1271 örnek sayısı  $\times$  2 boyut]).



**Şekil 10.** Farklı kişilere ait beyin haritalama (brain mapping) grafikleri **üst sıra:** ADHD bireyler, **alt sıra:** sağlıklı bireyler (İlgili beyin haritalama sonuçları 15 Hz'de elde edilmiştir ve güç yoğunluğu ifadeleri  $\mu V^2$  aralığındadır.)



**Şekil 11.** Farklı kişilere ait fonksiyonel bağlantı (functional connectivity) grafikleri **üst sıra:** ADHD bireyler, **alt sıra:** sağlıklı bireyler (Oluşan grafiklerin daha anlaşılır olması için korelasyon matrisinde her birey için farklı eşik seviyeleri uygulanmıştır. İlgili fonksiyonel bağlantı grafiklerinde, beyin haritalama sonuçlarındaki bireylere ait veri setleri kullanılmıştır.)

#### 4. SONUÇ

Dikkat eksikliği/hiperaktivite bozukluğu (ADHD), gelişimsel olarak uygun olmayan dikkatsizlik düzeyleri, hiperaktivite/dürtüsellik ve işlevsel bozulma ile karakterize edilen, erken yaşta ortaya çıkan, yaşam boyu süren, maliyetli ve yaygın bir hastalık olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışma, çocukluk çağı nörogelişimsel bozukluğunda sıklıkla karşılaşılan ADHD'nin erken ve objektif tanısını desteklemek için zaman-serisi sinyalleri üzerinde zamansal örüntüyü bozmadan boyut azaltarak ve makine öğrenmesi modeli ile farklı bir teknik sunmaktadır. Bulgularımız, EEG veri setlerinden elde edilen zaman alanı ve boyut azaltma özellik çıkarma özelliği olan t-SNE ile ilgili özellik çıkarılmış ve 1D-CNN derin öğrenme modelleri ile eğitim/test performansları 3-fold için ve ortalama sonuçları dahil edilerek elde edilmiştir. Yüksek tahmin performansına (ACC:  $\leq 87.50\%$ , SENS:  $95.00\%$  ve AUC:  $\leq 0.912$ ) sahip 1D-CNN ve t-SNE yaklaşımı, ADHD'nin tanılma amaçları için yararlı ve ayırt edici bir araç olabileceğini ortaya koymaktadır. Araştırma çalışmamızın, literatürdeki önceki yaklaşım ve performanslara göre daha iyi sonuç üretmemesi not edilmesi gerekmektedir. Ancak var olan literatürdeki tüm bu çalışmalar, frekans veya zaman alanında kapsamlı bir araştırma sonrasında EEG'den hastalığı karakterize eden özelliklerin manuel olarak seçilmesini gerektirmiştir. İlgili çalışmamız, t-SNE tekniği ile zaman alanı içinde kalıp, zamansal örüntüyü bozmadan boyut azaltarak özellik çıkarmanın yanında, 1D-CNN derin öğrenme modelleri üzerinde kıyas edilerek, ADHD ve sağlıklı bireyleri ayırmada ne kadar başarılı olduğuna dair literatürdeki ilk çalışma olarak görülmektedir. Ayrıca bu yaklaşım ADHD tanısına EEG sinyalleri üzerinden kullanımı kolay, düşük maliyetli yeni bir bakış açısı getirebilir ve bulgular tedavinin düzenlenmesinde yardımcı olabilir.

#### Yazar Katkıları

Kutlucan GÖRÜR, bu çalışmanın konusunun ve kapsamının detaylarını inceleyerek, deneysel analiz sürecinin gözlemlenmesine ve sonuçların yorumlanmasına katkı sağlamıştır. Ve yayının yazılması süreci yine kendisi tarafından yapılmıştır.

#### Veri Kullanılabilirliği

Kullanılan veri kümesi erişim linki: <https://iee-dataport.org/open-access/eeg-data-adhd-control-children>

#### Çıkar Çatışması

Makale yazarı, herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

#### KAYNAKÇA

- [1] M. Maniruzzaman, M.A.M. Hasan, N. Asai, and J. Shin "Optimal Channels and Features Selection Based ADHD Detection From EEG Signal Using Statistical and Machine Learning Techniques," IEEE Access, vol. 11, pp. 33570–33583, 2023.
- [2] G. Hámori et al. "Adolescent ADHD and electrophysiological reward responsiveness: A machine learning approach to evaluate classification accuracy and prognosis," Psychiatry Res., vol. 323, p. 115139, 2023.
- [3] A. Alim and M.H. Imtiaz "Automatic Identification of Children with ADHD from EEG Brain Waves," Signals, vol. 4, no. 1, pp. 193–205, Feb. 2023
- [4] S.K. Khare and U.R. Acharya "An explainable and interpretable model for attention deficit hyperactivity disorder in children using EEG signals," Comput. Biol. Med., vol. 155, p. 106676, Mar. 2023
- [5] Y.S. Liu, B. Cao, and P.R. Chokka "Screening for Adulthood ADHD and Comorbidities in a Tertiary Mental Health Center Using EarlyDetect: A Machine Learning-Based Pilot Study," J. Atten. Disord., vol. 27, no. 3, pp. 324–331, Feb. 2023
- [6] C.-C. Chen, E.H.-K. Wu, Y.-Q. Chen, H.-J. Tsai, C.-R. Chung, and S.-C. Yeh "Neuronal Correlates of Task Irrelevant Distractions Enhance the Detection of Attention Deficit/Hyperactivity Disorder," IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng., vol. 31, pp. 1302–1310, 2023
- [7] O. Karabiber Cura, S. Kocaaslan Atli, and A. Akan "Attention deficit hyperactivity disorder recognition based on intrinsic time-scale decomposition of EEG signals," Biomed. Signal Process. Control, vol. 81, p. 104512, Mar. 2023
- [8] R.C. Joy et al. "Detection and Classification of ADHD from EEG Signals Using Tunable Q-Factor Wavelet Transform," J. Sensors, vol. 2022, pp. 1–17, 2022.
- [9] H. Deng et al. "Systematic bibliometric and visualized analysis of research hotspots and trends in attention-deficit hyperactivity disorder neuroimaging," Front. Neurosci., vol. 17, 2023.
- [10] A. Khaleghi, P.M. Birgani, M.F. Fooladi, and M.R. Mohammadi "Applicable features of electroencephalogram for ADHD diagnosis," Res. Biomed. Eng., vol. 36, no. 1, pp. 1–11, 2020.
- [11] M. Altunkaynak et al., "Diagnosis of Attention Deficit Hyperactivity Disorder with combined time and frequency features," Biocybern. Biomed. Eng., vol. 40, no. 3, pp. 927–937, Jul. 2020.
- [12] M. Svantesson, H. Olausson, A. Eklund, and M. Thordstein "Get a New Perspective on EEG: Convolutional Neural Network Encoders for Parametric t-SNE," Brain Sci., vol. 13, no. 3, p. 453, 2023.
- [13] S. Hwang, K. Hong, G. Son, and H. Byun "Learning CNN features from DE features for EEG-based

- emotion recognition,” *Pattern Anal. Appl.*, vol. 23, no. 3, pp. 1323–1335, 2020.
- [14] O.P. Idowu, A.E. Ilesanmi, X. Li, O W. Samuel, P. Fang, and G. Li “An integrated deep learning model for motor intention recognition of multi-class EEG Signals in upper limb amputees,” *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 206, p. 106121, 2021.
- [15] J. Xu, H. Zheng, J. Wang, D. Li, and X. Fang “Recognition of EEG Signal Motor Imagery Intention Based on Deep Multi-View Feature Learning,” *Sensors*, vol. 20, no. 12, p. 3496, 2020.
- [16] T. Nishimoto, H. Higashi, H. Morioka, and S. Ishii “EEG-based personal identification method using unsupervised feature extraction and its robustness against intra-subject variability,” *J. Neural Eng.*, vol. 17, no. 2, p. 026007, 2020.
- [17] Z. Wang, Y. Wang, J. Zhang, C. Hu, Z. Yin, and Y. Song “Spatial-Temporal Feature Fusion Neural Network for EEG-Based Emotion Recognition,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 71, pp. 1–12, 2022.
- [18] M. Sun, W. Cui, S. Yu, H. Han, B. Hu, and Y. Li “A Dual-Branch Dynamic Graph Convolution Based Adaptive TransFormer Feature Fusion Network for EEG Emotion Recognition,” *IEEE Trans. Affect. Comput.*, vol. 13, no. 4, pp. 2218–2228, 2022.
- [19] “EEG DATA FOR ADHD / CONTROL CHILDREN.” <https://ieec-dataport.org/open-access/eeg-data-adhd-control-children>.
- [20] “Recurrence Plot.” <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/58246-tool-box-of-recurrence-plot-and-recurrence-quantification-analysis>.
- [21] H. W. Loh et al. “Deep neural network technique for automated detection of ADHD and CD using ECG signal,” *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 241, p. 107775, 2023.
- [22] Ö. Kasim and M. Tosun “Biometric Authentication from Photic Stimulated EEG Records,” *Appl. Artif. Intell.*, vol. 35, no. 15, pp. 1407–1419, 2021
- [23] R. Du, S. Zhu, H. Ni, T. Mao, J. Li, and R. Wei “Valence-arousal classification of emotion evoked by Chinese ancient-style music using 1D-CNN-BiLSTM model on EEG signals for college students,” *Multimed. Tools Appl.*, vol. 82, no. 10, pp. 15439–15456, 2023.
- [24] S. Shanmugam and S. Dharmar “A CNN-LSTM hybrid network for automatic seizure detection in EEG signals,” *Neural Comput. Appl.*, vol. 35, no. 28, pp. 20605–20617, 2023.
- [25] K. Gorur and B. Eraslan “The single-channel dry electrode SSVEP-based biometric approach: data augmentation techniques against overfitting for RNN-based deep models,” *Phys. Eng. Sci. Med.*, vol. 45, no. 4, pp. 1219–1240, 2022.
- [26] I. Ozer, C.K. Ozer, A.C. Karaca, K. Gorur, I. Kocak, and O. Cetin “Species-level microfossil identification for globotruncana genus using hybrid deep learning algorithms from the scratch via a low-cost light microscope imaging,” *Multimed. Tools Appl.*, vol. 82, no. 9, pp. 13689–13718, 2023.
- [27] “Time Domain Analysis.” <https://www.quora.com/What-are-the-advantages-and-disadvantages-of-frequency-domain-analysis-compared-to-time-domain-analysis>.
- [28] “Functional Connectivity.” <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/48576-circulargraph>.
- [29] “Brain Mapping.” <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/72729-topographic-eeg-meg-plot>.
- [30] K. Rubia et al. “Functional connectivity changes associated with fMRI neurofeedback of right inferior frontal cortex in adolescents with ADHD,” *Neuroimage*, vol. 188, pp. 43–58, 2019.
- [31] G. Leisman and R. Melillo “Front and center: Maturational dysregulation of frontal lobe functional neuroanatomic connections in attention deficit hyperactivity disorder,” *Front. Neuroanat.*, vol. 16, 2022.
- [32] A.F.T. Arnsten “The Emerging Neurobiology of Attention Deficit Hyperactivity Disorder: The Key Role of the Prefrontal Association Cortex,” *J. Pediatr.*, vol. 154, no. 5, pp. I-S43, 2009.
- [33] L. Dubreuil-Vall, G. Ruffini, and J. A. Camprodon “Deep Learning Convolutional Neural Networks Discriminate Adult ADHD From Healthy Individuals on the Basis of Event-Related Spectral EEG,” *Front. Neurosci.*, vol. 14, Apr. 2020
- [34] A. Parashar, N. Kalra, J. Singh, and R. Kumar Goyal, “Machine Learning Based Framework for Classification of Children with ADHD and Healthy Controls,” *Intell. Autom. Soft Comput.*, vol. 28, no. 3, pp. 669–682, 2021.
- [35] A. Ekhlesi, A. Motie Nasrabadi, and M. Mohammadi, “Classification of the Children with ADHD and Healthy Children Based on the Directed Phase Transfer Entropy of EEG Signals,” *Front. Biomed. Technol.*, 2021.
- [36] M. Maniruzzaman, J. Shin, M. Al Mehedi Hasan, and A. Yasumura “Efficient Feature Selection and Machine Learning Based ADHD Detection Using EEG Signal,” *Comput. Mater. Contin.*, vol. 72, no. 3, pp. 5179–5195, 2022.
- [37] D. Wang, D. Hong, and Q. Wu “Attention Deficit Hyperactivity Disorder Classification Based on Deep Learning,” *IEEE/ACM Trans. Comput. Biol. Bioinforma.*, vol. 20, no. 2, pp. 1581–1586, 2023.



## Effect of Anodic Polarization and Sliding Wear on Pitting Corrosion Behavior of Shipbuilding Aluminum Alloy 5083

### Anodik Polarizasyon ve Kayma Aşınmasının Gemi İnşa Alüminyum Alaşımı 5083'ün Çukurcuk Korozyonu Davranışına Etkisi

<sup>1</sup>Sabri ALKAN 

<sup>1</sup>Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi, Denizcilik Meslek Yüksekokulu, Bandırma/Balıkesir, Türkiye

[salkan@bandirma.edu.tr](mailto:salkan@bandirma.edu.tr)

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 4 August 2023

Accepted : 10 September 2023

##### Keywords:

Aluminum Alloy,  
Shipbuilding, Corrosive  
Wear, Pitting Corrosion,  
Tribocorrosion

#### ABSTRACT

This study aimed to characterize the pitting corrosion and simultaneous wear-corrosion (tribocorrosion) mechanisms of shipbuilding aluminum alloy 5083 under sliding wear and different anodic polarization conditions in simulated seawater. A tribocorrosion experimental setup was provided for the study under a 3 N load and different anodic potentials in a 3.5% NaCl solution. In the study, many grooves, parallel scratches and transverse cracks were determined on the wear track surface due to the low hardness of the test material. The corrosion rate of AA5083 increased nearly seven-fold in sliding tribocorrosion conditions than in corrosion conditions under open circuit potential. Chloride ions played a decisive role in the corrosion and tribocorrosion behavior of AA 5083. The dissolution of AA5083 increased from open circuit potential to higher anodic potentials. A half-cube mechanism, similar to the pitting corrosion of pure aluminum were observed under high anodic potentials.

© 2023 Bandırma Onyediy Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 4 Ağustos 2023

Kabul : 10 Eylül 2023

##### Anahtar Kelimeler:

Alüminyum Alaşım, Gemi  
İnşa, Korozif aşınma,  
Çukurcuk Korozyonu,  
Tribokorozyon

#### ÖZET

Bu çalışma, simüle edilmiş deniz suyunda kayma aşınması ve farklı anodik polarizasyon koşulları altında gemi yapımında kullanılan alüminyum alaşımı 5083'ün çukurcuk korozyonu ve eş zamanlı aşınma-korozyon (tribokorozyon) mekanizmalarını karakterize etmeyi amaçladı. Çalışma için %3.5 NaCl çözeltisinde 3 N yük ve farklı anodik potansiyeller altında bir tribokorozyon deney düzeneği sağlanmıştır. Çalışmada, test malzemesinin sertliğinin düşük olması nedeniyle aşınma izi yüzeyinde çok sayıda oluk, paralel çizik ve enine çatlak tespit edilmiştir. AA5083'ün korozyon hızı, kaymalı tribokorozyon koşullarında, açık devre potansiyeli altındaki korozyon koşullarına göre neredeyse yedi kat arttı. AA 5083'ün korozyon ve tribokorozyon davranışında klorür iyonları belirleyici bir rol oynadı. AA5083'ün bozunması açık devre potansiyelinden daha yüksek anodik potansiyellere gittikçe arttı. Yüksek anodik potansiyeller altında, saf alüminyumun çukurcuk korozyonuna benzer bir yarım küp mekanizması gözlemlendi.

© 2023 Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

## **1. INTRODUCTION**

The most effective way to limit greenhouse gas emissions in the maritime industry is to lighten the structure during ship design and construction to reduce fuel consumption [1]. So, in recent years, shipyards have shifted to using aluminum alloys (AAs) to achieve weight savings in high-speed ferries, patrol boats, yachts, and offshore wind service vessels [2–7]. This way, weight saving can provide almost half of a similar steel hull structure [8,9]. Moreover, AAs, as well as lightness, have excellent corrosion resistance in marine environments. They can form a few nanometers thick oxide film on their surface almost instantaneously [10,11], significantly protecting bare metal from the environment. Thus, thanks to the passive oxide film, the material surface rarely comes into direct contact with the environment. However, the oxide film may deteriorate [10,12] if there is continuous mechanical action while in an electrolyte, such as in ship-ice interaction [13–17] or underwater friction stir welding [2,18,19]. During ship-ice interaction or underwater friction stir welding, different material degradation mechanisms trigger each other, and a non-reversible material deterioration can emerge due to a combination of wear and corrosion, namely tribocorrosion [20,21].

In tribocorrosion, sliding wear and electrochemical potential can direct material loss and corrosion behavior [12,22,23]. Although aluminum alloys have excellent corrosion resistance in seawater, they are sensitive to pitting corrosion in aqueous media like other passive metals [24–30]. In marine environments, chloride ions provide an incredible convenience in approaching the metal surface due to their small size when the oxide film deteriorates [24,31,32]. Gulbransen [11] explained that the oxide film protectivity by the Pilling-Bedworth Ratio that the oxide film can shield defects nearly 3-4 nm in size [12,22]. The structure of the oxide film is affected to varying degrees by different parameters such as oxygen pressure, temperature, surface condition of the metal and alloying element additions [19,33]. Alloying elements significantly influence the OCP of aluminum alloys and can vary the potential in both directions [34]. Magnesium is a critical alloying element with higher diffusion characteristics than aluminum, resulting in the formation of MgO for aluminum-magnesium alloys [35].

Aluminum alloys are grouped into eight series [27]. The variety of alloys explains the expansion of applications with a comprehensive range of specific characteristics, such as tensile strengths varying from 100 to 700 MPa [6,36]. While AAs exhibit different properties in each series, they typically have similar properties in the same series, such as cast ability, extrudability, wear and corrosion [6]. Shipyards mostly prefer the strain-hardened (H) tempers of 5XXX series aluminum alloys (aluminum-magnesium alloys) with the highest formability for ship structures, heat exchangers, seawater desalination, or subsea robotics, which could contact seawater [5,7,36–38]. The mechanical properties of the shipbuilding aluminum (aluminum-magnesium) alloys increase as almost linear as a function of magnesium content up to 7 wt.% magnesium for wrought alloys and up to 12 wt.% for casting alloys. However, it evolved that higher magnesium content leads to susceptibility to intergranular pitting and stress corrosion [26,30,39,40]. Alloying elements, additives, and impurities affect AAs' chemical design, which directs mechanical properties [27], such as hardness, wear and frictional characteristics [18,41]. In contrast to their excellent corrosion resistance, the low mechanical strength of aluminum alloys makes them vulnerable to tribocorrosion [28].

In the shipbuilding industry, aluminum alloys are extensively utilized, but limited knowledge exists about how anodic polarization and sliding wear impact pitting corrosion and tribocorrosion in seawater for AA5083. Understanding the wear and corrosion behavior of shipbuilding aluminum alloys such as hull-ice interactions in seawater frictional conditions is pivotal. Addressing this gap, the study probes the pitting corrosion and tribocorrosion of AA5083 under anodic polarization and sliding wear in seawater, revealing the intricate alloy-environment interplay for the first time. While aluminum alloys are increasingly favored for ship weight reduction and corrosion resistance, the nuanced relationship between wear, corrosion, and alloy traits remains insufficiently explored. The novelty of this study stems from its holistic investigation into the multifaceted interactions among sliding wear, electrochemical potentials, and corrosion mechanisms in a marine context.

## **2. MATERIALS AND EXPERIMENTS**

### **2.1. Materials**

AA5083 plates were used in this study because of their extensive use in shipbuilding applications. The chemical properties are presented in Table 1, and Table 2 shows the mechanical properties of the materials used in the study. The samples were extracted from 0.5 mm thickness plates of AA5083. Their dimensions were 23 mm x 10 mm, so the bare surface of the samples was 2.3 cm<sup>2</sup> in the corrosion and tribocorrosion tests which will be in contact with the electrolyte. A shielded electrical cable was soldered back of the samples to get electrochemical data during the corrosion and tribocorrosion tests. Afterwards, the samples were embedded into Bakelite to contact only the test surface with the electrolyte. The AA5083 samples were treated with acetone under ultrasonic cleaning for 15 min. The bare surface of the samples in Bakelite was polished with emery papers of 600–1500 mesh. The samples were polished to get a mirror-like finish with 1 μm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> solutions. Finally, they were cleaned with deionized water and ethanol and dried with hot air.



**Table 1.** Chemical composition of AA5083.

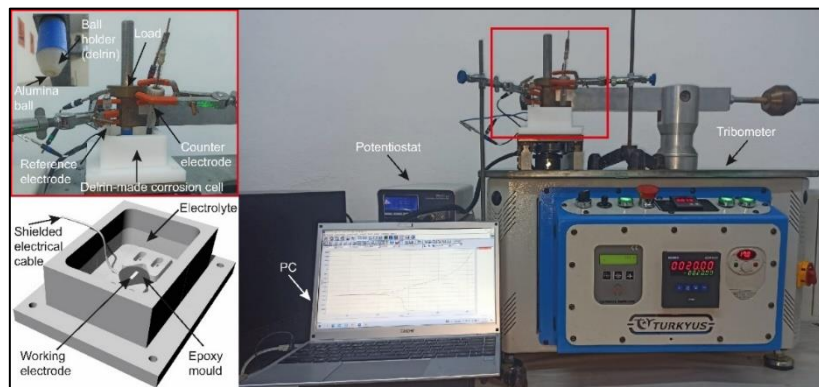
Material	Elements (Content-Wt. %) (min.-max.)									
	Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Cu	Mg	Zn	Other	Al
AA5083	0.4	0.4	0.4-1.0	0.05-0.25	0.15	0.1	4-4.9	0.25	0.15	Rem.

**Table 2.** Mechanical properties of AA5083.

Material	Mechanical Properties				
	Temper	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HB)
AA5083	H111	125-145	275-300	22	70-75

## 2.2. Experiments and Investigation Methods of Surface Morphology

The experimental setup used in the study is presented in Figure 1. A potentiostat combined with a linear reciprocating type tribometer (Turkyus-Turkey) was used to collect the electrochemical data during sliding tribocorrosion tests. The corrosion cell and ball holder were produced from Delrin to prevent unwanted corrosion effects during the tests. A 3.5% wt NaCl solution was prepared in each trial, and 100 ml electrolyte was filled into the corrosion cell.

