



**BANDIRMA  
ONYEDİ EYLÜL  
ÜNİVERSİTESİ**

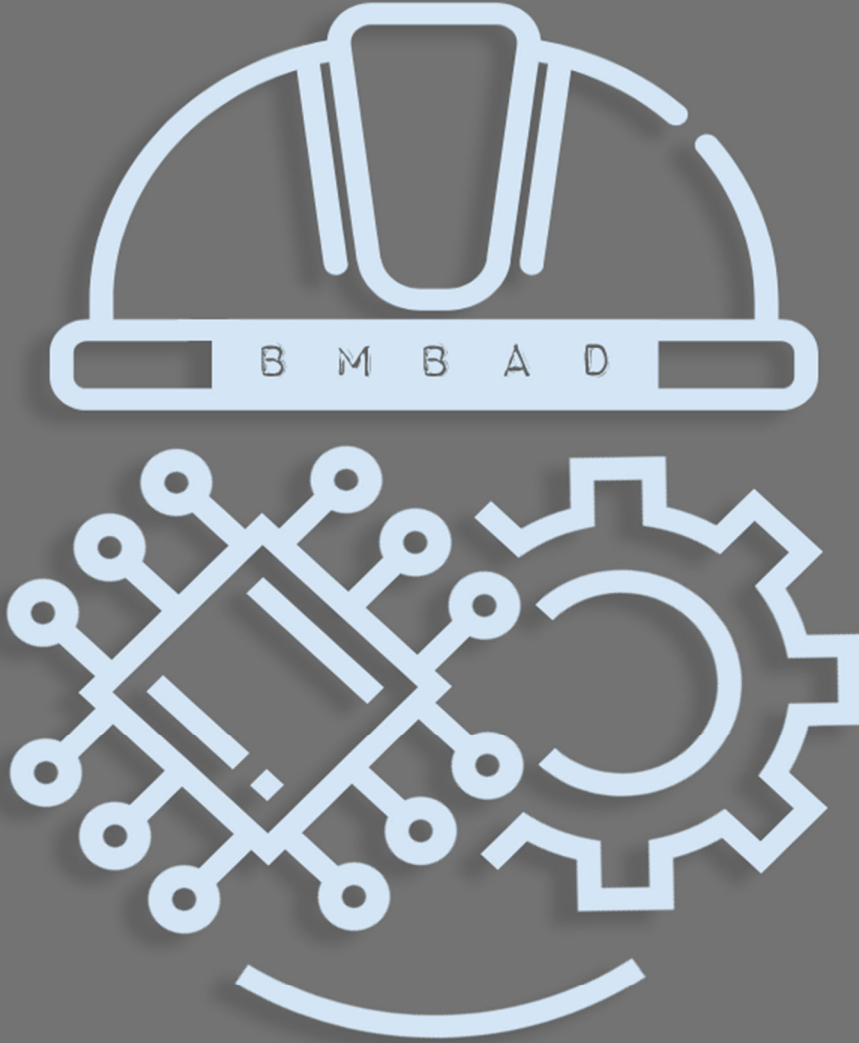
**BMBAD  
BJESR**

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

**Cilt/Volume : 5**

**Sayı/Issue : 1**

**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 1

2023

ISSN: 2687-4415

#### Sahibi/Owner

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

#### Baş Editor /Editor in Chief

Doç.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. Rafet DURGUT (Bandırma Onyedi Eylül Üniversite) (Bilgisayar)

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

Doç. Dr. Muhammet Nuri SEYMAN, mseyman@bandirma.edu.tr, Bandırma Onyediy Eylöl 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 Sentiment 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, herbay@thk.edu.tr, Türk Hava Kurumu 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

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

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

Doç. Dr. Selim ÖNCÜ, soncu@karabuk.edu.tr, karabük Üniversitesi

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

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

Doç. Dr. Hasan YAMIK, hasan.yamik@bilecik.edu.tr, Bilecik Şeyh Edebali 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 Onyedı Eylül Üniversitesi

Dr. Öğr. Üye. Kenan HATIPOĞLU, kenan.hatipoglu@mail.vwu.edu, West Virginia Area University

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

### Yazıřma Adresi/ Correspondence Address

Bandırma Onyedı 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)

Yüz Görüntüleri İçin Yeni Bir Süper Çözünürlük Yaklaşımı ve Farklı Görüntü Kalitesindeki Veri Setlerinin Başarı Performansı Üzerindeki Etkileri

*A New Super Resolution Approach for Face Images and the Effects of the Datasets of Different Image Quality on the Success Performance* **1-8**

**Fatih Mehmet ŞENALP**

(Araştırma Makalesi/Research Article)

3B Şekil Oluşturmak için Alt Örneklemesiz Shearlet Dönüşümüne Dayalı Yeni ve Yüksek Kaliteli Odaklama Ölçüm Operatörü

*A New High Quality Focus Measurement Operator Based on Nonsampled Shearlet Transform for 3D Shape Reconstruction* **9-19**

**Hülya DOĞAN, Ramazan Özgür DOĞAN**

(Araştırma Makalesi/Research Article)

Tag: Blokzincirinden Esinlenilen Veri Yapısı

*Tag: A Blockchain Inspired Data Structure* **20-33**

**Alpay DORUK, Savaş TAKAN, Fatih SOYGAZİ, Zeynep DEMİRTAŞ, Elnur AKKURT**

(Araştırma Makalesi/Research Article)

Endüstriyel Kontrol Sistemlerinde Yenilikçi Anomali Tespit Sistemlerinin İncelenmesi

*Investigation of Innovative Anomaly Detection Systems in Industrial Control Systems* **34-46**

**Kerem ÇINAR, Murat İSKEFİYELİ**

(Araştırma Makalesi/Research Article)

A case study: Understanding The Nature of Memories Architectures in FPGAs to Built-up Bi-CAM

*Bi-CAM İnşa Etmek İçin FPGA'lardaki Belleklerin Mimarilerinin Doğasını Anlamak: Bir Vaka Çalışması* **47-56**

**Abdelkader LAZZEM, Halit ÖZTEKİN, İhsan PEHLİVAN**

Haploid ve Diploid Mısırların Aktif Öğrenme Yaklaşımı ile Sınıflandırılması

*Active Learning-Based Classification of Haploid and Diploid Maize Seeds*

57-66

**Ali GÜNEŞ, Emrah DÖNMEZ**

---

---

Bright and Dark Solitary Love Waves in a Heterogeneous Semi-Space Coated with a Heterogeneous Elastic Layer

*Elastik Heterojen Bir Tabakayla Kaplı Heterojen Yarım Uzayda Parlak ve Karanlık Soliter Love Dalgaları*

67-78

**Ekin DELİKTAŞ-ÖZDEMİR**

---

---

Ses Dosyalarının ENF Tabanlı Adli Analizine Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü Parametre Seçimlerinin Etkisi

*The Effect of Short-Time Fourier Transform Parameters Choice on ENF-based Forensic Analysis of Audio*

79-87

**Ali Berk YALINKILIÇ, Saffet VATANSEVER**

---

---

Yapay Zekâ Yaklaşımlarını Kullanarak Retinopati Hastalığının Tespiti

*Detection of Retinopathy Solutions Using Artificial Intelligence Approaches*

88-97

**Abdulrahman ÇAVLI, Mesut TOĞAÇAR**

---

---

Evrişimli Sinir Ağlarında Transfer Öğrenmesi ile GAN tarafından Üretilen Sahte Görüntü Tespiti

*GAN-Generated Fake Image Detection with Transfer Learning in Convolutional Neural Networks*

98-107

**Ece ECEMİŞ, Kemal GÜNER, Umut KURAN, Emre Can KURAN**

---

---

OFDM-IM Sisteminde SLM Yöntemini Kullanarak Tepe Gücü/Ortalama Güç Oranının Düşürülmesi

*Reduction of Peak-to-Average Power Ratio Using SLM Method in OFDM-IM System*

108-114

**Kemal AKÖZLÜ, Necmi TAŞPINAR**

---

---

Araç Sınıflandırılmalı Trafik Hız Sınırı Ceza Sisteminin Bulanık Mantık Temelli Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi

*Fuzzy Logic Based Design and Implementation of Vehicle Classified Traffic Speed Limit Penalty System*

115-126

**Yalçın IŞIK, Mehmet KEHYA, Ahmet KAYABAŞI**

---

---

FDCCII Based New Memcapacitor Emulator Circuit with Electronically Tunable

*Elektronik Olarak Ayarlanabilen FDCCII Tabanlı Yeni Memkapasitör Emülatör Devresi*

127-134

**Muhammet Oğuz KORKMAZ, Abdullah YEŞİL**

---

---

Mikroskobik Kan Hücre Görüntülerinin Güncel Derin Öğrenme Mimarileri ile Bölütlemesi

*Segmentation of Microscopic Blood Cell Images with Current Deep Learning Architectures*

135-141

**Murat TOPTAŞ, Davut HANBAY**

---

---

Yenilenebilir Enerji Kaynaklarını İçeren Çok Kaynaklı Tek Alanlı Modern Güç Sistemi için Yük Frekansı Kontrolünün İyileştirilmesi

*Improving Load Frequency Control for Multi-Source Single Area Modern Power System Including Renewable Energy Sources*

142-154

**Yunus BALCI, Serhat DUMAN**

---

---

Güldüren (Emet-Kütahya) Bölgesindeki Demir Cevherleşmesinin Jeolojik, Mineralojik ve Jenetik Açından İncelenmesi

*Geological, Mineralogical and Genetic Investigation of Iron Mineralization in Güldüren (Emet-Kütahya) Region*

155-168

**Nursel ÖKSÜZ, Özge KABCUK, Mehmet SAVAŞ, İsmail KOÇAK**

---

---

Kötü Amaçlı Yazılım Türlerinin Tespitinde Kullanılan 1B Verilerin 2B Barkod Türlerine Dönüştürülerek Derin Ağlarla Analizlerinin Gerçekleştirilmesi

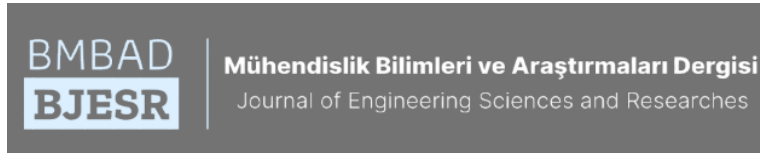
*Conversion of 1D Data Used in Detection of Malware Types to 2D Barcode Types and Analysis with Deep Networks*

166-177

**Mesut TOĞAÇAR**

---

---



## Yüz Görüntüleri İçin Yeni Bir Süper Çözünürlük Yaklaşımı ve Farklı Görüntü Kalitesindeki Veri Setlerinin Başarı Performansı Üzerindeki Etkileri

### A New Super Resolution Approach for Face Images and the Effects of the Datasets of Different Image Quality on the Success Performance

<sup>1</sup>Fatih Mehmet ŞENALP 

<sup>1</sup>Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Selçuklu/Konya, Türkiye

<sup>1</sup>fatih.senalp@gmail.com.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 13 October 2022

Accepted : 28 January 2023

##### Keywords:

Super Resolution, Deep Learning, Image Quality Metrics, Datasets of Different Image Quality

#### ABSTRACT

The term of resolution is of great importance for various computer vision applications. In recent years, super resolution applications to increase image resolutions have become the focus of researchers, thanks to hardware advances. In this paper, a new deep learning-based super resolution model (SISRGAN) is proposed. In addition, three different datasets with different quality levels were created from the CelebA dataset for super resolution applications. The results obtained as a result of the studies were compared with the state-of-the-art models in the literature using image quality metrics. The proposed deep network model showed a superior success in terms of both visual quality improvement and metric values. The proposed model showed a success performance of approximately 0.5 db in PSNR values, 2% in SSIM values and 1 unit in BRISQUE values compared to the TSRGAN model, which achieved the second best values in terms of metric values. In addition, it has been seen that the low resolution image quality in which the super resolution image will be created directly affects the success.

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

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 13 Ekim 2022

Kabul : 28 Ocak 2023

##### Anahtar Kelimeler:

Süper Çözünürlük, Derin Öğrenme, Görüntü Kalite Metrikleri, Farklı Görüntü Kalitesindeki Veri Setleri

#### ÖZET

Çözünürlük kavramı, çeşitli bilgisayarlı görü uygulamaları için büyük önem arz etmektedir. Son yıllarda donanımsal ilerlemeler sayesinde görüntü çözünürlüklerini artırmaya yönelik süper çözünürlük uygulamaları araştırmacıların odak noktası haline gelmiştir. Bu çalışmada ise yeni bir derin öğrenme tabanlı süper çözünürlük modeli (SISRGAN) önerilmiştir. Ayrıca, süper çözünürlük uygulamaları için CelebA veri setinden farklı kalite seviyelerinde üç farklı veri seti oluşturulmuştur. Çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar görüntü kalite metrikleri kullanılarak literatürde yer alan önemli modeller ile karşılaştırılmıştır. Önerilen derin ağ modelinin hem görsel kalitedeki iyileşme hem de metrik değerleri açısından daha üstün bir başarı ortaya koymuştur. Önerilen model, metrik değerleri bakımından en iyi ikinci değerleri elde eden TSRGAN modeline göre PSNR değerlerinde yaklaşık 0.5 db, SSIM değerlerinde %2 ve BRISQUE değerlerinde 1 birim daha üstün bir başarı performansı ortaya koymuştur. Ek olarak, süper çözünürlüklü görüntünün oluşturulacağı düşük çözünürlüklü görüntü kalitesinin başarıyı doğrudan etkilediği görülmüştür.

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

## 1. GİRİŞ

Çözünürlük, belirli bir birim içindeki piksel yoğunluğunun bir ölçüsüdür. Daha yüksek çözünürlüklü görüntüler, görüntü hakkında daha fazla ayrıntı sağlamaktadır. Bazı alanlarda, üzerinde çalışılacak görsellerin ayrıntılarını artırmaya önemli derecede ihtiyaç duyulmaktadır [1].

Süper çözünürlük, düşük çözünürlüklü görüntüleri minimum kayıpla geliştirmek için kullanılan bir tekniktir. Bu teknik, gürültü giderme ve bulanıklaştırma gibi çeşitli işlemleri içerebilmektedir. Görüntü iyileştirme, insan anlayışını geliştirmek ve hesaplamalı görevlerden daha yüksek doğruluk değerleri elde etmek için önemlidir. Daha yüksek çözünürlük, sahne hakkında daha fazla ayrıntı sağlamaktadır [2]. Süper çözünürlükteki ilk algoritmada Fourier dönüşümü tanıtıldı ve verilen çözüm araştırmacılar tarafından ilgiyle takip edildi. Bir sinir ağı ile çözülen bu çözümde, parmak izi görüntülerinin çözünürlüğünü iyileştirmek için çalışma gerçekleştirilmiştir. Algoritma tabanlı süper çözünürlük uygulamaları için süper çözünürlük terimi yapılacak olursa, yüksek çözünürlük (referans) görüntünün düşük çözünürlüklü karşılığında tahmini ve referans görüntüye yaklaşımı olarak tanımlanabilmektedir [3].

İnterpolasyon gibi süper çözünürlüğe benzer bazı geleneksel görüntü iyileştirme yöntemleri vardır. İnterpolasyon, süper çözünürlüğe benzer bir tekniktir ancak interpolasyon yüksek frekanslı ayrıntıları başarılı bir şekilde elde edememektedir. İnterpolasyon tekniği, en yakın komşu interpolasyonu, çift doğrusal interpolasyonu ve biküçük interpolasyonu gibi birkaç basit ve uygulaması kolay yöntemleri kapsamaktadır; fakat görsel kalite açısından da iyi sonuçlar göstermemektedirler. Bu yöntemler arasında en iyi sonuçları biküçük interpolasyon tekniği elde etmekte ve bu yöntem 4x4 (16 piksel değeri) komşuluk ilişkisinden yararlanmaktadır. Buna karşın çift doğrusal interpolasyon tekniğinde 2x2 komşuluk ilişkisi kullanılırken, en yakın komşu tekniğinde ise en yakın piksel noktasının değeri baz alınmaktadır [4].

Son yıllardaki donanım teknolojilerindeki ve derin öğrenme alanındaki gelişmeler süper çözünürlük uygulamalarına olan ilgiyi artırmıştır. Burada, derin ağ mimarilerinin geleneksel yöntemlere göre daha başarılı sonuçlar elde ettiği görülmüştür. Süper çözünürlük, birçok alanda önemli uygulamalara sahiptir. Örnek olarak; sahnelerde nesne tespiti (özellikle küçük nesnelere), gözetleme videolarında yüz tanıma, tıbbi görüntüleme, uzaktan algılamada görüntülerin yorumlanmasının iyileştirilmesi, astronomik görüntüler ve adli tıp gibi uygulama alanları gösterilebilmektedir [5]. Bunların yanı sıra son yıllarda termal ve hiperspektral görüntüleme gibi alanlarda da süper çözünürlük metodlarından yararlanılmaktadır [6].

Derin öğrenme tabanlı süper çözünürlük çalışmaları için ilk olarak evrişimli sinir ağları (CNN) tabanlı modeller kullanılmıştır. Dong vd. SRCNN modelini sunmuşlar ve düşük çözünürlüklü- yüksek çözünürlüklü görüntüler arasında uçtan uca haritalama (end to end mapping) tekniğini uygulamışlardır [7]. Ancak, bu tür sığ sinir ağları, giriş görüntülerinin çok seviyeli özelliklerini elde etme yeteneğini sınırlı tutmuştur. Önceki kenar görüntü süper çözünürlüğü için elverişli olmasına dikkat ederek, Liang vd. Derin ağ modelini eğitmek için ilk olarak düşük çözünürlüklü (DÇ) görüntüleri ile Sobel kenarlarını kullanmışlardır [8]. Bununla birlikte modelin başarısında bariz bir iyileşme elde edilememiştir. Daha sonra Kim vd. SRCNN modelinden esinlenerek tasarladıkları VDRS modelinde kalıntı öğrenme (residual learning) yönteminden yararlanmışlardır. Ayrıca evrişim katmanlarının sayısını 3 yerine 20 olarak düzenlemişler ve daha başarılı sonuçlara ulaşmışlardır. Burada, PSNR değeri 0,5-1 dB ve SSIM değeri ise %1-3 aralığında artış göstermiştir [9].

CNN tabanlı gerçekleştirilen uygulamalarda, daha çok ortalama kare hatayı (MSE) olabildiğince minimize etmek amaçlanmıştır. Son yıllarda ise görsellik açısından daha kaliteli görüntüler elde edebilmek amacıyla çekimsel üretici ağlar (GAN) tabanlı modeller önerilmiştir [10]. Ledig vd. SRGAN modelini geliştirmişler ve bu modelin üretici ağına bağlantı atlama tekniği uygulamışlardır [11]. SRGAN modeli, görsellik açısından CNN tabanlı modellere göre daha başarılı sonuçlara ulaşılmasını sağlamıştır. Bu durum GAN tabanlı süper çözünürlük uygulamalarına olan ilgiyi artırmıştır. Park vd. yalnızca oluşturulan görüntüleri değil, aynı zamanda özellik alanındaki hiyerarşik özellikleri de ayırt etmek için iki ayırt ediciye sahip GAN yapısına benzer bir model olan SRFeat'i sunmuşlardır [12]. Bu ek ayırt edici ağ, süper çözünürlüklü görüntüleri oluştururken üretici ağı özellik yaklaşımına dikkat çekmeye zorlamaktadır. Daha sonra, Wang vd. SRGAN modelini geliştirerek yoğun blok (dense block) kullandıkları ESRGAN modelini önermişlerdir. Bu modelin yapısında, her yoğun bloğun girişi aynı zamanda sıradaki bloğun çıkışına da bağlıdır ve artık öğrenme (residual learning) tekniğini güçlendirecek şekilde bağlantılar düzenlenmiştir [13]. Burada, SRGAN modeli ile karşılaştırıldığında 0.1-0.4 dB aralığında artışlar elde ettiği gözlenmiştir. Yakın zamanda gerçekleştirilen diğer bir çalışmada ise Senalp ve Ceylan geliştirdikleri TSRGAN ile süper çözünürlük uygulamaları gerçekleştirilmiş ve oldukça başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. Burada, SRGAN modeline göre PSNR değerinde 0.6 dB, SSIM değerinde ise %2 daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir [14].

Bu çalışmada, literatürde yaygın olarak kullanılan veri seti üzerinde süper çözünürlük uygulamaları gerçekleştirmek için yeni bir derin öğrenme tabanlı model önerilmiştir. Ayrıca, kullanılan veri setindeki görüntü kalitesinin başarı performansı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, kullanılan veri setinden yararlanarak daha düşük kalite görüntülerden oluşan iki farklı yeni veri seti daha oluşturulmuştur. Sonraki bölümlerde bu veri setleri, geliştirilen derin ağ modeli ve sonuçların değerlendirilmesi hakkında detaylı bilgiler verilmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, gerçekleştirilen süper çözünürlük uygulamaları için kullanılan ve farklı kalitede oluşturulan veri setleri, geliştirilen derin ağ mimarisi (SISRGAN) ve başarı performansı değerlendirme ölçütleri ile ilgili detaylı bilgiler verilmektedir.

### 2.1. Veri Setleri

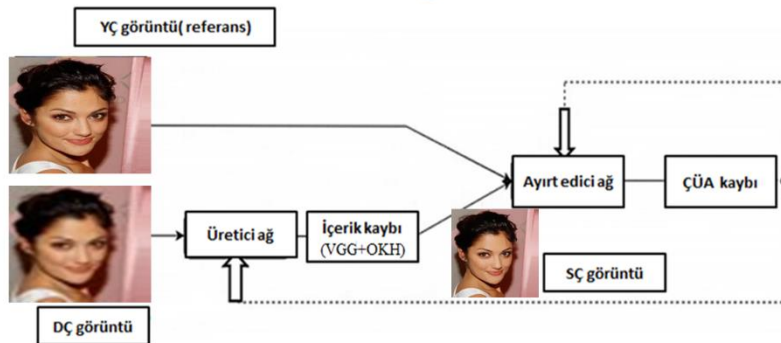
Bu çalışmada, önerilen derin ağ mimarisinin eğitim ve test işlemleri literatürde yaygın bir şekilde kullanılan CelebA veri seti [15] üzerinde yerine getirilmiştir. Bu veri setinden rastgele seçilen 2000 görüntüden 1900 tanesi eğitim, 100 tanesi ise test süreçleri için ayrılmıştır. Bu görüntüler yüksek çözünürlüklü (YÇ-referans) görüntüler olarak değerlendirilmiş ve bazı örnekler Şekil 1’de paylaşılmıştır. CelebA veri setine ait bu yüksek çözünürlüklü görüntüler 178x218 boyutlarındadırlar. Daha sonra bu yüksek çözünürlüklü (referans) görüntüler MATLAB ortamında 1/4 oranında alt ölçeklenerek (down-scaling) düşük çözünürlüklü görüntü veri seti oluşturulmuştur. Böylece 1900 yüksek-düşük çözünürlüklü görüntü çifti eğitim süreci için hazır hale getirilmiştir. Oluşturulan bu veri setine ek olarak, yüksek çözünürlüklü görüntülerin alt ölçeklenmesi sırasında %90 kalite faktörü ile kaydetme ve 4x4 maksimum havuzlama (max. pooling) yöntemleri kullanılarak daha az kalitede düşük çözünürlüklü görüntüler elde edilmiştir. Böylece üç farklı yüksek-düşük çözünürlüklü eğitim ve test veri setleri meydana getirilmiştir. Ayrıca, gerçekleştirilen süper çözünürlük uygulamaları sırasında eğitim ve test veri setleri birbirinden tamamen farklı olacak şekilde düzenlenmiştir.



Şekil 1. CelebA veri setine ait örnek görüntüler.