**Figure 1.** Tribocorrosion experimental setup [42].

The sintered alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ball with a diameter of 6.35 mm and 14 GPa hardness was used as an abrasive counter body. The wear stroke was 6 mm, and a linear motion speed of 0.02 m/s during 1200 s was achieved in tribocorrosion tests. A load of 3 N was chosen to simulate the frictional force that occurs during marine structural aluminium alloy applications [13], such as ship-ice interaction or underwater robotics [14–17]. OCPs were measured for 1 hour before all tests. Ag/AgCl electrode was used as a reference electrode (RE), platinum as a counter electrode (CE), and aluminium alloy samples were used as the working electrode (WE) in the study. The Zive SP1-type analyzer test devices were used with a standard three-electrode system in the electrochemical experiments. The Zive Data Manager software was used to obtain electrochemical data. The ASTM G5-14 standard was followed to describe corrosion potential ( $E_{\text{corr}}$ ) and current density ( $I_{\text{corr}}$ ). Potentiodynamic polarization tests varied from  $-1$  V to  $+1$  V on both electrochemical and triboelectrochemical conditions at a scan rate of 1 mV/s. The cyclic polarisation scans were also conducted further to investigate the pitting corrosion susceptibility of AA5083. The anodic tribocorrosion tests were conducted at constant potentials on AA5083 samples. The anodic potentials of  $-400$  mV,  $-600$  mV and  $-900$  mV were applied according to polarisation curves concerning OCPs to understand the dissolution of the alloy. Filmetrics Profilm 3D-Germany laser scanning microscope was used to define the surface morphology of the track after tribocorrosion tests. MAIA3, XMU model SEM instrument also analyzed the detail surface characteristics with its EDS (OXFORD, X-Max model) capability.

## 3. RESULTS AND DISCUSSIONS

### 3.1. Effect of Sliding Wear on Electrochemical Potential

Fig. 2 shows the change in OCP of AA5083 in a 3.5% NaCl solution for 6000 s both corrosion and sliding wear conditions. In Fig. 2, changes in OCP were characterized in four regions. After the alloy contacted the electrolyte, the electrochemical potentials increased almost linearly during in 600 s immersion period in the first region. The potential was stabilized after that period during 3000 s, and sliding started at the end of the second period. In the third region, OCP decreased from  $-724$  mV to nearly  $-1150$  mV due to the deterioration of the passive layer. Mechanical contact caused a shift to the negative direction in electrochemical potential because of the deterioration in the protective oxide layer [43]. The deterioration due to sliding in the wear track caused the formation of an anodic region. In this case, unworn regions with their deformed passive layer behaved as cathodic regions, and a battery cell occurred because of the potential difference [20,44,45]. This result caused a negative shift in OCP

[46]. In the fourth region, as soon as the sliding is finished, the surface starts to passivate itself again. Finally, a steady state condition in potential was achieved nearly after 5000 s in Fig. 2 [47].

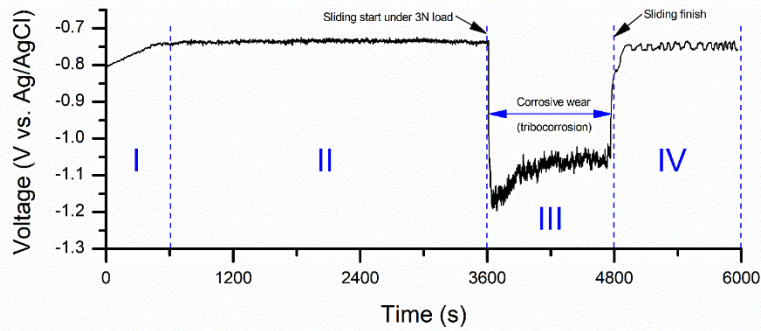


Figure 2. Variation in open circuit potential of AA5083 with time.

### 3.2. Potentiodynamic and Cyclic Polarization Scans

Fig. 3 shows potentiodynamic polarization scans employed for understanding corrosion kinetics under different electrochemical states. Tafel polarization curves were used to get the electrochemical data are shown in Table 3 for AA5083 under corrosion and 3 N sliding tribocorrosion conditions in 3.5% NaCl. The mechanical effects shifted the corrosion potential negatively in Fig. 3. The electrochemical behavior of AA5083 aluminum samples during polarization changed under sliding conditions due to the impairment of the oxide film by the load [20]. The shifting of OCP to the negative direction is a classical reaction of all passive alloys during polarization in a seawater environment [27,46,48]. The OCP of AA5083 was  $-724$  mV under corrosion conditions and decreased to  $-1175$  mV under tribocorrosion conditions. However, the corrosion rates of AA5083 increased under tribocorrosion conditions due to wear and corrosion synergism which can be induced by each other [44,49].

The combined action of mechanical wear and electrochemical processes creates an environment conducive to localized material loss, often resulting in more aggressive degradation compared to individual wear or corrosion scenarios. The observed increase in corrosion rate under sliding conditions can be attributed to the removal of the protective oxide layer, exposing fresh metal surfaces to the corrosive electrolyte [20]. This phenomenon is further compounded by the synergistic effects of mechanical wear, which not only physically removes material but also disrupts the passivating oxide layer, allowing aggressive ions to penetrate and exacerbate the corrosion process [31]. The distinct shifts in corrosion potential and corrosion rate emphasize the significance of tribocorrosion phenomena in real-world scenarios involving mechanical interaction within corrosive environments. The findings underscore the necessity of considering both mechanical and electrochemical aspects when evaluating the durability and performance of materials in practical applications, particularly in maritime environments where tribocorrosion can play a pivotal role in material degradation.

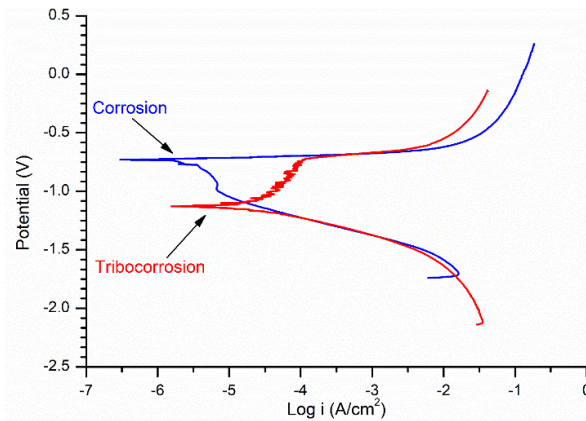


Figure 3. Potentiodynamic polarization curves.

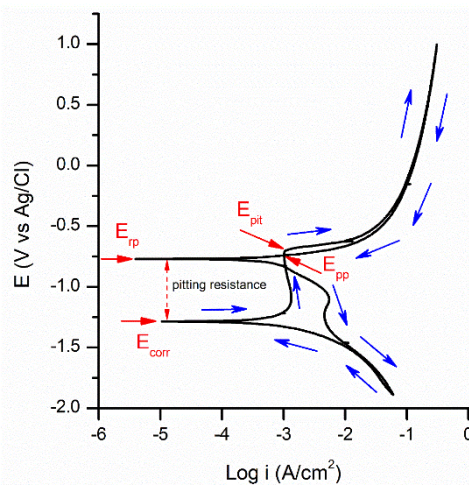
Table 3. Potentiodynamic polarization data of AA5083 under corrosion and tribocorrosion states in 3.5% NaCl.

Parameters	Corrosion	Tribocorrosion
$E_{corr}$ (mV)	-724	-1175
$\beta_a$	0.013	0.673
$\beta_c$	0.210	0.033
$I_{corr}$ (A/cm <sup>2</sup> )	3.462E-6	2.249E-5
$R_p$ (kOhm)	1.609	0.620
Corrosion rate (mmpy)	0.037	0.245

Fig. 4 presents the cyclic potentiodynamic polarization (CPDP) curves of AA5083 obtained in the study. The susceptibility of metals to localized corrosion can be evaluated in a short time by the CPDP technique [50]. It is an extended curve of potentiodynamic polarization with a reverse scan. In the forward scan of CPDP curves in Fig. 4, the beginning of the immediate increase of the corrosion current represents the pitting potential ( $E_{pit}$ ) and conforms to the initial collapse of the passive film and the following stabilization of one or more corrosion pits [31]. Several parameters complicate the susceptibility of pitting corrosion examination.

Moreover, the potential at which the development rate of the pits stops is called the repassivation potential ( $E_{rp}$ ). It indicates that the passive surface is irreparable if it is more active than the corrosion potential ( $E_{corr}$ ). During scanning, the point where the backward polarization curve intersects with the forward polarization curve is called protection potential ( $E_{pp}$ ).  $E_{pp}$  is the lowest point of the anodic current density in the backward polarization scanning. The resistance of a material to localized corrosion is assessed based on the  $E_{rp}$  measurement to the  $E_{corr}$ . If  $E_{rp}$  runs into the more noble values than the  $E_{corr}$ , the propagation of active pits is reduced or eliminated. Therefore, the passive film is stable at the potentials between the  $E_{pp}$  and  $E_{corr}$ , and no pits will start or develop. This part of the curve is named perfect passivity. Only old pits propagate at the potential between the  $E_{pit}$  and  $E_{pp}$ , and no new pits nucleate. If  $E_{corr}$  fits between  $E_{pit}$  and  $E_{rp}$ , the repassivation of pits will not occur, and preformed pits will continue to develop and reproduce [51].

Hysteresis in the CPDP curve can supply data on pitting corrosion and how readily a passive film restores itself. The difference between  $E_{pit} - E_{rp}$  (amount of hysteresis) indicates the localized corrosion amount. If the current density in the reverse scan exceeds the forward scanning curve, it will indicate pitting corrosion. Negative hysteresis emerges when the current density of the reverse scan is less than that of the forward, and positive hysteresis emerges when the current density of the reverse scan is more significant than that of the forward. A positive hysteresis loop was detected at the high potential of scan reversal, meaning the specimen experienced localized corrosion. Fig. 4 shows a slight positive hysteresis in the CPDP curves for AA5083. In Fig. 4, the  $E_{corr}$  value of AA5083 was  $-1278$  mV.  $E_{pit}$  value was about  $-700$  mV. However, there was a remarkable variation between the absolute difference of the  $E_{corr}$  and  $E_{rp}$  values of the alloys, which mainly determines the pitting corrosion resistance ( $R_{pit} = |E_{corr} - E_{rp}|$ ). The absolute difference between the  $E_{corr}$  and  $E_{rp}$  values of AA5083 indicates higher pitting corrosion resistance and the amount of localized corrosion. It should also be noted that as a result of cyclic polarization, degradation in the surface occurred, and this caused a slight change in corrosion potential.



**Figure 4.** Cyclic polarization scans for AA5083 under 3 N sliding condition in chloride solution.

### 3.3. Tribocorrosion Tests under Constant Anodic Potentials and Coefficient of Friction

Potentiostatic tribocorrosion tests were performed to examine the wear and corrosion behaviors of AA5083 at different constant potentials under 3 N sliding conditions. Anodic potentials of  $-400$  mV,  $-600$  mV and  $-900$  mV was selected and employed according to polarization curves in the experiment series. Fig. 5 represents the current trends registered at anodic potentials after sliding starts during 1200 s for AA5083 in simulated seawater. The current value is zero under the OCP since no current will flow through the circuit before the sliding starts. In Fig. 5, the current values are positive for anodic potentials and prove the anodic dissolution of the alloy [26]. The current fluctuations indicate the electrochemical activity within the wear track.

Fig. 6 shows the change in COF values during sliding potentiostatic tests. The COF values performed nearly similar behavior with time for AA5083 with an increasing trend, and the results were also compatible with previous studies [10,33]. The creation of third bodies may cause an increase in the COF with the continuous surface change due to the sliding. The fact that AA5083 has a lower hardness than the alumina ball caused it to undergo easy plastic deformation under high tribological contact.

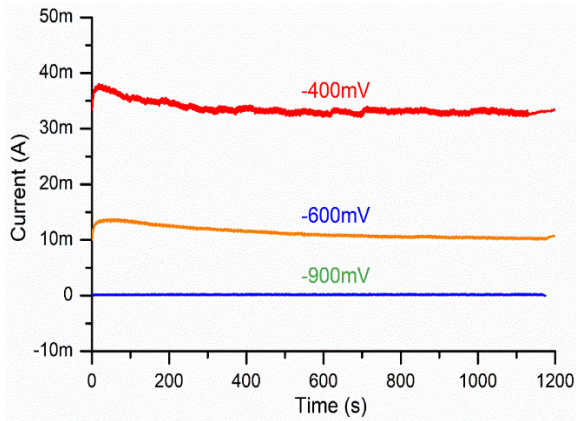


Figure 5. The current change during potentiostatic tribocorrosion tests.

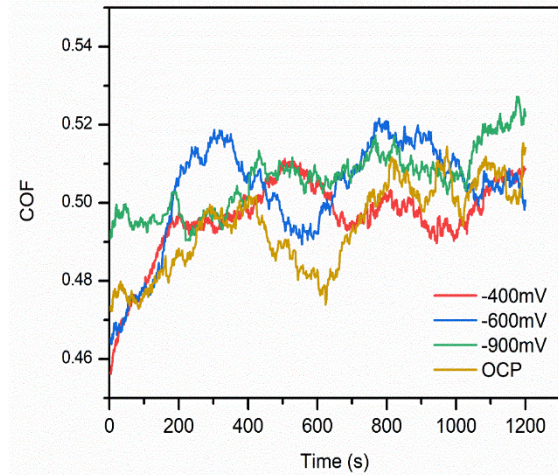


Figure 6. COF changes over time under different electrochemical sliding conditions in NaCl solution.

### 3.4. Surface Morphology Analysis and Pitting Corrosion Investigations

The surface morphology and tribocorrosion mechanism of the samples were investigated by optical and SEM after tribocorrosion tests. Optical microscope images of the wear track morphologies obtained under different triboelectrochemical conditions were presented in Fig. 7. The pits in the unworn region of anodic samples were more apparent in Fig. 7. However, the wear track morphology of the OCP sample has narrower and less deep than the abraded anodic samples. Figure 8 depicts optical micrographs of anodically polarized samples under  $-400$  mV,  $-600$  mV,  $-900$  mV and OCP. Clustered pits were identified on the  $-400$ -mV anodic sample surface in Fig. 8a, and they were nearly 80 microns in diameter under  $-600$  mV anodic potential in Fig. 8b.

SEM images of the wear tracks under different electrochemical sliding states were presented in Fig. 9. Abrasive effects were evident for all samples. Parallel scratches to the sliding direction and cracks in the wear track were pronounced. The dense pitting presence in the unworn areas, especially under anodic potentials of  $-400$  mV and  $-600$  mV, indicates galvanic coupling between wear track and non-abraded surfaces in Fig. 9. In Fig.9, It was determined that pitting corrosion does not occur in a region near the wear track (indicated by orange arrows) in the  $-400$  mV and  $-600$  mV samples. The width of this region increases when passing from  $-400$  mV to  $-600$  mV and disappears with pits in  $-900$  mV and OCP samples. This finding may be related to anodic current changes.

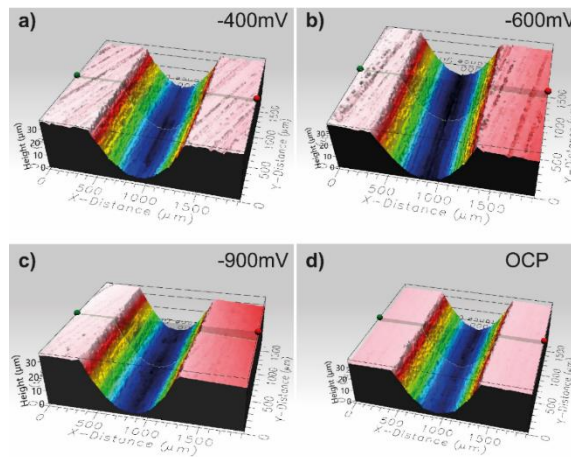


Figure 7. Wear track cross-sections after tribocorrosion tests a)  $-400$  mV, b)  $-600$  mV, c)  $-900$  mV, d) OCP.

Fig. 10 presents the EDS mapping of the OCP sample after the test. Elemental distribution in worn and unworn surfaces was identified in Fig. 10a. The rubbed area was oxidized, and Cl ions were evident on the sample surface, mainly in the wear track. This determination is significant because Cl ion concentration directly affects intergranular and pitting corrosion initiation and propagation. Small Cl ions can easily penetrate the passive protective oxide film on the aluminum alloys and degrade the oxide protection mechanism on the surface [31]. Fig. 10b also shows the map sum spectrum and validates the leakage of Cl ions and oxide formation on the sample's surface. The pits on the unworn surface are also identified and seen in Fig. 10b.

Fig. 11 represents SEM images of the wear track and unworn surfaces of AA5083 samples after the tribocorrosion test conducted under open circuit and anodic potentials. When Figure 11 was analyzed, pits were evident in the unworn regions at higher anodic potentials, especially  $-400$  mV and  $-600$  mV. In the wear tracks of the samples,

there were many parallel scratches to the sliding direction, micro-grooves, and cracks resulting from the sliding of the hard alumina counter body.

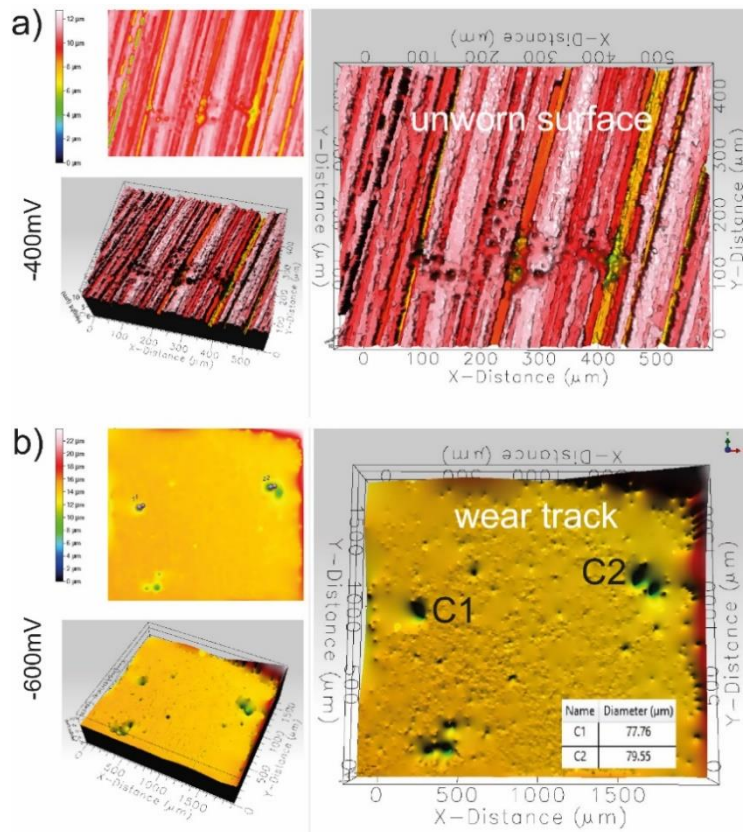


Figure 8. Optical microscope images of determined pits under anodic potentials a) -400 mV, b) -600 mV.

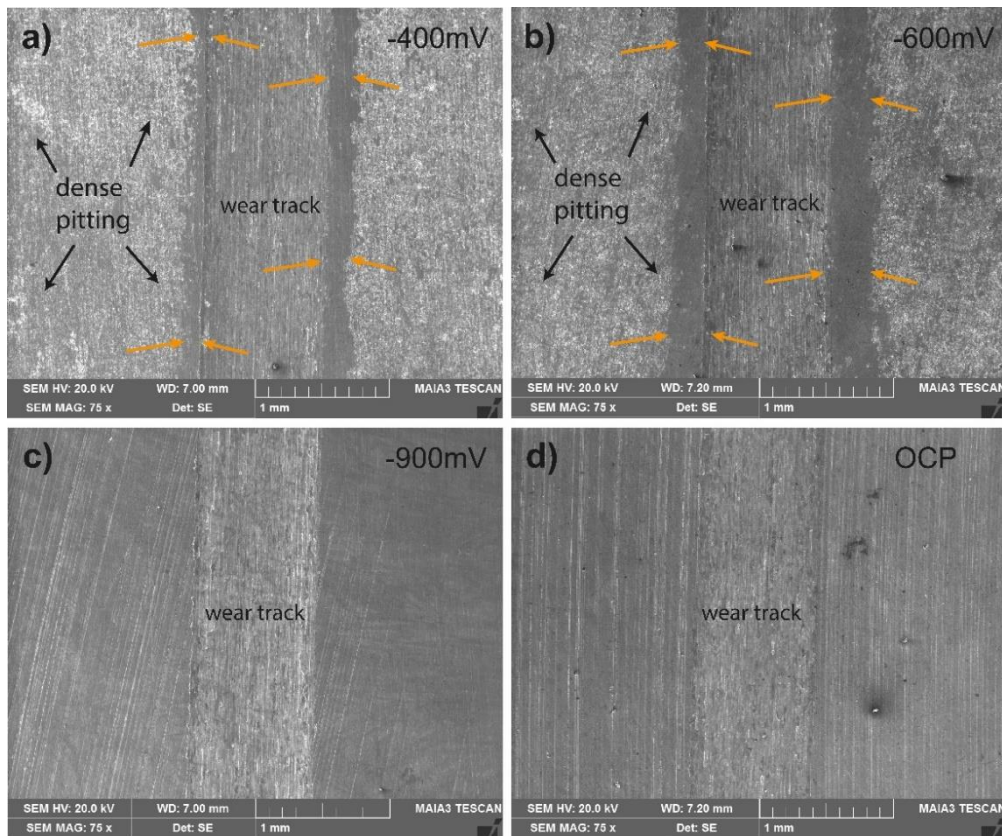


Figure 9. SEM images of wear tracks after tribocorrosion tests a) -400 mV, b) -600 mV, c) -900 mV, d) OCP.