### 2.1. Derin Ağ Mimarisi

Bu bölüm, süper çözünürlük çalışmalarının başarısını artırmak ve daha hızlı bir eğitim süreci yerine getirebilmek amacıyla geliştirilen SISRGAN (Single Image Super Resolution Generative Adversarial Networks) modeli ile ilgili detaylı bilgiler vermektedir. SISRGAN modeli literatürde önemli yere sahip TSRGAN [4] modelinden esinlenerek daha yüksek kalitede süper çözünürlüklü görüntüler elde etmek amacıyla geliştirilmiştir. Önerilen bu model çekişmeli üretici ağlar (GAN) tabanlı bir model olup, üretici (generator) ve ayırt edici (discriminator) ağ kısımlarından meydana gelmektedir [16]. Üretici ağ, x4 üst ölçekleme yaparak süper çözünürlüklü görüntüyü (SÇ) meydana getirmektedir. Modelin çalışma prensibine göre ağ kaybından yararlanarak geri yayılım (backpropagation) tekniği uygulanmaktadır. SISRGAN mimarisinin genel gösterimi Şekil 2’de verilmiştir.

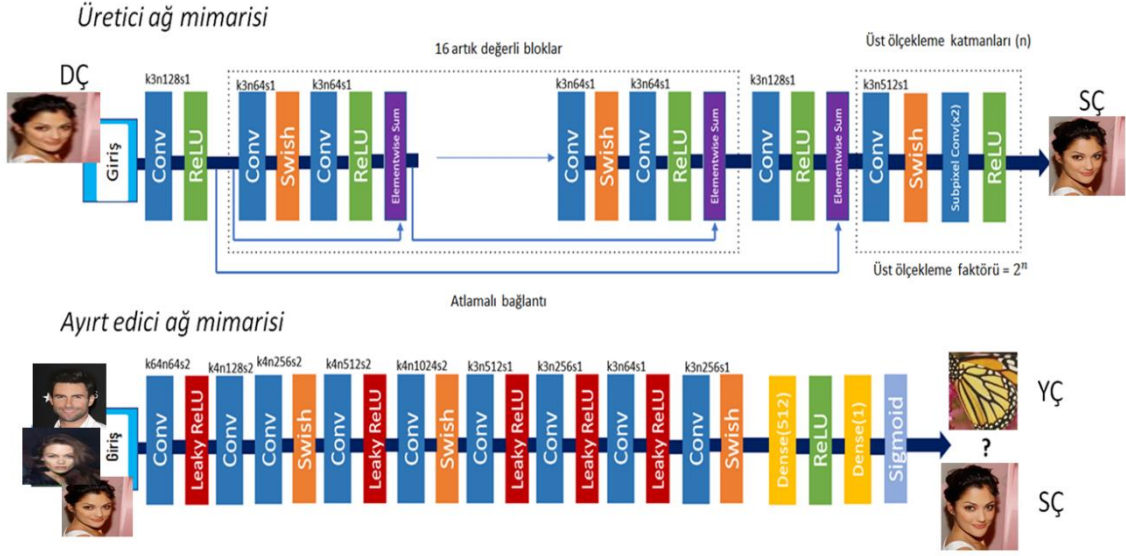


Şekil 2. SISRGAN mimarisi.

Önerilen SISRGAN modelinde yığın normalleştirme (batch normalization) katmanları kullanılmayarak eğitim hızı artırılmıştır. Ayrıca kullanılan swish aktivasyon fonksiyonu sayesinde negatif kısımda da öğrenme sağlanmıştır. Ek olarak, üretici ağ kısmında bağlantı atlama (skip connection) tekniği uygulanarak hem modelin başarısı artırılmış olup hem de eğitim süreci kolaylaştırılmıştır. Üretici ve ayırt edici ağların mimarileri Şekil 3’te gösterilmektedir. SISRGAN modeline ait derin ağ mimarisi genel olarak konvolüsyon, aktivasyon ve yoğun



(dense) katmanlarından meydana gelmektedir. Ayrıca, üretici ağ mimarisinde üst ölçekleme (up-scaling) işlemini gerçekleştirmeye yarayan alt piksel konvolüsyon (sub-pixel convolution) katmanları kullanılmaktadır. Geliştirilen modelde x4 üst ölçekleme faktörü için iki adet alt piksel konvolüsyon katmanı yer almaktadır.



Şekil 3. Üretici ve ayırt edici ağ mimarileri.

Matematiksel İfade:

$$\delta_G = \min \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N L_{SISRGAN}(G_{\delta_G}(I_n^{DC}), I_n^{YC}) \quad (1)$$

Denklem 1’de verilen formülde  $\delta_G$ , derin ağ modelinin ağırlık ve sapma değerlerini ifade ederken G ise SÇ görüntüyü temsil etmektedir. Ayrıca,  $I_n^{DC}$  ve  $I_n^{YC}$  ise sırasıyla eğitim veri setine ait DC ve YÇ örnek görüntüleri temsil etmektedir. Algısal kayıp (perceptual loss) değerini temsil eden  $L_{SISRGAN}$ , aynı zamanda geri yayılım yönteminde kullanılan derin ağın kaybıdır ve metrik değerlerindeki iyileşmenin yanı sıra görsel kaliteyi de artırabilmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu algısal kayıp değeri Denklem 2’de verilen formülle hesaplanmaktadır [17].

$$L_{\text{toplam}(SISRGAN)} = L_{mse} + L_{vgg} + L_{\text{çekişmeli}} \quad (2)$$

Ortalama Kare Hata (MSE), derin ağ modellerinin başarısını gösteren pozitif değerli bir ölçüttür. MSE değerinin azalması modelin başarısının arttığını göstermektedir [18]. MSE, Denklem 3’te verilen formülle hesaplanmaktadır ve n veri setinin boyutunu,  $e_j$  ise tahmin ile esas değer arasındaki hata değerini temsil etmektedir.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n e_j^2 \quad (3)$$

VGG kayıp değeri hesaplanırken önceden eğitilmiş VGG19 modelinden yararlanılmış olup, hesaplama formülü Denklem 4’te verilmiştir.  $G_{\phi}(I^{DC})$ , SÇ görüntüyü,  $I^{YC}$  ise YÇ görüntüyü temsil etmektedir. Ayrıca  $\psi_{i,j}$ , i. maksimum havuzlama (maxpooling) katmanından önce j. konvolüsyon katmanındaki özellik haritalarını gösterirken,  $W_{i,j}$  ve  $H_{i,j}$  özellik haritalarının boyutlarını göstermektedir [19].

$$L_{VGG_{i,j}}^{SÇ} = \frac{1}{W_{i,j} H_{i,j}} \sum_{m=1}^{W_{i,j}} \sum_{n=1}^{H_{i,j}} (\psi_{i,j}(I^{YC})_{m,n} - \psi_{i,j}(G_{\phi}(I^{DC}))_{m,n})^2 \quad (4)$$

Çekişmeli kayıp (adversarial loss), daha kaliteli görüntüler oluşturabilmek amacıyla yapısal olarak benzerliği artırma esasına dayanarak hesaplanan bir kayıp değeridir. Bu kayıp değerinin formülü Denklem 5’te verilmiştir.

Ayırt edici ağıın tüm eğitim veri seti üzerindeki olasılıklarına bağlı olarak hesaplanmaktadır.  $D_\alpha(G_\beta(I^{DC}))$ , SÇ görüntünün YÇ (referans) görüntüye ne ölçüde benzediğini göstermektedir.

$$L_{\text{Çekişmeli}}^{S\text{Ç}} = \sum_{n=1}^N -\log D_\alpha(G_\beta(I^{DC})) \quad (5)$$

## 2.2. Değerlendirme Kriterleri

Tepe sinyal gürültü oranı (PSNR), iki sinyal arasındaki sinyal kalitesini etkileyen bozulma gürültüsünün etkisine bağlı bir oran hesaplama amacıyla kullanılmaktadır. İki görüntü için hesaplanan bu oran desibel formunda hesaplanmaktadır. PSNR değeri, sinyaller geniş dinamik aralıklara sahip olduğu için desibel ölçeğinin logaritma terimi olarak hesaplanmaktadır. Tepe sinyal gürültü oranı, düşük kalitedeki görüntülerin yeniden oluşturulması sonucu süper çözünürlüklü görüntülerin kalitelerini değerlendirmek için kullanılan en yaygın ve önemli kalite değerlendirme metriklerindedir. Orjinal sinyal referans veri olarak kabul edilirken, gürültü ise sıkıştırma veya bozulmadan kaynaklanan hata olarak tanımlanmaktadır. PSNR, yeniden yapılandırma kalitesine ilişkin insan algısının yaklaşık tahmini olarak ifade edilebilmektedir. PSNR değerinin hesaplama formülü Denklem 6'da verilmiştir. Bu denklemde,  $I_0$  referans görüntüyü,  $I$  ise oluşturulan süper çözünürlüklü görüntüyü temsil etmektedir [20].

$$PSNR = 20 \times \log_{10} \left( 255 \sqrt{MSE(I, I_0)} \right) \quad (6)$$

Yapısal benzerlik indeksi (SSIM), algıya dayalı bir metriktir. Bu yöntemde görüntü bozulması, yapısal bilgilerdeki algısal değişiklik olarak kabul edilmektedir. Yapısal bilgi terimi, birbirine güçlü şekilde bağlı pikseller veya uzamsal olarak kapalı pikseller hakkında vurgu yapmaktadır. Bu güçlü bir şekilde birbirine bağımlı pikseller, görüntü alanındaki görsel nesnelere hakkında daha önemli bazı bilgileri belirtmektedir. SSIM, görüntü ve videoların algılanan görsel kalitesini tahmin etmektedir. Yani, orijinal ve yeniden oluşturulmuş iki görüntü arasındaki benzerliği ölçmektedir. SSIM değerinin hesaplama formülü Denklem 7'de verilmiş olup,  $\mu_R(n)$  ve  $\mu_D(n)$  sembolleri, referans ( $I_R$ ) ve bozuk ( $I_D$ ) görüntü dizisinin n. çerçevesinin ortalamasını temsil etmektedir. Ayrıca,  $\sigma_R(n)$  ve  $\sigma_D(n)$ , referans ( $I_R$ ) ve bozuk ( $I_D$ ) görüntü dizisinin n. çerçevesinin standart sapmasını temsil etmektedir. C1, C2 ise kararsızlıktan kaçınmak için kullanılan sabitlerdir [21].

$$SSIM = \frac{[2\mu_R(n)\mu_D(n) + C1][2\sigma_R(n)\sigma_D(n) + C2]}{[\mu_R^2(n) + \mu_D^2(n) + C1][\sigma_R^2(n) + \sigma_D^2(n) + C2]} \quad (7)$$

Kör/referanssız görüntü uzamsal kalite değerlendiricisi (BRISQUE), referans istemeyen bir ölçüm metriğidir. Bu algoritma istatistik tabanlı ve referanssız bir görüntü kalite değerlendirme metodudur. BRISQUE algoritmasının içindeki detay kayıpları, istatistiksel gözlem ve yöntemler yardımıyla herhangi bir referansa ihtiyaç duyulmadan hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu değer 0'a yaklaştıkça detay kaybı azalacağından dolayı görüntünün iyileştirilmesi çalışmalarının daha başarılı olduğu kabul edilmektedir.

## 3. GERÇEKLEŞTİRİLEN SÜPER ÇÖZÜNÜRLÜK UYGULAMALARI

### 3.1. Eğitim Süreçlerinin Detayları

Bu çalışmada, derin öğrenme tabanlı süper çözünürlük modellerinin eğitim süreçleri için CPU E5-2680 işlemci ve 32 gb GeForce GTX 1080 Ti ekran kartına sahip bir iş istasyonu kullanılmıştır. Derin ağların eğitimi 10.000 iterasyon (epoch) sonunda tamamlanmıştır. Burada, önerilen SISRGAN modelinin diğer modellere göre eğitim hızının daha yüksek olduğu gözlemlenmiş olup, ağı eğitimi 19 saat sürmüştür. Ek olarak, TSRGAN ağının eğitimi 23 saat sürerken, SRGAN ağının eğitimi ise 25 saatte tamamlanmıştır. Ayrıca, önerilen modelde optimizasyon algoritması olarak Adam algoritması kullanılmış ve öğrenme oranı 0.001 tercih edilmiştir.

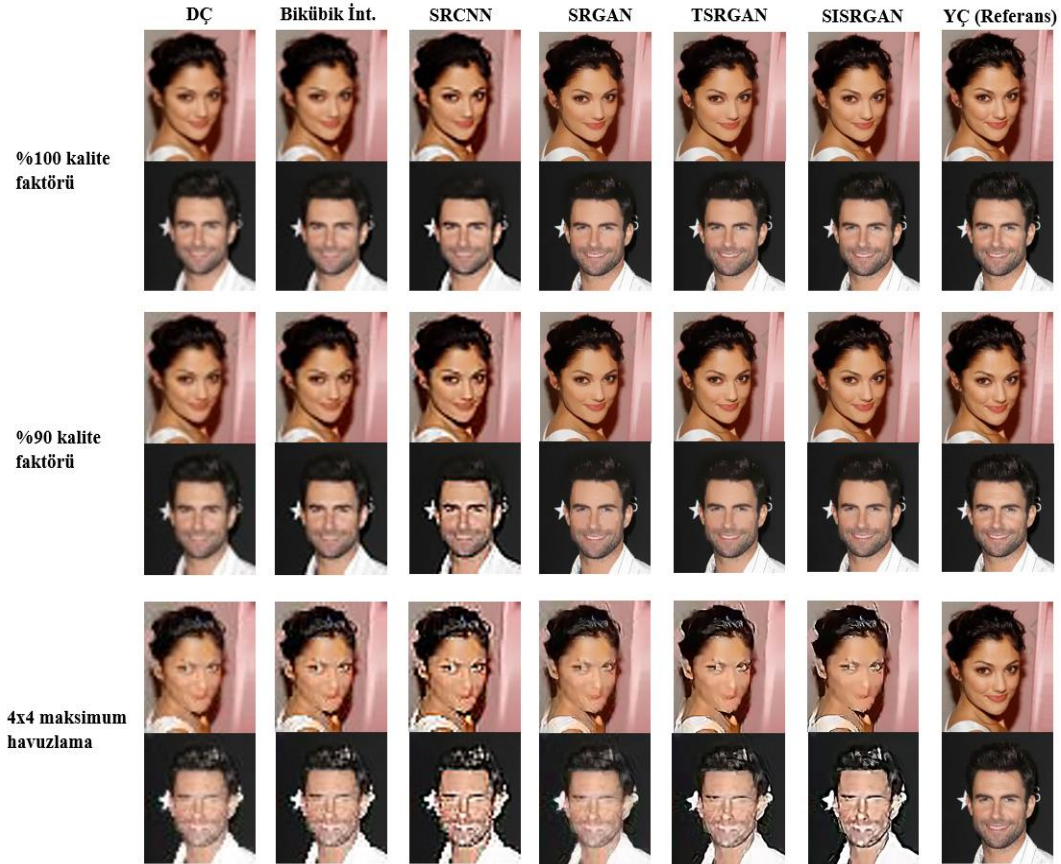
### 3.2. Süper Çözünürlük Uygulamalarının Sonuçları

Bu bölümde, oluşturulan üç farklı veri seti üzerinde gerçekleştirilen süper çözünürlük uygulamalarının sonuçları ayrı ayrı olacak şekilde paylaşılmıştır. CelebA veri seti ve bu veri setinden faydalanarak oluşturulmuş diğer iki veri seti için yürütülen çalışmalarda x4 üst ölçekleme tekniği kullanılmıştır. Çalışmalar sonucu elde edilen süper çözünürlüklü görüntülerin kalitesi görüntü kalite metrikleri olan PSNR ve SSIM ölçütleri baz alınarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, görsel bir değerlendirme yapabilmek amacıyla düşük çözünürlüklü, yüksek çözünürlüklü ve üretilen süper çözünürlüklü görüntülere ait bazı örnekler Şekil 4'te paylaşılmıştır. Burada, Bölüm 2.1'de detaylıca açıklanan üç farklı veri seti ile gerçekleştirilen çalışmaların sonuçları ayrı ayrı sunulmuştur. Elde edilen görüntüler incelendiğinde %100 ve %90 kalite faktörü ile oluşturulan veri setleri için yerine getirilen çalışmalarda sonuçların görsel olarak yakın olduğu ve %100 kalite faktörü ile oluşturulan



görüntülerin daha kaliteli olduğu gözlemlenmiştir; fakat 4x4 maksimum havuzlama yöntemi ile elde edilen görüntüler üzerinde yürütülen çalışmada ise başarının daha düşük seviyede kaldığı görülmektedir. Bu durum, elde edilen düşük çözünürlüklü görüntülerde piksel değerlerine dair veri kaybının çok daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte maksimum havuzlama yöntemiyle bir veri seti oluşturularak ilk defa gerçekleştirilen süper çözünürlük uygulamasında, önerilen SISRGAN modelinin literatürde yer alan önemli modellere (SRCNN, SRGAN, TSRGAN) karşı daha üstün bir başarıya ulaştığı gözlenmiştir çünkü kenar detay bilgileri (yüksek frekans bilgileri) daha iyi şekilde oluşturularak daha net süper çözünürlüklü görüntüler meydana getirilmiştir. Şekil 4 incelendiğinde, özellikle SISRGAN modeli olmak üzere süper çözünürlük tekniklerinin görüntüleri iyileştirme konusunda hem bulanıklık giderme hem de yüksek frekans bilgilerinin elde edilmesi açısından başarılı sonuçlar elde ettiği görülmüştür. Elde edilen bu görsel sonuçlar, süper çözünürlüklü görüntü formunun oluşturulacağı düşük çözünürlüklü ham görüntünün çözünürlüğünün başarı performansı üzerinde oldukça etkili olduğunu göstermiştir.

Geliştirilen derin ağ modelinin başarısını sayısal değerlerle de destekleyebilmek amacıyla üç farklı veri seti için PSNR ve SSIM değerleri bağımsız olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan görüntü kalite metriklerinin sonuçları Tablo 1’de verilmiş ve en iyi değerler kalın, en iyi ikinci değerler ise altı çizili olarak gösterilmiştir. Burada, önerilen SISRGAN modelinin genel çerçevede en başarılı sonuçları elde ettiği gözlenirken, TSRGAN modelinin ise en iyi ikinci başarıya sahip olduğu görülmektedir. SISRGAN modeli TSRGAN modeline göre PSNR değerlerinde 0,3-0,5 dB aralığında üstün bir başarı performansı ortaya koymuştur. Ayrıca, SSIM değerleri dikkate alındığında yaklaşık %2 daha başarılı sonuçlar elde etmiştir; ancak maksimum havuzlama ile elde edilen veri setinde ise TSRGAN modeline yakın bir başarı ile en iyi ikinci değere sahiptir. Ek olarak, PSNR odaklı modeller olarak değerlendirilen evrişimli sinir ağları tabanlı SRCNN modeline karşı da oldukça yüksek değerlere ulaşarak görsel kalitenin yanında metrik değerleri açısından da SISRGAN modeli başarısını kanıtlamıştır. Ayrıca, PSNR ve SSIM metriklerinin yanı sıra BRISQUE (Blind/Referenceless Image Spatial Quality Evaluator) metriği ile sonuçlar değerlendirilmiştir. Referans tabanlı olmayan bu metrik algısal kaliteyi ölçmek amacıyla kullanılmıştır. BRISQUE metrik değeri 0-100 aralığında değerler almakta ve düşük değer daha iyi bir algısal kaliteyi ifade etmektedir. Tablo 1’de paylaşılan sonuçlar önerilen modelin BRISQUE metriği açısından da literatürdeki modellere göre başarılı olduğu ve referans görüntünün değerlerine oldukça yaklaştığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4. Farklı veri setleri için elde edilen süper çözünürlüklü yüz görüntüleri.

**Tablo 1.** PSNR ve SSIM sonuçları.

|                               | DÇ     | Biküçük<br>İnterpolasyon | SRCNN<br>[7]  | SRGAN<br>[11] | TSRGAN<br>[14] | SISRGAN<br>(Önerilen) | YÇ<br>(Referans) |
|-------------------------------|--------|--------------------------|---------------|---------------|----------------|-----------------------|------------------|
| <b>%100 kalite faktörü</b>    |        |                          |               |               |                |                       |                  |
| PSNR                          | 21,437 | 23,238                   | 24,956        | 24,663        | <u>25,294</u>  | <b>25,714</b>         | $\infty$         |
| SSIM                          | 0,723  | 0,749                    | 0,785         | 0,771         | <u>0,794</u>   | <b>0,816</b>          | <b>1</b>         |
| BRISQUE                       | 36,685 | 31,603                   | 30,311        | 27,093        | <u>24,967</u>  | <b>23,623</b>         | <b>17,449</b>    |
| <b>%90 kalite faktörü</b>     |        |                          |               |               |                |                       |                  |
| PSNR                          | 21,118 | 22,826                   | 24,552        | 24,419        | <u>25,046</u>  | <b>25,315</b>         | $\infty$         |
| SSIM                          | 0,671  | 0,698                    | 0,758         | 0,734         | <u>0,761</u>   | <b>0,783</b>          | <b>1</b>         |
| BRISQUE                       | 38,683 | 35,804                   | 32,543        | 29,965        | <u>27,604</u>  | <b>26,970</b>         | <b>17,449</b>    |
| <b>4x4 maksimum havuzlama</b> |        |                          |               |               |                |                       |                  |
| PSNR                          | 15,762 | 16,912                   | <u>20,364</u> | 19,814        | 20,148         | <b>20,554</b>         | $\infty$         |
| SSIM                          | 0,604  | 0,626                    | 0,685         | 0,668         | <b>0,692</b>   | <u>0,690</u>          | <b>1</b>         |
| BRISQUE                       | 52,578 | 49,635                   | 48,001        | <u>41,877</u> | 42,640         | <b>41,822</b>         | <b>17,449</b>    |

#### 4. SONUÇ

Bu makalede, görünür yüz görüntüleri için yeni bir derin öğrenme tabanlı süper çözünürlük modeli önerilmiştir. Önerilen SISRGAN modeli çekışmeli üretici ağlar tabanlı bir model olup, hem algısal olarak görsel kaliteyi artırmak hem de görüntü kalite metrikleriyle bunu gösterebilmek amacıyla geliştirilmiştir. Ayrıca, derin ağı eğitimi ve test aşamalarında kullanılan düşük çözünürlüklü görüntülerin kalite seviyesinin, yeniden oluşturulan süper çözünürlüklü görüntülerin kalitesine olan etkisini gözlemleyebilmek için CelebA veri setinden oluşturulmuş üç farklı kalite seviyesine sahip veri setleri üzerinde çalışmalar yerine getirilmiştir. Çalışmalar sonucu elde edilen bütün sonuçlar PSNR ve SSIM değerleri dikkate alınarak literatürde yer alan yeni ve üstün başarılı modeller ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde önerilen derin ağı modelinin diğer modellere karşı oldukça üstün bir başarıya sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, kalite faktörleri ile oluşturulan veri setleri üzerindeki sonuçlar birbirine yakın değerlerde olmasına rağmen maksimum havuzlama tekniği ile elde edilen veri seti için yürütülen çalışmaların sonuçları daha düşük değerlerdedir. Bu durumun en büyük sebebi, süper çözünürlüklü görüntünün üretileceği düşük çözünürlüklü görüntüdeki veri kaybının çok daha yüksek seviyede olmasıdır. Önerilen model bu veri seti üzerindeki çalışmalarda da en iyi PSNR ve en iyi ikinci SSIM değerlerine ulaşarak, düşük kalitedeki görüntüler üzerinde de uygulanabilir olduğunu kanıtlamıştır. Ek olarak, bulanıklık giderme ve kenar detay bilgilerinin elde edilmesi açısından da başarılı sonuçlar gösteren SISRGAN modeli görsel kalite açısından da önemli oranda iyileşmeler göstermiştir. Burada, maksimum havuzlama ile elde edilmiş düşük çözünürlüklü görüntülerdeki iyileşmeler biraz daha düşük seviyede kalmıştır, çünkü bu görüntüler diğer veri setlerindeki görüntülere göre çok daha düşük görsel kaliteye sahiptir. Sonuç olarak, yüksek çözünürlüklü referans görüntülere yakın kalitede süper çözünürlüklü görüntüler oluşturma bakımından %100 ve %90 kalite faktörleri ile türetilen veri setleri üzerindeki çalışmalar hem görsel hem de metrik değerleri dikkate alındığında daha başarılı sonuçlar ortaya koymuştur. Gerçekleştirilen tüm süper çözünürlük uygulamalarının gösterdiği yüksek başarı performansı, görüntüleme cihazlarının kullanıldığı projelerde daha düşük maliyetli kameralardan faydalanarak proje maliyetini düşürme konusunda araştırmacılara bir alternatif sunmaktadır. Ayrıca, görüntü detaylar bilgilerinin önemli olduğu hastalık teşhisi gibi medikal uygulamalar için süper çözünürlük yöntemlerinin faydalı olabileceği öngörülmektedir.

#### Yazar Katkıları

Fatih Mehmet Şenalp: Makalenin kapsamının belirlenmesine, araştırmaların yürütülmesine, makalenin yazımına ve sonuçların değerlendirilmesine katkı sağlamıştır.

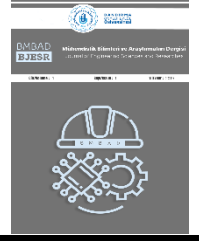
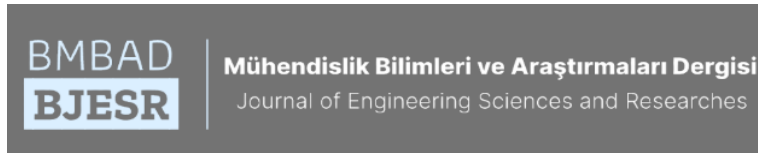
#### Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

#### KAYNAKÇA

- [1] M. Protter, M. Elad, H. Takeda and P. Milanfar "Generalizing the nonlocal-means to super-resolution reconstruction", IEEE Transactions on image processing, vol. 18, no. 1, pp. 36-51, 2008.
- [2] R. W. Gerchberg "Super-resolution through error energy reduction", Optica Acta: International Journal of Optics, vol. 21, no. 9, pp. 709-720, 1974.
- [3] K. Nasrollahi and T. B. Moeslund "Super-resolution: a comprehensive survey. Machine vision

- and applications”, vol. 25, no. 6, pp. 1423-1468, 2014.
- [4] H. Hurkal and Z. Orman “A survey on image super-resolution with generative adversarial networks”, *Acta Infologica*, vol. 4, no. 2, pp. 139-154, 2020.
- [5] L. Yue et al. “Image super-resolution: the techniques, applications, and future”, *Signal Processing* vol. 128, pp. 389-408, 2018.
- [6] R. Yan, K. Yang and K. Wang “NLFNet: Non-Local Fusion Towards Generalized Multimodal Semantic Segmentation across RGB-Depth, Polarization, and Thermal Images”, 2021 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), pp. 1129-1135, 2021.
- [7] C. Dong, C.C. Loy, K. He, X. Tan “Image super-resolution using deep convolutional networks”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 38, pp. 295-307, 2015.
- [8] Y. Liang, J. Wang, S. Zhou, Y. Gong and N. Zheng “Incorporating image priors with deep convolutional neural networks for image super-resolution”, *Neurocomputing*, vol. 194, pp. 340-347, 2016.
- [9] J. Kim, J.K. Lee and K.M. Lee “Accurate image super-resolution using very deep convolutional networks”, *IEEE CVPR*, pp. 1646-1654, 2016.
- [10] I. Goodfellow et al. “Generative adversarial networks”, In *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)*, pp. 2672-2680, 2014.
- [11] C. Ledig et al. “Photo-Realistic Single Image Super-Resolution Using a Generative Adversarial Network”, 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) Honolulu, pp. 105-114, 2017.
- [12] S.J. Park, H. Son, S. Cho, K.S. Hong, S. Lee “Srfeat: single image super-resolution with feature discrimination”, In: *Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV)*, pp. 439-455, 2018.
- [13] M. Wang et al. “Improved face super-resolution generative adversarial networks”, *Machine Vision and Applications*, vol. 31, p. 22, 2020.
- [14] F.M. Senalp and M. Ceylan “Deep learning based super resolution and classification applications for neonatal thermal images”, *Traitement du Signal* vol. 38, no. 5, pp. 1361-1368, 2021.
- [15] Z. Liu, P. Luo, X. Wang, and X. Tang “Deep Learning Face Attributes in the Wild”, in *Proc. IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, 2015.
- [16] A. Radford, L. Metz and S. Chintala “Unsupervised representation learning with deep convolutional generative adversarial networks”, *arXiv preprint arXiv:1511.06434*, 2015.
- [17] J. Johnson, A. Alahi and F. Li “Perceptual losses for real-time style transfer and super resolution”, In *European Conference on Computer Vision (ECCV)* Springer, pp. 694-711, 2016.
- [18] D. Weixiang, P. Addepalli and Y. Zhao “The Spatial Resolution Enhancement for a Thermogram Enabled by Controlled Sub-pixel Movements”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* vol. 69, no. 6, pp. 3566-3575, 2019.
- [19] Y. Gu et al. “MedSRGAN: medical images super-resolution using generative adversarial networks”, *Multimed Tools Appl.* vol. 79, pp. 21815-21840, 2020.
- [20] H. Javaid et al. “Video colour variation detection and motion magnification to observe subtle changes”, *M.Sc. Thesis Blekinge Institute of Technology Faisalabad Pakistan*, 2013.
- [21] A. Dosovitskiy and T. Brox “Generating images with perceptual similarity metrics based on deep networks”, In *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)*, pp. 658-666, 2016.



## 3B Şekil Oluşturmak için Alt Örneklemesiz Shearlet Dönüşümüne Dayalı Yeni ve Yüksek Kaliteli Odaklama Ölçüm Operatörü

### A New High Quality Focus Measurement Operator Based on Nonsampled Shearlet Transform for 3D Shape Reconstruction

<sup>1</sup>Hülya DOĞAN , <sup>2</sup>Ramazan Özgür DOĞAN 

<sup>1</sup>Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

<sup>2</sup>Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane, Türkiye

<sup>1</sup>hulya@ktu.edu.tr, <sup>2</sup>ramazan.dogan@gumushane.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 14 November 2022

Accepted : 3 January 2023

##### Keywords:

Focus Measurement Operator, Shape from focus, 3D Shape Reconstruction, Nonsampled Shearlet Transform

#### ABSTRACT

Shape From Focus (SFF), which does not require any additional hardware in the 3D shape creation process, is one of the most preferred strategies. The SFF strategy uses a series of 2D images with different focusing on the process of creating 3D shapes of objects and consists of three basic steps: (1) Obtaining a 2D image series with different focus, (2) Calculating the focus values of image pixels, and (3) Selection of maximum focused pixel. In order to create 3D shapes with high accuracy and lower noise, researchers often develop a pre- or post-processing algorithms instead of proposing new focus measurement operators in the second stage of SFF. In this study, a new and high-quality focusing measurement operator based on Nonsampled Shearlet Transform is proposed, which does not require any pre- or post-processing. Proposed focus measurement operator is analyzed under different conditions. Subjective and objective results show that the proposed focus measure operator achieves better performance.

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

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 14 Kasım 2022

Kabul : 3 Ocak 2023

##### Anahtar Kelimeler:

Odaklama Ölçüm Operatörü, Odaktan Şekil, 3B Şekil Oluşturma, Alt Örneklemesiz Shearlet Dönüşümü

#### ÖZET

3B şekil oluşturulma sürecinde herhangi ek donanım gerektirmeyen Odaktan Şekil (Shape From Focus- SFF) en çok tercih edilen stratejilerdendir. SFF stratejisi, 3B şekil oluşturma sürecinde farklı odaklı 2B görüntü serisi kullanmakta ve üç temel aşamadan oluşmaktadır: (1) Farklı odaklı 2B görüntü serisinin elde edilmesi, (2) Görüntü piksellerinin odaklama değerlerinin hesaplanması ve (3) Maksimum odaklı pikselin seçilmesi. Yüksek doğruluk ve daha düşük gürültü ile 3B şekil oluşturmak için, araştırmacılar SFF'nin ikinci aşamasında yeni odaklama ölçüm operatörü önermek yerine genellikle bir ön veya son işlem algoritmaları geliştirmektedirler. Literatür çalışmalarının aksine, bu çalışmada herhangi bir ön veya son işlem gerektirmeyen Alt Örneklemesiz Shearlet Dönüşümüne dayalı yeni ve yüksek kaliteli odaklama ölçüm operatörü önerilmektedir. Önerilen odaklama ölçüm operatörünün etkinliği sentetik görüntü serileri kullanılarak pencere boyutu ve gürültü seviyesi gibi farklı koşullar altında analiz edilmektedir. Elde edilen öznel ve nesnel sonuçlar önerilen odaklama ölçüm operatörünün daha iyi performans sağladığını göstermektedir.

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



## 1. GİRİŞ

Herhangi bir objenin 3 boyutlu (3B) gerçek dünyadan 2 boyutlu (2B) görüntüye projeksiyonu sırasında bir boyut kaybı gerçekleşmektedir. Bu yüzden objelerin 2B görüntülerinden tekrar 3B şekillerinin oluşturulma süreci bilgisayarla görme alanında hem zorlayıcı hem uzun süredir çalışılan popüler konulardan biri olmaktadır. Literatürde objelerin 3B şeklinin oluşturulması için kullanılan ekipmanlar aktif ve pasif olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır [1]. Objeye ile görüntüleme alanı arasındaki mesafeyi ölçmek için aktif ekipmanlar ultrasonik veya kızılötesi dalgalar kullanılmaktadır. Bu ekipmanlar yüksek maliyetli olmalarına rağmen, yüksek doğruluk ve gerçek zamanlı performansları sayesinde tercih edilmektedir. Pasif ekipmanlar objeye ile görüntüleme alanı arasındaki mesafeyi ölçmek için herhangi bir cihaz gerektirmemektedir. Literatürde objelerin 3B şeklinin oluşturulması için kullanılan stratejiler ise geometrik ve fotometrik olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Geometrik stratejiler, objenin 3B şeklini oluşturmak için yapı detaylarını ve kameranın iç ve dış parametrelerini kullanılmaktadır. Bu stratejilere örnek olarak iki veya üç oküler kameranın kullanıldığı stereo görüntüleme verilebilmektedir. Fotometrik stratejilerde 3B şekil oluşturmak için görüntülenen obje bölgesindeki piksellerin parlaklık değerleri kullanılmaktadır. Tek lensli bir kameranın kullanıldığı bu stratejilere örnek olarak SFF verilebilmektedir.

Literatür araştırmaları bilgisayarla görme alanında objenin 3B şeklinin oluşturulması için en çok tercih edilen stratejinin SFF olduğunu göstermektedir [2, 3]. SFF, objelerin 3B şekillerini oluşturma sürecinde aynı görüş alanına ve farklı odaklamalara sahip 2B görüntü serisi kullanan bir stratejidir. 3B şekil, objeye ile kamera merceği arasındaki mesafeleri içermektedir. Bu mesafelerin genel geometrisi Denklem 1 ile hesaplanmaktadır.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{o} + \frac{1}{i} \quad (1)$$

Denklem 1, Gauss nesne yasasını tanımlamaktadır. Denklem 1’de  $f$  kameranın odak uzaklığını,  $o$  ve  $i$  objeye ve görüntünün mesafelerini temsil etmektedir.

Görüntülenen bölge ile görüntüleme ekipmanı arasında herhangi bir fiziksel temas gerektirmeyen SFF stratejisi, üç temel aşamadan oluşmaktadır: (1) Farklı Odaklı 2B Görüntü Serisinin Elde Edilmesi: Bu aşamada aynı görüş alanına ve farklı odaklama değerlerine sahip 2B görüntüler oluşturulmaktadır. Bu görüntülerin oluşturulması için genelde odaklama derinliğinin artırılması kullanılmaktadır. (2) Görüntü Piksellerinin Odaklama Değerlerinin Hesaplanması: Bu aşamada 2B görüntü serisindeki her pikselin odaklama değeri hesaplanmaktadır. Piksellerin odaklama değerlerini hesaplamak için literatürde odaklama ölçüm operatörleri kullanılmaktadır. Odaklama ölçüm operatörleri altı sınıfa ayrılabilir [3]:

- (1) Gradyan Tabanlı Odaklama Ölçüm Operatörleri: Bu ölçüm operatörleri piksellerin odaklama bilgilerini hesaplamak için birinci dereceden türevlerini kullanılmaktadırlar. Gradyan tabanlı odaklama ölçüm operatörlerine Gradyan Enerjisi [4], Tenengrad [3], Gradyan Karesi [3], Gauss Türevi [5], Eşikli Mutlak Gradyan [3], Tenengrad Varyansı [3] ve 3B Gradyan [6] örnek olarak verilebilmektedir.
- (2) Laplace Tabanlı Odaklama Ölçüm Operatörleri: Bu ölçüm operatörleri piksellerin odaklama bilgilerini hesaplamak için ikinci dereceden türevlerini kullanılmaktadırlar. Laplace tabanlı odaklama ölçüm operatörlerine Değiştirilmiş Laplace [7], Laplace Varyansı [8], Laplace Enerjisi [6], 3B Laplace [9], Diyagonal Laplace [10] ve Çok Yönlü Değiştirilmiş Laplace [11] örnek olarak verilebilmektedir.
- (3) İstatistik Tabanlı Odaklama Ölçüm Operatörleri: Bu ölçüm operatörleri piksellerin odaklama bilgilerini hesaplamak için görüntünün histogram ve yoğunluk gibi niteliksel bilgileri kullanılmaktadırlar. İstatistik tabanlı odaklama ölçüm operatörlerine Varyans [3], Histogram Entropisi [3], Öz Değerler [12], Değiştirilmiş Varyans [3], Chebyshev Momentleri [13], Yerel Varyans [8], Normalize Varyans [3] ve Histogram Aralığı [3] örnek olarak verilebilmektedir.
- (4) Ayrık Kosinüs Dönüşümü (AKD) Tabanlı Odaklama Ölçüm Operatörü: Bu ölçüm operatörleri piksellerin odaklama bilgilerini hesaplamak için görüntünün Ayrık Kosinüs Dönüşümü katsayılarını kullanılmaktadırlar. Ayrık Kosinüs Dönüşümü tabanlı odaklama ölçüm operatörlerine Değiştirilmiş AKD [14], AKD Enerji Oranı [15] ve AKD Azaltılmış Enerji Oranı [16] örnek olarak verilebilmektedir.
- (5) Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD) Tabanlı Odaklama Ölçüm Operatörü: Bu ölçüm operatörleri piksellerin odaklama bilgilerini hesaplamak için görüntünün Ayrık Dalgacık Dönüşümü katsayılarını kullanılmaktadırlar. Ayrık Dalgacık Dönüşümü tabanlı odaklama ölçüm operatörlerine ADD Katsayıları Toplamı [17], ADD Katsayıları Oranı [17], ADD Katsayıları Varyansı [17] ve 3B ADD [18] örnek olarak verilebilmektedir.
- (6) Diğer Odaklama Ölçüm Operatörleri: Bu ölçüm operatörleri piksellerin odaklama bilgilerini hesaplamak için piksellerin çeşitli özelliklerini kullanılmaktadırlar. Bu gruptaki odaklama ölçüm operatörlerine Görüntü Eğriliği [19], Yerel İkili Model [20], Gabor Katsayıları [21], Helmlı ve Scherer’in Ortalama Metodu [19], Curvelet Katsayıları Oranı [22], 2B Yönlendirilebilir Filtreler [23], Görüntü Kontrastı [24], Uzamsal Frekans [3], Mutlak Merkezi Moment [25], Otokorelasyon [3] ve 3B Yönlendirilebilir Filtreler [26] örnek olarak verilebilmektedir.

(3) Maksimum Odaklı Pikselin Seçilmesi: Objenin 3B şekli 2B görüntü serisindeki her piksel koordinatının en yüksek odaklama değeri seçilerek oluşturulmaktadır.

Literatürde SFF stratejilerinin ana aşamaları Nayar [7] tarafından çalışmada belirtilmiş ve diğer araştırmacılar ise bu çalışmayı temel alarak yeni yaklaşımlar önermişlerdir [2, 3]. Bu çalışmada Nayar, pürüzlü yüzeylerdeki doku değişimlerinin daha yüksek frekanslara sahip olduğu fikrinden yola çıkarak iki farklı algoritma geliştirmiştir. İlk algoritmada tüm pikseller için odaklama bilgileri hesaplanmış ve bu bilgilerin en yükseği pikselin 3B ölçüsü olarak kabul edilmiştir. Çalışmada geliştirilen ikinci algoritmada ise Gauss dağılımı, elde edilen 3B şeklin düzeltilmesi (iyileştirilmesi) için kullanılmıştır. Ek olarak bu çalışmada farklı odaklı 2B görüntü serisi oluşturulmuş ve Değiştirilmiş Laplace Toplamı odaklama ölçüm operatörü kullanılarak piksellerin odaklama değerleri hesaplanmıştır. Bu çalışmayı temel alarak gerçekleştirilen literatür çalışmaları şu şekilde gruplandırılabilir: (1) Yeni odaklama ölçüm operatörünün geliştirilmesi: Bu grupta araştırmacılar farklı odaklı görüntülerdeki piksellerinin odaklama değerlerini hesaplamak için odaklama ölçüm operatörü önermektedirler [3-26]. (2) Literatürde önerilen odaklama ölçüm operatörlerinin gürültü, bozulma, yoğunluk ve pencere boyutu gibi çeşitli koşullar altında karşılaştırılması [3]. (3) Oluşturulmuş 3B şeklin iyileştirilmesi: Bu grupta araştırmacılar, yüksek doğruluk ve daha düşük gürültüye sahip 3B şekil oluşturmak için bir ön veya son işlem algoritması geliştirmektedirler. Bu algoritmalara örnek olarak 3B Ağırlıklı En Küçük Kareler [27], Maksimum Korrentropiye dayalı Kalman Filtreleme [28], Değiştirilmiş Kalman Filtresi [29], Bayes Filtresi tabanlı Jitter gürültüsünü giderme [30], yerel ağırlıklı parametrik olmayan regresyon [31], Kalman filtresine dayalı örnekleme [32], düşük sıralı yaklaşım [33], uyarlanabilir pencere seçimi [34], uyarlanabilir Sinir Ağı Filtresi [35], güvenilirlik ölçümü [36] verilebilmektedir. (4) Farklı odaklı 2B görüntüler arasındaki örnekleme adım boyutunun tahmini [37].

Önceki paragraflarda değindiğimiz gibi literatürde piksellerin odaklama derecesini hesaplamak için odaklama ölçüm operatörleri önerilmiştir. Birçok odaklama ölçüm operatörü, yoğun dokulu alanlarda yeterli performans elde etmektedir. Ancak zayıf dokulu alanlarda aynı verimliliğe sahip değildir. Klasik ölçüm operatörleriyle (Varyans, Tenengrad) karşılaştırıldığında, son zamanlarda ADD, Curvelet, 2B ve 3B Yönlendirilebilir filtreleme dayalı ölçüm operatörleri, SFF stratejisi için daha doğru bir odaklama derecesi sağlamaktadır. Ancak literatür çalışmaları, bu operatörlerin görüntülerdeki eğrilerin ve kenarların tanımlanmasında bazı kısıtlamalara sahip olduğunu göstermektedir [17, 22, 23, 26]. Araştırmacılar, daha yüksek doğrulukla 3B şekil oluşturmak için yeni bir odaklama ölçüm operatörü önermek yerine, bu kısıtlamaları en aza indirmek için genellikle bir ön veya son işlem algoritmasını geliştirmektedirler. Çalışmamız ise diğer stratejilerden daha yüksek hıza sahip olan ve piksellerin odaklama bilgilerinin çıkarılması için daha detaylı görüntü temsilleri sağlayan Alt Örnekleme Shearlet Dönüşümüne (AÖSD) dayalı yeni ve yüksek kaliteli odaklama ölçüm operatörü önermektedir. Önerilen odaklama ölçüm operatörü, daha yüksek kalitede 3B şekil oluşturmak için herhangi bir ön veya son işlem algoritmasına ihtiyaç duymamaktadır. Önerilen odaklama ölçüm operatörünün performans analizi gürültü seviyesi ve pencere boyutu gibi çeşitli koşullar altında değerlendirilmektedir.

Bu çalışmanın genel yapısı şu şekilde tasarlanmıştır. Bölüm 2’de önerilen odaklama ölçüm operatörünün temelini oluşturan Alt Örnekleme Shearlet Dönüşümünün yapısı ve matematiksel ifadesi tanımlanmaktadır. 3B şekil oluşturma için önerilen yaklaşımın uygulanması Bölüm 3’te sunulmaktadır. Bölüm 4’te çalışmada elde edilen bulgulardan bahsedilmekte ve bulgular hakkında genel tartışma gerçekleştirilmektedir. Son olarak Bölüm 5’te ise çalışmada elde edilen sonuçlara değinilmektedir.

## 2. ALT ÖRNEKLEMESİZ SHEARLET DÖNÜŞÜMÜ

2008 yılında Easley tarafından geliştirilen Shearlet dönüşümü diğer çok ölçekli dönüşümlerin (Dalgacık, Curvelet, Contourlet) üstün özelliklerini birleştirerek görüntünün matematiksel ve geometrik yapılarını oluşturabilen çok ölçekli bir dönüşümdür [38]. Ayrıntılı shearlet dönüşümü türü olan Alt Örnekleme Shearlet Dönüşümü (Non-Subsampled Shearlet Transform), yukarı- aşağı örnekleyicileri ve öteleme bağımlılığını kaldırarak önceki çok ölçekli dönüşümlerden ayrılmaktadır. AÖSD genellikle çok ölçekli ve çok yönlü ayrıştırımdan oluşan iki ana aşamada gerçekleştirilmektedir.