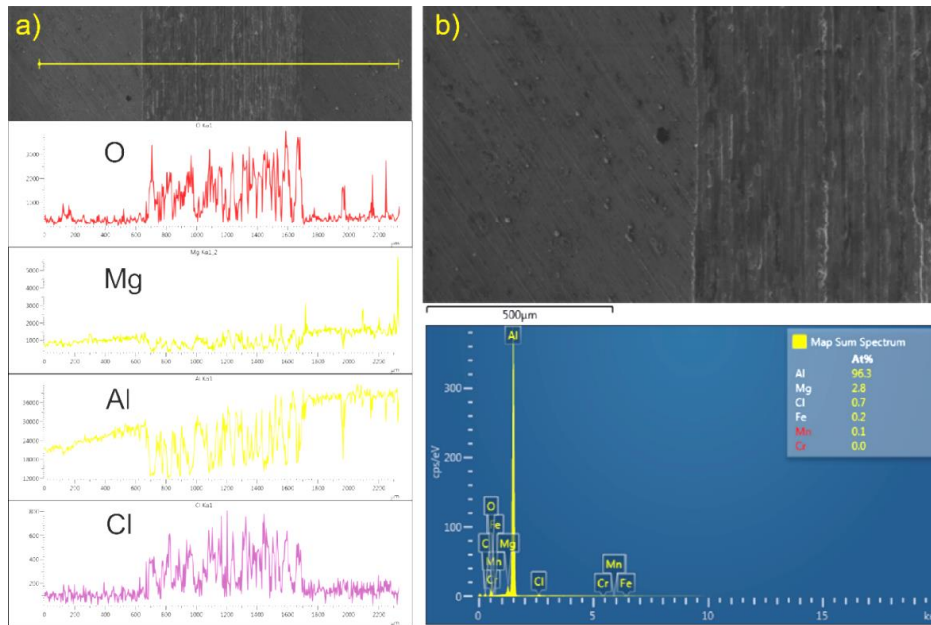


Figure 10. EDS analysis of OCP sample a) line spectrum, b) map sum spectrum.

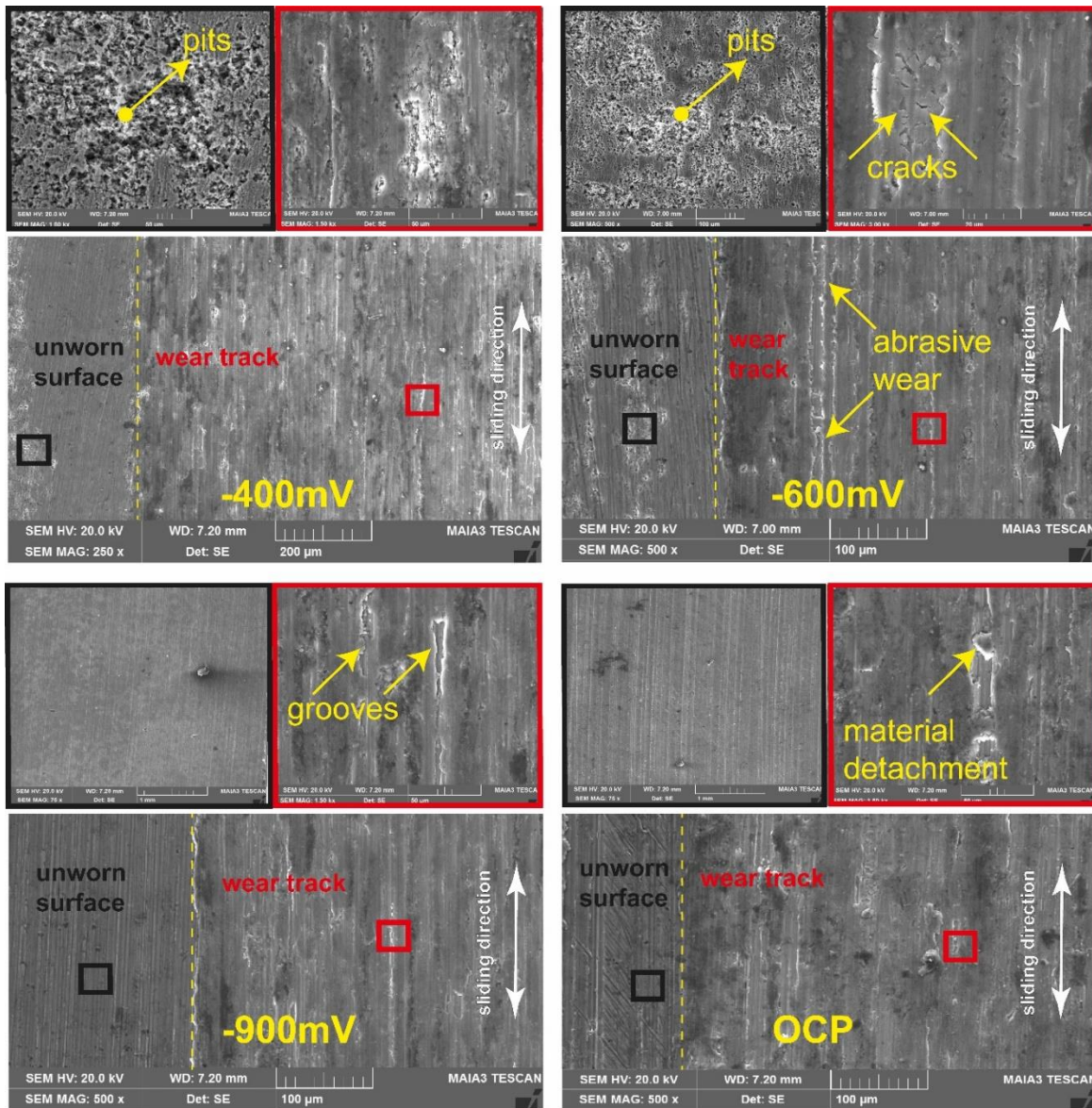


Figure 11. SEM images of worn and unworn surfaces after OCP and anodic tribocorrosion tests.

Several researchers showed an intergranular to pitting corrosion transformation mechanism under anodic potentials in marine environments [5,25,30,52]. They have reported that corrosion of the alloy first occurs at the grain boundary, and after the grain boundary is attacked, corrosion propagates into the grain as a source of crystallographic pitting [25,52,53]. This transformation mechanism is notably depicted in Fig. 12, wherein the observed half-cube mechanism is attributed to intergranular pitting corrosion, a phenomenon tightly linked to the cubic lattice structure of the alloy. Analogous observations have been reported by researchers in the realm of aluminum corrosion, thus corroborating the broader applicability of such mechanisms [52,54]. This interplay between grain boundaries, lattice structure, and the localized corrosion process highlights the intricacies inherent in alloy degradation under complex environmental and mechanical conditions. It further underscores the necessity of a nuanced understanding of corrosion mechanisms to inform effective strategies for alloy design and mitigation of degradation processes in practical applications.

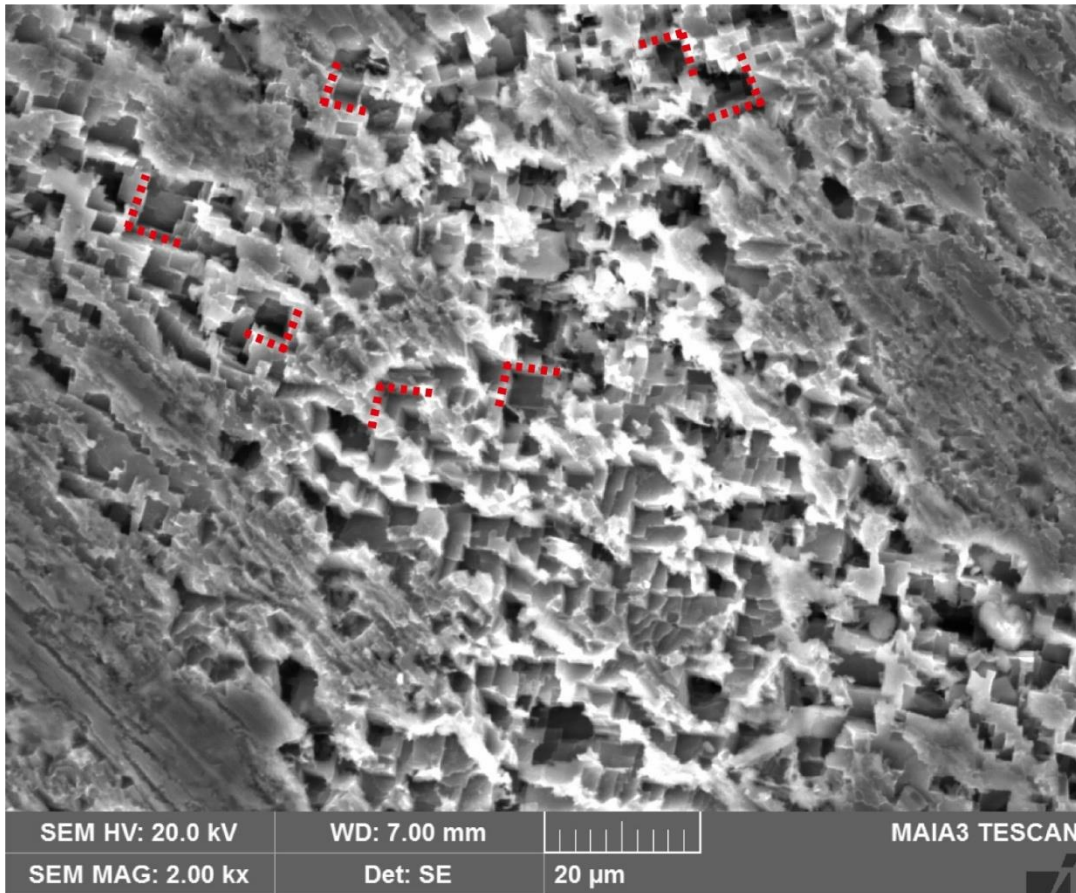


Figure 12. Half cube pitting corrosion mechanism under anodic potential of -400 mV.

#### 4. CONCLUSIONS

The study assessed the corrosion and tribocorrosion response of AA5083 under a 3 N load in 3.5% NaCl solution, observing decreased open circuit potential (OCP) due to passive oxide layer degradation during sliding tribocorrosion. Enhanced wear track features, including grooves, parallel scratches, and transverse cracks, were evident. Alloying elements and particularly Cl ions exerted a decisive influence on corrosion behavior. The study revealed that the corrosion rate of AA5083 exhibited an approximate seven-fold increase under sliding tribocorrosion conditions compared to corrosion conditions at open circuit potential. The study also identified an intergranular pitting corrosion mechanism resembling the half-cube mechanism of pure aluminum. As aluminum alloys gain prominence for their weight-saving and corrosion-resistant attributes in maritime contexts, comprehending the intricate interplay of wear, electrochemistry, and corrosion mechanisms becomes pivotal. This study's revelation of AA5083's vulnerability to pitting and intergranular stress corrosion, attributed to alloy composition, serves as a guide for optimizing alloy designs to bolster mechanical robustness and corrosion resistance. By addressing this critical knowledge gap through a comprehensive exploration of wear-corrosion interactions in marine environments, the study facilitates the formulation of effective strategies aimed at enhancing material performance, durability, and sustainability in the maritime domain. These findings have the potential to guide the shipbuilding sector by offering vital insights into the wear-corrosion dynamics of AA5083 under anodic polarization and sliding wear in seawater.

## Author Contributions

All stages of the study were done by the author.

## Conflict of Interest

The author declares that there is no conflict of interest.

## KAYNAKÇA

- [1] T. Lamb "Concepts for Ferry Propulsion and Emissions Performance Improvement," *J. Sh. Prod. Des.*, vol. 31, no. 03, pp. 170–180, 2015.
- [2] M.O.M. Segaletsho, V. Msomi, and V. Moni "Corrosion behaviour of friction stir welded dissimilar joints produced from AA5083 and other alloys of aluminium: A critical review," *Mater Today Proc.*, vol. 56, pp. 1696–1701, 2022.
- [3] C. Wei, G. Wang, M. Cridland, D.L. Olson, and S. Liu "Corrosion protection of ships", Third Edit. Elsevier Inc., 2018.
- [4] B. Ertuğ and C. Kumruoğlu "5083 type Al-Mg and 6082 type Al-Mg-Si alloys for ship building," *Am. J. Eng. Res.*, vol. 4, no. 3, pp. 146–150, 2015.
- [5] J. Liu, M.J. Tan, A.E. W. Jarfors, Y. Aue-u-lan, and S. Castagne "Formability in AA5083 and AA6061 alloys for light weight applications," *Mater. Des.*, vol. 31, no. SUPPL. 1, pp. S66–S70, 2010.
- [6] C. Vargel, *Corrosion of Aluminium*. Elsevier, 2004.
- [7] K.E. Perumal, "Handbook of Environmental Degradation of Materials", Elsevier, 2012.
- [8] S. Gupta, D. Singh, A. Yadav, S. Jain, and B. Pratap "A comparative study of 5083 aluminium alloy and 316L stainless steel for shipbuilding material," *Mater Today Proc.*, vol. 28, pp. 2358–2363, 2020.
- [9] T.S. Um and M.II Roh "Optimal dimension design of a hatch cover for lightening a bulk carrier," *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, vol. 7, no. 2, pp. 270–287, 2015.
- [10] Z. Li, H. Yu, and D. Sun "The tribocorrosion mechanism of aluminum alloy 7075-T6 in the deep ocean," *Corros. Sci.*, vol. 183, no. August 2020, p. 109306, 2021.
- [11] E.A. Gulbransen and W.S. Wyong "Thin oxide films on aluminum," *J. Phys. Colloid Chem.*, vol. 51, no. 5, pp. 1087–1103, 1947.
- [12] E.P. Georgiou et al. "Effect of cathodic hydrogen charging on the wear behavior of 5754 Al alloy," *Wear*, vol. 390–391, pp. 295–301, 2017.
- [13] H. Wu et al. "Influences of Load and Microstructure on Tribocorrosion Behaviour of High Strength Hull Steel in Saline Solution," *Tribol. Lett.*, vol. 67, no. 4, pp. 1–12, 2019.
- [14] I. Kubat, M. Sayed, and A. Collins "Modeling of Pressured Ice Interaction with Ships," *SNAME 9th International Conference and Exhibition on Performance of Ships and Structures in Ice*. p. D021S004R002, Sep. 20, 2010.
- [15] J.H. Kim and Y. Kim "Numerical simulation on the ice-induced fatigue damage of ship structural members in broken ice fields," *Mar. Struct.*, vol. 66, no. March, pp. 83–105, 2019.
- [16] M. Kotilainen, J. Vanhatalo, M. Suominen, and P. Kujala "Predicting ice-induced load amplitudes on ship bow conditional on ice thickness and ship speed in the Baltic Sea," *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 135, pp. 116–126, 2017.
- [17] F. Li, M. Körgesaar, P. Kujala, and F. Goerlandt "Finite element based meta-modeling of ship-ice interaction at shoulder and midship areas for ship performance simulation," *Mar. Struct.*, vol. 71, no. August 2019, 2020.
- [18] N.R. Ramesh and V.S.S. Kumar "Experimental erosion-corrosion analysis of friction stir welding of AA 5083 and AA 6061 for sub-sea applications," *Appl. Ocean Res.*, vol. 98, no. September 2019.
- [19] I.A. Kartsonakis, D.A. Dragatogiannis, E.P. Koumoulos, A. Karantonis, and C.A. Charitidis, "Corrosion behaviour of dissimilar friction stir welded aluminium alloys reinforced with nanoadditives," *Mater. Des.*, vol. 102, pp. 56–67, 2016.
- [20] A C. Vieira, L.A. Rocha, N. Papageorgiou, and S. Mischler "Mechanical and electrochemical deterioration mechanisms in the tribocorrosion of Al alloys in NaCl and in NaNO<sub>3</sub> solutions," *Corros. Sci.*, vol. 54, no. 1, pp. 26–35, 2012.
- [21] R.J.K. Wood "Marine wear and tribocorrosion," *Wear*, vol. 376–377, pp. 893–910, 2017.
- [22] K. Wang, Y. Wang, X. Yue, and W. Cai "Multiphysics modeling and uncertainty quantification of tribocorrosion in aluminum alloys," *Corros. Sci.*, vol. 178, no. November 2020, p. 109095, 2021.
- [23] V.I. Pokhmurskii, I.M. Zin, V.A. Vynar, and L.M. Bily "Contradictory effect of chromate inhibitor on corrosive wear of aluminium alloy," *Corros. Sci.*, vol. 53, no. 3, pp. 904–908, 2011.
- [24] B. Grgur and L. Marunčić "The influence of chloride anions on the pitting corrosion of aluminum alloy en 46000," *Zast. Mater.*, vol. 59, no. 2, pp. 243–248, 2018.
- [25] J. Ressa, U. Martin, J. Bosch, R.K. Gupta, and D.M. Bastidas "Intergranular to intragranular pitting corrosion transition mechanism of sensitized aa5083 at 150°C," *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 8, pp. 1–21, 2020.
- [26] Y.J. Yang and S.J. Kim "Electrochemical characteristics of aluminum alloys in sea water for marine environment," *Acta Phys. Pol. A*, vol. 135, no. 5, pp. 1005–1011, 2019.
- [27] H. Ezuber, A. El-Houd, and F. El-Shawesh "A study on the corrosion behavior of aluminum alloys in seawater," *Mater. Des.*, vol. 29, no. 4, pp. 801–805, 2008.
- [28] G. Meyer-Rodenbeck, T. Hurd, and A. Ball "On the abrasive-corrosive wear of aluminium alloys," *Wear*, vol. 154, no. 2, pp. 305–317, 1992.
- [29] C.N. Panagopoulos and E.P. Georgiou, "The effect



- of hydrogen charging on the mechanical behaviour of 5083 wrought aluminum alloy,” *Corros. Sci.*, vol. 49, no. 12, pp. 4443–4451, 2007.
- [30] L. Tan and T.R. Allen “Effect of thermomechanical treatment on the corrosion of AA5083,” *Corros. Sci.*, vol. 52, no. 2, pp. 548–554, 2010.
- [31] S. Alkan “Evaluation of pitting susceptibility and tribocorrosion behaviors of AISI 304 stainless steel in marine environments,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.*, 2022.
- [32] S. Alkan and M.S. Gök “Influence of plasma nitriding pre-treatment on the corrosion and tribocorrosion behaviours of PVD CrN, TiN and AlTiN coated AISI 4140 steel in seawater,” *Lubr. Sci.*, vol. 34, no. 2, pp. 67–83, 2022.
- [33] H. Mraied and W. Cai “The effects of Mn concentration on the tribocorrosion resistance of Al – Mn alloys,” *Wear*, vol. 380–381, pp. 191–202, 2017.
- [34] A. International “Corrosion: Environments and Industries,” in *ASM Handbook*, ASM International, 2006.
- [35] K. Shimizu, G.M. Brown, K. Kobayashi, P. Skeldon, G.E. Thompson, and G.C. Wood “The early stages of high temperature oxidation of an Al-0.5 wt% Mg alloy,” *Corros. Sci.*, vol. 40, no. 4–5, pp. 557–575, 1998.
- [36] O.F. Hosseinabadi and M. R. Khedmati “A review on ultimate strength of aluminium structural elements and systems for marine applications,” *Ocean Eng.*, vol. 232, no. April, p. 109153, Jul. 2021.
- [37] K.R. Chasse, A.J. Scardino, and G.W. Swain “Corrosion and fouling study of copper-based antifouling coatings on 5083 aluminum alloy,” *Prog. Org. Coatings*, vol. 141, no. August 2019, p. 105555, 2020.
- [38] D. Kumar, J. Jain, and N.N. Gosvami “Macroscale to Nanoscale Tribology of Magnesium-Based Alloys: A Review,” *Tribol. Lett.*, vol. 70, no. 1, pp. 1–29, 2022.
- [39] Y. Tzeng, R. Chen, and S. Lee “Nondestructive tests on the effect of Mg content on the corrosion and mechanical properties of 5000 series aluminum alloys,” *Mater. Chem. Phys.*, vol. 259, no. September 2020, p. 124202, 2021.
- [40] H. Kamoutsi, G.N. Haidemenopoulos, V. Bontozoglou, and S. Pantelakis “Corrosion-induced hydrogen embrittlement in aluminum alloy 2024,” *Corros. Sci.*, vol. 48, no. 5, pp. 1209–1224, 2006.
- [41] M. Szkodo, A. Stanisławska, A. Komarov, and Ł. Bolewski “Effect of MAO coatings on cavitation erosion and tribological properties of 5056 and 7075 aluminum alloys,” *Wear*, vol. 474–475, no. September 2020, 2021.
- [42] S. Alkan “Enhancement of Marine Corrosion and Tribocorrosion Resistance of Offshore Mooring Chain Steel By Aluminizing Process,” *Brodogradnja*, vol. 73, no. 4, pp. 131–159, 2022.
- [43] N. Papageorgiou and S. Mischler “Electrochemical simulation of the current and potential response in sliding tribocorrosion,” *Tribol. Lett.*, vol. 48, no. 3, pp. 271–283, 2012.
- [44] Y.H. Liew, C. Örnek, J. Pan, D. Thierry, S. Wijesinghe, and D.J. Blackwood “Towards understanding micro-galvanic activities in localised corrosion of AA2099 aluminium alloy,” *Electrochim. Acta*, vol. 392, p. 139005, 2021.
- [45] K.C. Tekin and U. Malayoglu “Assessing the tribocorrosion performance of three different nickel-based superalloys,” *Tribol. Lett.*, vol. 37, no. 3, pp. 563–572, 2010.
- [46] S. Alkan and M.S. Gök “Effect of sliding wear and electrochemical potential on tribocorrosion behaviour of AISI 316 stainless steel in seawater,” *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 24, no. 2, pp. 524–532, 2021.
- [47] J. Zahavi and M. Metzger “Electron Microscope Study of Breakdown and Repair of Anodic Films on Aluminum,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 119, no. 11, p. 1479, 1972.
- [48] A. Bidiville, M. Favero, P. Stadelmann, and S. Mischler “Influence of Applied Potential on the Mechanical Response of Stainless Steel During Tribocorrosion,” *ECS Meet. Abstr.*, vol. MA2007-02, no. 13, pp. 853–853, 2007.
- [49] B. Zhang, J. Wang, and F. Yan “Load-dependent tribocorrosion behaviour of nickel-aluminium bronze in artificial seawater,” *Corros. Sci.*, vol. 131, no. December 2016, pp. 252–263, 2018.
- [50] S. Esmailzadeh, M. Aliofkhaezai, and H. Sarlak “Interpretation of Cyclic Potentiodynamic Polarization Test Results for Study of Corrosion Behavior of Metals: A Review,” *Prot. Met. Phys. Chem. Surfaces*, vol. 54, no. 5, pp. 976–989, 2018.
- [51] W.S. Tait “Electrochemical corrosion basics,” *Handb. Environ. Degrad. Mater. Third Ed.*, pp. 97–115, 2018.
- [52] X. Zhang, X. Zhou, T. Hashimoto, and B. Liu “Localized corrosion in AA2024-T351 aluminium alloy: Transition from intergranular corrosion to crystallographic pitting,” *Mater. Charact.*, vol. 130, no. May, pp. 230–236, 2017.
- [53] M. Chen, Y. Deng, J. Tang, S. Fan, and X. Zhang “A study of the crystallographic pitting behavior of Al-0.54Mg-0.66Si aluminum alloy in acidic chloride solutions,” *Mater. Charact.*, vol. 148, no. December 2018, pp. 259–265, 2019.
- [54] K. Jafarzadeh, T. Shahrabi, S.M.M. Hadavi, and M. G. Hosseini “Morphological characterization of AA5083-H321 aluminum alloy corrosion in NaCl solution under hydrodynamic conditions,” *Anti-Corrosion Methods Mater.*, vol. 56, no. 1, pp. 35–42, 2009.



## Sarıcakaya (Eskişehir) Granitoidindeki Pegmatitlerin Kökeni ve Seramik Hammadde Potansiyelleri

### Nature and Ceramic Raw Material Potentials of Pegmatites within the Sarıcakaya (Eskişehir) Granitoid

<sup>1</sup>Bahattin GÜLLÜ , <sup>2</sup>Hacer BİLGİLİOĞLU 

<sup>1,2</sup>Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Aksaray, Türkiye

<sup>1</sup>bgullu@aksaray.edu.tr, <sup>2</sup>hcanbas@aksaray.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 20 August 2023

Accepted : 25 September 2023

##### Keywords:

Sarıcakaya Granitoid,  
Pegmatite, Pegmatitic-  
pneumatolytic Phase,  
Confocal Raman  
Spectroscopy

#### ABSTRACT

The pegmatites within Sarıcakaya (Eskişehir) Granitoid are mainly composed of plagioclase, orthoclase, quartz, biotite, ±garnet, ±muscovite, ±epidote minerals. According to Confocal Raman Spectroscopy studies, plagioclase minerals are albite-oligoclase, and garnets are mostly in spessartine composition. Pegmatites, which have the potential to be usable as ceramic raw materials, are in sharp contact with the host rock and show sericitization and argillization. The A/NK (mol%) ratio of pegmatites ranges from 0.96-1.79 (avr. 1.32), A/CNK (mol%) ratios range between 0.82-1.55 (avr. 1.07), reflecting the metalumin to peralumin character. Zircon and apatite saturation temperatures which were calculated according to whole rock geochemical analysis show that the average temperature of the magma forming the pegmatites varies in the range of 678.7-766.7°C. The pegmatites, in which the effects of crustal contamination are observed in the spider diagrams normalized according to ORG and PM, are thought to be the crystallized magmatic units of the magma forming the Sarıcakaya granitoid in the pegmatitic-pneumatolytic phase.

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 20 Ağustos 2023

Kabul : 25 Eylül 2023

##### Anahtar Kelimeler:

Sarıcakaya Granitoid,  
Pegmatit, Pegmatitik-  
pnömatolitik Evre, Konfokal  
Raman Spektroskopisi

#### ÖZET

Sarıcakaya (Eskişehir) Granitoidindeki pegmatitler başlıca plajiyoklaz, ortoklaz, kuvars, biyotit, ±granat, ±muskovit, ±epidot minerallerinden oluşmaktadır. Konfokal raman spektroskopisi çalışmalarında plajiyoklaz minerallerinin albit-oligoklaz, granatların ise çoğunlukla spesartin bileşimli oldukları belirlenmiştir. Seramik hammadde olarak kullanılabilme potansiyeline sahip pegmatitler ana kaya ile keskin dokanaklı olup, serizitleşme ve killeşme gösterirler. Pegmatitlerin A/NK (mol%) oranı 0.96-1.79 (ortalama 1.32), A/CNK (mol%) oranları 0.82-1.55 (ortalama:1.07) arasında değişmekte olup metalümin-peralümin karakteri yansıtmaktadır. Tüm kaya jeokimyasal analiz sonuçlarına göre hesaplanan zirkon ve apatit doygunluk sıcaklıkları pegmatitleri oluşturan magmanın ortalama sıcaklığının 678.7-766.7°C aralığında değiştiğini göstermektedir. ORG'ye ve PM'ye göre normalize edilen örümcek diyagramında kabuksal kirlenmenin etkilerinin gözlemlendiği pegmatitlerin, Sarıcakaya Granitoidini oluşturan magmanın pegmatitik-pnömatolitik evredeki kristallenmiş magmatik birimleri olduğu değerlendirilmiştir.

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

## 1. GİRİŞ

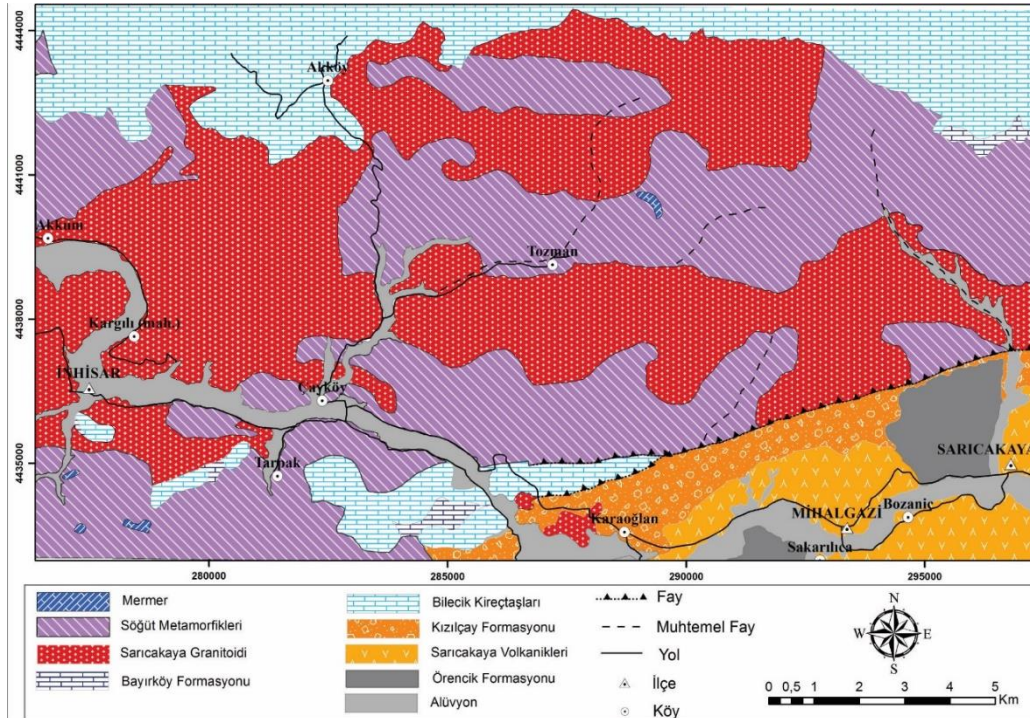
Pegmatitik kayalar genel olarak feldispat, kuvars veya mika kristalleri içeren çok iri taneli kristalin kayalardır. Bu özellikleri ile içerisinde buldukları ana kayadan kolaylıkla ayırt edilebilirler. Bu da onların gerek bilimsel olarak oluşumlarının araştırılmasını, gerekse ekonomik olarak kullanımını ön plana çıkarabilmektedir. Bu felsik kayalar içermiş oldukları bazı stratejik metaller [1] ve bazı nadir elementlerden (Nb, Ta, Be veya Li gibi) kaynaklanan olağanüstü mineralleri ile hem mineralogların hem de gemologların dikkatlerini çekmiştir [2]. Pegmatit kavramı ve mineralojik bileşimleri [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17], jeokimyasal özellikleri-kökenleri [18, 19, 20, 21, 22], türleri-sınıflandırmaları [23, 24, 25, 2] ve seramik hammaddesi olarak kullanılabilirliklerini [26, 27, 28, 29, 1, 30] ortaya koyan çok sayıda bilimsel çalışma mevcuttur. Ülkemizde granitik kayalar ile ilişkili pegmatitlerin feldispat hammaddesi olarak ele alındığı ve bunların zenginleştirilmesi proseslerinin tartışıldığı birçok çalışma [31, 32, 33, 34, 35, 36] olsa da, özellikle granitik-pegmatitlerin petrokimyasal özellikleri ve içerisinde bulunduğu kaya ile kökensel ilişkilerini irdeleyen çalışmalar [37, 38, 39] oldukça sınırlıdır.

Bu makale başlıca iki amaca yönelik olarak hazırlanmıştır: Birincisi, Kuzeybatı Anadolu'da Karbonifer yaşlı [40] Sarıcakaya Granitoidi içerisindeki pegmatitlerin mineralojik, petrografik ve jeokimyasal özelliklerinin ortaya çıkarılmasıdır. İkinci amacı ise, çalışma alanındaki ileri derece ayrılmış pegmatit damarlarının seramik hammaddesi olabilme potansiyelini değerlendirmektir.

## 2. GENEL JEOLojİ

Türkiye'nin önemli tektonik birliklerinden olan Pontidler ve Anatolidlerin istif özelliklerinin en iyi gözlemlendiği önemli lokasyonlardan biri de Kuzeybatı Anadolu bölgesidir. Bölgenin Pontidlerdeki bölümünde Sakarya zonu, Anatolidler kısmında ise Tavşanlı ve Afyon tektonik zonları ile temsil edilen üç büyük metamorfik masif yer almaktadır [41, 42]. Masif içerisindeki kayalar farklı metamorfizma sürecinde gelişmiş (yeşilşist, hornfels ve amfibolit fasiyesi) fillit, şist, gnays, amfibolit ve mermerlerle temsil edilirler. [43, 44].

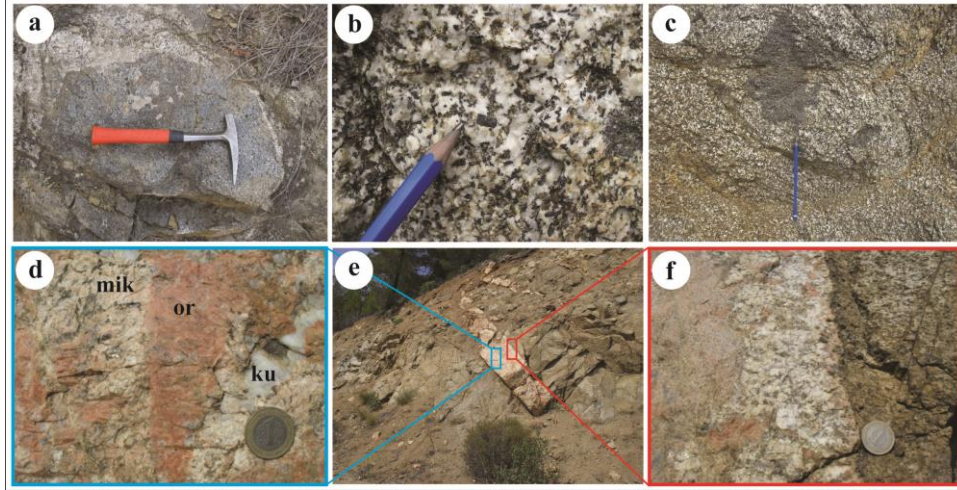
Bölgedeki en yaşlı birimi Paleozoyik yaşlı Söğüt metamorfikleri [45] oluşturur. Söğüt metamorfikleri Karbonifer yaşlı Sarıcakaya Granitoidi tarafından kesilmektedir. Metamorfik birimlerin üzerinde ise Jura yaşlı kumtaşı, konglomera, kireçtaşı ve şeyllerin hakim litolojii oluşturduğu Bayırköy Formasyonu ve Bilecik Kireçtaşları gelmektedir. Bilecik Kireçtaşları, Dağköplü Melanjı olarak adlandırılan ve Neo-Tetis'in kuzey kolunu temsil eden İzmir-Ankara-Erzincan suture zonu kayaları (ofiyolitik melanj, peridotit, serpantin), kumtaşı, metamorfik ve volkanik kaya topluluklarından oluşan Geç Kretase yaşlı birim tarafından örtülmektedir. Paleosen sonlarında doğru ise konglomera, çamurtaşı ardalanmasının oluşturduğu karasal Kızılçay Formasyonu çökelmiştir. Çalışma alanının en genç birimlerini ise Pliyosen - Kuvaterner yaşlı güncel çökeller ve alüvyonlar oluşturmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Çalışma alanı jeoloji haritası ([40]'dan değiştirilerek alınmıştır).

Gabro'dan granodiyorite kadar değişen farklı kaya gruplarını bünyesinde barındıran Sarıcakaya Granitoidinde kuzeyden güneye doğru gidildikçe kayalardaki açık-koyu renkli mineral oranı ve büyüklükleri oldukça dikkat

çekicidir. Sarıcakaya Granitoyidi gabro, diyoritik-gabro, diyorit ve granodiyorit aralığında değişen kaya topluluklarından oluşmaktadır (Şekil 2a-b). Holokristalin tanesal dokulu Sarıcakaya Granitoidinin granodiyorit bileşimli kayalarında boyutları 50 cm'ye varan magmatik anklavlar gözlenmektedir (Şekil 2c). Arenalaşmanın yoğun olarak gözleendiği kısımlarda pegmatit, apilit ve kuvars damarları ile çeşitli doğrultularda kesilmektedir (Şekil 2e). Pegmatit damarları pembe, beyaz renkli olup, kalınlıkları 30-100 cm aralığında GB ve KB'ya eğimlidirler. İri K-feldispat ve kuvars (0.5-5 cm) mineralleriyle (Şekil 2d) karakterize olan pegmatitler ana kaya ile keskin dokanaklı (Şekil 2f) olarak gözlenirler. Sarıcakaya Granitoyidi içerisindeki granit - alkali feldispat granit bileşimine sahip kayalarda yer yer serizitleşme ve killeşme türü alterasyonlar göze çarpmaktadır. Porfirik dokunun gözleendiği pegmatitlerde ana mineralleri, kuvars, plajiyoklaz (Michel Levy yöntemine göre çoğunlukla albit kısmen oligoklaz) K-feldispat (ortoklaz, mikroklin), mika mineralleri (muskovit, biyotit) oluşturmaktadır. Ayrıca kayada tali ve ikincil bileşenler olarak granat, epidot ve opak mineraller de görülmüştür. Bölgede sınırlı alanlarda gözlenen apilitler beyaz renklidir. Minaralojik olarak daha çok felsik mineral (plajiyoklaz, mikroklin, ortoklaz, kuvars gibi) içeren apilitlerde çok az oranda biyotit gibi mafik mineral varlığı da gözlenmiştir.



Şekil 2. Sarıcakaya granitoidindeki (a) gabro, (b) granodiyorit, (c) anklavların arazi görünümü ve içerisindeki (e) pegmatitlerin (d) mineral bileşimleri ile (f) ana kayayla olan dokanak ilişkisinin arazi görünümü (ort: ortoklaz, mik: mikroklin, alb: albit, ku: kuvars).

### 3. MATERYAL VE METOD

Çalışma alanından derlenen örneklerden petrografik analiz amaçlı ince kesitler hazırlanmıştır. Petrografik analizler, Aksaray Üniversitesi (ASÜ) Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Prof. Dr. Halil BAŞ Mineraloji-Petrografi araştırma laboratuvarında Leica marka polarizan mikroskopla yapılmış ve kayalardan mikrofoto çekimleri gerçekleştirilmiştir. Optik özelliklerine göre tanımlaması yapılan kaya içerisindeki minerallerin türlerinin belirlenebilmesi amacı ile Konfokal Raman Spektroskopisi (KRS) analizleri gerçekleştirilmiştir. KRS çalışmaları Ankara Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde Thermo marka DXR model Raman cihazı ile yapılmıştır. Raman spektroskopisinin temeli, güçlü bir lazer kaynağından herhangi bir örnek üzerine düşürülen ışının saçılan bölümünün ölçülmesi esasına dayanır. Örnek üzerine düşürülen lazer ışınının bir kısmı örnek tarafından absorblanırken bir kısmı da saçılacaktır [46]. Bu saçılma, ışıkla etkileşen molekülün titreşim enerji düzeyleri arasındaki enerji farkı kadar olup, örnek ile etkileşen veya saçılan ışının arasındaki dalga boyu farkı da Raman Kayması (Shift) olarak adlandırılır [47].

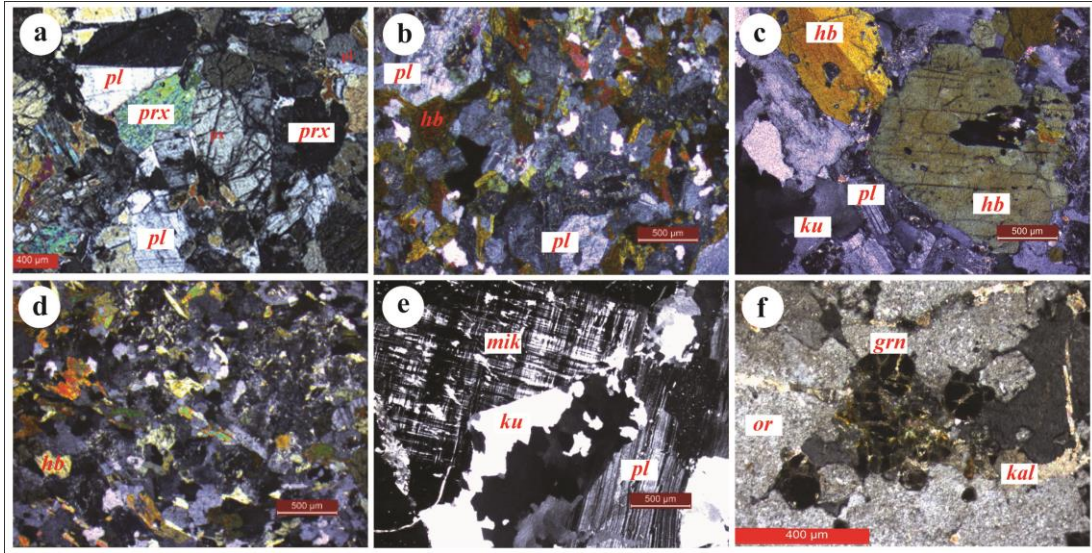
Mineralojik ve petrografik çalışmalar esnasında seçilen, alterasyonlardan en az etkilenmiş pegmatit örnekleri üzerinde Jeokimyasal analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler ASÜ Araştırma Merkezi Jeokimyasal Analiz Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Jeokimyasal analizler için örnekler öncelikle Retsch marka çeneli kırıcıdan geçirilerek tungsten karbür bilyeli öğütücüde 200 mesh boyutunda öğütülmüştür. Öğütülen örneklerden 6 g ve bağlayıcı olarak kullanılan Wachs'tan 1 g alınıp homojen bir şekilde karıştırılmıştır. Toplam 7 g'lık karışım 47 mm Die ataçmanı ile preslenerek pellet haline getirilmiştir. Elde edilen pelletlerin jeokimyasal analizi dalgaboyu dağılımlı X-Ray Floresans (WD-XRF) cihazında gerçekleştirilmiştir. Örneklere ait ateşte zayıf değerleri (Loss on Ignition) örneklerin fırında 12 saat 950 °C'deki kütle kaybı esas alınarak hesaplanmıştır.

### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 4.1. Mineraloji-Petrografi

Genel mineralojik bileşenlerini piroksen, plajiyoklaz ve  $\pm$ amfibol minerallerinin oluşturduğu Sarıcakaya Granitoidindeki gabro bileşimli kayalar eş kristalli tanesal doku özelliği göstermektedir (Şekil 3a). Gabroların bileşiminde piroksen minerallerinin azalmasıyla kaya bünyesine biyotit ile az miktarda kuvars ve feldispatın katılmasıyla kayalar diyoritik bileşim kazanmışlardır. Bölgede geniş alanlarda yayılım gösteren diyoritlerde tali

bileşen olarak titanitlerin yanısıra ikincil serizit, biyotit ve epidot mineralleri gözlenmektedir (Şekil 3b). Magmatik kütlelerin en geniş yayılımını sunan granodiyoritlerin genel mineralojik bileşimini ise plajiyoklaz, ortoklaz, kuvars, amfibol, biyotit, zirkon, apatit mineralleri oluşturmaktadır (Şekil 3c). Genel olarak holokristalen, hipidiyomorf taneseli doku özelliği gösteren granitoidlerde poiklitik ortoklaz, süngerimsi hücremsi plajiyoklaz ve lata biçimli plajiyoklaz oluşumları ile temsil edilen magma karışım dokuları da gözlenmektedir. Granodiyoritler içerisinde rengi ve dokusal özelliğiyle ana kayadan kolaylıkla ayrılan mafik magmatik anklavlar gözlenmektedir. Koyu renkli olarak gözlenen anklavlar, daha ince taneli olup, ana kayadan keskin dokanakla ayrılırlar. Polarizan mikroskop altında mafik magmatik anklavlar holokristalin hipidiyomorf taneseli/porfirik, doku özelliği göstermektedir (Şekil 3d). Anklavların kristal boyutları anakaya oranla daha ince tanelidir. Mikrodiyorit/mikrodiyoritporfir bileşim sergileyen anklavlarda ana bileşeni plajiyoklaz, amfibol, biyotit ve az miktarda ortoklaz mineralleri oluşturur. Modal mineralojik analiz sonuçlarına göre (baskın olarak) alkali feldispat granit ve (daha az) granit bileşim sergileyen pegmatitler ise K-feldispat (ortoklaz, mikroklin, albit) ve kuvars ana bileşenine eşlik eden granat, opak mineral ve apatit tali bileşenlerinden oluşurlar. Orta-iri kristalli pegmatitler holokristalin hipidiyomorf taneseli/porfirik dokuludurlar (Şekil 3e-f). Kayada baskın minerali feldispatlar oluşturmaktadır. Polarizan mikroskopta ortoklaz mineralleri pertitik doku özelliği ile karakterize olurken mikroklinlerde ise kafes ikizi karakteristiktir (Şekil 3e). Kayada kuvars minerali ile k-feldispat ve/veya plajiyoklaz mineralleri arasında gelişen implikasyon dokuları gözlenmektedir. Grafik ve mirmekitik doku olarak tanımlanan bu dokular sulu bir sıvı fazın varlığı ile bir silikat eriyiğinden kuvars ve feldispatların eş zamanlı kristalleşmesine işaret edebilmektedir. Yerleşimi esnasında ana kaya ile sıcaklık farkından dolayı ana kaya ile keskin dokanak özelliği sergileyen pegmatitlerde yer yer serizitleşme, killeşme ve karbonatlaşma türü alterasyonlar göze çarpmaktadır.