1. Çok ölçekli ayrıştırma Denklem 2’de görüldüğü gibi yinelemeli olarak hesaplanan Alt Örnekleme Shearlet Laplace Piramidi (AÖLP) kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Denklem 2’de giriş görüntüsü ile aynı boyutta alçak ve yüksek frekans katsayıları hesaplanmaktadır.

$$AÖLP_{j+1} = A_j f = (Ah_j^1 \prod_{k=1}^{j-1} Ah_k^0) f \quad (2)$$

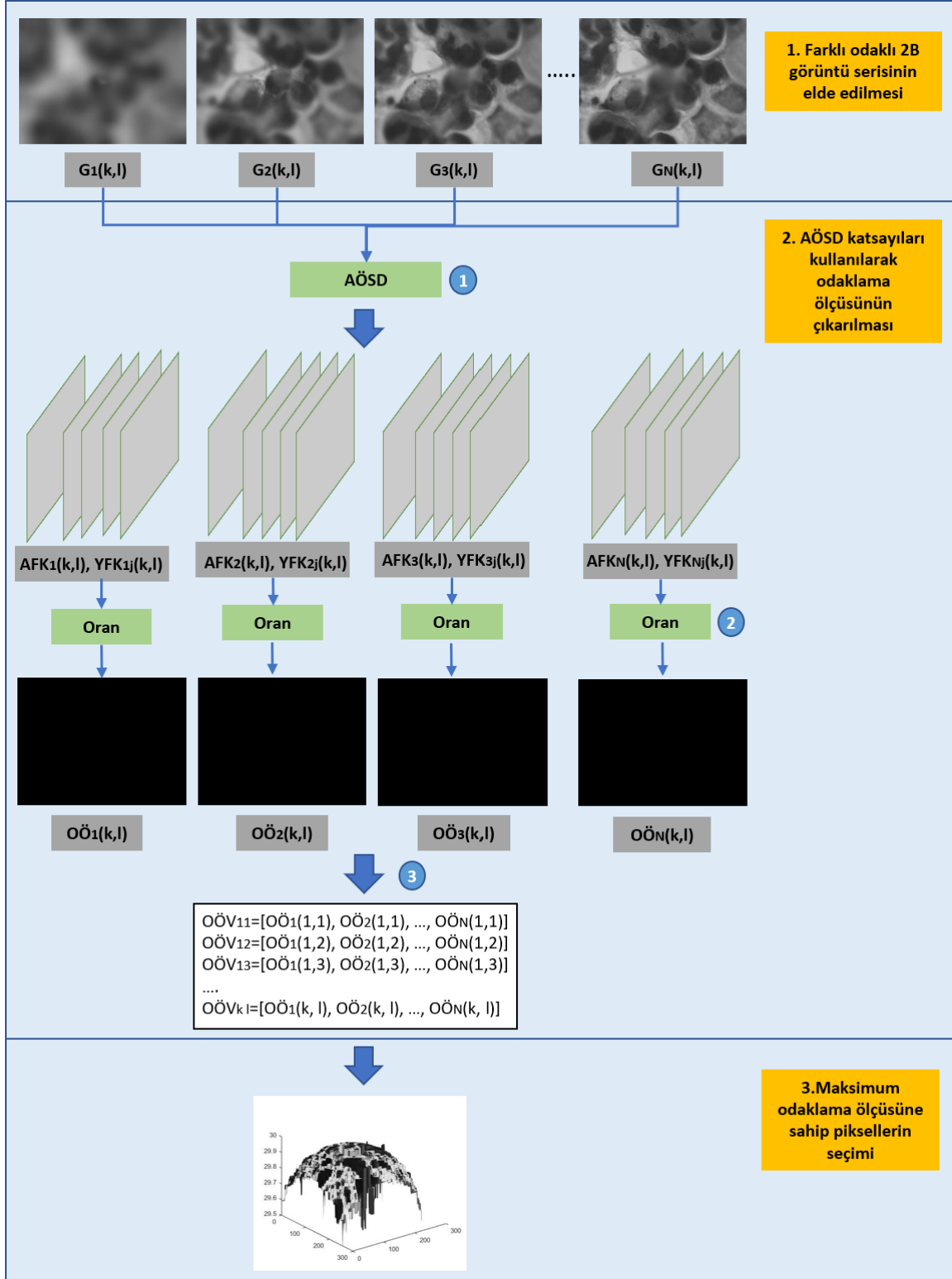
Denklem 2’de  $f$  giriş görüntüsünü,  $AÖLP_{j+1}$  giriş görüntüsünün Laplace Piramidi katsayılarını,  $Ah_j^1$  ve  $Ah_k^0$  ise  $j$  ölçeği ve  $k$  ötelemedeki alçak ve yüksek geçiş filtrelerini temsil etmektedir.

2. Çok yönlü ayrıştırma, psödo-polar koordinatta bazı özel kesme filtre konfigürasyonları kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

Bir görüntünün AÖSD katsayılarının hesaplanması sürecinde gerçekleştirilen adımlar şu şekildedir:

1. Giriş görüntüsüne AÖLP uygulanmakta, alçak ve yüksek geçiş katsayıları elde edilmektedir.
2. Yüksek geçiş katsayılarına Hızlı Fourier dönüşümü (Fast Fourier Transform-FFT) uygulanmaktadır.
3. FFT katsayıları psödo-polar koordinat sistemine dönüştürülmekte ve katsayılar elde edilmektedir.

4. Psödo-polar koordinat sistemindeki katsayılara bant geçiş filtresi uygulanarak AÖSD katsayılarının FFT dönüşüm katsayıları hesaplanmaktadır.
5. AÖSD katsayılarının FFT dönüşüm katsayılarına Ters FFT uygulanarak giriş görüntüsünün psödo-polar koordinat sistemindeki AÖSD katsayıları elde edilmektedir.
6. Giriş görüntüsünün psödo-polar koordinat sistemindeki AÖSD katsayıları kartezyen koordinat sistemine dönüştürülmektedir.



**Şekil 1.** Çalışmada sunulan SFF stratejisinin şematik temsili; (1) Farklı odaklı 2B görüntü serisinin elde edilmesi, (2) AÖSD katsayıları kullanılarak odaklama ölçüsünün çıkarılması ve (3) Maksimum odaklama ölçüsüne sahip piksellerin seçimi.

### 3. METODOLOJİ

Şekil 1'de görüldüğü gibi, çalışmada sunulan SFF stratejisi üç ana aşamada gerçekleştirilmektedir: (1) Farklı odaklı 2B görüntü serisinin elde edilmesi, (2) AÖSD katsayıları kullanılarak odaklama ölçüsünün çıkarılması ve (3) Maksimum odaklama ölçüsüne sahip piksellerin seçimi. Bu aşamalar şu şekilde açıklanabilmektedir:

#### 1. Farklı odaklı 2B görüntü serisinin elde edilmesi:

Önerilen SFF stratejisinin ilk aşamasında, aynı görüş alanına ve odaklama ölçüsüne sahip 2B görüntü serisi tanımlanmaktadır.

#### 2. AÖSD katsayıları kullanılarak odaklama ölçüsünün çıkarılması:

Önerilen SFF stratejisinin ikinci aşamasında AÖSD katsayıları kullanılarak görüntü serisindeki her pikselin odaklama bilgisi çıkarılmaktadır. SFF stratejileri seride bulunan farklı odaklama ölçülerine sahip 2B görüntülerin pikselleri arasında bire bir ilişki gerektirmektedir. Çok ölçekli dönüşümlerin kullanıldığı önceki çalışmalarda, katsayı temsillerinin boyutları (alçak ve yüksek geçiren katsayılar) giriş görüntüleri ile aynı olmadığından, farklı odaklı 2B görüntülerin katsayıları yeniden boyutlandırılmaktadır. Bu durum 2B görüntülerdeki kritik bilgilerin kaybolmasına sebep olabilmektedir. Bu çalışmada boyutları giriş görüntüsü ile aynı olan katsayı gösterimlerini (alçak ve yüksek geçiren katsayıları) sağlayan AÖSD kullanılarak bu problem çözülmektedir. Çalışmada önerilen SFF stratejisinin bu aşamasında gerçekleştirilen işlem adımları sırasıyla şu şekildedir:

1. Serideki her görüntüye ( $G_1(k, l), G_2(k, l), G_3(k, l), \dots, G_N(k, l)$ ) AÖSD uygulanarak alçak ( $AFK_1(k, l), AFK_2(k, l), AFK_3(k, l), \dots, AFK_N(k, l)$ ) ve yüksek ( $YFK_{11}(k, l), YFK_{12}(k, l), \dots, YFK_{1M}(k, l), YFK_{21}(k, l), YFK_{22}(k, l), \dots, YFK_{2M}(k, l), \dots, YFK_{N1}(k, l), YFK_{N2}(k, l), \dots, YFK_{NM}(k, l)$ ) frekans katsayıları hesaplanmaktadır.
2. Yüksek frekans katsayıları farklı odaklı 2B görüntülerle ilgili ayrıntılı bilgileri içermektedir. Alçak frekans katsayıları ise 2B görüntülerdeki odaklanmış ve odaklanmamış alanlar arasındaki farkı temsil etmektedir. Bu işlem adımında Denklem 3'te verildiği gibi farklı odaklı 2B görüntülerin her pikseli için yüksek frekans katsayılarının toplamının düşük frekans katsayılarına oranı hesaplanmakta ve her 2B görüntü için piksellerin odaklama ölçümlerinden oluşan 2B diziler ( $OÖ_1(k, l), OÖ_2(k, l), OÖ_3(k, l), \dots, OÖ_N(k, l)$ ) elde edilmektedir.

$$OÖ_N(k, l) = \frac{\sum YFK_N(k, l)}{AFK_N(k, l)} \quad (3)$$

3. Bu işlem adımında tüm piksel koordinatları için odaklama ölçüm vektörleri ( $OÖV_{11}, OÖV_{12}, OÖV_{13}, \dots, OÖV_{kl}$ ) oluşturulmaktadır.

#### 3. Maksimum odaklama ölçüsüne sahip piksellerin seçimi:

Önerilen SFF stratejisinin bu aşamasında odaklama ölçüm vektörleri üzerinde en yüksek odaklama değerine sahip piksel konumları seçilerek 3B şekil ( $Z(k, l)$ ) oluşturulmaktadır.

### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada önerilen odaklama ölçüm operatörünün etkinliğinin değerlendirmesi için sentetik görüntü serilerinden oluşan bir veri seti oluşturulmuştur. Sentetik görüntü serileri 50 mm'den 200 mm'ye kadar odak mesafesinden elde edilmişlerdir. Her seri farklı odaklamalara sahip 30 adet 2B görüntü içermektedir. Her 2B görüntünün boyutu 256 x 256 pikseldir. Çalışmada oluşturulan görüntü serilerine farklı 6 sınıftan seçilmiş çeşitli odaklama ölçüm operatörleri uygulanmaktadır. Tüm odaklama ölçüm operatörleri Intel (R) Core (TM) i7-4500U 2.40 GHz işlemci, 64 bit Windows 10 işletim sistemi ve 4GB belleğe sahip bir kişisel bilgisayar platformunda değerlendirilmiştir.

Çalışmada oluşturulan sentetik görüntü serileri, odaklama ölçüm operatörlerinin etkinliğini değerlendirmek için kullanılabilen referans 3B şekil görüntüsü içermektedirler. Bu kapsamda çalışmada odaklama ölçüm operatörlerinin performansını belirlemek için referans gerektiren kalite değerlendirme kriterleri tercih edilmiştir. Çalışmada kullanılan referans gerektiren kalite değerlendirme kriterleri şu şekildedir:

#### 1. Korelasyon Katsayısı (KK):

Korelasyon Katsayısı, SFF stratejisi ile oluşturulan 3B şekil ile referans 3B şekil arasındaki ilişki hakkında bir değer vermektedir. İdeal odaklama ölçüm operatörü ile oluşturulmuş 3B şeklin KK değerinin diğer operatörlere göre daha yüksek olması beklenmektedir. KK'nın formülasyonu Denklem 4'te verilmektedir.

$$KK = \frac{\sum_k \sum_l (RZ_{k,l} - \bar{RZ})(Z_{k,l} - \bar{Z})}{\sqrt{(\sum_k \sum_l (RZ_{k,l} - \bar{RZ})^2)(\sum_k \sum_l (Z_{k,l} - \bar{Z})^2)}} \quad (4)$$

Denklem 4'te  $Z_{k,l}$  ve  $RZ_{k,l}$ , SFF stratejisi ile oluşturulan 3B şekil ile referans 3B şekil değerleridir.  $\bar{Z}$  ve  $\bar{RZ}$  ise SFF stratejisi ile oluşturulan 3B şekil ile referans 3B şekil değerlerinin ortalamalarını ifade etmektedir.



## 2. Tepe Sinyal Gürültü Oranı (TSGO):

Tepe Sinyal Gürültü Oranı, SFF stratejisi ile oluşturulan 3B şekil ile referans 3B şekil arasındaki ilişkiyi temsil eden bir değerdir. İdeal odaklama ölçüm operatörü ile oluşturulmuş 3B şeklin TSGO değerinin diğer operatörlere göre daha yüksek olması beklenmektedir. TSGO'nun formülasyonu Denklem 5'te verilmektedir.

$$PSNR = 20 * \log \frac{M^2}{\sqrt{\frac{1}{KL} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L (RZ_{k,l} - Z_{k,l})^2}} \quad (5)$$

Denklem 5'te  $Z_{k,l}$  ve  $RZ_{k,l}$ , SFF stratejisi ile oluşturulan 3B şekil ile referans 3B şekil değerleridir.  $M$ , SFF stratejisi ile oluşturulan 3B şekil değerlerinin maksimum olanını,  $K$  ve  $L$  ise 3B şekil boyutlarını ifade etmektedir.

## 3. Kök Ortalama Kare Hatası (KOKH):

Kök Ortalama Kare Hatası, SFF stratejisi ile oluşturulan 3B şekil ile referans 3B şekil arasındaki benzerliği tanımlamaktadır. İdeal odaklama ölçüm operatörü ile oluşturulmuş 3B şeklin KOKH değerinin diğer operatörlere göre daha düşük olması beklenmektedir. KOKH'nin formülasyonu Denklem 6'da verilmektedir.

$$KOKH = \sqrt{\frac{1}{KL} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L (RZ_{k,l} - Z_{k,l})^2} \quad (6)$$

Denklem 6'da  $Z_{k,l}$  ve  $RZ_{k,l}$ , SFF stratejisi ile oluşturulan 3B şekil ile referans 3B şekil değerleridir.

## 4. Evrensel Kalite İndeksi (EKI):

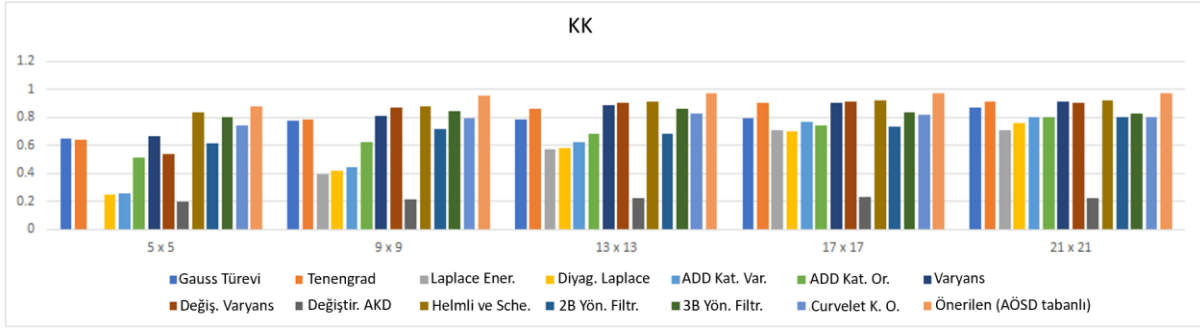
Evrensel Kalite İndeksi, SFF stratejisi ile oluşturulan 3B şekil ile referans 3B şekil arasındaki bozukluğu ölçmek için kullanılmaktadır. İdeal odaklama ölçüm operatörü ile oluşturulmuş 3B şeklin EKI değerinin diğer operatörlere göre daha yüksek olması beklenmektedir. EKI'nın formülasyonu Denklem 7'de verilmektedir.

$$EKI = \frac{4\sigma_{Z,RZ}\bar{RZ}\bar{Z}}{(\sigma_{RZ}^2 + \sigma_Z^2)(\bar{RZ}^2 + \bar{Z}^2)} \quad (7)$$

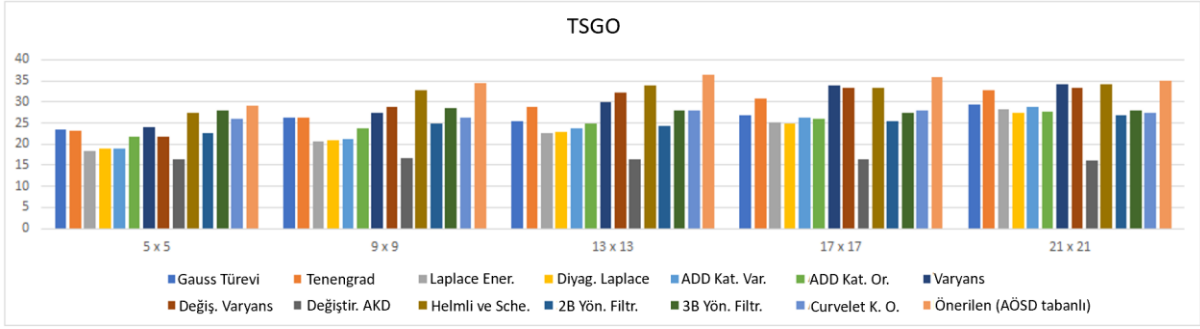
Denklem 7'de  $\bar{Z}$  ve  $\bar{RZ}$  SFF stratejisi ile oluşturulan 3B şekil ile referans 3B şekil değerlerinin ortalamalarını,  $\sigma_{Z,RZ}$ ,  $\sigma_Z$  ve  $\sigma_{RZ}$  ise SFF stratejisi ile oluşturulan 3B şekil ile referans 3B şekil değerlerinin kovaryans ve varyanslarını ifade etmektedirler.

Odaklama ölçüm operatörleri odaklama değerlerini hesaplama sürecinde piksellerin etrafındaki komşu pikselleri de işleme katmaktadırlar. Literatür çalışmaları yüksek doğruluklu 3B şekil oluşturmak için pencere (komşuluk) boyutunun etkili olduğunu göstermektedir [15, 22]. Bu kapsamda çalışmada görüntü serilerinde farklı odaklama ölçüm operatörleri ile beş farklı pencere boyutu (5 x 5, 9 x 9, 13 x 13, 17 x 17, 21 x 21) test edilmiştir. Sentetik görüntü serisi için kalite değerlendirme kriterlerinin sonuçları Şekil 2'de sunulmaktadır. Pencere boyutunun 13x13 olduğunda odaklama ölçüm operatörlerinin KK, TSGO ve EKI değerlerinin maksimum, KOKH değerlerinin ise minimum olduğu Şekil 2'de görülmektedir. Pencere boyutu 13x13 olana kadar, 3B Yönlendirilebilir Filtreler [26], Curvelet Katsayılarının Oranı [22] ve önerilen (AÖSD tabanlı) ölçüm operatörlerinin KOKH değerleri azalmaktadır. Bununla birlikte, pencere boyutunun büyüklüğü arttıkça diğer ölçüm operatörlerinin KOKH değerleri azalmaktadır. Benzer şekilde, pencere boyutu 13x13 olana kadar, 3B Yönlendirilebilir Filtreler [26], Curvelet Katsayılarının Oranı [22] ve önerilen (AÖSD tabanlı) ölçüm operatörlerinin KK, TSGO ve EKI değerleri artmaktadır. Bununla birlikte, pencere boyutunun büyüklüğü arttıkça diğer ölçüm operatörlerinin KK, TSGO ve EKI değerleri de artmaktadır. Bu kapsamda KK, TSGO, KOKH ve EKI değerlendirme kriterleri açısından, sentetik görüntü serisi için optimum pencere boyutunun 13x13 olduğu bildirilmektedir. AKD [14] tabanlı odaklama ölçüm operatörünün en yüksek KOKH ve en düşük KK, TSGO ve EKI değerleri ile en kötü performansı sağladığı dikkat çekmektedir. Ayrıca, objektif sonuçlar istatistik, ADD ve Laplace tabanlı odaklama ölçüm operatörlerinin pencere boyutunun azaltılmasına daha duyarlı olduklarını göstermektedir. Buna karşılık, 2B [23] ve 3B [26] Yönlendirilebilir Filtreler, Çok Yönlü Değiştirilmiş Laplace [11], Curvelet Katsayılarının Oranı [22] komşuluk boyutunun artmasından en az etkilenen odaklama ölçüm operatörleridir.

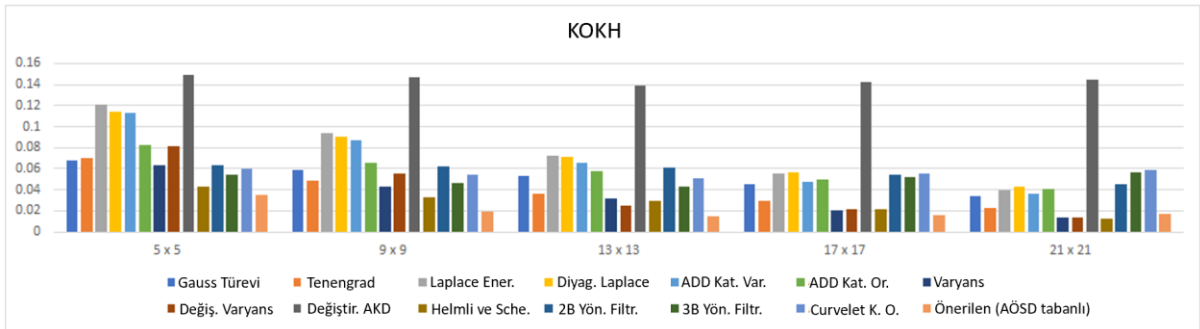
Şekil 3'te sentetik görüntü serisi için referans 3B şekil, 3B ADD [18], 3B Yönlendirilebilir Filtreler [26], Tenegrad [3], Varyans [3], Curvelet Katsayıları Oranı [22], Laplace Enerjisi [6], Çok Yönlü Değiştirilmiş Laplace [11] ve önerilen (AÖSD tabanlı) odaklama ölçüm operatörleri ile 13x13 pencere boyutunda oluşturulmuş 3B şekiller gösterilmektedir. Şekil 3.a'daki referans 3B şekil ile farklı odaklama ölçüm operatörleri ile oluşturulan 3B şekiller karşılaştırıldığında, önerilen odaklama ölçüm operatörünün etkinliğinin literatürdeki diğer operatörlere göre daha üstün olduğu açıkça görülmektedir. Şekil 2 ve 3'te verildiği gibi, önerilen odaklama ölçüm operatörü ile oluşturulan 3B şekil, en düşük aykırı değerlere ve gürültüye sahiptir. Ek olarak, oluşturulan 3B şekil referans 3B şekle en çok benzeyendir.



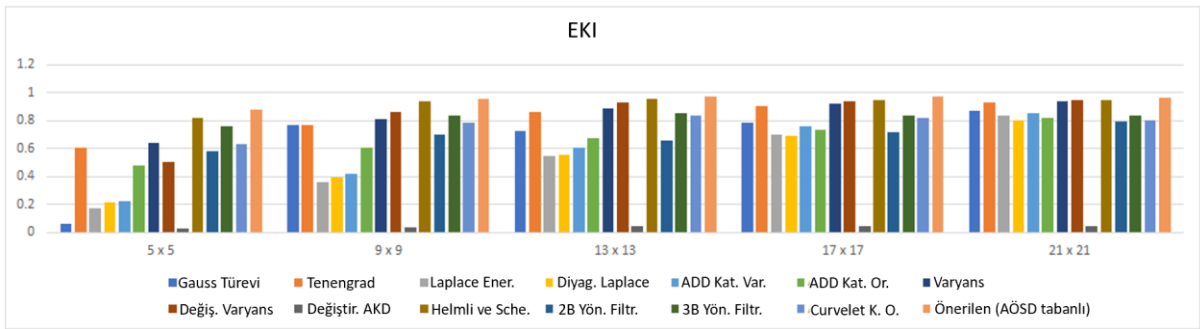
(a)



(b)

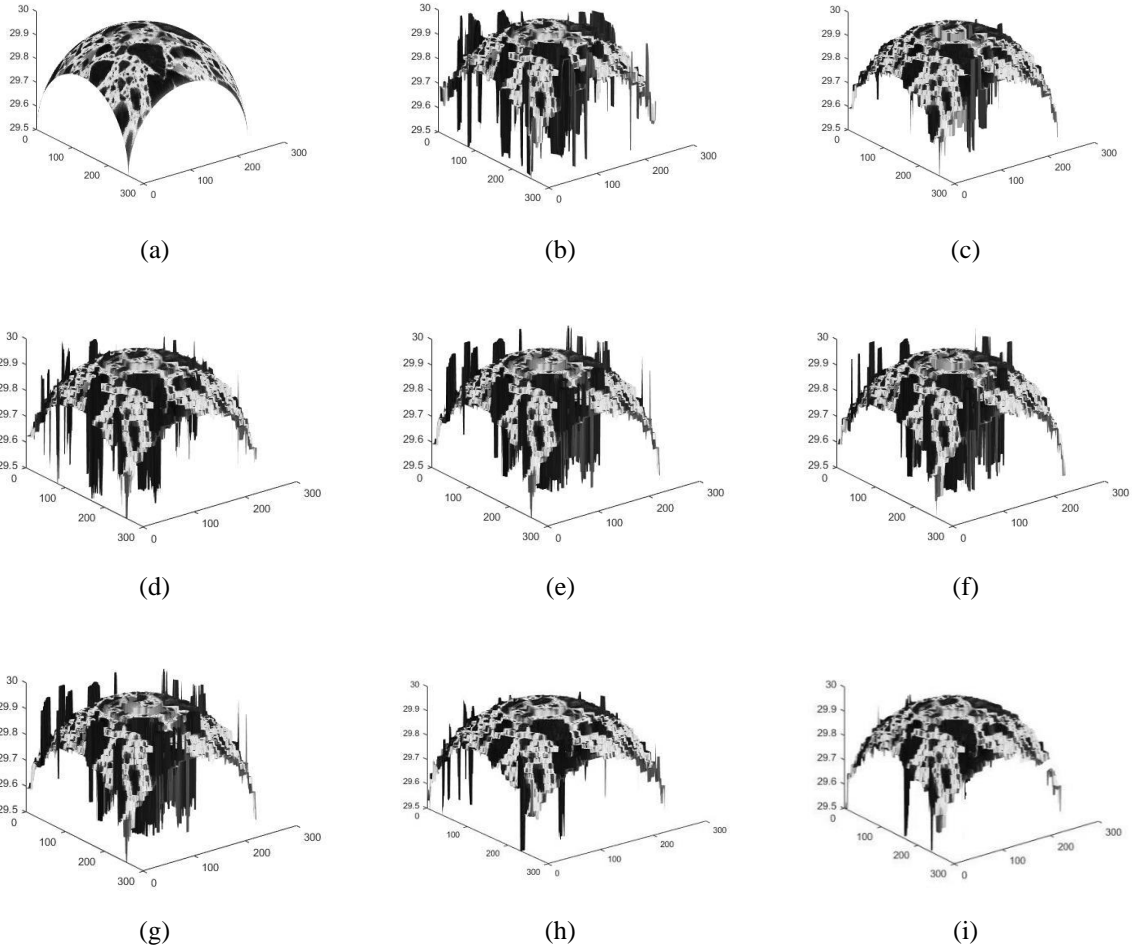


(c)



(d)

Şekil 2. Sentetik görüntü serisi için kalite değerlendirme kriterlerinin sonuçları; (a) Korelasyon Katsayısı (KK), (b) Tepe Sinyal Gürültü Oranı (TSGO), (c) Kök Ortalama Kare Hatası (KOKH), (d) Evrensel Kalite İndeksi (EKI).