**Şekil 3.** Sarıcakaya Granitoidini oluşturan (a) gabro, (b) diyorit, (c) granodiyorit bileşimli anakayaların polarizan mikroskop altında görünüşleri; (d) magmatikler içindeki anklavların fotomikrografı; mikroklin minerallerinde gözlenen kafes yapısı, (e) pegmatitlerde gözlenen grafik doku, (d) pegmatitlerin polarizan mikroskop altında genel doku özellikleri (e) pegmatitlerde gözlenen karbonatlaşma-serizitleşme türü alterasyonlar ve pegmatitlerde gözlenen granat minerallerinin mikrofotografı (prx: piroksen, pl: plajiyoklaz, hb: hornblend, mik: mikroklin, ku: kuvars, or: ortoklaz, grn: granat).

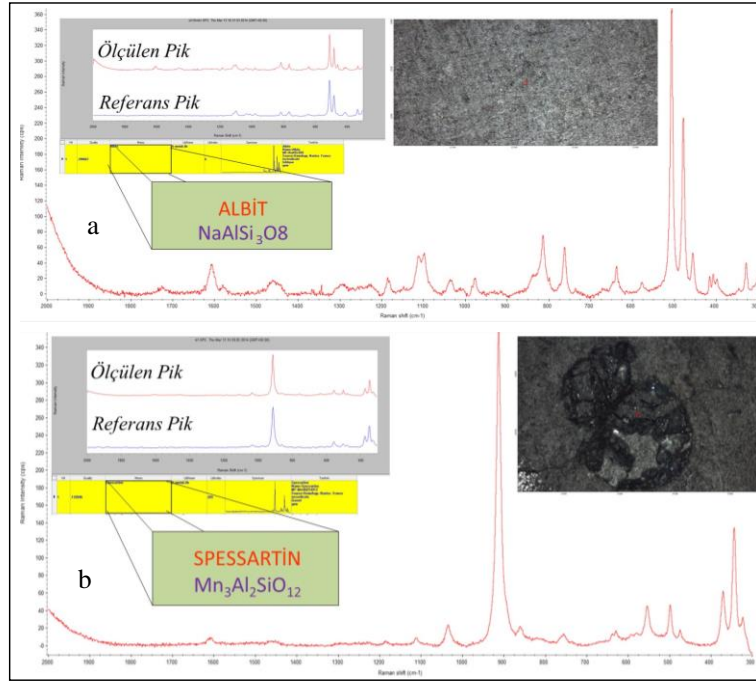
#### 4.2. Konfokal Raman Spektroskopi Çalışmaları

Minerallerin sahip oldukları karakteristik Raman Kayma (shift) değerleri onların parmak izleri gibidir ve minerallerin ayırt edilmesinde etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Minerallere ait Raman spektrumları Spectral ID programı kullanılarak değerlendirilmiştir. Pegmatitlerde gözlenen plajiyoklazların albit bileşimli olduğu belirlenmiştir (Şekil 4a). Ayrıca granatlar da baskın olarak  $919.87\text{ cm}^{-1}$ ,  $550.97\text{ cm}^{-1}$ ,  $495.07\text{ cm}^{-1}$ ,  $369.29\text{ cm}^{-1}$ ,  $342.62\text{ cm}^{-1}$ ,  $213.03\text{ cm}^{-1}$ ,  $162.21\text{ cm}^{-1}$  ve  $140.62\text{ cm}^{-1}$  aralığında gözlenen raman pikleri granatların spesartin türünde olduğunu göstermektedir (Şekil 4b).

#### 4.3. Jeokimya

Çalışma alanında, Sarıcakaya Granitoidini oluşturan kaya gruplarından, içerdikleri anklavlardan ve pegmatit örneklerinden tüm kaya jeokimyasal analizleri gerçekleştirilmiştir (Tablo 1). Toplam alkali-silika diyagramında Sarıcakaya granitoidinin ana kütlelerine ait kayalar gabrodan granodiyorite kadar değişen kompozisyonlar sunmaktadır. Magmatik kütledeki pegmatitler ise granit alanında yer alırken, ana kaya içerisinde mafik mikrogranüler anklavlar da mikro-diyorit/diyoritporfir bileşimindedir. Jeokimyasal adlama diyagramındaki adlamalar petrografik tanımlamaları desteklemektedir (Şekil 5a). Bölgedeki kayaları oluşturan magmaların

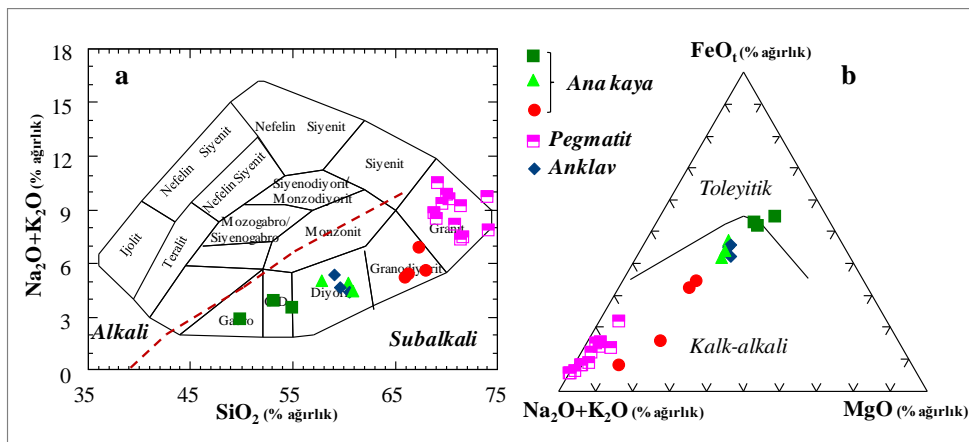
karakterini ortaya koymak amacı ile çizilen toplam alkaliye karşı silika diyagramında kayalar sub-alkalen karakter sunarken AFM diyagramında ise toleyitikten kalkalkaliye geçişlidirler (Şekil 5b).



Şekil 4. Pegmatitlerdeki (a) plajiyoklaz ve (b) granat minerallerine ait raman spektrumları ve karşılaştırılması.

Alüminyum doygunluk indekslerine bakıldığında bölgedeki kayaların tamamının metalümin karakterli oldukları görülmektedir. Ancak pegmatitlere doğru kısmen peralümin karakterin etkili olduğu söylenebilir (Şekil 6a).  $K_2O-Na_2O$  diyagramında bölgedeki kaya gruplarından granodiyoritler hafif Na serisi yönelim sergilese de baskın K serisini karakterize ettikleri açıkça görülmektedir. Kaya gruplarındaki bu K yönelimi  $K_2O-SiO_2$  diyagramında orta ve yüksek K'lu kalkalkalen dağılım ile temsil edilmektedir (Şekil 6c).

Ana oksit elementlerinin  $SiO_2$ 'ye göre değişim diyagramlarında  $K_2O$  ve  $Na_2O$  değerlerinde düzenli bir artış gözlenirken (Şekil 7f,i),  $Fe_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $TiO_2$  ve  $MnO$  değerlerinde ise düzenli bir azalma gözlenmektedir (Şekil 7a,b,d,e,g). Diyagrama aktarılan örneklerin boşluksuz ve lineer yönelimleri bölgedeki kayaların oluşumlarında karışım süreçlerinin yanında fraksiyonel kristallenmenin de etkili olduğunu yansıtmaktadır.  $P_2O_5$ 'deki değişim ise fraksiyonel kristallenme sürecinde artık magmada  $P_2O_5$ 'in zenginleşerek, orta-geç evreye doğru tali minerallerin bünyelerine girerek ortamdan uzaklaştığını yansıtmaktadır (Şekil 7h). Fraksiyonel kristallenme sürecinde  $Al_2O_3$  değerinde ise belirgin bir artış veya azalış saptanmamıştır. Magmaların kristallenme süreci hakkında önemli bilgiler sunan değişim diyagramlarına topluca bakıldığında pegmatitlerin Sarıcakaya magmatiklerinin geç evre fraksiyonlanmış ürünleri olabileceği dikkati çekmektedir.



Şekil 5. a) Sarıcakaya Granitoyidi ve pegmatitlerinin toplam alkali-silika adlama diyagramında [48] (alkali-subalkali ayırım çizgisi [49]'e göre) ve b) AFM diyagramında [49] dağılımları.

#### 4.4. Pegmatitlerin kökeni ve muhtemel yerleşim sıcaklığı

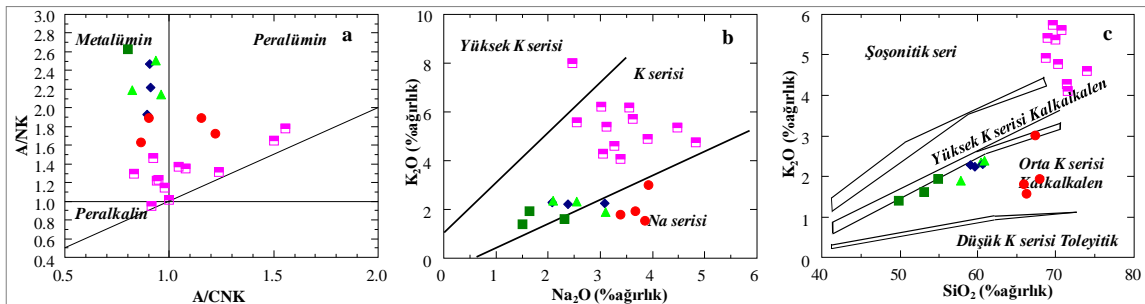
Sarıcakaya granitoyidi örnekleri iz element verilerinin okyanus ortası sırtı granitlerine (ORG) ait verilerle karşılaştırılarak hazırlanan değişim diyagramlar Şekil 8a-b'de verilmiştir. Benzer dağılım desenlerine sahip anakaya ve

**Tablo 1.** Sarıcakaya granitoidine ait kayaların ana element oksit, iz element ve pegmatitlere ait nadir toprak element analiz sonuçları.

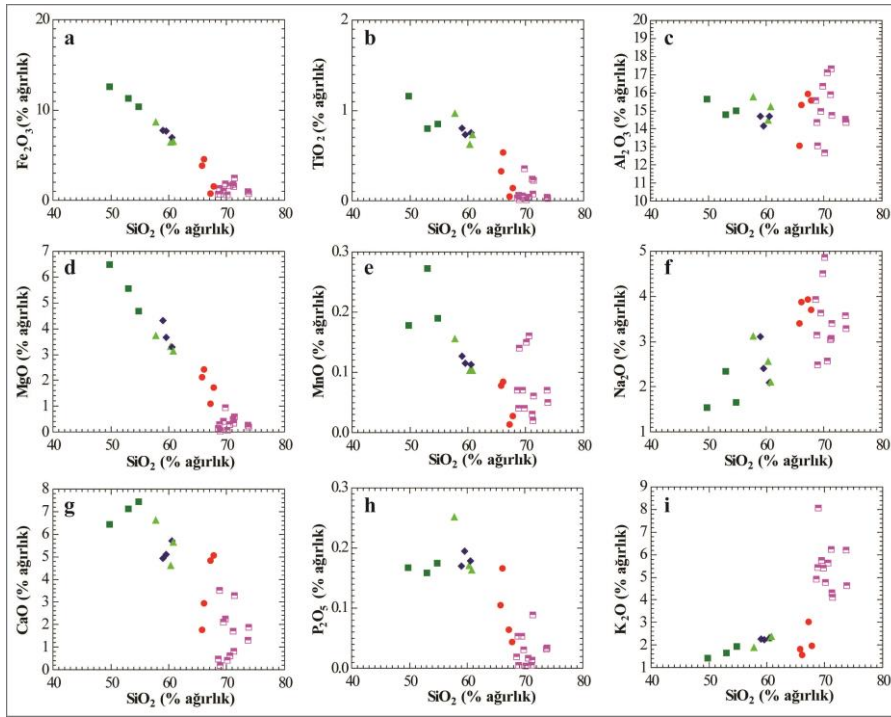
Element	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	Toplam	Cl	Sc	Cr	Co	Ni	Cu	
Örnek	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	
PEGMATİT	TOZ-1	68.60	0.03	15.56	0.63	0.07	0.14	0.47	3.93	4.92	0.02	2.24	96.60	20.0	-	-	10.1	3.8	1.2
	132	68.82	0.06	14.33	1.33	0.04	0.29	3.51	3.13	5.41	0.05	3.43	100.40	29.2	7.8	11.1	3.3	4.7	4.9
	P-1	68.99	0.01	13.05	0.68	0.14	0.02	0.19	2.48	8.04	0.00	2.98	96.59	20.0	-	-	10.1	3.3	1.2
	416	69.45	0.05	14.95	1.02	0.07	0.40	2.09	3.63	5.73	0.05	2.01	99.45	151.4	9.0	16.2	6.3	5.3	8.9
	413	69.85	0.35	16.34	1.83	0.04	0.94	2.24	4.50	5.38	0.03	1.12	102.62	45.3	9.6	16.6	12.1	6.8	21.4
	SK-10	70.14	0.01	12.67	0.60	0.15	0.05	0.42	4.85	4.77	0.00	2.84	96.50	22.0	-	-	9.5	1.9	1.3
	231	70.61	0.04	17.09	1.61	0.16	0.27	0.62	2.56	5.61	0.02	1.04	99.63	41.4	6.8	12.9	5.8	5.0	0.8
	412	71.22	0.24	15.89	1.73	0.03	0.47	1.69	3.03	6.22	0.00	1.60	102.12	79.3	10.6	19.0	7.6	7.1	0.2
	40	71.25	0.07	17.32	1.52	0.02	0.34	0.82	3.06	4.29	0.01	1.14	99.84	35.7	7.1	22.9	9.4	4.0	nd
	38	71.44	0.22	14.72	2.46	0.06	0.57	3.28	3.40	4.10	0.09	0.90	101.24	108.2	8.8	8.7	16.6	3.5	4.6
72	73.73	0.04	14.53	0.96	0.07	0.25	1.30	3.57	6.19	0.03	0.49	101.16	68.7	8.8	12.6	12.3	4.4	4.1	
44	73.87	0.02	14.35	0.75	0.05	0.19	1.87	3.28	4.61	0.03	0.64	99.66	34.5	9.1	5.4	5.5	3.3	24.8	
ANAKAYA	SK-11	65.79	0.32	13.06	3.82	0.08	2.11	1.76	3.40	1.81	0.10	2.35	94.60	2.0	-	-	29.3	3.3	3.3
	SK-8	66.16	0.53	15.32	4.56	0.08	2.40	2.92	3.87	1.56	0.17	1.87	99.45	98.6	-	-	21.0	3.0	1.3
	SK-6	67.83	0.14	15.56	1.51	0.03	1.72	5.04	3.69	1.95	0.04	1.93	99.43	2.0	-	-	13.5	2.2	1.2
	SK-14	60.38	0.63	14.48	6.49	0.10	3.31	4.62	2.56	2.34	0.17	3.95	99.02	164.6	-	-	25.0	5.9	3.5
	SK-15	57.75	0.97	15.77	8.65	0.16	3.75	6.63	3.12	1.90	0.25	1.05	100.00	234.5	-	-	39.1	2.0	57.6
	SK-3	60.77	0.73	15.22	6.53	0.10	3.14	5.66	2.11	2.38	0.16	2.62	99.42	142.9	-	-	36.0	3.9	6.6
	SK-7	67.23	0.05	15.91	0.75	0.01	1.09	4.82	3.93	3.01	0.06	2.31	99.18	127.0	-	-	13.0	3.7	1.1
	SK-4	49.81	1.15	15.63	12.56	0.18	6.46	6.43	1.53	1.39	0.17	3.20	98.51	43.9	-	-	59.8	5.7	60.0
	SK-9	53.12	0.80	14.76	11.28	0.27	5.53	7.11	2.33	1.63	0.16	2.10	99.09	330.0	-	-	33.0	12.0	209.8
	A-1	54.90	0.85	15.00	10.29	0.19	4.67	7.43	1.65	1.93	0.17	1.87	98.96	294.7	-	-	37.7	7.5	32.8
Ank	SK-12	59.02	0.80	14.70	7.75	0.13	4.31	4.92	3.11	2.28	0.17	1.98	99.16	79.4	-	-	32.1	8.4	152.6
	SK-16	59.60	0.73	14.16	7.69	0.12	3.67	5.11	2.40	2.23	0.19	2.54	98.45	459.5	-	-	28.3	5.7	5.9
	SK-2	60.50	0.75	14.70	6.96	0.11	3.28	5.70	2.09	2.31	0.18	2.13	98.71	143.3	-	-	27.0	7.9	7.6

Element	Pb	Zn	Ga	Ge	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Sb	Ba	Be	Cs	Ta	Hf	W	Th	U	
Örnek	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	
PEGMATİT	TOZ-1	48.7	8.0	13.8	3.5	143.4	66.2	4.0	11.0	5.5	0.8	144.2	1.0	7.5	3.1	4.7	219.6	2.0	5.7
	132	85.2	23.8	13.2	0.8	101.5	76.3	36.4	91.4	4.6	0.7	294.0	2.0	0.4	2.1	4.8	50.8	6.5	1.6
	P-1	27.1	2.2	16.8	1.3	165.5	18.7	29.1	19.8	2.9	0.8	86.4	3.0	3.5	2.2	4.7	177.7	3.5	6.4
	416	108.7	14.5	19.5	1.4	114.9	103.8	38.4	53.6	10.6	0.8	318.8	-	-	-	8.0	-	5.5	3.0
	413	31.9	57.5	19.7	0.9	144.9	203.3	18.9	62.8	12.8	0.6	570.7	-	-	-	5.5	-	5.8	4.1
	SK-10	17.1	2.0	18.4	1.5	97.0	17.1	37.2	48.7	5.1	0.8	51.1	2.0	3.6	3.5	3.5	213.5	5.7	6.4
	231	36.8	9.9	19.5	0.9	134.3	101.9	13.1	18.7	7.5	0.2	113.6	-	-	-	7.7	-	2.4	3.1
	412	36.9	67.5	20.3	1.2	231.7	126.8	11.6	59.4	12.7	nd	385.0	-	-	-	7.2	-	6.1	7.6
	40	22.8	16.2	22.4	0.6	116.2	97.8	8.4	23.0	9.3	nd	76.3	-	-	-	6.6	-	7.3	2.8
	38	7.3	50.2	20.1	0.5	133.8	116.5	24.1	68.1	10.4	0.8	619.5	-	-	-	3.7	-	7.0	3.9
72	35.8	13.1	18.6	0.6	80.6	120.3	44.1	58.5	10.1	0.7	168.7	-	-	-	5.3	-	5.9	0.7	
44	16.2	11.7	17.0	0.7	94.7	134.7	32.7	44.3	10.1	0.3	993.7	-	-	-	6.8	-	6.6	1.6	
ANAKAYA	SK-11	17.2	40.8	14.3	1.2	94.2	208.1	9.3	60.5	7.4	0.9	1005.0	-	5.1	3.6	2.9	115.7	0.9	2.8
	SK-8	8.2	55.9	19.5	1.4	62.7	214.2	9.4	88.6	7.8	0.9	451.7	-	3.7	2.9	3.2	153.5	0.8	17.2
	SK-6	14.1	15.3	18.1	1.4	49.1	261.1	9.1	47.9	7.1	0.8	514.5	-	3.9	2.7	2.4	186.4	0.8	1.0
	SK-14	8.5	58.3	19.6	2.4	82.0	253.4	21.6	115.0	8.4	1.0	631.1	-	4.0	3.7	5.1	121.9	0.8	1.6
	SK-15	7.7	81.2	20.7	1.6	71.1	262.0	25.5	110.4	11.9	1.0	581.3	-	3.9	7.6	6.4	145.7	1.3	12.5
	SK-3	10.5	53.6	17.6	2.1	73.0	241.6	20.9	103.6	11.9	1.0	666.9	-	3.3	6.3	6.0	109.2	1.1	1.4
	SK-7	16.5	8.4	18.5	1.3	73.1	275.3	8.8	46.5	6.9	0.9	1073.0	-	4.9	2.5	2.4	146.2	0.8	0.7
	SK-4	28.8	103.9	23.8	0.7	100.1	188.8	49.3	100.0	11.5	0.8	394.2	-	3.9	8.1	7.1	28.7	1.2	1.7
	SK-9	10.5	103.7	21.8	1.1	66.0	206.4	45.3	67.0	15.0	1.0	185.0	-	3.8	14.0	11.0	37.6	1.1	1.1
	A-1	14.3	80.0	20.6	1.2	75.2	227.1	41.5	77.9	12.6	0.9	376.5	-	3.8	6.3	6.0	56.1	1.1	1.4
Ank	SK-12	5.4	69.5	18.7	1.2	78.0	207.3	21.2	78.7	8.0	0.9	595.3	-	3.5	11.0	3.7	70.8	0.5	2.2
	SK-16	10.8	67.2	17.6	1.2	80.2	235.3	22.6	122.5	11.8	0.9	629.4	-	4.4	3.9	3.6	80.2	0.9	3.1
	SK-2	11.7	59.2	19.5	1.2	69.3	229.1	21.9	123.3	12.7	1.0	654.2	-	4.1	3.9	3.8	92.8	0.9	5.1

Element	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
Örnek	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	
PEGMATİT	TOZ-1	7.2	9.8	5.2	11.0	2.5	0.4	3.0	0.6	2.7	1.0	0.9	0.6	1.0	0.2
	132	11.3	23.4	2.8	10.5	3.5	0.3	4.6	0.9	6.0	1.2	3.7	0.6	3.5	0.5
	P-1	15.8	18.0	4.3	10.5	2.0	0.4	2.5	0.7	2.1	0.5	0.9	0.6	1.1	0.3
	416	-	-	-	20.2	3.0	-	5.0	-	-	-	-	-	-	-
	413	-	-	-	24.7	3.7	-	2.6	-	-	-	-	-	-	-
	SK-10	17.2	35.9	5.6	15.4	1.9	0.3	2.9	0.4	3.1	0.6	1.0	0.5	0.9	0.1
	231	-	-	-	9.3	2.2	-	2.6	-	-	-	-	-	-	-
	412	-	-	-	20.0	2.0	-	2.6	-	-	-	-	-	-	-
	40	-	-	-	8.3	2.1	-	3.2	-	-	-	-	-	-	-
	38	-	-	-	17.8	2.1	-	3.1	-	-	-	-	-	-	-
72	-	-	-	33.3	3.4	-	4.2	-	-	-	-	-	-	-	
44	-	-	-	33.5	3.7	-	4.5	-	-	-	-	-	-	-	



**Şekil 6.** Sarıcakaya Granitoidi ve pegmatitlerinin a) A/NK-A/CNK diyagramlarında [50], b) Na



Şekil 7. Sarıcakaya granitoid ve pegmatitlerinin harker değişim diyagramları (Sembol açıklamaları Şekil 5'deki gibidir).

pegmatitlerde geniş iyon yarıçaplı litofil elementler bakımından zenginleşme, kalıcılığı yüksek elementler bakımından fakirleşme gözlenmektedir. Ba, Th ve Ta haricinde diğer elementler her iki kaya grubunda neredeyse benzer davranışlar sergilemektedir. Bu da pegmatitlerin içerisinde yer aldığı magmatikleri oluşturan magma kaynağı ile kökensel ilişkili olduğunu göstermektedir. Pegmatitlerdeki baskın negatif Zr ile Ba anomalileri K-feldispat fraksiyonunu ifade etmektedir. Magma kristalizasyon sürecinde Nb-Ta'nın tükenmemesi Shoshonitik karakteri yansıtan bir magma kaynağına işaret edebilir [53]. Ayrıca Rb elementindeki zenginleşme fraksiyonel kristalleşmenin son safhasına kadar magmatik eriyikte kalıp, daha sonra muskovit ve K-feldispatın bünyelerine girmesi ile ilişkili olup kabuksal kirlenmeye de işaret etmektedir. Bu kabuksal kirlenme pirimitif mantoya normalize edilen çoklu element değişim diyagramında da Ti hariç diğer tüm elementlerdeki zenginleşme ile kendini belli etmektedir (Şekil 8c). Pegmatitlerin kondrite normalize edilen örümcek diyagramına bakıldığında ise genel olarak pegmatitlerin nadir toprak elementleri bakımından zenginleştiği dikkat çekicidir (Şekil 8d). Pegmatitlerdeki bu zenginleşme hafif nadir toprak elementlerinde 100 kata kadarken ağır nadir toprak elementlerinde 10-20 kat kadardır. Pegmatitlerdeki hafif negatif Eu anomalisi magmada az miktarda plajiyoklaz varlığına işaret eder [54].

Pegmatit örnekleri değişken fraksiyon derecelerini yansıtan Rb'a karşı Sr ve Rb'a karşı Ba diyagramlarında normal granit alanında yer almaktadır (Şekil 9a, b).

K-Rb fraksiyonu basit ve hibridize (karmaşık) tip pegmatitlerin ayırt edilmelerinde kullanılmaktadır. Sarıcakaya pegmatit örnekleri  $K_2O/Rb-Rb$  diyagramında [60] basit tip pegmatitler alanında yer almaktadır (Şekil 10a). Pegmatitlerin kaynak kaya karakteristiğini ortaya koymak amacı ile iz element sonuçlarına bakıldığında özellikle fraksiyonlanmanın bir sonucu olarak bolluk oranına göre sırasıyla Sr, Ba ve Rb değişimleri üçlü diyagrama aktarıldığında diferansiyasyon trendi sergileyen Sarıcakaya granitoidinden farklılaşmış kökeni ifade etmektedir (Şekil 10b).

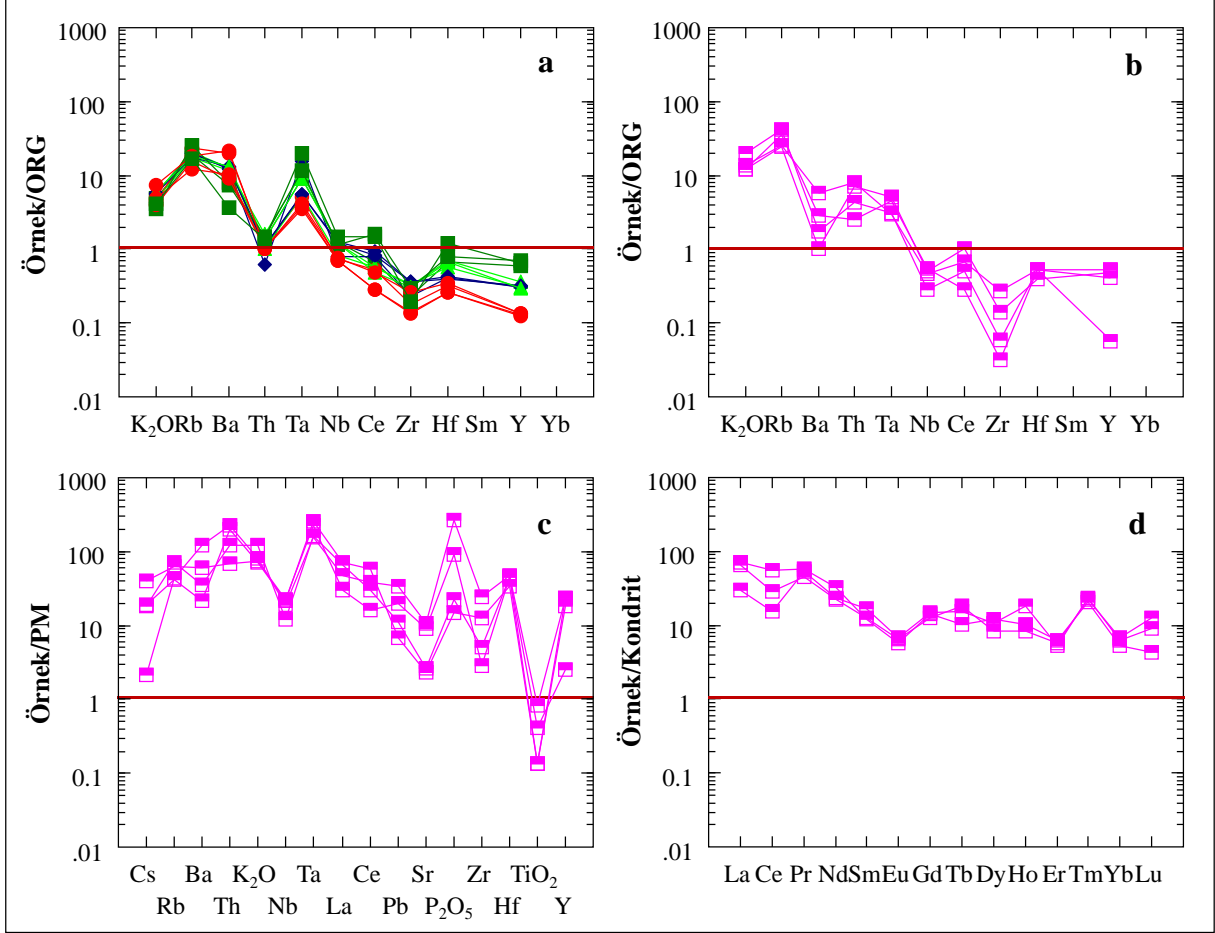
Pegmatitlerin kristalizasyon sıcaklıklarına yaklaşımda bulunabilmek için M faktörüne bağlı  $[M=(Na+K+2.Ca)/(Al.Si)]$  zirkon ( $T_{zirkon\ doy.}$ ) ve tüm kaya  $SiO_2$  ve  $P_2O_5$  konsantrasyonuna bağlı apatit ( $T_{apatit\ doy.}$ ) doygunluk [61, 62] sıcaklık hesaplamaları yapılmıştır. Yapılan hesaplamada ortalama  $T_{zirkon\ doy. ort} = 678.7\ ^\circ C$  ve  $T_{apatit\ doy. ort} = 766.7\ ^\circ C$  sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Hesaplanan zirkon doygunluk yaşının apatitten daha düşük değerlerde olması erken kristalizasyon evresinde zirkon mineralinin görünmemesinden kaynaklanabilmektedir [63].

#### 4.5. Pegmatitlerin seramik hammadde olarak kullanılabilirliği

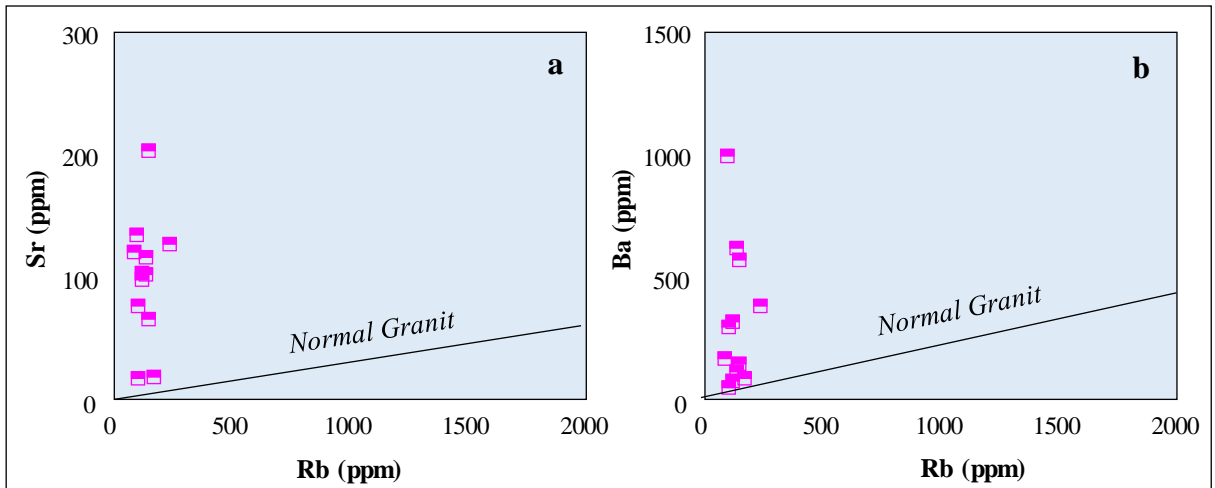
Sarıcakaya pegmatitlerinin endüstriyel hammadde olarak özellikle seramik sanayinde farklı amaçlarla kullanımlarına yönelik değerlendirmeler yapılırken mineralojik ve petrografik özelliklerin yanı sıra mineral kimyası ve tüm kaya jeokimyasal özelliklerine de bakılması gerekmektedir. Sarıcakaya pegmatitlerinin içerisinde çok iri kristalen (yer yer 5cm'ye varan) mikroklin ve ortoklaz mineralleri bulunmaktadır. Bu minerallerin hem iri kristalen olmaları hem de başka mineral (özellikle demir içerikli mineraller) kapanımları içermemeleri/ya da az miktarda içermeleri nedeniyle seramik sanayinde feldispat hammadde olarak kullanıma oldukça uygun



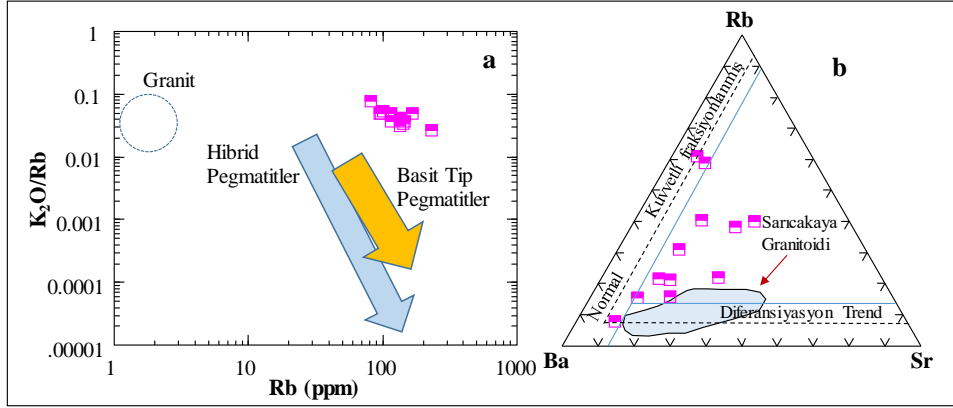
gözükmektedirler. Söz konusu kayaların içerisindeki feldispat minerallerinin seramik sanayiinde endüstriyel hammadde kullanımı için bileşimlerdeki  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$  veya  $\text{FeO}_t$  ve  $\text{TiO}_2$  içerikleri oldukça önemlidir. Sarıcakaya pegmatit kayalarının  $\text{Na}_2\text{O}$  içeriği ağırlıkça % 2.48-4.85 (ortalama ağırlıkça % 3.45),  $\text{K}_2\text{O}$  içerikleri ağırlıkça % 4.10-8.04 (ortalama ağırlıkça % 5.44),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  miktarları ağırlıkça % 0.60-2.46 (ortalama ağırlıkça % 1.26) ve  $\text{TiO}_2$  içerikleri ağırlıkça % 0.01-0.35 (ortalama ağırlıkça % 0.10) arasındadır (bkz. Tablo1, Şekil 11a). K içeriğinin Na içeriğine göre yüksek oluşu kayanın içerisindeki alkali feldispat minerallerinin oransal olarak fazla olmalarından kaynaklanmaktadır.



Şekil 8. (a) Sarıcakaya Granitoidi ana kaya ve pegmatitlerin bazı iz elementlerinin (b) ORG'ye (c) PM'ye (primitif manto) normalize edilmiş çoklu element değişim diyagramları, (d) pegmatitlere ait Nadir Toprak Element (NTE) analiz sonuçlarının Kondrite normalize edilmiş çoklu element değişim diyagramı (normalize değerler ORG için [55]'den Kondrit için [56]'dan, PM için normalize değerleri [57]'den, element sıralaması [58]'den alınmıştır, sembol açıklamaları Şekil 5'deki gibidir).

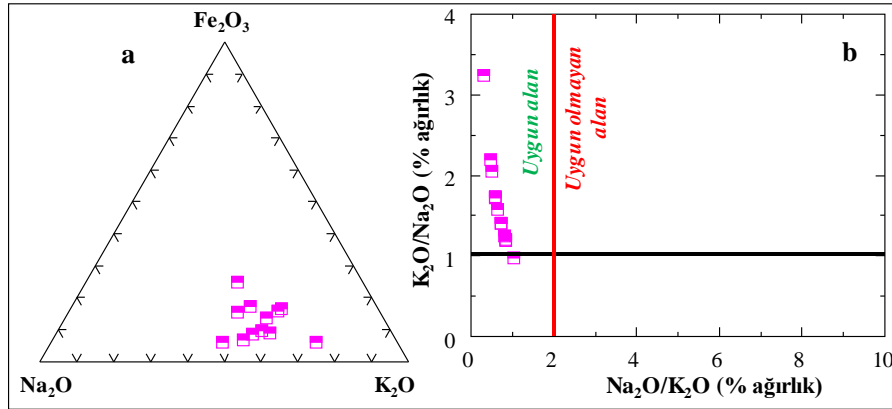


Şekil 9. (a) Sr-Rb ve (b) Ba-Rb diyagramlarında pegmatitlerin dağılımları (normal granit sınırı [59]'dan alınmıştır).



Şekil 10. Pegmatitlerin (a)  $K_2O/Rb$ - $Rb$  [60] ve (b)  $Rb$ - $Ba$ - $Sr$  üçlü diyagramlarında [59] dağılımları

Alkali feldispat mineralleri özellikle K içeriği yüksek olan ortoklaz gibi alkali feldispat minerallerinin geniş bir aralıkta ergime sıcaklığına (1280-1170°C) sahip olmaları nedeniyle seramik sanayiinde daha fazla tercih edilmektedirler [64]. Kayaların toplam  $Na_2O$  ve  $K_2O$  içerikleri ise ağırlıkça % 7.35-10.52 (ortalama ağırlıkça % 8.89) arasındadır (bkz. Tablo1). [65]'e göre seramik sanayiinde kullanılacak feldispatların  $Na_2O+K_2O$  içerikleri I., II. ve III. sınıf hammadde için sırasıyla ağırlıkça %10, %9 ve %8 olmalıdır. Buna göre Sarıcakaya pegmatitlerinin seramik sanayiinde endüstriyel hammadde olarak kullanımları uygun gözükmemektedir. Kayaların içerisindeki  $Na_2O/K_2O$  oranının  $<2$  olması seramik hammaddesinde kullanılmaları durumunda kuvvetli eritken davranış sergileyeceklerini göstermektedir (Şekil 11b) [66].  $K_2O/Na_2O$  oranının  $>1$  olması ise hızlı pişirme tekniklerine uygun olmadıklarını göstermektedir [64].



Şekil 11. Sarıcakaya pegmatitlerinin  $Na_2O$ - $Fe_2O_3$ - $K_2O$  üçgen değişim ve  $K_2O/Na_2O$ 'e karşı  $Na_2O/K_2O$  değişim diyagramı [67, 66].

Renk yapıcı elementlerden Ti'un miktarı her üç sınıf seramik hammaddesi için istenilen değerlerin (0.15-0.40, [65]) oldukça altındadır fakat Fe içeriği tüm örneklerde olması gereken değerlerin (0.10-0.50, [65]) oldukça fazladır. Fe içeriği uygun tekniklerle uzaklaştırıldığında çok daha iyi kalitede hammadde elde edilmiş olacaktır.

## 5. SONUÇLAR

Sarıcakaya Granitoidi içerisinde yer alan ve ana mineralojik bileşimini plajiyoklaz (albit-oligoklaz), ortoklaz, mikroklin, kuvars, muskovit, biyotit ve granat (spesartin) minerallerinin oluşturduğu pegmatitler alkali feldispat granit-granit bileşimindedir. Pegmatitlerin ortalama 1.32 A/NK (mol%) ve ortalama:1.07 A/CNK (mol%) oranları metalümin-peralümin karakteri yansıtmaktadır. Tüm kaya kimyasından hesaplanan zirkon ve apatit doygunluk sıcaklıkları pegmatitleri oluşturan magmanın ortalama sıcaklığının 678.7-766.7°C aralığında değiştiğini göstermektedir. Hesaplanan sıcaklık değeri ve diğer petrolojik-jeokimyasal veriler, Sarıcakaya Granitoidi ile kökensel ilişkili olduğu düşünülen pegmatitlerin Sarıcakaya magmatiklerini oluşturan magmanın pegmatitik-pnömatolitik evredeki ürünleri olabileceğini desteklemektedir.

Jeolojik olarak pegmatitler kökeni veya oluşum süreçleri ile ele alınsa da, ekonomik olarak bakıldığında bunların tamamının endüstriyel hammadde olup olamayacakları cevaplanması gereken soruların başında gelmektedir. Bu kapsamda Sarıcakaya pegmatit kayalarının  $Na_2O$  (ortalama ağırlıkça % 3.45),  $K_2O$  (ortalama ağırlıkça % 5.44),  $Fe_2O_3$  (ortalama ağırlıkça % 1.26) ve  $TiO_2$  içerikleri (ortalama ağırlıkça % 0.10) değerlendirildiğinde pegmatitlerin seramik sanayiinde endüstriyel hammadde olarak kullanılabilirliği ortaya çıkmaktadır.

## Yazar Katkıları

Yazarlar makaleye eşit derecede katkı sağlamıştır.

## Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler

## KAYNAKÇA

- [1] R.L. Linnen, M. Van Lichtervelde, and P. Černý “Granitic Pegmatites as Sources of Strategic Metals”, *Elements*, vol. 8, pp. 275-280, 2012.
- [2] H.G. Dill “Pegmatites and aplites: Their Genetic and Applied Ore Geology”, *Ore Geol Rev*, vol. 69, pp. 417-561, 2015.
- [3] H. Strunz, “Laueit,  $MnFe_2 3+[OH]PO_4 \cdot 8H_2O$ , ein neues mineral”, *Naturwissenschaften*, vol. 41, 256p, 1954a.
- [4] H. Strunz “Hagendorfit, ein neues Mineral der Varulith-Hühnerkobelit-Reihe”, *Neues Jb Mineral Monat*, pp. 252–255, 1954b.
- [5] H. Schneiderhöhn “Die Pegmatite (The pegmatites)”, *Gustav Fischer Verlag, Stuttgart*, 720 p. 1961.
- [6] E. Seeliger, and A. Mücke “Ernstit, ein neues  $Mn_2+Fe_3+$  - Phosphat und seine Beziehungen zum Eosphorit”, *Neues Jb Mineral Monat*, pp. 289-298, 1970.
- [7] P.B. Moore, and A.R. Kampf “Schoonerite, A New Zinc-Manganese-Iron Phosphate Mineral”, *Am Mineral*, vol. 62, pp 246–249, 1977.
- [8] B.D. Sturman, R.C. Rouse and, P.J. Dunn “Parascholzite, A New Mineral from Hagendorf, Bavaria, And Its Relationship to Scholzite”, *Am Mineral*, vol. 66, pp. 843–851, 1981.
- [9] Y. Marzoni Fecia Di Cossato, P. Orlandi, and G. Vezzalini “Rittmannite, A New Mineral Species of the Whiteite Group from the Mangualde Granitic Pegmatite, Portugal”, *Can Mineral*, vol. 27, pp. 447–449, 1989.
- [10] F. Walter, W. Postl, and J. Taucher “Weinebeneit: Paragenese und Morphologie eines neuen Ca–Be-Phosphates von der Spodumenpegmatit-Lagerstätte Weinebene, Koralpe, Kärnten”, *Mitt Abt Mineral, Landesmuseum Joanneum*, vol. 58, pp.37–43, 1990.
- [11] W.D. Birch, A. Pring, and E.E. Foord “Selwynite,  $Nak(Be, Al)Zr_2(PO_4)_4 \cdot 2H_2O$ , A New Gainessite-Like Mineral from Wycheproof, Victoria, Australia”, *Can Mineral*, vol. 33, pp.55-58, 1995.
- [12] W.D. Birch, I.E. Grey, S.J. Mills, A. Pring, C. Bougero, A. Ribaldi-Tunnicliffe, N.C. Wilson, and E. Keck “Nordgauite,  $MnAl_2(PO_4)_2(F,OH)_2 \cdot 5H_2O$ , A New Mineral from the Hagendorf–Süd Pegmatite, Bavaria, Germany: Description and Crystal Structure”, *Mineral Mag*, vol. 75, pp. 269–278, 2011.
- [13] G. Adiwidjana, K. Friese, K.H. Klaska, and J. Schlüter “The Crystal Structure of Kastningite ( $Mn, Fe, Mg)(H_2O)_4[Al_2(OH)_2(H_2O)_2(PO_4)_2] \cdot 2H_2O$  - A New Hydroxyl Aquated Orthophosphate Hydrate Mineral”, *Z. Kristallogr*, vol. 214, pp. 465–468, 1999.
- [14] G. Raade, G. Ferraris, A. Gula, G. Ivaldi, and F. Bernhard “Kristianesite A New Calcium-Scandium-Tin Sorosilicate from Granite Pegmatite from Tordal, Telemark, Norway”, *Mineral Petrol*, vol. 75, pp. 89–99, 2002.
- [15] J. Brugger, N. Meisser, B. Etschmann, S. Ansermet, and A. Pring “Paulscherrite From The Number 2 Workings, Mount Painter Inlier, Northern Flinders Ranges, South Australia; “Dehydrated Schoepite” is a Mineral After All”, *Am Mineral*, vol. 96, pp.229–240, 2011.
- [16] V.N. Yakovenchuk, E. Keck, S.V. Krivovichev, Y.A. Pakhomovsky, E.A. Selivanova, J.A. Mikhailova, A.P. Chernyatjeva, G.Y. Ivanyuk “Whiteite-(Cammn),  $CaMnMn_2Al_2[PO_4]_4(OH)_2 \cdot 8H_2O$ , “A New Mineral From The Hagendorf–Süd Granitic Pegmatite, Germany”, *Mineral Mag*, vol. 76, pp. 2761–2771, 2012.
- [17] T. Koralay, Y.K. Kadioglu, and S.Y. Jiang “Determination of Tourmaline Composition in Pegmatite From Buldan, Denizli (Western Anatolia, Turkey) Using XRD, XRF, and Confocal Raman Spectroscopy”, *Spectrosc Lett*, vol. 46, pp. 499-506, 2013.
- [18] P. Černý “Geochemical and Petrogenetic Features of Mineralization in Rare-Element Granitic Pegmatites in The Light of Current Research”, *Appl Geochem*, vol. 7, pp.393–416, 1992.
- [19] M.A. Wise, and P. Černý “The Crystal Chemistry of the Tapiolite Series”, *Can Mineral*, vol. 34, pp.631–647, 1996.
- [20] R.J. Bakker, and M.A. Elburg “Amagmatic–Hydrothermal Transition in Arkaroola (Northern Flinders Ranges, South Australia); from Diopside-Titanite Pegmatites to Hematite-Quartz Growth”, *Contrib Mineral Petrol*, vol. 152, pp. 541–569, 2006.
- [21] J. Oyarzábal, M.Á. Galliski, and E. Perino “Geochemistry of K-Feldspar and Muscovite in Rare-Element Pegmatites and Granites from the Totoral Pegmatite Field, San Luis, Argentina”, *Resour Geol*, vol. 59, pp. 315–329, 2009.
- [22] R. Thomas, and P. Davidson “The Missing Link between Granites and Granitic Pegmatites”, *J Geosci*, vol. 58, pp.183-200, 2013.
- [23] P. Černý, P.L. Blevin, M. Cuney, and D. London “Granite-Related Ore Deposits”, *Econ Geol*, 100th Anniversary Volume, pp. 337-370, 2005.
- [24] P. Černý, and S. Ercit “The Classification of Granitic Pegmatites Revisited”, *Can Mineral*, vol. 43, pp. 2005–2026, 2005.
- [25] D. London “Pegmatites”, *The Canadian Mineralogist, Special Publication p. 347*, 2008.