**Şekil 3.** Sentetik görüntü serisi için (a) referans 3B şekil, (b) 3B ADD [18], (c) 3B Yönlendirilebilir Filtreler [26], (d) Tenengrad [3], (e) Varyans [3], (f) Curvelet Katsayıları Oranı [22], (g) Laplace Enerjisi [6], (h) Çok Yönlü Değiştirilmiş Laplace [11] ve (i) önerilen (AÖSD tabanlı) odaklama ölçüm operatörleri ile 13x13 pencere boyutunda oluşturulmuş 3B şekiller.

Literatür çalışmalarında gürültünün, 3B şekil oluşturma sürecinde odaklama ölçüm operatörlerinin etkinliğini en çok etkileyen faktörlerden biri olduğu bahsedilmektedir [3, 22]. Bu çalışmada odaklama ölçüm operatörlerinin gürültüye dayanıklılığını ortaya çıkarmak amaçlanmaktadır. Bu kapsamda sentetik görüntü serileri Gauss gürültüleriyle bozularak 3B şekiller farklı gürültü seviyesi altında değerlendirilmektedir. Tablo 1, 0,001 ile 0,1 arasında çeşitli varyanslara sahip Gauss gürültüleri ile bozulan sentetik görüntü serileri için kalite değerlendirme kriterlerinin sonuçlarını göstermektedir. Optimum odaklama ölçüm operatörü ile oluşturulan 3B şeklin daha düşük KOKH ve daha yüksek KK, TSGO ve EKI değerlerine sahip olması beklenmektedir. Objektif değerlendirme sonuçlarında önerilen odaklama ölçüm operatörünün diğer odaklama ölçüm operatörlerinden daha yüksek etkinliğe sahip olduğu görülmektedir. Laplace, ADD ve AKD tabanlı ölçüm operatörlerinin KK, TSGO, KOKH ve EKI açısından en düşük performansa sahip olduğu açıktır. Gradyan ve istatistik tabanlı odaklama ölçüm operatörleri, daha düşük KOKH ve daha yüksek KK, TSGO ve EKI değerleriyle gürültüye karşı dayanıklıdır. Ayrıca, Gauss Türevi gürültü seviyeleri arasındaki daha büyük değişikliklerle gürültüye en duyarlı odaklama ölçüm operatörüdür.

**Tablo 1.** 0,001 ile 0,1 arasında çeşitli varyanslara sahip Gauss gürültüleri ile bozulan sentetik görüntü serileri için kalite değerlendirme kriterlerinin sonuçları.

| <b>Odaklama Operatörü</b>        | <b><math>\sigma = 0,1</math></b>   | <b><math>\sigma = 0,01</math></b>  | <b><math>\sigma = 0,001</math></b>   |
|----------------------------------|--|--|--|
| <b>Tenengrad [3]</b>             | KK = 0,6<br>TSGO = 22,28<br>KOKH = 0,08<br>EKI = 0,56                              | KK = 0,53<br>TSGO = 21,39<br>KOKH = 0,09<br>EKI = 0,49                             | KK = 0,50<br>TSGO = 21,24<br>KOKH = 0,09<br>EKI = 0,46                             |
| <b>Gauss Türevi [5]</b>          | KK = 0,18<br>TSGO = 14,05<br>KOKH = 0,2<br>EKI = 0,12                              | KK = 0,63<br>TSGO = 22,6<br>KOKH = 0,07<br>EKI = 0,59                              | KK = 0,65<br>TSGO = 23,21<br>KOKH = 0,07<br>EKI = 0,62                             |
| <b>Laplace Enerjisi [6]</b>      | KK = 0,12<br>TSGO = 14,52<br>KOKH = 0,19<br>EKI = 0,08                             | KK = 0,11<br>TSGO = 14,77<br>KOKH = 0,18<br>EKI = 0,08                             | KK = 0,02<br>TSGO = 14,92<br>KOKH = 0,18<br>EKI = 0,05                             |
| <b>Diagonal Laplace [10]</b>     | KK = 0,09<br>TSGO = 14,91<br>KOKH = 0,18<br>EKI = 0,06                             | KK = 0,05<br>TSGO = 15,38<br>KOKH = 0,17<br>EKI = 0,04                             | KK = 0,02<br>TSGO = 15,63<br>KOKH = 0,17<br>EKI = 0,02                             |
| <b>Çok Yönlü Değ. Lap.[11]</b>   | KK = 0,68<br>TSGO = 22,97<br>KOKH = 0,07<br>EKI = 0,63                             | KK = 0,63<br>TSGO = 21,87<br>KOKH = 0,08<br>EKI = 0,57                             | KK = 0,64<br>TSGO = 21,95<br>KOKH = 0,08<br>EKI = 0,58                             |
| <b>Varyans [3]</b>               | KK = 0,71<br>TSGO = 24,93<br>KOKH = 0,06<br>EKI = 0,70                             | KK = 0,68<br>TSGO = 24,36<br>KOKH = 0,06<br>EKI = 0,66                             | KK = 0,71<br>TSGO = 24,97<br>KOKH = 0,06<br>EKI = 0,70                             |
| <b>Değiştir. Varyans [3]</b>     | KK = 0,62<br>TSGO = 22,76<br>KOKH = 0,07<br>EKI = 0,58                             | KK = 0,61<br>TSGO = 22,91<br>KOKH = 0,07<br>EKI = 0,59                             | KK = 0,61<br>TSGO = 22,87<br>KOKH = 0,07<br>EKI = 0,58                             |
| <b>Değiştir. AKD [14]</b>        | KK = 0,02<br>TSGO = 15,38<br>KOKH = 0,17<br>EKI = 0,01                             | KK = 0,02<br>TSGO = 15,40<br>KOKH = 0,17<br>EKI = 0,01                             | KK = 0,02<br>TSGO = 15,33<br>KOKH = 0,17<br>EKI = 0,01                             |
| <b>ADD Kats. Oranı [17]</b>      | KK = 0,06<br>TSGO = 14,92<br>KOKH = 0,18<br>EKI = 0,04                             | KK = 0,04<br>TSGO = 15,27<br>KOKH = 0,17<br>EKI = 0,03                             | KK = 0,04<br>TSGO = 13,19<br>KOKH = 0,17<br>EKI = 0,03                             |
| <b>3B ADD [18]</b>               | KK = 0,14<br>TSGO = 14,58<br>KOKH = 0,19<br>EKI = 0,09                             | KK = 0,15<br>TSGO = 14,93<br>KOKH = 0,18<br>EKI = 0,10                             | KK = 0,15<br>TSGO = 14,67<br>KOKH = 0,18<br>EKI = 0,10                             |
| <b>Curvelet Kats. Oranı [22]</b> | KK = 0,57<br>TSGO = 19,25<br>KOKH = 0,08<br>EKI = 0,61                             | KK = 0,57<br>TSGO = 19,16<br>KOKH = 0,08<br>EKI = 0,60                             | KK = 0,57<br>TSGO = 19,32<br>KOKH = 0,08<br>EKI = 0,61                             |
| <b>2B Yönl. Filtreler [23]</b>   | KK = 0,62<br>TSGO = 22,25<br>KOKH = 0,08<br>EKI = 0,57                             | KK = 0,62<br>TSGO = 22,53<br>KOKH = 0,07<br>EKI = 0,58                             | KK = 0,61<br>TSGO = 22,59<br>KOKH = 0,07<br>EKI = 0,57                             |
| <b>3B Yönl. Filtreler [26]</b>   | KK = 0,60<br>TSGO = 20,08<br>KOKH = 0,07<br>EKI = 0,61                             | KK = 0,60<br>TSGO = 20,10<br>KOKH = 0,07<br>EKI = 0,61                             | KK = 0,59<br>TSGO = 20,16<br>KOKH = 0,07<br>EKI = 0,61                             |
| <b>Önerilen (AÖSD Tabanlı)</b>   | <b>KK = 0,84</b><br><b>TSGO = 27,43</b><br><b>KOKH = 0,04</b><br><b>EKI = 0,82</b> | <b>KK = 0,83</b><br><b>TSGO = 27,50</b><br><b>KOKH = 0,04</b><br><b>EKI = 0,82</b> | <b>KK = 0,83</b><br><b>TSGO = 27,33</b><br><b>KOKH = 0,04</b><br><b>EKI = 0,80</b> |

## 5. SONUÇLAR

Literatürde 3B şekil oluşturmak için herhangi bir ek donanım gerektirmemesinden dolayı SFF stratejileri sıklıkla tercih edilmektedir. Klasik SFF stratejileri; farklı odaklı 2B görüntü serisinin elde edilmesi, görüntü piksellerinin odaklama değerlerinin hesaplanması ve maksimum odaklı pikselin seçilmesi olmak üzere üç temel aşamadan oluşmaktadır. Literatürdeki çalışmalarda araştırmacılar yüksek doğruluklu ve daha düşük gürültülü 3B şekil oluşturmak için yeni bir odaklama ölçüm operatörü önermekte ya da ön veya son işlem algoritmaları geliştirmektedirler. Literatür çalışmalarının aksine, bu çalışmada herhangi bir ön veya son işlem gerektirmeyen 3B şekil oluşturma sürecinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda Alt Örnekleme Shearlet Dönüşümüne dayalı yeni ve yüksek kaliteli odaklama ölçüm operatörü önerilmiştir. Önerilen odaklama ölçüm operatörünün etkinliği sentetik görüntü serileri kullanılarak pencere boyutu ve gürültü seviyesi gibi farklı koşullar altında analiz edilmiştir. Önerilen odaklama ölçüm operatörünün literatürdeki yaklaşımlardan daha iyi performans sağladığı elde edilen öznel ve nesnel sonuçlar ile ispatlanmıştır. Önerilen AÖSD tabanlı odaklama ölçüm operatörü literatürdeki diğer SFF yaklaşımlarına benzer şekilde koşma süresi bakımından dezavantaja sahiptir. Bu durumu minimize etmek ve SFF sürecinde performansı daha da artırmak için gelecek çalışmalarda derin öğrenmeye dayalı stratejilerinin önerilmesi planlanmaktadır.

## Yazar Katkıları

Hülya Doğan çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması, son onay ve tam sorumluluk kısımlarına, Ramazan Özgür Doğan çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi, fikirsel içeriğin eleştirel incelenmesi, son onay ve tam sorumluluk kısımlarına katkı sağlamışlardır.

## Çıkar Çatışması

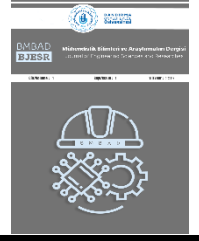
Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

## KAYNAKÇA

- [1] B. Billiot, F. Cointault, L. Journaux, J.C. Simon, and P. Gouton “3D image acquisition system based on shape from focus technique”, *Sensors*, vol. 13, no. 4, pp. 5040-5053, 2013.
- [2] S.O. Shim, A.S. Malik, and T.S. Choi “Accurate shape from focus based on focus adjustment in optical microscopy”, *Microscopy research and technique*, vol. 72, no. 5, pp. 362–370, 2009.
- [3] S. Pertuz, D. Puig, and M.A. Garcia “Analysis of focus measure operators for shape-from-focus”, *Pattern Recognition*, vol. 46, no. 5, pp. 1415–1432, 2013.
- [4] A.S. Malik, and T.S. Choi “A novel algorithm for estimation of depth map using image focus for 3d shape recovery in the presence of noise”, *Pattern Recognition*, vol. 41, no. 7, pp. 2200–2225, 2008.
- [5] J.M. Geusebroek, F. Cornelissen, A.W. Smeulders, and H. Geerts “Robust autofocusing in microscopy”, *Cytometry: The Journal of the International Society for Analytical Cytology*, vol. 39, no. 1, pp. 1–9, 2000.
- [6] M.B. Ahmad, and T.S. Choi “Application of three dimensional shape from image focus in lcd/tft displays manufacturing”, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 53, no. 1, pp. 1–4, 2007.
- [7] S.K. Nayar “Shape from focus system”, *Computer Vision and Pattern Recognition, Proceedings IEEE Computer Society Conference on. IEEE*, pp. 302–308, 1992.
- [8] J.L. Pech Pacheco, G. Cristóbal, J. Chamorro Martinez, and J. Fernández Valdivia “Diatom autofocusing in brightfield microscopy: a comparative study”, *Pattern Recognition*, 15th International Conference on. IEEE, pp. 314–317, 2000.
- [9] Y. An, G. Kang, I.J. Kim, H.S. Chung, and J. Park “Shape from focus through laplacian using 3d window”, *Future Generation Communication and Networking, 2008 Second International Conference on. IEEE*, pp. 46–50, 2008.
- [10] A. Thelen, S. Frey, S. Hirsch, and P. Hering “Improvements in shape-from-focus for holographic reconstructions with regard to focus operators, neighborhood-size, and height value interpolation”, *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 18, no. 1, pp. 151–157, 2009.
- [11] T. Yan, Z. Hu, Y. Qian, Z. Qiao, and L. Zhang “3d shape reconstruction from multifocus image fusion using a multidirectional modified laplacian operator”, *Pattern Recognition*, vol. 98, p. 107065, 2020.
- [12] C.Y. Wee, and R. Paramesran “Measure of image sharpness using eigenvalues”, *Information Sciences*, vol. 177, no. 12, pp. 2533–2552, 2007.
- [13] P.T. Yap, and P. Raveendran “Image focus measure based on chebyshev moments”, *IEE Proceedings-Vision, Image and Signal Processing*, vol. 151, no.2, pp. 128–136, 2004.
- [14] S.Y. Lee, Y. Kumar, J.M. Cho, S.W. Lee, and S.W. Kim “Enhanced autofocus algorithm using robust focus measure and fuzzy reasoning”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 18, no. 9, pp. 1237–1246, 2008.
- [15] C.H. Shen, and H.H. Chen “Robust focus measure for low-contrast images”, *Consumer Electronics, International Conference on. IEEE*, pp. 69–70, 2006.



- [16] S.Y. Lee, J.T. Yoo, Y. Kumar, and S.W. Kim “Reduced energy-ratio measure for robust autofocusing in digital camera”, *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 16, no. 2, pp. 133–136, 2009.
- [17] H. Xie, W. Rong, and L. Sun “Construction and evaluation of a wavelet-based focus measure for microscopy imaging”, *Microscopy research and technique*, vol. 70, no. 11, pp. 987–995, 2007.
- [18] U. Ali, and M.T. Mahmood “3d shape recovery by aggregating 3d wavelet transform-based image focus volumes through 3d weighted least squares”, *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, pp. 1–19, 2019.
- [19] F.S. Helmlı, and S. Scherer “Adaptive shape from focus with an error estimation in light microscopy”, *Image and Signal Processing and Analysis, Proceedings of the 2nd International Symposium on. IEEE*, pp. 188–193, 2001.
- [20] J. Lorenzo, M. Castrillon, J.M’endez, and O. Deniz “Exploring the use of local binary patterns as focus measure”, *Computational Intelligence for Modelling Control and Automation, International Conference on. IEEE*, pp. 855–860, 2008.
- [21] F. Mahmood, J. Mahmood, A. Zeb, and J. Iqbal “3d shape recovery from image focus using gabor features”, *Machine Vision, Tenth International Conference on. IEEE*, vol. 10696, pp. 106961F, 2018.
- [22] R. Minhas, A.A. Mohammed, and Q.J. Wu “Shape from focus using fast discrete curvelet transform”, *Pattern Recognition*, vol. 44, no. 4, pp. 839–853, 2011.
- [23] R. Minhas, A.A. Mohammed, Q.J. Wu, and M.A. Sid Ahmed “3d shape from focus and depth map computation using steerable filters”, *Image Analysis and Recognition, International Conference on. IEEE*, pp. 573–583, 2009.
- [24] H. Nanda, and R. Cutler “Practical calibrations for a real-time digital omnidirectional camera”, *CVPR Technical Sketch* vol. 20, no. 2, 2001.
- [25] M.V. Shirvaikar “An optimal measure for camera focus and exposure”, *System Theory, Thirty-Sixth Southeastern Symposium on. IEEE*, pp. 472– 475, 2004.
- [26] T. Fan, and H. Yu “A novel shape from focus method based on 3d steerable filters for improved performance on treating textureless region”, *Optics Communications*, vol. 410, pp. 254–261, 2018.
- [27] U. Ali, V. Pruks, and M.T. Mahmood “Image focus volume regularization for shape from focus through 3d weighted least squares”, *Information Sciences*, vol. 489, pp. 155–166, 2019.
- [28] M. Chen, Y. Zhong, Z. Li and J. Wu “A novel 3d shape reconstruction method based on maximum correntropy kalman filtering”, *Sensor Review*, 2018.
- [29] H.S. Jang, M.S. Muhammad and T.S. Choi “Optimal depth estimation using modified kalman filter in the presence of non-gaussian jitter noise”, *Microscopy Research and Technique*, pp. 1–8, 2018.
- [30] H.S. Jang, M.S. Muhammad and T.S. Choi “Bayes filter based jitter noise removal in shape recovery from image focus”, *Journal of Imaging Science and Technology*, vol. 63, no. 2, pp. 20501–1, 2019.
- [31] H.S. Jang, M.S. Muhammad and T.S. Choi “Optimizing image focus for shape from focus through locally weighted non-parametric regression”, *IEEE Access*, vol. 7, pp. 74393–74400, 2019.
- [32] H.S. Jang, M.S. Muhammad, G. Yun and D.H. Kim “Sampling based on kalman filter for shape from focus in the presence of noise”, *Applied Sciences*, vol. 9, no. 16, pp. 3276, 2019.
- [33] P.G. Kumar and R. Ranjan Sahay “Accurate structure recovery via weighted nuclear norm: A low rank approach to shape-from-focus”, *Computer Vision, Proceedings of the IEEE International Conference on. IEEE*, pp. 563–574, 2017.
- [34] I. Lee, M.T. Mahmood and T.S. Choi “Adaptive window selection for 3d shape recovery from image focus”, *Optics and Laser Technology*, vol. 45, pp. 21–31, 2013.
- [35] S.A. Lee, H.S. Jang and B.G. Lee “Jitter elimination in shape recovery by using adaptive neural network filter”, *Sensors*, vol. 19, no. 11, pp. 2566, 2019.
- [36] S. Pertuz, D. Puig and M.A. Garcia “Reliability measure for shape-from-focus”, *Image and Vision Computing*, vol. 31, no. 10, pp. 725–734, 2013.
- [37] M. Muhammad and T.S. Choi “Sampling for shape from focus in optical microscopy”, *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 34, no. 3, pp. 564–573, 2012.
- [38] G. Easley, D. Labate, and W.Q. Lim “Sparse directional image representations using the discrete shearlet transform”, *Applied and Computational Harmonic Analysis*, vol. 25, no. 1, pp. 25– 46, 2008.



## Tag: Blokzincirinden Esinlenen Veri Yapısı

## Tag: A Blockchain Inspired Data Structure

<sup>1\*</sup>Alpay DORUK , <sup>2</sup>Savaş TAKAN , <sup>3</sup>Fatih SOYGAZI , <sup>4</sup>Zeynep DEMİRTAŞ , <sup>5</sup>Elnur AKKURT 

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

<sup>2</sup>Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Yapay Zekâ ve Veri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

<sup>3</sup>Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Aydın/TÜRKİYE

<sup>4,5</sup>Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü. Bursa/TÜRKİYE

<sup>1</sup>adoruk@bandirma.edu.tr, <sup>2</sup>stakan@ankara.edu.tr, <sup>3</sup>fatih.soygazi@adu.edu.tr,

<sup>4,5</sup>031990080@ogr.uludag.edu.tr, <sup>5</sup>031990053@ogr.uludag.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

### ARTICLE INFO

#### Article history

Received : 5 December 2022

Accepted : 12 January 2023

#### Keywords:

Data Structure, Blockchain, Software Engineering, Modifiability, Reliability

### ABSTRACT

In this study, the data structure of the blockchain is discussed from a software engineering perspective. The traceable, immutable, and provable nature of the data structure of the blockchain is among the issues to be dealt with in terms of software engineering. However, it is difficult to use in software development because the conventional data structures used in blockchain are intertwined with other blockchain-based technologies. In this article, the data structure is separated from blockchain technologies and made accessible to software engineers for various purposes. In doing so, numerous software engineering problems related to the blockchain data structure have been addressed and solutions developed. The proposed data structure has been validated and evaluated by comparing it with the traditional blockchain data structure. It is observed that the time/space complexity of our proposed data structure reduces on a logarithmic scale.

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

### MAKALE BİLGİSİ

#### Makale Tarihleri

Gönderim : 5 Aralık 2022

Kabul : 12 Ocak 2023

#### Anahtar Kelimeler:

Veri yapısı, Blokzinciri, Yazılım Mühendisliği, Değişmezlik, Güvenilirlik.

### ÖZET

Bu çalışmada blokzincirinin veri yapısı yazılım mühendisliği bakış açısından ele alınmaktadır. Blokzincirinin veri yapısının izlenebilir, değiştirilemez ve kanıtlanabilir doğası, yazılım mühendisliği açısından ilgilenecek konular arasında görülmektedir. Ancak blokzincirinde kullanılan geleneksel veri yapıları diğer blokzincir tabanlı teknolojilerle iç içe olduğu için yazılım geliştirmede kullanımı zordur. Bu makalede, veri yapısı blokzinciri teknolojilerinden ayrılmış ve yazılım mühendisleri için farklı amaçlar doğrultusunda kullanılabilir hale getirilmiştir. Bunu yaparken, blokzinciri veri yapısıyla ilgili çok sayıda yazılım mühendisliği sorunu ele alınmış ve çözümler geliştirilmiştir. Önerilen veri yapısı, geleneksel blokzinciri veri yapısı ile karşılaştırılarak doğrulanmış ve değerlendirilmiştir. Önerilen veri yapısının zaman ve uzay karmaşıklığının blokzincirindeki veri seviyesindeki mekanizmalara göre logaritmik bir ölçekte azaltma sağladığı görülmüştür.