- [26] P. Černý “Exploration strategy and methods for pegmatite deposits of tantalum”, In Lanthanides, Tantalum and Niobium (P. Möller, P. Cerny and F. Saube, eds.), Springer-Verlag, Berlin, pp. 271-299, 1989.
- [27] D. London “Geochemistry of Alkali and Alkaline Earth Elements in Ore-Forming Granites, Pegmatites And Rhyolites” In: Linnen, R.L., Samson, I. M. (Eds.), Rare Element Geochemistry and Mineral Deposits, Geological Association of Canada Short Course Notes, vol. 17, pp. 17-43, 2005.
- [28] C. Karaguzel, I. Gulgonul, C. Demir, M. Cinar, and M.S. Celik “Concentration of K-Feldspar from a Pegmatitic Feldspar Ore by Flotation”, Int J Miner Process, vol. 81, pp. 122-132, 2006.
- [29] M. Melcher, T. Graupner, F. Henjes-Kunst, T. Oberthür, M. Sitnikova, E. Gäbler, A. Gerdes, H. Brätz, D. Davis, and S. Dewaele “Analytical Fingerprint of Columbite– Tantalite (Coltan) Mineralization in Pegmatites: Focus on Africa”, Proceedings, Ninth International Congress for Applied Mineralogy (ICAM), Brisbane, Qld. Australasian Institute of Mining and Metallurgy, pp. 615–624, 2008.
- [30] D. London, and D.J. Kontak “Granitic Pegmatites: Scientific Wonders and Economic Bonanzas”, Elements, vol. 8, no. 4, pp. 257-261, 2012.
- [31] Y. Kibici, and G. Güneş “Sivrihisar - Günyüzü (Eskişehir) - Dinek Granitporfirleri İçindeki Feldspatların Ekonomik Potansiyeli”, Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir, pp. 83-95, 1995.
- [32] S. Saklar, C. Oktay, M. Karadeniz, and S. Gürsu “Feldspar Beneficiation from Manisa Alaşehir Pegmatites” International Mining Congress and Exhibition of Turkey-IMCET, pp. 457-459, 2003.
- [33] I. Bayraktar, S. Ersayın, and Ö.Y. Gülsoy “Upgrading Titanium Bearing Na-Feldspar by Flotation Using Sulphonates, Succinamate and Soaps of Vegetable Oils”, Minerals Engineering, vol. 1, no. 12, pp. 1363-1374, 1997.
- [34] I. Bayraktar, S. Ersayın, and Ö.Y. Gülsoy “Magnetic Separation and Flotation of Albite Ore”. In S. Atak, G. Önal, M.S. Celik (Eds.), Innovations in Mineral and Coal Processing, Balkema, Rooterdam, pp. 315-318, 1998.
- [35] M.S. Çelik, B. Pehlivanoglu, A. Aslanbaş, and R. Asmatulu “Flotation of Colored Impurities from Feldspar Ores”, Minerals and Metallurgical Processing, vol. 18, no. 2, pp. 101-105, 2001.
- [36] N.T. Selli, and A. Tunali “Alternatif Hammade Olarak Pegmatitin Sırlı Porselen Karo Ve Yer Karosu Massesinde Kullanılması”, AKÜ FEMÜBİD, vol. 14, no. OZ5787, pp. 549-552, 2014.
- [37] O. Bayramgil “Gördes Pegmatitlerinin Mineralojik Etüdü”, Türkiye Jeoloji Bülteni, vol. 5, no. 12, pp. 54-70, 1954.
- [38] N. Dağ, and Ö. Dora “Gördes (Menderes Masifi Kuzeyi) Pegmatoidleri”, TJK Bülteni, vol. 34, pp. 1-8, 1991.
- [39] B. Güllü, Y.K. Kadioğlu, C.Ö. Kılıç, H. Canbaş, K. Deniz, and T. Koralay “Sarıcakaya Granitoyidi İçerisinde Yer Alan Pegmatitlerin Petrokimyasal Karakteristikleri”, Uluslararası Katılımlı VI. Ulusal Jeokimya Sempozyumu Bildiri Özleri Kitabı, pp. 106-108, 2014.
- [40] H. Bilgilioğlu “Sarıcakaya (Eskişehir) Magmatik Kompleksinin Petrolojik İncelenmesi”, Aksaray Üniversitesi Fen Bil Ens, Doktora Tezi (yayımlanmamış), p. 163, 2019.
- [41] A.I. Okay “The Geology of the Ağvanis Metamorphic Rocks and Neighbouring Formations”, Bull of the Min Res and Exp, vol. 99, pp. 16-36, 1984a.
- [42] A.I. Okay “Distribution and Characteristics of The Northwest Turkish Blueschists”, In: J.E. Dixon, and A.H.F. Robertson (Editors), “The Geological Evolution of the Eastern Mediterranean”, Geol. Soc. London Spec. Publ., vol. 17, pp. 455-466, 1984b.
- [43] I.E. Altınlı “Geology of central Sakarya”, 50th Anniversary of the Republic, Earth Sciences Congress, Ankara, pp. 159-190, 1973.
- [44] Y. Yılmaz “Tectonic evolution of the southern margin of the Sakarya continent, NW Turkey”, İstanbul Earth Sciences Review, vol. 1, no. 2, pp. 33-51, 1981.
- [45] C. Demirkol “Üzümlü-Tuzaklı (Bilecik) Dolayının Jeolojisi”, Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, vol. 20, no.1, Ankara, 1977.
- [46] B. Güllü, Y.K. Kadioğlu, T. Koralay, and K. Deniz “Raman Characteristics of Gücünkaya (Aksaray) Gabbroic Rocks, Central Anatolia-Turkey”, 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, Bulgaria, vol. 19, pp. 475-482, 2019.
- [47] M.A. Akçe, and Y.K. Kadioğlu “Principles of Raman Spectroscopy and Their Uses in the Determination of the Minerals”, Nevşehir Journal of Science and Technology, vol. 9, no.2, pp. 99-115, 2020.
- [48] K.G. Cox, J.D. Bell, and R.J. Pankhurst “In: The Interpretation of Igneous Rocks”, George Allen & Unwin, London, pp. 450, 1979.
- [49] T.N. Irvine, and W.R.A. Baragar “A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks”, Can J Earth Sci, vol. 8, pp. 523-548, 1971.
- [50] P.O. Maniar, and P.M. Piccoli “Tectonic Discrimination of Granitoids”, Geological Society of America Bulletin, vol. 101, pp. 635-643, 1989.
- [51] E.A.K. Middlemost “The Basalt Clan”, Earth-Science Rev, vol. 11, pp. 337-364, 1975.
- [52] P.C., Rickwood “Boundary Lines Within Petrologic Diagrams Which Use Oxides of Major and Minor Elements”, Lithos, vol. 22, pp. 247-263, 1989.
- [53] X.H. Li, H.W. Zhou, Y. Liu, C.Y. Lee, M. Sun, and C.H. Chen “Shoshonitic Intrusive Suite in SE Guangxi: Petrology and Geochemistry”. Chinese Science Bulletin, vol. 45, pp. 653-659, 2000.
- [54] R.R. Meshram, B. Singh, M.K. Mishra, H. Hrushikesh, A. Siddiqui, D. Shukla, R. Akhtar, and T.M. Meshram “Petrological and Geochemical Studies of Lepidolite (LCT Type) and Non-Lepidolite Pegmatite’s from Chakrasila, Dhubri

- District, Assam, North East India”, *Open Journal of Geology*, vol. 11, pp. 81-104, 2021.
- [55] J.A. Pearce N.B.W. Harris, and A.G. Tindle, “Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks”, *J Petrology*, vol. 25, pp. 956-983, 1984.
- [56] N.M. Evensen, P.J. Hamilton, and R.K. O’Nions “Rare Earth Abundances In Chondritic Meteorites”, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 42(8), pp. 1199-1212, 1978.
- [57] W.F. McDonough, and S.S. Sun “The Composition of the Earth”, *Chem Geol*, vol. 120, pp. 223–253, 1995.
- [58] T. Koralay, K. Deniz, B. Duman, and Y.K. Kadioğlu “Mineralogical and Geochemical Characterization and Implications for Provenance of Roman Granite Columns in Ancient Tripolis (Denizli, Turkey)”, *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 14, no. 420, pp. 1-23, 2021.
- [59] A.M. El Bouseily, and A.A. El Sokkary “The Relation Between Rb, Ba and Sr in Granitic Rocks”, *Chemical Geology*, vol. 16, pp. 207-219, 1975.
- [60] M.A. Mckeough, D.R. Lentz, C.R. Mcfarlane, and J. Brown “Geology and Evolution of Pegmatite-Hosted U-Th ± REE-Y-Nb Mineralization, Kulyk, Eagle, and Karin Lakes Region, Wollaston Domain, Northern Saskatchewan, Canada: Examples of the Dual Role of Extreme Fractionation and Hybridization Processes”, *Jour of Geosciences*, vol. 58, pp. 321-346, 2013.
- [61] E.B. Watson, and T.M. Harrison “Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types”, *Earth and Planetary Science Letters* vol. 64, pp. 295-304, 1983.
- [62] T. M. Harrison, and E. B. Watson “The Behaviour of Apatite During Crustal Anatexis: Equilibrium and Kinetic Considerations”, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 48, pp. 1467-1477, 1984.
- [63] B. Güllü, and Y.K. Kadioğlu “Magmatic Signature of the Closure of the Northern Branch of the Neo-Tethys: Upper Paleocene-Middle Eocene Magmatism At The Boundary Of The Tavşanlı-Sakarya Zone (Turkey)”, *Geological Quarterly*, vol. 66 (13), no. 2, pp. 1-20, 2022.
- [64] K. Deniz, and Y.K. Kadioğlu “Investigation of Feldspar Raw Material Potential of Alkali Feldspar Granites and Alkali Feldspar Syenites Within Central Anatolia”, *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, vol. 158, pp. 265-289, 2019.
- [65] TS11325, *Türk Standartları*, 1994, *Feldispat Seramik Sanayinde Kullanılan*, TSE, Ankara.
- [66] E. Lewicka “Conditions of the Feldspathic Raw Materials Supply From Domestic and Foreign Sources in Poland”, *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, vol. 26, no. 4, pp. 5–18, 2010.
- [67] K. Deniz, and Y.K. Kadioğlu “Nefelin Siyenitlerin Seramik Sanayiinde Kullanılma Potansiyeli: Buzlukdağ Örneği”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 24, no. 6, pp. 1209-1219, 2018.



# Cooperative Spectrum Sensing Using Reptile Search Algorithm in Cognitive Radio

## Bilişsel Radyoda Sürüngen Arama Algoritması Kullanarak İşbirlikçi Spektrum Algılama

<sup>1</sup>Burcu KETENCİ , <sup>2</sup>Necmi TAŞPINAR , <sup>3</sup>Tareq M. SHAMİ 

<sup>1</sup>Erciyes University, Institute of Natural and Applied Science, Kayseri, Turkey

<sup>2</sup>Erciyes University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Kayseri, Turkey

<sup>3</sup>University of York, Department of Electronic Engineering, U.K.

<sup>1</sup>burcuketenci23@gmail.com, <sup>2</sup>taspinar@erciyes.edu.tr,

<sup>3</sup>tareq.al-shami@york.ac.uk

Araştırma Makalesi/Research Article

### ARTICLE INFO

#### Article history

Received : 25 August 2023

Accepted : 26 September 2023

#### Keywords:

Cognitive Radio, Reptile Search Algorithm, Weight Coefficients Optimization, Detection Performance

### ABSTRACT

Given the growing requirement for wireless communication and the limited nature of the spectrum, cognitive radio technology plays a crucial role in optimizing the use of the radio frequency spectrum. Spectrum sensing is the core function of the cognitive radio network. In this paper, the recently developed Reptile Search Algorithm (RSA) is used to increase detection capabilities in cooperative spectrum sensing for cognitive radio systems. Weight assignments were made to secondary users with the help of soft fusion scheme and Reptile Search Algorithm was used to ensure that these assignments gave the highest detection results. The results were compared with the other two optimization algorithms, Particle Swarm Optimization (PSO) and Aquila Optimizer (AO), and it was seen that Reptile Search Algorithm provides better results than the other algorithms.

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

### MAKALE BİLGİSİ

#### Makale Tarihleri

Gönderim : 25 Ağustos 2023

Kabul : 26 Eylül 2023

#### Anahtar Kelimeler:

Bilişsel Radyo, Sürüngen Arama Algoritması, Ağırlık Katsayıları Optimizasyonu, Algılama Performansı

### ÖZET

Kablosuz iletişim için giderek artan gereksinim ve spektrumun sınırlı doğası göz önüne alındığında, bilişsel radyo teknolojisi radyo frekansı spektrumunun kullanımının optimize edilmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Spektrum algılama, bilişsel radyo ağının temel işlevidir. Bu makalede, yakın zamanda geliştirilen Sürüngen Arama Algoritması (RSA), bilişsel radyo sistemleri için işbirlikçi spektrum algılamada tespit yeteneklerini artırmak amacıyla kullanılmıştır. Yumuşak füzyon şeması yardımıyla ikincil kullanıcılara ağırlık atamaları gerçekleştirildi ve bu atamaların en yüksek tespit sonuçlarını vermesini sağlamak için Sürüngen Arama Algoritmasını kullanıldı. Sonuçlar diğer iki optimizasyon algoritması olan Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve Aquila Optimizer (AO) ile karşılaştırılarak Sürüngen Arama Algoritmasının diğer algoritmalara göre daha iyi sonuçlar sağladığı görülmüştür.

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

ORCID ID: <sup>1</sup>0000-0002-9936-9785

<sup>2</sup>0000-0003-4689-4487

<sup>3</sup>0000-0002-0159-4985

## 1. INTRODUCTION

The radio frequency spectrum is utilized as a critical resource in wireless technologies, including radio and television broadcasting, cellular networks, Wi-Fi, satellite communications, Bluetooth and much more. As the interest and demand for wireless services grow day by day, the proper allocation and utilization of spectrum become increasingly essential. Due to the limitations of the fixed spectrum allocation approach in fully utilizing the spectrum's capacity, cognitive radio technology is employed to achieve more efficient spectrum utilization [1]. Cognitive radio enables unlicensed users to adaptively use frequency bands when licensed users with priority rights are not actively occupying the spectrum, using the concept of dynamic spectrum access [2]. The users who have a license in the spectrum are considered primary users (PUs), while the users who do not have a license are considered secondary users (SUs). One of the critical stages in cognitive radio is spectrum sensing, which refers to the process of analyzing and detecting the occupation or availability of radio frequency bands. The successful execution of the spectrum sensing stage is vital because if the presence of primary users is not precisely determined, secondary users may cause detrimental interference to the other users, which is highly undesirable [3-4].

In the literature, research on spectrum sensing algorithms has been evolving and depending on the system requirements and characteristics, various methods such as energy detection [5], matched filter [6], cyclostationary detection [7] are used [8]. Cooperative spectrum sensing schemes are proposed to mitigate the impact of different challenges such as fading, noise variations and to increase the reliability of spectrum sensing. [9] In these schemes, multiple secondary users come together to perform the sensing task cooperatively. Each secondary user senses the spectrum locally, and then the information obtained from these users is combined at a fusion center to generate an ultimate conclusion. This combining process in the fusion center can be applied with three different techniques: Hard Decision Fusion, Soft Decision Fusion and Softened Hard Decision Fusion [10-13]. In this study, the soft decision fusion technique is used, which is known to have better detection performance than hard decision fusion. In this technique, secondary users report their detection results in the form of probability distributions. These reports provide statistical information about the spectrum state and the fusion center merges this information to estimate the presence/absence of the PU in the spectrum.

Several metaheuristic algorithms have been investigated in the literature for the implementation of spectrum sensing. In [14], to enhance the detection accuracy in cooperative spectrum sensing, PSO and five additional PSO variants were employed to optimize the weight vector, and a comparative study was conducted to evaluate their performance. A soft decision fusion (SDF)-based cognitive radio network based on GA is introduced in [15] and the results show that it performs better compared to HDF and traditional schemes. In [16], an evolutionary optimization approach using the Imperialistic Competitive Algorithm (ICA) is presented for the effective selection of weighting coefficients for each secondary user in the cooperative sensing scheme. The ICA-based method has been compared to Genetic Algorithms (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), and SDF-based methods, demonstrating that it surpassed other SDF-based techniques in terms of performance. In [17], the efficient adaptive artificial bee colony (EA-ABC) algorithm was developed, and the proposed EA-ABC algorithm was adapted for cooperative spectrum sensing. The results have shown that a higher detection probability is achieved compared to ABC, PSO, and modified PSO algorithms with the same false alarm probability. Three distinct bio-inspired techniques, namely, PSO, firefly algorithm, and fish school search, were employed to assess the optimal weighting vector utilized in the fusion center in [18]. Numerical findings demonstrate that bio-inspired techniques outperform traditional algorithms commonly used for spectrum sensing and allocation. In this paper, our focus is on enhancing spectrum sensing performance. In line with this objective, we aim to achieve maximum efficiency in detection performance by leveraging the functionality of intelligent optimization techniques rather than traditional methods for assigning weights to users in the soft fusion scheme. Our goal is to harness the power of intelligent optimization techniques to enhance detection performance and consequently improve the overall quality of service in cognitive radio networks, addressing the growing demand for spectrum resources while minimizing interference and ensuring more efficient spectrum utilization. In cognitive radio (CR) systems, weight coefficients are utilized to merge the individual sensing reports from multiple secondary users (SUs) during the cooperative spectrum sensing process, and they play a critical role in the detection performance. Each SU may be exposed to different channel conditions, noise levels, and fading effects, which makes all sensing reports not equally reliable. By assigning higher weights to secondary users with more reliable sensing capabilities, they have a greater influence on the final combined decision. This way, the cognitive radio system makes more accurate and informed decisions about the primary user (PU) activity, reducing the likelihood of harmful interference caused by secondary users. Ultimately, by intelligently combining the sensing reports using weight coefficients, the cognitive radio system can better utilize underutilized spectrum bands, leading to improved spectrum efficiency and increased capacity. Various optimization algorithms are used to search for the optimal set of weights that maximize the detection accuracy. Towards this goal, the recently emerged Reptile Search Algorithm (RSA) has been adapted to the cooperative spectrum sensing scheme, aiding in determining suitable weight coefficients. We selected the reptile search algorithm because of its effective balance between exploration and exploitation mechanisms, thus facilitating our efficient discovery of optimal weights. This adaptability of the algorithm allows it to dynamically adapt to environmental changes and intelligently explore uncharted regions of the parameter space. In the context of cognitive radio networks, where spectrum dynamics can change rapidly, this adaptability is highly valuable. The obtained results have been compared with other optimization algorithms such as Particle Swarm Optimization

(PSO) and Aquila Optimizer (AO). This paper is divided into the following sections: A summary of the system model we used is presented in Section 2. In Section 3 RSA and weight optimization performed using RSA are explained. The simulation parameters and simulation results are presented in Section 4. The overall results of this paper are given in Section 5.