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

ORCID: <sup>1\*</sup>0000-0002-6190-288X

<sup>2</sup>0000-0002-7718-9476

<sup>3</sup>0000-0001-8426-2283

<sup>4</sup>0000-0002-5038-8141

<sup>5</sup>0000-0001-8143-0851

## 1. GİRİŞ

Blokzinciri, Bitcoin ile hayatımıza girmiş olmakla beraber sadece finansal alandaki uygulamalara özgü bir teknoloji değildir. Farklı çalışma alanlarına özgü beklentileri karşılayabilecek bir yazılım mimarisini destekleyecek bileşenlerden meydana gelmektedir [1-8]. Blokzinciri teknolojisi için geliştirilen esnek yazılım bileşenleri, blokzincirinin farklı alanlarda rahatlıkla kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır.

Blokzinciri [9-11], blokların işlemlerle ilgili bilgileri sakladığı birbirine zincirlenmiş blok listesidir. Bloklar, kendi bloğunun ve bir önceki bloğun bilgilerini değişmez bir şekilde saklar. Bu nedenle blokzincirine yeni bilgiler eklemek gerekiyorsa yeni bir blok ilave etmek gerekir. Farklı veriler içeren herhangi bir blok, diğerlerinden farklı bir özet (hash) değerine sahiptir. Blokzincirlerinde Merkle ağacı [12], Yönlü Döngüsüz Çizge (Directed Acyclic Graph (DAG)) [13] vb. gibi farklı veri yapıları kullanılabilir.

Blokzincirinin birçok teknolojiye dayandığını söylemek hatalı olmaz. Ancak blokzincirinin var olan teknolojileri, her sistem için aynı değeri taşıyabilmektedir [14-15]. Örneğin, dağıtık sistemler, para gibi, bir hafızada az yer kaplayan değerler için uygun bir çözüm olabilir fakat yüksek miktarda hafıza gerektiren yapılarda problemler oluşabilmektedir [16]. Diğer bir deyişle, bu teknolojilerin birbirine girmiş olması kullanım açısından dezavantajlara neden olabilmektedir. Bu nedenle, blokzinciri teknolojisini bir bütün olarak almak yerine, ayrı ayrı değerlendirmek faydalı bir seçenek olabilmektedir. Bu açıdan, blokzinciri türü veri yapıları, blokzincirinin sahip olduğu diğer teknolojilerden ayrıştırılırsa, bu yapı yazılım mühendisliğinde rahat ve esnek bir şekilde kullanılabilir hale gelmiş olur. Sahip olduğu tüm teknolojiler ile birlikte kullanıldığında, blokzinciri ile yapılamayacak pek çok işlem, bu sayede yapılabilir hale gelecektir.

Bir bloktaki verilerle ilgili ele alınması gereken bazı sorunlu durumlar vardır. Bu verilerle ilgili ilk sorun, işlem (transaction) verileri arasındaki ilişkiyi yakalamak için bir uygulamaya duyulan ihtiyaçtır. İşleme ilgili genel bilgiler bir arada bu zincirlerde saklandığından, geleneksel blokzinciri yaklaşımı, veri odaklı değil işlem odaklıdır. İkinci sorun, uygulamaya özel başka bir çözüme ihtiyaç duyulan blokzincirinin veri bütünlüğü ile ilgilidir.

Veri modeli, bir uygulamada kullanılacak ana kavramları ifade etmek amacıyla oluşturulan veri temelini ifade etmektedir. Veri yapısı ise, herhangi bir verinin bilgisayar ortamında saklanabilmesi için ihtiyaç duyulan daha alt seviyede bir kavramdır. Veri modeli, veri yapısına ihtiyaç duymakla beraber o veri yapısının sahip olduğu özelliğe bağımlı biçimde davranmamalıdır. Bu durumda veri, bir nevi uygulama bağımlı bir şekilde ele alınmaktadır. Mesela, Ontoloji bir veri modelidir. Çizge bir veri yapısıdır. Bir veri modelini ifade etmek için veri yapısına ihtiyaç vardır. Ontoloji oluştururken mutlaka RDF gibi bir dille çizge oluşturmaya gerek yoktur. Örneğin Prolog ile de ontoloji oluşturulabilir [17]. Bu durum ontolojinin çalışma mekanizmasını etkilemez [18]. Ancak blokzincirinde mekanizma olarak özetleme operasyonu örneğin Merkle ağacı üzerinde yürüdüğü için blokzincirini de etkilemekte ve bu durum yazılım mühendisliğine aykırılık oluşturmaktadır. Bu noktada, veri modeli ile veri yapısının tamamıyla bağımsız olduğu bir yaklaşıma gidilmesinin daha uygun olacağı düşünülmektedir.

Çalışmada, yukarıda değinilen problemleri çözmek üzere, blokzincirinin yapısında değişiklik sağlanmıştır. Geleneksel blokzinciri yapısı <data, prevHash> şeklindedir. Bu yapıda veri, sadece data içerisinde saklanmaktadır. Yeni veri, prevHash kullanılarak, bir önceki veriye eklenir. Çalışmada önerilen yapıda ise veri üç kısma bölünmüştür. Birincisi Meta; ikincisi Data, üçüncüsü ise Tanık Çizgesi (Witnessing Graph) kısmıdır. Çalışmada Tag olarak adlandırılan yapı <meta, data, witnessing graph, stamp> şeklinde formüle edilmiştir. Meta, data ve tanık çizgesi yapıları, Tag yapısı içinde “gösterge” (pointer) olarak tutulmaktadır.

Önerilen modelin meta kısmında değişebilen veriler bulunmaktadır. Böyle bir veri yapısına duyulan ihtiyaç, bir resim tablosunun, kendisi değişmediği halde sahiplerinin değişebilir olmasının sağlanmasına benzetilebilir. Data kısmı ise değişmez veriyi barındırmaktadır. Bu analogiye göre tabloyu çizen ressam, meta kısmında değil, data kısmında bulunmalıdır. Çünkü bir tablonun ressamı sabittir, değişmez. Önerilen veri yapısında esneklik sağlayabilmek için, data ve meta birer gösterge olarak modellenmiştir.

Önerilen modelde Tag’ler veri taşıyabilir veya başka Tag’lere tanıklık yapabilir. Tanık Çizgesi ise tanıklardan oluşan bir yapıdır. Diğer bir deyişle, içerisinde tanık Tag’lerini barındırır. Bu tanıklar sayesinde özet fonksiyonu hesaplanır. Tanık Çizgesi’nin kendi içindeki yapısı çok farklı biçimlerde (array, set, map) mevcut olabilir. Bu sayede, her çeşit veri yapısı rahatlıkla gerçekleştirilebilmektedir. Örneğin Tag’ler bir harita’ya (map) aktarılabilir veya bir bağlı liste (linked list) ya da bir ağaç içerisinde rahatlıkla kullanılabilir. Çünkü Tanık Çizgesi sayesinde, Tag’lere ulaşmak mümkündür. Yani önerilen veri yapısı, kanıt Tag’lerin göstergelerini kendi içerisinde tutmaktadır. Bu da onlara kolaylıkla erişimi mümkün kılmaktadır. Ayrıca, güncel blokzincirinden farklı olarak, önerilen yaklaşımda Tanık Çizgesi ile veri ağı birbirinden ayrı tutulmuştur. Tanık Çizgesi, tanık Tag’lerinden oluşmaktadır. Veri ağı ise Meta ve Data bölümlerinden oluşmaktadır. Diğer bir husus, örneğin bir Tag’in tanıkları olarak sahip olduğu bazı Tag’lerin değiştirildiği anlaşılırsa, bu Tag tanıklarının içerisinden çıkarılmaktadır. Bir Tag’in güvenilir olması için en az bir tane tanık Tag’ine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durumu sağlamayan Tag’lere şüpheli Tag adı verilmektedir.

Önerilen veri yapı türü, blokzincir teknolojisinin en önemli özelliklerinden biri olan “eklenebilir ama güncellenemez ve kanıtlanabilir” olma özelliğine bazı eklentiler ve değişiklikler getirilerek geliştirilmiştir. Önerilen veri yapısı, yaygın kullanılan bir dil olan Javascript kullanılarak örneklendirilmiştir. Bunun dışında, önerilen model örnek bir senaryo ile sınanmıştır. Böylece, “eklenebilir ama güncellenemez ve kanıtlanabilir” olma özelliğinin yanı sıra diğer değişikliklerle birlikte bu çalışmada önerilen veri yapısının; sağlık, hukuk, eğitim vb.



gibi pek çok farklı sektörde yazılım süreçlerinde rahatlıkla kullanılacak nitelikler sunduğunu söylemek mümkündür.

Çalışmanın en önemli katkıları olarak;

- Blokzincirinin güncel olarak kullandığı veri yapısının yazılım mühendisliği prensiplerine uygun olmayan kısımları ele alınarak bir veri yapısı önerilmektedir.
- Önerilen yenilikçi veri yapısı ile beraber çalışan bir güven mekanizması detaylandırılmaktadır. Bahsedilen güven mekanizması yardımı ile sistemdeki veri takibinin gerçekleştirilebildiğine dair örnekler verilmiştir.
- Veri esnekliği ve farklı tiplerdeki verinin blokzincirinde kullanılabilmesi için bölünebilen ve bölünemeyen verinin, önerilen veri yapısı yardımı ile nasıl oluşturulabildiği açıklanmaktadır.
- Önerilen veri yapısı yardımı ile zaman-uzay karmaşıklığı açısından ciddi bir iyileştirme yapılmaktadır.

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Blokzincirinin finansal alandaki başarısı, farklı endüstriyel alanlarda blokzincirine olan ilgiyi arttırmıştır [19]. Ayrıca, dağıtık sistemi ve verinin değiştirilmesine karşı mekanizmaları sayesinde, blokzinciri teknolojisi yaygın bir kullanıma ulaşmıştır.

Blokzinciri, blokların aktarılması için farklı uçtan uca ağ yapıları kullanmakta ve bloklarda bulunan verileri işlemler (transaction) yardımı ile ağ üzerinde kullanıcılar arasında paylaşmaktadır. Farklı blokzinciri ağları (Bitcoin, Ethereum, Ripple etc.) kendi mimarilerine uygun bir veri seviyesi inşa etmekte ve işlemlerin güvenli olarak gerçekleştirilmesi için bu seviyede kendi veri yapılarından yararlanmaktadır [20]. Yönlü Döngüsüz Çizge (DAG) veri yapısı tabanlı kullanılan çeşitli ağlar da mevcuttur [21].

Blokzincirinin mimari beklentilerini sağlayan farklı veri yapıları vardır. Bağlı bloklar, özet değerleri yardımıyla blokzincirini oluşturur. Bu durumda iki ihtimal bulunur. Bloklar, her durumda blok bağlantılarına göre ayrı ayrı çok sayıda özet değerine sahip olabilir veya bu blokları içeren her işlem sadece bir özet ile temsil edilebilir. İkincisi mantıklı çözümdür. Bu nedenle, Merkle ağacı (veya karma ağacı) [9], kökte sadece bir özet kalana kadar yaprak düğümlerinin özet değerlerini yapraklardan kök düzeyine kadar değerlendiren ikili bir ağaçtır. Her yaprak düğümü kendi özet değerini içerirken, yapraklar dışındaki diğer düğümler, ağacın alt seviyelerindeki özetlerin özetlerini içerir. Blokzincirindeki her bloğun kendi başlığı vardır ve önceki bloğun özet değerini gösterir. Tüm bu önceki özet değerleri bir Merkle ağacında birleştirilir ve bu zincirin doğrulanması için benzersiz bir özet elde edilir. Yönlü Döngüsüz Çizge (DAG), ağaçtaki çeşitli dalların tek bir ileri yönde başka bir dalı gösterebileceği belirli bir Merkle ağacı türüdür. Her veri yapısında, veriler sabit veriler olarak kabul edilir ve bloklardaki verilerin güncellenebilirliği ana odak değildir. Önerimiz, veri yapısından bağımsız bir çözüm ile bloklardaki verilerin güncellenebilirliğinin sağlanmasıdır.

Przytarski [22], blokzincirinin veri modelinin problemlerini ele almak için bir çözüm önermektedir. Anahtar/değer çiftini, bir varlığın niteliklerinin daha esnek şekilde tutulduğu *<entity, feature, value>* modeli ile değiştirir. Varlıklar ve özellikler arasındaki ilişki daha genel bir şekilde oluşturulmakta ve bu şekilde verilerin sorgulanması kolaylaştırılmaktadır. Bu yaklaşımda, varlık/nitelik ilişkisi iki farklı Merkle Ağacı ile tanımlanır ve bu yaklaşım için veri yapısı yüksek depolama kapasitesi gerektirirken, yaklaşımımız belirli bir veri yapısından bağımsızdır ve ayrıca işlem verilerinin güncellenebilir özelliği vardır.

Przytarski ve arkadaşları [23] blokzincirine girilen veri türlerini iki farklı şekilde tanımlamaktadır. Birincisi, "sabit nesne"dir. "Sabit nesne", belirli bir zamanda geçerli olan bir öge türünü tanımlar. Bu nesnelere, o olayın zaman damgasını bir özellik olarak tutarak zaman içindeki olaylara işaret eder. İkincisi "genişletilebilir nesne"dir. "Genişletilebilir nesne", zaman içinde değiştirilebilecek bir nesne türüdür. Bu tür nesnelere bir dizi anahtar/değer çiftinden oluşur ve bu anahtar/değer çiftleri bir zincir olarak bir zaman damgasıyla bağlantılıdır. "Çıktı Formatı" Bölümünde gösterildiği gibi zaman içinde "genişletilebilir nesne" üzerindeki alanlar için yaratma, okuma, güncelleme ve silme (CRUD) işlemleri uygulanabilir. Ek olarak amacımız, yalnızca anahtar/değer çiftlerini değil, aynı zamanda gerekirse zincir yönelimli nesnelere güncellemek için genişletilmiş bir şekilde Taglerle esnek bir nesne oluşturmaktır. Bu nesnelere, blokzinciri uygulamalarında iletişim sağlamak için JSON, RDF/N3, RDF/XML vb. sözdizimi gibi farklı formatlarda temsil edilebilir ve iletilebilir. Bir nesnenin modifikasyonu, değişmez bir zincirin oluşturulmasından bağımsız olduğu için, blokların (meta veri) önceki ve mevcut durumu, gerçek verileriyle birlikte saklanmalıdır. Ancak, bir zaman çizelgesindeki güncellenebilirlik de izlenmelidir. Bu nedenle, bir zincirdeki bir nesne hakkında kilitleme işlemi, nesnelere güncellenebilirlik durumunu izlemeye devam etmemize yardımcı olur.

Verinin bir parçası olarak blokzincirindeki bloklar, bazı veri odaklı özellikleri kapsar. Veriler bir veri deposunda saklanmalıdır ve saklanan veriler, izlenmesi gereken verilerle ilgili bazı meta verilerle sahip olabilir. Gerçek veriler ve meta veriler, geleneksel veri tabanı sisteminde veya blokzincirinin kendisinde saklanmalıdır. Eberhardt ve Tai [24] bu veri depolama işlemi, verilerin blokzincirinde depolandığı "zincir içi" olarak sınıflandırırken, "zincir dışı", verilerin geleneksel veri tabanında depolanmasını ve meta verilerin blokzincirinde tutulmasını önerir.

Burada dikkate alınması gereken ilk sorun, blokzincirinin doğrulanmasıdır. İkinci sorun ise yeni işlemlerin meta verileri sık sık güncellemesi ve bu durumun blokzincirini uzatmasıdır. Makalemizin katkısı, buradaki blokzinciri mekanizmasının farklı bölümlerinin "güncellenebilirliğini" sağlayan ve onları zarif bir şekilde doğrulayan bir veri yapısı önermesidir [22], [23], [24]. Eberhardt ve Tai [24], verilerin ve meta verilerin güncellenebilirliğini

blokzincirinin güveni için bir iletişim yükü ile belirleyerek "zincir içi" bir yaklaşım önermiştir. Bundan farklı olarak makalemizde geliştirilen veri yapısında esnek bir tanık mekanizması önerilmiştir. Blokzinciri teknolojisinin ortaya çıkması ile beraber farklı özelliklere sahip blokzinciri yapıları geliştirildi. Geliştirilen teknolojiler birbirine çoğunlukla benzemekle beraber Tablo 1’de görüldüğü üzere bazı farklılıklar görülmektedir. Tablo 1’de yedi adet güncel blokzinciri teknolojisi ile beraber önerdiğimiz yöntemin özellikleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma kriteri olarak blokzincirdeki verinin değiştirilip değiştirilemediği, farklı veri yapılarını desteklemesi, özet yapıları, veri ekleme/silme yetenekleri, blokzincirindeki blokların önceki bloğa bağımlılığı, bir kilitleme fonksiyonu içerip içermemesi ve ayrı bir veri yapısı olarak kullanılabilme yetisi göz önüne alınmıştır. Tablo 1’de görüldüğü üzere önerdiğimiz veri yapısı var olan blokzinciri veri yapılarından ciddi anlamda farklılıklar içermektedir. Önerdiğimiz veri yapısı, diğer çalışmaların bağımsız olarak bir veri yapısına dönüştürülebilmesi, çalışmamızın güncellenebilir veriye izin vermesi ve güvenilirlik açısından önerdiği Tanık Çizgesi yapısı ile özellikle esneklik açısından önde görülmektedir.

**Tablo 1.** Farklı blokzinciri veri yapılarının önerilen veri yapısıyla karşılaştırılması.

|                  | Değişebilen Veri | Veri Yapısı Desteği | Hash Yapısı                  | Ekleme ve Çıkarma Özellikleri | Önceki blok içinde tutuluyor mu? | Kilitleme /Açma Fonksiyonu | Çoklu İlişki Desteği | Yazılım alanında veri yapısı olarak kullanılabilir mi? |
|------------------|------------------|---------------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------------|----------------------|--|
| Önerilen Model   | Evet             | Evet                | Hepsi                        | Evet                          | Evet                             | Evet                       | Evet                 | Evet   |
| Ethereum [25]    | Hayır            | Hayır               | MerklePatricia Tree          | Hayır                         | Hayır                            | Hayır                      | Hayır                | Hayır  |
| Ripple [26]      | Hayır            | Hayır               | Merkle Tree                  | Hayır                         | Hayır                            | Hayır                      | Hayır                | Hayır  |
| Tezos [27]       | Hayır            | Hayır               | Merkle Tree                  | Hayır                         | Hayır                            | Hayır                      | Hayır                | Hayır  |
| Hyperledger [28] | Hayır            | Hayır               | Merkle Tree                  | Hayır                         | Hayır                            | Hayır                      | Hayır                | Hayır  |
| Stellar [29]     | Hayır            | Hayır               | Merkle Tree                  | Hayır                         | Hayır                            | Hayır                      | Hayır                | Hayır  |
| Hedera [30]      | Hayır            | Hayır               | Hash graph                   | Hayır                         | Hayır                            | Hayır                      | Hayır                | Hayır  |
| IOTA [31]        | Hayır            | Hayır               | Directed Acyclic Graph (DAG) | Hayır                         | Hayır                            | Hayır                      | Hayır                | Hayır  |

Bildiğimiz kadarıyla ve bu bölümde anlatıldığı üzere belirtilen hiçbir referansta blokzincirinde ihtiyaç dahilinde güncellenmesi gereken veriye dair bir çözüm üretildiği veya blokzincirinin veri seviyesindeki veri yapısının güven mekanizmasından ayrılarak yazılım mühendisliği çerçevesinde ele alındığı bir çalışma görülmemiştir. Çalışma ile bu noktalarda blokzincirine yenilikçi bir bakış açısı sunulmaktadır

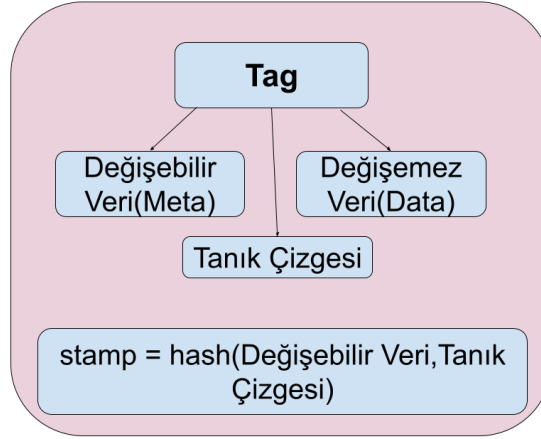
### 3. ÖNERİLEN VERİ YAPISI

Tag adı verilen yapı, üç kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım, Data’nın göstergesini ifade eder. Bu gösterge, herhangi bir veri yapısına referans olabilir. Göstergenin maliyeti, düşüktür. Bu nedenle, değişmeyen veriyi yapı içerisinde tutmamak, bunun yerine göstergeleri tutmak, avantaj sağlamaktadır. İkinci kısım ise ilişkilerin ve güncellenebilir özelliklerin tutulduğu Meta göstergesidir. Bu kısım, genel olarak opsiyoneldir. Çünkü güncellenebilir kısımlar, yapının dışında da tutulabilmektedir. Önerilen veri yapısı, buna izin vermektedir. Üçüncü kısım ise Tanık Çizgesidir. Tanık Çizgesi, verinin değiştirilmediğinin kanıtıdır. Geliştirilen yapıda, Tanık Çizgesinin ve Data’nın özetlenmesiyle, o veri koruma altına alınmaktadır. Birçok blokzinciri önerisinden farklı olarak, oluşturulan yapıya fazladan tanık göstergeleri eklenebilir esnekliği sağlanmaktadır. Tanık Çizgesi, örnek çalışmalarda ifade edileceği üzere, birden fazla Tag’e sahip olabileceği gibi sadece tek bir Tag’e de sahip olabilmektedir. Bu da koruma seviyesinin güçlendirilmesine veya azaltılmasına imkan tanımaktadır. Şekil 1’de, Tag yapısı genel özellikleriyle gösterilmektedir.

Değişmezlik kontrolü, stamp yapısı ile sağlanmaktadır. Stamp, verinin tanık çizgesi ile özetlenmesi yolu ile hesaplanmaktadır. Örnek stamp hesaplama denklemi Denklem (1)’de görülmektedir. İstenildiği zaman stamp hesaplanmakta ve ilgili değışkene atanmaktadır. Daha sonra, değışiklik olup olmadığını kontrol etmek için yeni bir stamp değeri hesaplanmakta ve eski stamp değeri ile karşılaştırılmaktadır. Böylece, yapının değışip değışmediği, karşılaştırmanın sonucuna göre belirlenmiş olmaktadır. Çıkan sonuçlar eşitse yapının değıştirilmediği; sonuçlar eşit değilse yapının değıştirildiği anlamına gelmektedir. Bir diğer nokta ise eğer Tanık Çizgesi hesaplanırken bazı Tag’ler şüpheli pozisyona düşmüş ise o Tag’lerin hesaplamaya dahil edilmemesidir.

$$stamp = hash(data + \sum_{j=0}^n Tag_j) \quad (1)$$

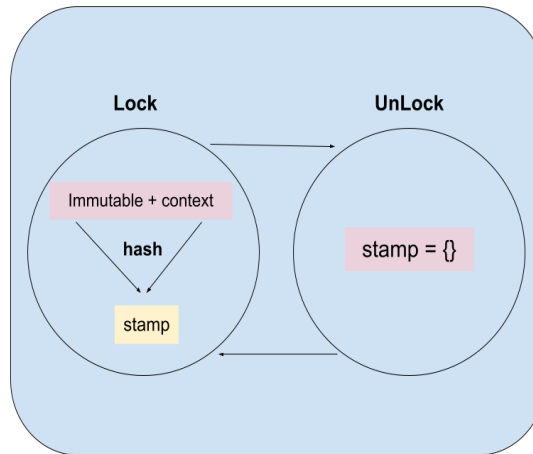
Denklem 1, Tag’in verisi ile o Tag’in sahip olduğu Tag’lerin özetlenmesini ifade etmektedir. Denklem 1’de toplama işareti topolojik yapıdaki ilişkileri ayırt etmemektedir.



Şekil 1. Tag veri yapısının genel görünümü.

Fakat, gerçekte stamp değeri hesaplanırken derin öncelikli arama veya genişlik öncelikli arama yöntemiyle hesaplanmaktadır.

Önerilen yapıda, bunların dışında iki adet fonksiyon bulunmaktadır. Bunlardan birisi Lock() diğeri ise isLock()'tur. Lock() fonksiyonu sistemi kilitlemeye yaramaktadır. Lock() fonksiyonu, stamp'i hesaplayarak sisteme kaydetmektedir. Bu andan sonra, sistemdeki Tag'lerde ve veride bir değişiklik olduğunda farklı özet çıkacağından, verinin değişip değişmediği otomatik olarak ortaya çıkmaktadır. Bunu sorgulayan fonksiyon ise isLock'tur. isLock fonksiyonu veride bir değişiklik olup olmadığını kontrol etmektedir. Değinilen tüm noktalar, Tag veri yapısının temel özelliklerini oluşturmaktadır. Tag'in Lock ve Unlock durumunun genel yapısı Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Lock() ve Unlock() fonksiyonu.

Aşağıda, Tag yapısının psödo kodu verilmektedir:

```

class Tag(meta, data, witnessing graph)
  doStamp()
    return hash(witnessing graph + data)
  lock()
    stamp = doStamp()
  isLock()
    return stamp == doStamp()
  
```

Tanık Çizgesi yapısı birçok şekilde olabilir. Aşağıda buna yönelik örnekler verilmektedir:

```

Tag1 = newTag("meta", "data", Tag1)
Tag2 = newTag("meta", "data", [Tag1, Tag2])
Tag3 = newTag("meta", "data", {Tag1: Tag2, Tag4: Tag7})
subject = newTag("meta", "data", {verb, object})
  
```

Data veya Meta ile birçok farklı model oluşturulabileceği aşağıda gösterilmektedir.

```

Tag1 = newTag({"has", Tag2}, "data", null)
Tag2 = newTag({"is_a", Tag3}, "data", Tag1)
Tag3 = newTag({"inherit_of", Tag1}, "data", Tag2)

```

Çalışmada önerilen veri yapısına genel hatlarıyla değindikten sonra, önerilen yapı ile üretilebilecek örnek çıktılarına Bölüm 4'te yer verilmektedir.

#### 4. DEĞERLENDİRME

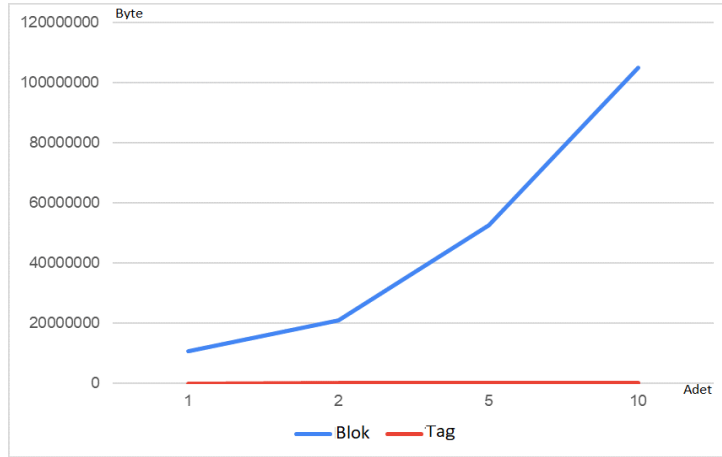
Geliştirilen model, özünde, blokzincirine bir alternatif olarak önerilmektedir. Çünkü senaryo bölümünde görülebileceği üzere, bazı yapıların blokzinciri altında gerçekleştirilmesi oldukça zordur. Aynı zamanda blokzinciri pek çok katmandan oluşan bir yapıya sahiptir. Şüphesiz her katman, bu proje ile uyumlu olmayacaktır. Bu nedenle projede, yalnızca gerekli katmanın kullanılmasına yönelinmiştir. Bu doğrultuda, blokzinciri veri yapısı ile bu çalışma kapsamında geliştirilen veri yapısı karşılaştırılarak, avantaj ve dezavantajlar ortaya konulmaktadır. Şekil 3, önerilen veri yapısı için Tag mekanizmasının sağladığı avantajları göstermektedir. Her bloğun veya etiketin boyutu 10 MB olarak ve her adresin boyutu 256 bayt olarak ayarlanmıştır. Bu deney düzeniğinden görüldüğü gibi, işlenecek veriler blokların toplam miktarı ile doğrusal olarak artmaktadır. Ayrıca, Tag mekanizması tarafından işlenecek veriler, geleneksel blok zincirine kıyasla neredeyse yok denecek kadar azdır. Blokzincirinde her bir bloğun kapladığı alan aşağıdaki gibidir:

$$\text{Blok boyutu} = \text{blok sayısı} * (\text{bir bloğun veri boyutu} + \text{adres boyutu}) \quad (2)$$

Buna karşın, geliştirilen Tag mekanizmasında, her bir Tag'in kapladığı alan aşağıdaki gibidir:

$$\text{Tag boyutu} = \text{Tag sayısı} * (2 * \text{adres boyutu} + \text{stamp boyutu} * \text{adres boyutu} + \text{Tag boyutu} * \text{adres boyutu}) \quad (3)$$

Kolaylıkla görülebileceği gibi adres boyutları her zaman bir bloğun veri boyutundan çok daha küçüktür. Blokzincirinde büyük miktardaki verinin zaman ve alan karmaşıklığı  $O(n)$ 'dir. Buna karşın, geliştirilen Tag mekanizmasının zaman ve alan karmaşıklığı  $O(1)$ 'dir. Şekil 3'te bu durum gösterilmektedir.



Şekil 3. Blok ve Tag veri depolama karşılaştırması (Byte).

Tag mekanizmasının avantajları Tablo 2'de gösterilmiştir. Burada veri ile ilgili Meta bilgiler ayrı tutularak, bu Meta bilgilere rahatlıkla erişilebilir hale gelmiştir. Ayrıca Tag yapısı, blokzincirinden farklı olarak, değiştirilebilir veri yapısını da içerisinde barındırmaktadır. Geliştirilen modelde üç önemli unsur bulunmaktadır. Bunlardan ilki, verinin güncellenebilirliğidir. İkincisi, verilerin modelden ayrı tutulmasıdır, üçüncüsü ise güven mekanizmasıdır. Tüm bu katkılar sayesinde, blokzincirinin boyutu arttığında kolaylıkla performans artışı gözlemlenmektedir.

Tablo 2. Blok ve Tag mekanizması (Veri odaklı karşılaştırma).

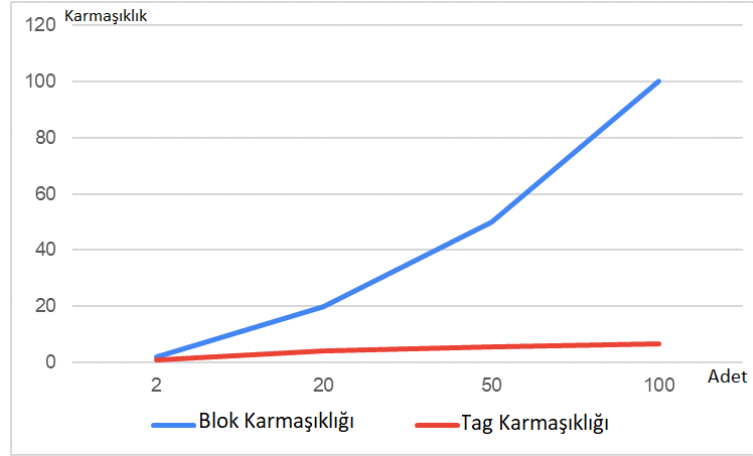
| Tür  | Data     | Yedekleme       | Değişme | Silme               | Ekleme              | Değişme            |
|------|----------|-----------------|---------|---------------------|---------------------|--------------------|
| Blok | İçeride  | Model ve veri   | Yok     | Veri + adres boyutu | Veri + adres boyutu | Veri+ adres boyutu |
| Tag  | Dışarıda | Model veya veri | Var     | 0                   | 4*adres boyutu      | 4*adres boyutu     |

Tablo 2’de, blokzinciri veri yapısı ile geliştirilen Tag yapısı karşılaştırılmıştır. Blokzincirinde her bir blok, bağlı liste yapısında saklanır. Blokzinciri veri yapısı, bunun dışında farklı bir saklama türüne izin vermemektedir. Bağlı listedeki operasyonlar esnek değildir ve güncellenemezdir. Buna karşın önerdiğimiz model, çeşitli yapıları barındırabildiği için blokzincirindeki bloklara göre esneklik ve güncellenebilirlik avantajlarına sahiptir. Bloklar arasındaki bağlantılar, blokzincirinde blokların farklı konumlara taşınmasını engellerken; önerdiğimiz Tag yapısı, çizge tabanlı olması ve esnekliği dolayısıyla, bir Tag’ın farklı bir konuma taşınmasında herhangi bir probleme yol açmaz. Veri taşınabilirliği aynı zamanda indeksleme ile ilintilidir. Blokzincirindeki standart bloklarda kullanılan bağlı liste yapısında bu indekslemeyi oluşturmak oldukça zor iken; önerdiğimiz Tag yapısı, her türlü indeksleme mekanizmasını kolaylıkla içinde barındırabilecek özelliklere sahiptir.

**Tablo 3.** Blok ve Tag mekanizması (Veri yapısı odaklı karşılaştırma).

| Tür  | Veri Yapısı | Esneklik | Taşınabilirlik | İndeks | Arama    |
|------|-------------|----------|----------------|--------|----------|
| Blok | Bağlı Liste | Yok      | Yok            | Yok    | O(n)     |
| Tag  | Herhangi    | Var      | Var            | Var    | O(log n) |

Şekil 4’te, blokzincirindeki bloklar ile önerilen Tag yapısının arama performansları karşılaştırılmıştır. Blokzincirinde, bağlı liste yapısı nedeniyle blok sayıları arttıkça, arama karmaşıklığı doğrusal şekilde artar. Buna karşın önerilen Tag yapısı, her türlü indeksleme mekanizmasını barındırabildiğinden, örneğin indeksleme için B+Tree kullanılırsa, arama karmaşıklığı önemli oranda azalmaktadır.



**Şekil 4.** Blok ve Tag arama süresi karmaşıklığı.

Tablo 4, iki yaklaşımı güven odaklı bir perspektiften ele almaktadır. Buna göre her bloğun güveni, bir önceki ekli bloğa bağlıdır ve blokların güveni, derece veya hiyerarşik bir şekilde gerçekleştirilemeyebilir. Öte yandan, Tag’ler, birbirleri arasında farklı türde ilişkiler kurabilir ve farklı Tag’ler için farklı güven dereceleri bulunabilmektedir.

**Tablo 4.** Blok ve Tag mekanizması (Güven odaklı karşılaştırma).

|      | Güven Bağımlılığı (blok sayısı) | Güven (Yöntem) | Bağımlılığı | Bakım onarım                                     |
|------|---------------------------------|----------------|-------------|--|
| Blok | 1                               | Sabit          |             | Blok düzeyinde bütünlük yok. Önceki bloğa bağlı. |
| Tag  | n                               | Derece tabanlı |             | Gerekirse farklı Tag’ler işlenebilmektedir.      |

Geliştirilen modelin fiziksel olarak test edilmesi için, dört adet STM32 ve Lora Modülü kullanılmış ve testler gerçekleştirilmiştir. Konsensus algoritmaları bu aşamada entegre edilmemiş ancak bilginin saklanması, aranması ve transferi ile ilgili istemci-sunucu yapısında testler uygulanmıştır. Sonucunda, modelin fiziksel işlerliği tespit edilmiştir. Kodlar, GitHub linkinde<sup>1</sup> mevcuttur.

Görülebileceği gibi, geliştirilen Tag yapısının esnekliği ve güvenilirliği sayesinde, kullanışlı bir veri modeli oluşturabilmek mümkündür. Geliştirilen veri yapısı, aşağıda örnek senaryolarla test edilmiş ve işlevselliği ispatlanmıştır. Böylece, geliştirilen modelin çok çeşitli yazılım süreçlerinde kullanılabilir olduğu gösterilmiştir.

<sup>1</sup> <https://github.com/kursuApp/tag/>

#### 4.1. Senaryo: Güncellenebilirlik

Değişmezliği göstermek amacıyla, aşağıda iki farklı Tag oluşturulmuştur. Burada Tag2'nin bağlamı Tag1'dir. Tag1'in ise bu aşamada herhangi bir bağlamı yoktur. Bu iki Tag'i oluşturmak için kullanılan psödo kodu aşağıdaki gibidir.

```
Tag1 = new Tag(meta, data, null)
Tag2 = new Tag(meta, data, Tag1)
```

Yukarıda gösterilen aşamada, lock fonksiyonu çalıştırılmamıştır. Dolayısıyla bunun sonucunda herhangi bir güncellenebilirlik mekanizması aktive edilmemiştir. Güncellenebilirlik mekanizması aktif hale getirilmediğinde, Stamp değerleri sıfır olacaktır. Bu yapının JSON format görünümü aşağıdaki gibidir:

```
Tag1: {meta, data, context: null, stamp:0}
Tag2: {meta, data, context: Tag1, stamp:0}
```

Aşağıdaki aşamada ise Tag2'nin lock fonksiyonu çağırılarak, sistem kilitlenmiş ve böylece değiştirilemez yapılmıştır. Tag2'nin lock fonksiyonunu çağırma komutu aşağıdaki gibidir:

```
Tag2.lock()
```

Bunun sonucunda Tag1'in Tag2'yi desteklediği yapı, sadece Tag2'nin Lock fonksiyonu çalıştırılrsa dahi Tag1'i değiştirilmez yapmaktadır. Tag2'nin Lock fonksiyonu uygulandıktan sonraki yapının JSON format görünümü aşağıdaki gibidir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, stamp değerlerinin girilmiş olmasıdır. Bu stamp değerleri Tag1'in ve Tag2'nin özetiştir.

```
Tag1: {meta, data, context: null, stamp:{ 40ka7}}
Tag2: {meta, data, context: Tag1, stamp:{ 50ba8}}
```

İstendiğinde, Meta değişkenine yeni bir Tag eklenebilir ve bu, Stamp değerini değiştirmez. Bu durum bağlamı oluştururken bize büyük esneklik sağlayacaktır. Çünkü bazı Tag'ler bağlam için önemliken bazıları önemsizdir. Aşağıda, değiştirilebilir değerler değişse de Stamp değerlerinin değişmediği JSON formatında gösterilmiştir:

```
Tag1: {meta: 'first', data, context: null, stamp: 40ka7 }
Tag2: {meta: 'second', data, context: Tag1, stamp: 50ba8 }
```

İstendiğinde data değişkenine yeni Tag eklenirse, Stamp değerleri yeniden oluşturulur ve bu yeni değerler eski değerlerle karşılaştırıldığında, yeni oluşturulan Stamp değerlerinin eski Stamp değerlerinden farklı olduğu görülecektir. Burada dikkat çekmek istediğimiz nokta, Tag1'in data değeri değiştirildiğinde, Tag2'nin de değişeceğidir. Bu durum, aşağıda JSON formatında gösterilmiştir:

```
Tag1: {meta: 'first', data, context: null, stamp: 27b45 }
Tag2: {meta: 'second', data, context: Tag1, stamp: 13ca6 }
```

Son olarak geliştirdiğimiz modelde, değişen Stamp değerlerine bakarak, hangi noktadaki Tag'in değiştiği tespit edilebilir.

#### 4.2. Güvenilirlik

Geliştirilen veri yapısında, bir Tag'in güvenilirliği, onun bağlamı ile ilgilidir. Bağlamındaki güvenilir Tag sayısı ne kadar fazla ise o Tag o kadar güvenlidir denilebilir. Eğer bağlamında hiçbir Tag yoksa o Tag'e şüpheli Tag denmektedir. Aşağıdaki örnekte bir Tag'in hiçbir bağlamı olmadan oluşturulmasına örnek gösterilmiştir.

```
Tag1 = new Tag(meta, data, null)
```

Aşağıdaki örnek, birden fazla bağlamın dizi yardımı ile nasıl ifade edileceğini göstermektedir. Burada Tag'in, iki tane tanık Tag'i bulunmaktadır.

```
Tag3 = new Tag(meta, data, [Tag1, Tag2])
```

Aşağıdaki durumda Tag'in bağlamı, map yapısıyla oluşmaktadır. Bağlamın içinde dört tane Tag bulunmaktadır.



```
Tag5 = new Tag(meta, data, {Tag1: Tag2, Tag3: Tag4})
```

Aşağıdaki Tag modeli, <subject, verb, object> paternine uygun bir şekilde gösterilmiştir. Burada Tag'ler, birbirlerini zincirleme olarak desteklemektedir.

```
object = new Tag(meta, data)
verb = new Tag(meta, data, object)
subject = new Tag(meta, data, verb)
```

Subject'e, verb ve object'in direk destek verdiği durumu ifade etmek istersek aşağıdaki gibi bir yapı oluşturabiliriz:

```
subject = new Tag(meta, data, {verb, object})
```

### 4.3. Senaryo: Tutarlılık

Bu bölümde, modele yönelik temel bir senaryoya yer verilmektedir. Burada öncelikle beş adet Tag yaratılmıştır. Bu Tag'ler yaratıldığı anda, henüz Tag'lerin bağlamı bulunmamaktadır. Tag'lerin yaratımı ile ilgili sözde kodlar:

```
Tag1 = new Tag('Femicide is on the rise.')
Tag2 = new Tag('A 36-year-old man stabbed his ex-fiancee to death.')
Tag3 = new Tag('The man who fatally stabbed his ex-fiancee received a 23-year prison sentence. ');
Tag4 = new Tag('the man who stabbed her to death was released on good behavior during the first trial.')
Tag5 = new Tag('Women's rights activists demonstrated against the release in front of the court.')
```

Tag'ler yaratıldıktan sonra, neden sonuç ilişkisine göre aralarında bağlam oluşur. Eğer bir Tag'in bağlamında herhangi bir Tag yoksa, bu Tag güvenilir değildir. Örneğin aşağıdaki kodda, birinci Tag'i destekleyen ikinci, üçüncü ve dördüncü Tag'lerdir. Bu Tag'lerin hepsinin yok olması, birinci Tag'in tanık çizgesini ortadan kaldıracak, yani Tag bağlamsız kalacak ve güvenilir olmaktan çıkacaktır. Aşağıdaki kodda, Tag'lerin neden sonuç ilişkileri girildikten sonra, Tag'ler Lock fonksiyonu ile kilitlenmiştir. Bu durumda, Tag'lerin kendisinde ya da onu destekleyen Tag'lerden herhangi birinde bir hata ya da değişiklik olduğunda, model değişikliğin kaynağını bularak, o Tag'i bağlamdan çıkarır.

```
Tag1.addSupporter(Tag2)
Tag1.addSupporter(Tag3)
Tag1.addSupporter(Tag4)
Tag3.addSupporter(Tag2)
Tag4.addSupporter(Tag2)
Tag4.addSupporter(Tag3)
Tag5.addSupporter(Tag2)
Tag5.addSupporter(Tag3)
Tag5.addSupporter(Tag4)
Tag5.lock();
```

Oluşturulan modelde daha sonra, Tag2'nin hatalı olduğu ortaya çıkmış ve bunun sonucunda, hatalı olduğu tespit edilen Tag, güven ağından çıkarılmıştır. Sonrasında, Tag2 ile desteklenen Tag3 güvenilir olmaktan çıkmıştır. Tag3'ün de güven ağından çıkmasıyla, Tag4 desteksiz kalmış ve güvenilir olmaktan çıkmıştır. Bunun sonucunda Tag4 de güven ağından çıkarılmıştır. Böylece Tag1 desteksiz kalmış ve güven ağından çıkmıştır. Bu durum, Tag5'i desteksiz kılmış ve güvenilir olmaktan çıkarmıştır. Sonuçta, örnekteki tüm Tag'ler güvenilir olmaktan, yani tanık çizgesinden çıkmıştır. Bu durum tutarlılığın çalışmasına bir örnektir.

```
Zanlı eski nişanlısını öldürmedi. (Tag2)
Tag2'yi destekleyen yok, silinecek.
Tag3'ü destekleyen yok, silinecek. (Tag2)
Tag4'ü destekleyen yok, silinecek. (Tag2, Tag3)
Tag1'i destekleyen yok, silinecek. (Tag2, Tag3, Tag4)
Tag5'i destekleyen yok, silinecek. (Tag2, Tag3, Tag4)
```

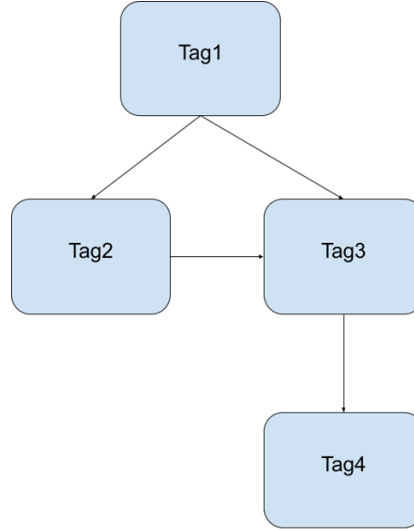
Eğer bir Tag'in bağlamı içerisinde hiçbir Tag bulunmuyorsa, o Tag'in varlığı kabullere bağlıdır. Diğer pek çok Tag, bu ilk etapta hiç desteği bulunmayan Tag'lerden türeyebilir. Bu, sistemde bir problem yaratmaz. Modelde böyle bir Tag bulunabilir.

#### 4.4. Senaryo: Bağlam

Aşağıda bir Tag'ın bağlamını açıklayabilmek için dört adet Tag oluşturulmuştur.

```
Tag1 = new Tag(meta,data,null)
Tag2 = new Tag(meta, data, Tag1)
Tag3 = new Tag(meta, data, [Tag1, Tag2])
Tag4 = new Tag(meta, data, Tag3)
```

Yukarıdaki Tag'lerin aralarında oluşturdukları bağlam Şekil 5'te ifade edilmektedir. Burada Tag1'in bağlamı yoktur fakat modelde varlığını sürdürmektedir. Bu, Tag1'i doğrulayacak herhangi bir tanık Tag'inin bulunmadığı anlamı taşımaktadır.



Şekil 5. Tag'in bağlam yapısı.

Şekil 6'da görüleceği gibi, Tag4'ün bağlamı içerisinde Tag1, Tag2, Tag3 bulunmaktadır. Bağlamı hesaplarken özet değer, ağa özgü olacağından, yukarıdaki şekilde Tag4'ün bağlamı Tag1, Tag2, Tag3'e ve aralarındaki ilişkiye özgü olacaktır. Ayrıca, bir Tag'ın birçok bağlamı olabileceğinden dolayı, bu şekilde istenilen özetler bir diziye atarak bağlamlar kümesi oluşturulması mümkündür. Daha sonra, başka bir Tag'ın bağlamı ile uyumlu olup olmadığı, bu özet değerlerine bakılarak anlaşılmaktadır.