**2. SYSTEM MODEL**

Figure (1) illustrates the proposed framework for cooperative spectrum sensing. Soft fusion technique has been used in this study. M number of SU have been used to transmit local observations to a fusion center (FC). The local individual decision of each SU is forwarded to the FC according to the binary hypothesis given in (1).

$$\begin{cases} X_i[n] = W_i[n], & \text{for } H_0 \\ X_i[n] = g_i S[n] + W_i[n], & \text{for } H_1 \end{cases} \quad i = 1, 2, 3, \dots, M \quad (1)$$

In this hypothesis,  $H_0$  represents that there is no active primary user in the spectrum, indicating that the spectrum is vacant.  $H_1$ , on the other hand, signifies that the spectrum is occupied by a primary user and is not vacant. In (1), the received signal is symbolized by  $X_i[n]$ . The channel gain between the primary user and  $i^{th}$  secondary user is signified by  $g_i$ . While  $W_i[n]$  represents the additive white Gaussian noise (AWGN)  $W_i[n] \sim N(0, \sigma_{W_i}^2)$ ,  $s[n]$  denotes the signal of the primary user. The channel gain of the secondary user-fusion center link is represented by  $h_i$ .  $N_i[n]$  represents the AWGN characterized by a mean value of zero and a variance of  $\delta_i^2$ . The signals received from the secondary users are denoted as  $Y_i[n]$ .  $Z_i$  stands for the energy accumulated by the fusion center from the  $i^{th}$  secondary user.  $Z$  is the ultimate test statistic computed by the fusion center before the decision-making block. At the fusion center, the energy of every secondary user is multiplied by a weight and then all the weighted energies are summed together. Subsequently, a constant threshold value, dependent on a fixed false alarm probability  $P_f$ , is compared with this sum to make a decision between hypothesis  $H_0$  or  $H_1$ . The probability of detection equation that we want to maximize in this study is given below:

$$P_d(\omega) = Q\left(\frac{Q^{-1}(P_f)\sqrt{\omega^T \varphi_{H_0} \omega} - \omega^T \theta}{\sqrt{\omega^T \varphi_{H_1} \omega}}\right) \quad (2)$$

where,  $Q(x) = \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$ ,  $\theta_i = \sigma_s^2 K P_{R,i} |h_i|^2 |g_i|^2$ ,  $\sigma_s^2$  is the variance of the primary user signal,  $K$  corresponds to the total number of samples,  $P_{R,i}$  represents the transmitting power of the  $i^{th}$  secondary user. The covariance matrices for the  $H_0$  and  $H_1$  hypothesis are denoted as  $\varphi_{H_0}$  and  $\varphi_{H_1}$ . The weight vector  $\omega = [\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_M]^T$  and Reptile Search Algorithm is employed to find the appropriate weight coefficients. The detailed equations used in this study can be found in [14].

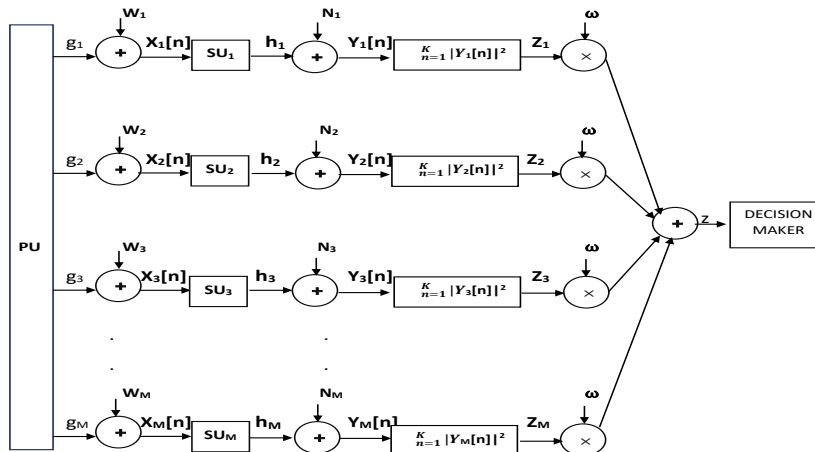


Fig.1. Illustration of cooperative spectrum sensing architecture.

**3. REPTILE SEARCH ALGORITHM BASED APPROACH FOR SENSING OPTIMIZATION**

The reptile search algorithm (RSA), introduced by Abualigah et al.[19], is an innovative optimization algorithm that replicates the encirclement and hunting actions exhibited by crocodiles. The RSA starts by assigning a random solution to the variable  $x_{ij}$  within the minimum and maximum values. In order to harness the inherent behavior of crocodiles, RSA divides its total iterations into four stages. The first two stages specifically emphasize exploration, employing the encircling strategy that encompasses high and belly walking actions. During the encircling process,



crocodiles initiate a search in the area, enabling a comprehensive exploration of the solution area, which can be represented in the following manner:

$$x_{(i,j)}(t+1) = \begin{cases} Best_j(t) \times -\eta_{(i,j)}(t) \times \beta - R_{(i,j)}(t) \times rand, & t \leq \frac{T}{4} \\ Best_j(t) \times x_{(r_1,j)} \times ES(t) \times rand, & t \leq 2\frac{T}{4} \text{ and } t > \frac{T}{4} \end{cases} \quad (3)$$

Where  $t$  corresponds to the current iteration while  $T$  signifies the maximum number of iterations.  $Best_j(t)$  represents the  $i^{th}$  position in the currently best solution.  $rand$  denotes a random number generator. The hunting parameter is denoted by  $\eta_{(i,j)}$  and is calculated utilizing (4).  $\beta$ , set to a constant value, controls the exploration accuracy. The reduce function  $R_{(i,j)}$  is computed according to (5).  $r_1$  represents a randomly chosen value from the range  $[1 N]$ , where  $N$  is the count of candidate solutions,  $x_{(r_1,j)}$  denotes a randomly selected location from the  $i^{th}$  solution. The Evolutionary Sense ( $ES$ ) is a probability ratio, calculated using (6).

$$\eta_{(i,j)} = Best_j(t) \times P_{(i,j)} \quad (4)$$

$$R_{(i,j)} = \frac{Best_j(t) - x_{(r_2,j)}}{Best_j(t) + \epsilon} \quad (5)$$

$$ES(t) = 2 \times r_3 \times \left(1 - \frac{1}{T}\right) \quad (6)$$

Where,  $\epsilon$  is a small amount.  $r_2$  represents a random value and  $r_3$  represents a random integer number within the range of -1 to 1. Equation (7) is used to determine the difference parameter  $P_{(i,j)}$ . The accuracy of exploration is controlled by  $\alpha$ . The average positions of the  $i^{th}$  solution, denoted by  $M(x_i)$ , are determined using (8).

$$P_{(i,j)} = \alpha + \frac{x_{(i,j)} - M(x_i)}{Best_j(t) \times (UB_{(j)} - LB_{(j)}) + \epsilon} \quad (7)$$

$$M(x_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{(i,j)} \quad (8)$$

During the final two phases, RSA employs exploitation to carry out the local search, utilizing two approaches: hunting coordination and cooperation. The solution's value can be updated using (9) throughout the exploitation phase [20].

$$x_{(i,j)}(t+1) = \begin{cases} Best_j(t) \times P_{(i,j)}(t) \times rand, & t \leq 3\frac{T}{4} \text{ and } t > 2\frac{T}{4} \\ Best_j(t) - \eta_{(i,j)}(t) \times \epsilon - R_{(i,j)}(t) \times rand, & t \leq T \text{ and } t > 3\frac{T}{4} \end{cases} \quad (9)$$

In our study, the size of the weight vector is equal to the number of secondary users, which corresponds to the population size in RSA. At the beginning of RSA, random solutions are generated, and during the iteration cycles, RSA's search mechanisms explore possible locations of solutions close to the optimum. Each solution adjusts its positions based on the processes proposed by RSA and ultimately finds the most suitable weight coefficients that maximize the detection probability given in (2), which corresponds to the best solution obtained. Accordingly, (3), (5), (7), (8) and (9) have been updated as follows,

$$\omega_{(i,j)}(t+1) = \begin{cases} Best_j(t) \times -\eta_{(i,j)}(t) \times \beta - R_{(i,j)}(t) \times rand, & t \leq \frac{T}{4} \\ Best_j(t) \times \omega_{(r_1,j)} \times ES(t) \times rand, & t \leq 2\frac{T}{4} \text{ and } t > \frac{T}{4} \end{cases} \quad (10)$$

$$R_{(i,j)} = \frac{Best_j(t) - \omega_{(r_2,j)}}{Best_j(t) + \epsilon} \quad (11)$$

$$P_{(i,j)} = \alpha + \frac{\omega_{(i,j)} - M(\omega_i)}{Best_j(t) \times (UB_{(j)} - LB_{(j)}) + \epsilon} \quad (12)$$

$$M(\omega_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \omega_{(i,j)} \quad (13)$$

$$\omega_{(i,j)}(t+1) = \begin{cases} Best_j(t) \times P_{(i,j)}(t) \times rand, & t \leq 3\frac{T}{4} \text{ and } t > 2\frac{T}{4} \\ Best_j(t) - \eta_{(i,j)}(t) \times \epsilon - R_{(i,j)}(t) \times rand, & t \leq T \text{ and } t > 3\frac{T}{4} \end{cases} \quad (14)$$

#### 4. SIMULATION RESULTS

In this section, simulation studies aimed at maximizing the detection probability given by equation (2) are presented. The simulation parameter values used throughout this study are defined in Table 1. For the reptile search algorithm,  $\alpha$  and  $\beta$  parameter values that control the exploration accuracy are selected as 0.1. The values for noise and channel gain are chosen at random within a certain range in order to simulate sub-optimal SNR scenarios. We assessed the sensing performance using detection probability metric, which quantifies the reliability of correctly identifying the existence of PUs' signals when they are indeed present. To provide a comprehensive assessment, we contrasted the RSA approach with two other metaheuristic techniques: Particle Swarm Optimization and Aquila

Optimizer. PSO, inspired by social behavior patterns, iteratively refines solutions by mimicking the movement of particles in a multidimensional search space. On the other hand, AO, simulates four different hunting tactics observed in the hunting behavior of Aquila, navigating through a multidimensional search space to find optimal or near-optimal solutions. Fig. 2 depicts the average detection probabilities of weight schemes obtained using PSO, AO, and RSA. The population size is taken as 20 for all three algorithms. The obtained results are for a fixed false alarm probability value of 0.24. At the beginning of iterations, all three algorithms exhibited similar behavior. The following is the provided pseudo code for the suggested system:

---

**Algorithm 1:** The pseudo code of the reptile search algorithm for optimizing  $P_d(\omega)$

---

Initialize the population  $\omega_i (i = 1, 2, 3, \dots, M)$ ,  $M$ : Number of Secondary Users, and parameters  $\alpha, \beta$

**While** ( $t < T$ ) **do**

    Compute the fitness values of every potential solution

    Save the best solution obtained so far

    Update  $ES$  according to (6)

**for** ( $i = 1 - M$ ) **do**

**for** ( $j = 1 - M$ ) **do**

$\eta, R, P$  are updated using (4), (11) and (12)

**if** ( $t \leq \frac{T}{4}$ ) **then**

$\omega_{(i,j)}(t+1) = Best_j(t) \times -\eta_{(i,j)}(t) \times \beta - R_{(i,j)}(t) \times rand,$

**else if** ( $t \leq 2\frac{T}{4}$  and  $t > \frac{T}{4}$ ) **then**

$\omega_{(i,j)}(t+1) = Best_j(t) \times \omega_{(r_1,j)} \times ES(t) \times rand,$

**else if** ( $t \leq 3\frac{T}{4}$  and  $t > 2\frac{T}{4}$ ) **then**

$\omega_{(i,j)}(t+1) = Best_j(t) \times P_{(i,j)}(t) \times rand,$

**else**

$\omega_{(i,j)}(t+1) = Best_j(t) - \eta_{(i,j)}(t) \times \epsilon - R_{(i,j)}(t) \times rand,$

**end if**

**end for**

**end for**

$t = t + 1$

**end while**

Return the solution with the highest fitness

---

However, after surpassing a certain iteration, RSA outperformed PSO and AO significantly in terms of average probability of detection ( $P_d$ ) values. While the average  $P_d$  value of RSA exceeded 0.9, AO remained approximately 0.78 and PSO remained around 0.81. The convergence speed of RSA has shown improvement after around 370 iterations.

The simulation curves shown in Fig. 3 and Fig. 4 are used to evaluate the detection probability values of PSO, AO and RSA for various false alarm probability values. In these receivers operating characteristic (ROC) curves, the value of probability of false alarm ( $P_f$ ) is changed at each iteration, instead of being set to a fixed value. The probability of false alarm is systematically varied between 0 and 1, with increments of 0.1. For each probability value, the corresponding probability of detection is calculated to construct the ROC curve, illustrating the trade-off between false alarm rate and detection rate. The performance of RSA is compared with PSO and AO and the results have shown that the detection performance of PSO and AO are approximately close to each other, while the detection performance of RSA has outperformed both of them. Additionally, to observe the impact of the number of secondary users on the detection performance, in Fig. 3, the number of secondary users was set as 20, while in Fig. 4, the number was increased to 24. The results indicate that as the number of secondary users increases, the detection performance also improves. For example, when the  $P_f$  value is 0.1, in the cognitive radio system with 20 users, the detection probability for RSA is 0.79, while with 24 users, it increases to approximately 0.82. For AO, it rises from around 0.60 to 0.65, and for PSO, it increases from around 0.59 to 0.61. When the  $P_f$  value is 0.2, in the cognitive radio system with 20 users, the detection probability for RSA is approximately 0.84, while with 24 users, it increases to approximately 0.86. For AO, it rises from 0.71 to 0.78, and for PSO, it increases from about 0.73 to around 0.77. With an increasing number of secondary users, the cooperative spectrum sensing process becomes more robust due to the diversity in sensing reports from multiple users. This diversity enhances the accuracy of detecting PU signals. As more secondary users participate, more accurate decisions can be made regarding the occupancy or availability of the frequency band. The simulation results underscore the effectiveness of the proposed RSA-based cooperative spectrum sensing approach in cognitive radio systems. The obtained results presented in this section demonstrate that the weight optimization performed with the help of RSA significantly boosts the sensing accuracy in spectrum sensing and is superior to the other two meta-heuristic optimization algorithms.

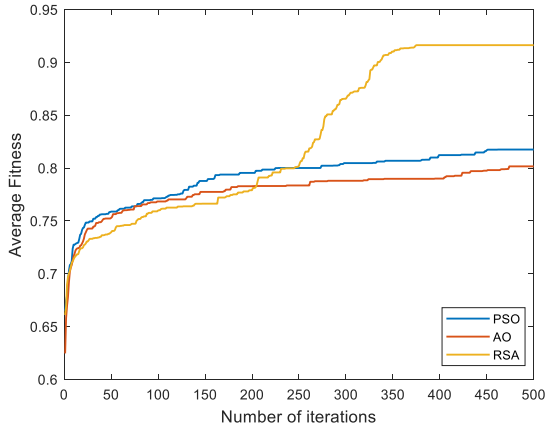


Fig. 2. Comparison of average fitness values for PSO, AO and RSA.

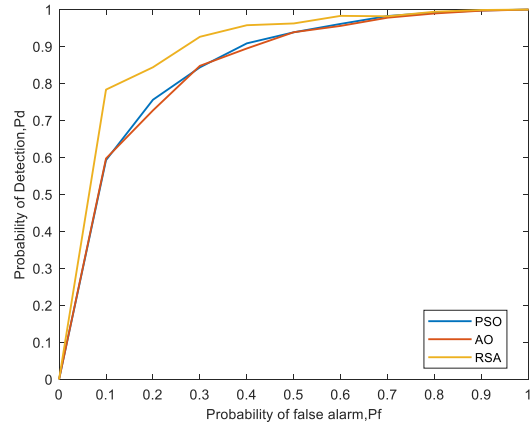


Fig. 3.  $P_f$  vs  $P_d$  for 20 secondary users.

Table 1. Simulation parameters.

Variable	Value
Number of SUs (M)	20
Probability of False Alarm	0.24
Sensing time, Bandwidth	28 $\mu$ sec, 6 MHz
SU-FC channel noise variance	$-60 \text{ dBm} \leq \delta_i^2 \leq -47 \text{ dBm}$
PU-SU channel gain	$-50 \text{ dBm} \leq g_i \leq -40 \text{ dBm}$
SU-FC channel gain	$-40 \text{ dBm} \leq h \leq -30 \text{ dBm}$
Transmit power (PU)	25 dBm
Transmit power (SU)	12 dBm

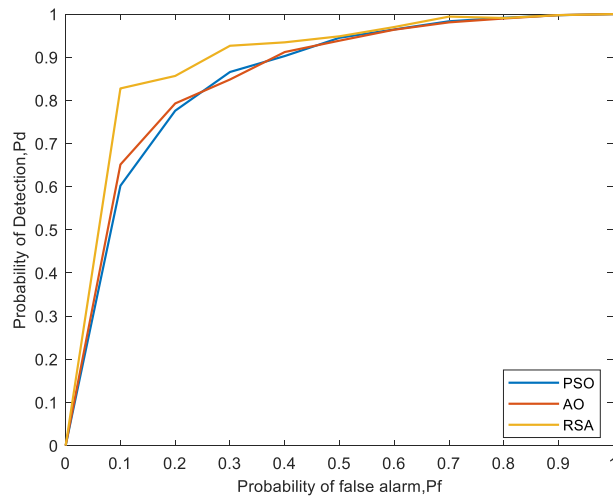


Fig. 4.  $P_f$  vs  $P_d$  for 24 secondary users.

## 5. CONCLUSION

Cognitive radio is a technology that offers an opportunistic solution to the spectrum scarcity issue caused by the increasing number of wireless communication devices. Spectrum sensing is a vital process of cognitive radio. In this paper, we focused on adapting different metaheuristic algorithms to the soft fusion scheme to enhance the effectiveness of cooperative spectrum sensing systems in cognitive radio. We used RSA, PSO and AO to perform weight optimization. Compared to PSO and AO, RSA offers better performance in terms of detecting spectrum holes and determining the presence of primary users, which are measures of detection probability.

## Acknowledgment

This work was supported by Erciyes University Scientific Research Projects Coordination Unit (Project No: FYL-2022-12479).

## Author's Contribution

Burcu Ketenci contributed to the implementation of the research, analysis of the result, and writing; Tareq M. Shami provided support for the coding part of the study, and Necmi Taşpınar contributed to the review of the manuscript.

## Statement of Conflict of Interest

Authors have declared no conflict of interest.

## REFERENCES

- [1] S. Haykin "Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, no. 2, pp. 201–220, 2005.
- [2] B. Wang, K.J.R. Liu "Advances in Cognitive radio networks: A survey," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 5, no. 1, pp. 5–23, 2011.
- [3] P.Verma, B.Singh "On the decision fusion for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks," *Wireless Networks*, vol. 23, no. 7, pp. 2253–2262, 2016.
- [4] I.F. Akyildiz, W.-Y. Lee, M.C. Vuran, and S. Mohanty "NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey," *Computer Networks*, vol. 50, no. 13, pp. 2127–2159, 2006.
- [5] W. Zhang, R. Mallik, and K. Letaief "Optimization of cooperative spectrum sensing with energy detection in cognitive radio networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 12, pp. 5761–5766, 2009.
- [6] R. Vadivelu, K. Sankaranarayanan, and V. Vijayakumari "Matched filter based spectrum sensing for cognitive radio at low signal to noise ratio," *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. 62, no. 1, 2014.
- [7] K. Kim, I.A. Akbar, K.K. Bae, J.-S. Um, C.M. Spooner, and J.H. Reed "Cyclostationary Approaches to Signal Detection and Classification in Cognitive Radio," *2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, pp. 212-215, 2007.
- [8] Y.-C. Liang, K.-C. Chen, G. Y. Li, and P. Mahonen, "Cognitive radio networking and communications: an overview," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 7, pp. 3386–3407, Sep. 2011.
- [9] Z. Quan, S. Cui, H. Vincent Poor, and A.H. Sayed "Collaborative wideband sensing for cognitive radios," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 25, no. 6, pp. 60–73, 2008.
- [10] Z. Quan, S. Cui, and A.H. Sayed "Optimal Linear Cooperation for Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 2, no. 1, pp. 28–40, 2008.
- [11] J. Ma, G. Zhao, and Y. Li "Soft combination and detection for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, no. 11, pp. 4502–4507, 2008.
- [12] H. Sakran, M. Shokair "Hard and softened combination for cooperative spectrum sensing over imperfect channels in cognitive radio networks," *Telecommunication Systems*, vol. 52, no. 1, pp. 61–71, 2011.
- [13] D. Teguig, B. Scheers, and Vincent Le Nir "Data fusion schemes for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks," *2012 Military Communications and Information Systems Conference (MCC)*, pp. 1–7, Gdansk, Poland, 2012.
- [14] T.M. Shami, A.A. El-Saleh, and A.M. Kareem "On the detection performance of cooperative spectrum sensing using particle swarm optimization algorithms," *IEEE 2nd International Symposium on Telecommunication Technologies*, pp. 110–114, Langkawi, Malaysia, 2014.
- [15] A.A. El-Saleh, M. Ismail, and M.A.M. Ali "Genetic algorithm-assisted soft fusion-based linear cooperative spectrum sensing," *IEICE Electronics Express*, vol. 8, no. 18, pp. 1527–1533, 2011.
- [16] M. Akbari, M. Ghanbarisabagh "A novel evolutionary-based cooperative spectrum sensing mechanism for cognitive radio networks," *Wireless Personal Communications*, vol. 79, no. 2, pp. 1017-1030, 2014.
- [17] X. Li, L. Lu, L. Liu, G.Li, X.Guan "Cooperative spectrum sensing based on an efficient adaptive artificial bee colony algorithm," *Soft Computing*, vol. 19, no. 13, pp. 597-607, 2015.
- [18] F. Azmat, Y. Chen and N. Stocks "Bio-inspired collaborative spectrum sensing and allocation for cognitive radios," *IET Communications*, vol. 9, no. 16, pp.1949-1959, 2015.
- [19] L. Abualigah, M. A. Elaziz, P. Sumari, Z. W. Geem, and A. H. Gandomi "Reptile Search Algorithm (RSA): A nature-inspired meta-heuristic optimizer," *Expert Systems with Applications*, vol. 191, p. 116158, 2022.
- [20] I. Al-Shourbaji, N. Helian, Y. Sun, S. Alshathri, and M. Abd Elaziz "Boosting Ant Colony Optimization with Reptile Search Algorithm for Churn Prediction," *Mathematics*, vol. 10, no. 7, p. 1031, 2022.