#### 4.5. Senaryo: Seçim

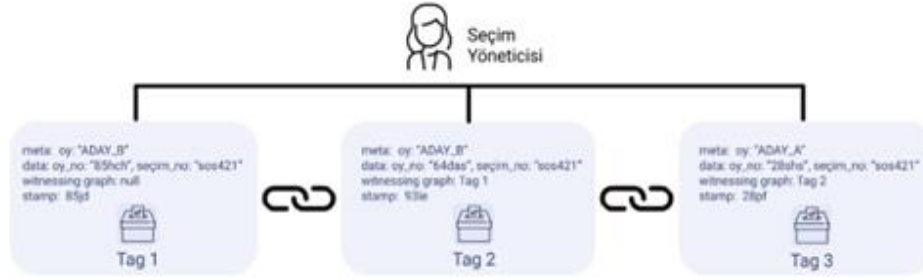
Örnek bir seçim senaryosunda, Tag yapısının nasıl uygulandığı görülebilir. Öncelikle iki aday Tag belirlenir. Oylayan Tag'ler, oylanan Tag'lere bağlanır. Oylamaya katılan her Tag, oylama sonrası sistemi kilitletler. Böylece oylamanın değiştirilemezliği ve dolayısıyla, güvenilirliği sağlanmış olmaktadır. Bu kilitlemeler sonucunda oluşan değerler, oylamanın sonucunda oluşan değerlerle karşılaştırıldığında, eğer değerler birbirine eşitse, seçim geçerli kabul edilmektedir. Eğer değerler birbirine eşit değilse, problemin hangi aşamadan kaynaklandığı, bağlam tarafından anında tespit edilebilmektedir. Aşağıda bu yapının nasıl gerçekleştirildiği gösterilmiştir.

```
Tag0 = new Tag(meta={}, data={kisi:'ADAY_A', secim_no:'sos421'}, context= null,stamp={})
Tag1 = new Tag(meta, data={kisi:'ADAY_B', secim_no:'sos421'}, context= null,stamp={})
Tag1 = new Tag(meta={}, data={oy_no:'85hch', secim_no:'sos421'}, context= Tag1 ,stamp={})
Tag2 = new Tag(meta={}, data={oy_no:'64das', secim_no:'sos421'}, context= Tag1,stamp={})
Tag3 = new Tag(meta={oy='ADAY_A'}, data={oy_no:'28shs', secim_no:'sos421'}, context=Tag0, stamp={})
```

Yukarıda iki kişi 'ADAY\_B'ye, bir kişi de 'ADAY\_A'ya oy vermiştir. Seçim numarası 'sos421' olarak belirlenmiştir. Oy numarası adayların sayısal kimliğini ifade eder, bu yapı özet fonksiyonu olduğu için, gizlilik korunmaktadır. Sistem şu anda lock() fonksiyonunu çalıştırmadığı için, korumada değildir ve özet değeri yoktur. Eğer lock() fonksiyonu çalıştırılırsa, oylama değiştirilemez hale gelecektir.

Şekil 6'da, Tag yapısının bir seçim senaryosuna nasıl uygulandığı görülebilir. Burada önemli nokta, Tag'lerin çok farklı yapıda tasarlanabilmesidir. Örneğin Şekil 6'da, belli bir zincir oluşturularak Tag yapısı, oyların problemsiz şekilde sayılmasını mümkün kılmaktadır.





Şekil 6. Seçimlerin Tag yapısıyla gerçekleştirilmesi.

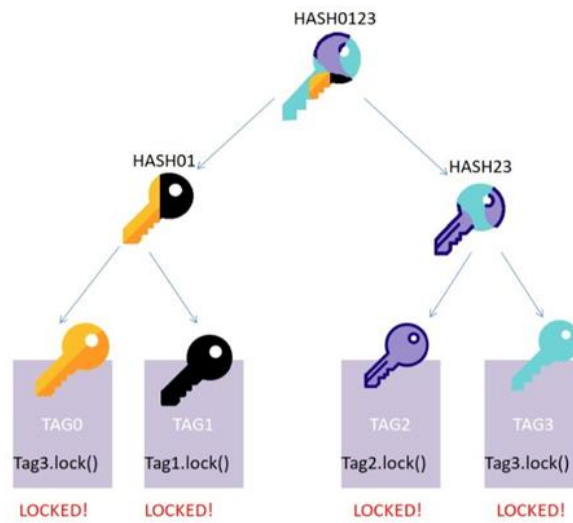
Her oylama gerçekleştirildikten sonra ya da belli farklı periyotlarda, Lock fonksiyonu çalıştırılmakta ve fonksiyonun döndürdüğü stamp değeri ilgili paydaşlarla paylaşılmaktadır. Seçim sonlandıktan sonra sistem, son özet değerinden geri dönerek diğer tüm özet değerlerini vermektedir. Bu değerler, muhataplar tarafından kontrol edildiğinde, eğer sistemin verdiği özet değerleri ile muhatapların daha önceden elde ettiği değerler birbirine eşit ise seçim geçerli kabul edilmektedir. Değil ise problemin hangi aşamadan kaynaklandığı, tag yapısı tarafından anında tespit edilebilmektedir. Blokzinciri pek çok teknoloji barındırdığı için böyle bir yapıyı, düşük veri miktarına rağmen efektif şekilde gerçekleştiremeyebilir. Çünkü muhatap sayısının sonsuza göre belirlenmesi ve aynı zamanda pek çok teknolojiyle birleşik gelmesi dolayısıyla güncel blokzinciri, çok basit eylemlerde çok ciddi tasarım süreçlerine ihtiyaç duyabilmektedir. Önerilen Tag yapısı, aynı işlemi önemli derecede daha az karmaşıklık ile gerçekleştirebilmektedir.

#### 4.6. Senaryo: Merkle Tree

Blokzincirinde Merkle Tree çok kullanılan bir veri yapısıdır. Aşağıda bu yapının Tag veri yapısında gerçekleştirilmesi gösterilmiştir.

```
const tag0 = newTag('meta', 'data', null)
const tag1 = newTag('meta', 'data', tag0)
const hash01 = hash(tag0.lock(), tag1.lock())
const tag2 = newTag('meta', 'data', tag0)
const tag3 = newTag('meta', 'data', tag3)
const hash23 = hash(tag2.lock(), tag3.lock())
const root = hash(hash01, hash23)
```

Yukarıdaki kodun gösterimi, Şekil 7’de ifade edilmiştir. Görselde kullanılan yapı, Tag yapısıdır. Burada, tanık çizgesinin yapısı gösterilmektedir. Bu durum, yukarıdaki kodun veri yapısından farklıdır.

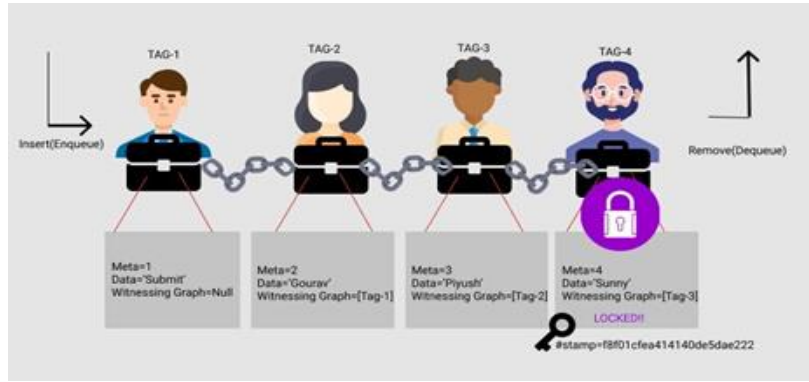


Şekil 7. Tag yapısıyla MerkleTree gösterimi.

#### 4.7. Senaryo: Priority Queue

Aşağıda, bir Öncelikli Kuyruk (Priority Queue) veri yapısı örneği gösterilmektedir. Bu örneğin gösterilmesindeki amaç, rahatlıkla farklı veri yapılarının bu Tag sistemi içerisinde var edilebilmesidir. Burada önceliklendirmeler değişken olduğu için Meta'nın içerisinde yer almaktadır.

```
priorityQueue = newPriorityQueue()
tag1 = newTag(2,"Sumit", null)
tag2 = newTag(1,"Gourav", [tag1])
priorityQueue.enqueue(tag1)
priorityQueue.enqueue(tag2)
priorityQueue.dequeue()
tag3 = newTag(2,"Sunil", [block5])
priorityQueue.enqueue (tag3)
block3.isLock()
```

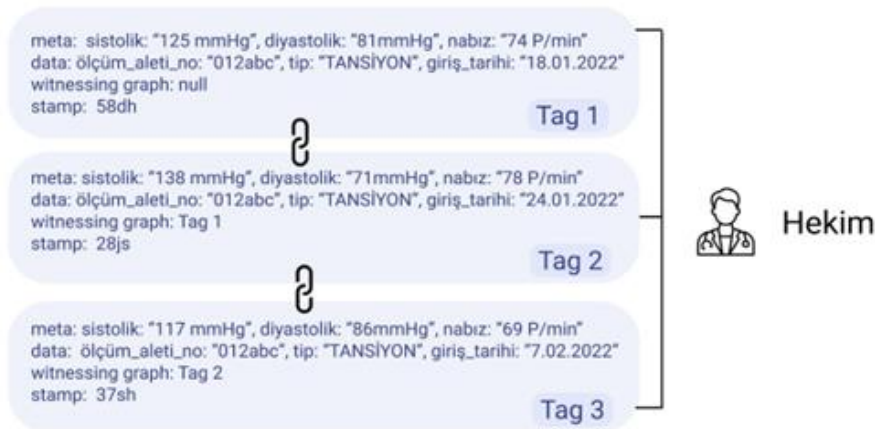


Şekil 8. Priority Queue ile Tag yapısı.

Priority Queue ile ilgili açıklama, Şekil 8'de görselleştirilmiştir. Burada dikkat çeken nokta, kullanım kolaylığı açısından işlemlerin normal veri yapılarına benzerlik göstermesidir. Fakat önerilen veri yapısı, istendiği anda sistemi kilitleyebilecek, istendiği anda sistemi eski haline döndürebilecek özelliklere sahiptir. Diğer bir nokta, önerilen veri yapısının kanıtlanabilirlik özelliği taşımasıdır.

#### 4.8. Senaryo: Kan basıncı

Şekil 9'da kan basıncı, IoT teknolojileri ile ölçüldükten sonra bu bilginin blokzincirine atılması gösterilmektedir. Bu senaryo, Şekil 6'daki seçim senaryosundan farklı olsa da bu yapı da aynı mantık ile karmaşıklığı düşük bir şekilde kolaylıkla çözümlenebilir.



Şekil 9. Kan basıncı ölçümlerinin Tag yapısı ile gösterimi.

Yukarıda değinilen tüm örneklerden yola çıkarak, önerilen veri yapısının güncel blokzinciri teknolojisi ile karşılaştırıldığında hantal olmayan, karmaşıklığı az, algılanması ve uygulanması yazılım mühendisliği açısından elverişli, güvenilir, basit ve esnek olduğunu söylemek mümkündür.

## 5. SONUÇ

Güncel blokzinciri teknolojileri, her geçen gün genişleyen bir kullanım olanağı sunsa da, temelde bazı problemler barındırmaktadır. İşlemler ve bilgiler bir arada blokzincirlerde saklandığından, güncel blokzinciri yaklaşımı, veri odaklı yaklaşıma uygun değildir. İkinci sorun, uygulamaya özel başka bir çözüme ihtiyaç duyulan blokzincirinin veri bütünlüğü ile ilgilidir. Ayrıca veri modeli, veri yapısına ihtiyaç duymakla beraber o veri yapısının sahip olduğu özelliğe bağımlı biçimde davranmamalıdır.

Çalışmada, yukarıdaki problemleri çözümleyebilmek amacıyla, yeni bir veri yapı türü önerilmiştir. Önerilen veri yapı türü, blokzincir teknolojisinin bize göre en önemli özelliklerinden biri olan “eklenebilir ama değiştirilemezlik ve kanıtlanabilirlik” özelliklerine bazı eklentiler ve değişiklikler getirilerek geliştirilmiştir. Geliştirilen veri yapısı Tag’lerden oluşmaktadır. Tag yapısının yaratımında Meta, Data ve Tanık Çizgesi referansları alınır. Meta’da, güncellenebilenler; Data’da güncellenemeyenler, Tanık Çizgesi’nde ise Tag’ler bulunmaktadır. Önerilen veri yapısında, Tag’lere esneklik kazandırıldığı için istenilen veri yapısının içerisinde var olabilmeleri mümkün hale gelmektedir. Çalışmada önerilen veri yapısı, Tag’lerin göstergelerini kendi içinde tutar. Bu da onlara kolaylıkla erişimi mümkün kılmaktadır.

Önerilen model ile diğer pek çok yazılım çözümü için yeni bir veri yapısı oluşturmak hedeflenmiştir. Buradan hareketle önerilen veri yapısı, yaygın olarak kullanılan bir programlama dili olan Javascript kullanılarak modellenmiştir. Oluşturulan model, geleneksel blokzinciri modeli ile karşılaştırılmış ve yazılım mühendisliği açısından eksiklikleri giderilmiştir. Daha sonra bu model, bilgisayar bilimi için önemli olan veri yapılarına uyarlanmıştır. Bunun dışında veri yapısı olarak nasıl kullanılacağı, örnek senaryolarla sınanmıştır.

Sonucunda, günümüzde yazılım mimarisi açısından eksikliği hissedilen, güncellenebilirlik ve güncellenemezlik özelliklerine esneklik katacak, istenildiği ölçüde Tag eklenmesine olanak sunan ve sağlık, hukuk, eğitim, güvenlik gibi pek çok alanda rahatlıkla kullanılacak özgün bir veri yapısı geliştirilmiştir. Geliştirilen veri yapısı, blokzincirlerinin yeni tasarımlarında kullanılacağı gibi, yazılım alanında izlenebilir ve gözlemlenebilir özelliklere sahip bir veri yapısı şablonu sunmaktadır. Son olarak, geliştirilen veri yapısının, esnek kullanım olanaklarının yanı sıra bundan sonraki çalışmalar için perspektif ve kaynak oluşturması beklenmektedir.

## Yazar Katkıları

Yazarlar makale çalışmasına eşit katkı vermiştir.

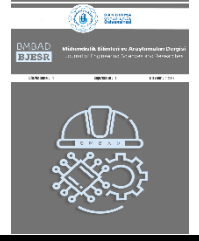
## Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

## KAYNAKÇA



- [1] N. El Madhoun, J. Hatin, and E. Bertin “Going beyond the blockchain hype: In which cases are blockchains useful for its applications”, 3rd Cyber Security in Networking Conference (CSNet), IEEE, pp. 21-27, 2019.
- [2] M. Belotti, N. Božić, G. Pujolle, and S. Secci “A vademecum on blockchain technologies: When, which, and how”, IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 21 no. 4, pp. 3796-3838, 2019.
- [3] P. P. Ray, D. Dash, K. Salah, and N. Kumar “Blockchain for IoT-based healthcare: background, consensus, platforms, and use cases”, IEEE Systems Journal, vol. 15, no. 1, pp. 85-94, 2020.
- [4] O. Ali, A. Jaradat, A. Kulakli, and A. Abuhalmeh “A comparative study: Blockchain technology utilization benefits, challenges and functionalities”, IEEE Access, vol. 9, pp. 12730-12749, 2021.
- [5] Y. Liu, X. Ma, L. Shu, G.P. Hancke, and A.M. Abu-Mahfouz “From Industry 4.0 to Agriculture 4.0: Current status, enabling technologies, and research challenges”, IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 17, no. 6, pp. 4322-4334, 2020.
- [6] P. Bhattacharya, S. Tanwar, U. Bodkhe, S. Tyagi, and N. Kumar, “Bindaas: Blockchain-based deep-learning as-a-service in healthcare 4.0 applications”, IEEE transactions on network science and engineering, vol. 8, no. 2, pp. 1242-1255, 2019.
- [7] M.B. Mollah, J. Zhao, D. Niyato, Y.L. Guan, C. Yuen, S. Sun, ... and L.H. Koh “Blockchain for the internet of vehicles towards intelligent transportation systems: A survey”, IEEE Internet of Things Journal, vol. 8, no. 6, pp. 4157-4185, 2020.
- [8] J. Bao, D. He, M. Luo, and K. K. R. Choo “A survey of blockchain applications in the energy sector”, IEEE Systems Journal, vol. 15, no. 3, pp. 3370-3381, 2020.
- [9] M. Di Pierro “What is the blockchain?”, Computing in Science and Engineering, vol. 19, no. 5, pp. 92-95, 2017.
- [10] T. Ahram, A. Sargolzaei, S. Sargolzaei, J. Daniels, and B. Amaba “Blockchain technology innovations”, IEEE Technology and Engineering Management Conference (TEMSCON), IEEE, pp. 137-141, 2017.
- [11] V. Gatteschi, F. Lamberti, C. Demartini, C. Pranteda, and V. Santamaria “To blockchain or not to blockchain: That is the question”, IT Professional, vol. 20, no. 2, pp. 62-74, 2018.
- [12] R.C. Merkle “Secrecy, authentication, and public key systems”. Stanford University, 1979.
- [13] N. Christofides “Graph theory: An algorithmic approach (Computer science and applied mathematics)”, Academic Press, Inc, 1975.

- [14] J. Golosova, and A. Romanovs “The advantages and disadvantages of the blockchain technology”. IEEE 6th workshop on advances in information, electronic and electrical engineering (AIEEE), IEEE, pp. 1-6, 2018.
- [15] A. Chauhan, O.P. Malviya, M. Verma, and T.S. Mor “Blockchain and scalability”, IEEE International Conference on Software Quality, Reliability and Security Companion (QRS-C), IEEE, pp. 122-128, 2018.
- [16] Q. Zhou, H. Huang, Z. Zheng, and J. Bian “Solutions to scalability of blockchain: A survey”, IEEE Access, vol. 8, pp. 16440-16455, 2020.
- [17] J. Wielemaker, Z. Huang, and L. Van Der Meij “SWI-Prolog and the web”, Theory and practice of logic programming, vol. 8, no. 3, pp. 363-392, 2008.
- [18] R. Mizoguchi, and K. Kozaki “Ontology engineering environments”, Handbook on Ontologies, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 315-336, 2009.
- [19] I. Konstantinidis, G. Siaminos, C. Timplalexis, P. Zervas, V. Peristeras, and S. Decker “Blockchain for business applications: A systematic literature review”, International Conference on Business Information Systems, Springer, Cham., pp. 384-399, 2018
- [20] C.G. Akcora, Y. R. Gel, and M. Kantarcioglu “Blockchain networks: Data structures of Bitcoin, Monero, Zcash, Ethereum, Ripple, and Iota”, Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery, vol. 12, no. 1, e1436, 2022.
- [21] H. Pervez, M. Muneeb, M.U. Irfan, and I. U. Haq “A comparative analysis of DAG-based blockchain architectures”, 12th International conference on open source systems and technologies (ICOSST), IEEE, pp. 27-34, 2018.
- [22] D. Przytarski “Using Triples as the Data Model for Blockchain Systems”, BlockSW/CKG@ ISWC, 2019.
- [23] D. Przytarski, C. Stach, C. Gritti, and B. Mitschang “Query Processing in Blockchain Systems: Current State and Future Challenges”, Future Internet, vol. 14, no. 1, 2021.
- [24] J. Eberhardt, and S. Tai “On or Off the Blockchain”, Insights on off-chaining computation and data, European Conference on Service-Oriented and Cloud Computing, Springer, Cham, pp. 3-15, 2017.
- [25] V. Buterin “A next-generation smart contract and decentralized application platform”, White Paper, vol. 3, no. 37, pp. 2-1, 2014.
- [26] D. Schwartz, N. Youngs, and A. Britto “The ripple protocol consensus algorithm”, Ripple Labs Inc White Paper, vol. 5, no. 8, p. 151, 2014.
- [27] L.M. Goodman “Tezos—a self-amending crypto-ledger”, White paper. URL: [https://www.tezos.com/static/papers/white\\_paper](https://www.tezos.com/static/papers/white_paper). 2014.
- [28] D. Voell, F.L.N., Gaski, R. Jagadeesan, R. Khasanshyn, H. Montgomery, S. Teis, ... and M. Bowman “Hyperledger whitepaper”, Published:<https://wiki.hyperledger.org/groups/whitepaper/whitepaper-wg>, 2016.
- [29] D. Mazieres “The stellar consensus protocol: A federated model for internet-level consensus”, Stellar Development Foundation, vol. 32, pp. 1-45, 2015.
- [30] L. Baird, M. Harmon, and P. Madsen “Hedera: A governing council and public hashgraph network”, The trust layer of the internet, whitepaper, vol. 1, pp. 1-97, 2018.
- [31] S. Popov “The tangle”, White paper, vol. 1, no. 3, 2018.



## Endüstriyel Kontrol Sistemlerinde Yenilikçi Anomali Tespit Sistemlerinin İncelenmesi

### Investigation of Innovative Anomaly Detection Systems in Industrial Control Systems

<sup>1,2</sup>Kerem ÇINAR , <sup>2</sup>Murat İSKEFİYELİ 

<sup>1</sup>*İstanbul Gedik Üniversitesi, Bilgisayar Programcılığı Programı, 34722, İstanbul, Türkiye*

<sup>2</sup>*Sakarya Üniversitesi, Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi, 54050, Sakarya, Türkiye*

<sup>1</sup>kerem.cinar@gedik.edu.tr, <sup>2</sup>miskef@sakarya.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received: 5 January 2023

Accepted: 12 April 2023

##### Keywords:

Deep Learning, GAN, Industrial Control Systems, Machine Learning

#### ABSTRACT

Industrial Control Systems (ICS) or SCADA networks are becoming targets of cyber-attacks as their architectures move from proprietary hardware, software, and protocols to standard and open sources. Large-scale sensor data makes anomalies and cyber-attack events continuously monitored. Current unsupervised machine learning approaches have not fully exploited the spatiotemporal correlation and other dependencies between sensors in the system to detect anomalies. This article reviews the approaches used to detect anomalies in SCADA networks of various architectures such as Convolutional Neural Networks (CNN), Recurrent Neural Networks (RNN), Stacked Autoencoder (SAE), and Long Short-Term Memory. In addition to reviews of these methods in the article, an unsupervised multivariate anomaly detection method based on Generative Contradictory Networks (GANs) using Long-Short-Term-Memory Recurrent Neural Networks (LSTM-RNN) as basic models (i.e. generator and discriminator) is presented.

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

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 5 Ocak 2023

Kabul : 12 Nisan 2023

##### Anahtar Kelimeler:

Derin Öğrenme, GAN, Endüstriyel Kontrol Sistemleri, Makine Öğrenimi

#### ÖZET

Endüstriyel Kontrol Sistemleri (ICS) veya SCADA ağları, mimarileri tescilli donanım, yazılım ve protokollerden standart ve açık kaynaklara geçtikçe siber saldırıların hedefi haline gelmektedir. Büyük ölçekli sensör verileri, olağan dışı durumları ve siber saldırı olaylarını sürekli olarak izlenebilir kılmaktadır. Mevcut denetimsiz makine öğrenimi yaklaşımları, anomalileri tespit etmek için sistemdeki sensörler arasındaki uzamsal-zamansal korelasyonu ve diğer bağımlılıkları tam olarak kullanmamıştır. Bu makale, Konvolüsyonel Sinir Ağı (CNN), Tekrarlayan Sinir Ağı (RNN), Stacked Autoencoder (SAE), Uzun Kısa Süreli Bellek gibi çeşitli mimarilerin SCADA ağlarındaki anomalilerin tespit edilmesinde kullanılan yaklaşımların incelenmesidir. Ayrıca makalede bu yöntemlerin incelenmesine ek olarak Uzun-Kısa Süreli-Bellek Tekrarlayan Sinir Ağlarını (LSTM-RNN) temel modeller (yani, üretici ve ayırıcı) olarak kullanan, Üretken Çelişkili Ağlara (GAN'lar) dayalı denetimsiz çok değişkenli bir anomali tespit yöntemini detaylı olarak sunmaktadır.

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

ORCID: <sup>1</sup>0000-0002-6098-5521

<sup>2</sup>0000-0002-8210-5070



## 1. GİRİŞ

Endüstriyel kontrol sistemleri (ICS) yaygın olarak ilaç endüstrisi, imalat, elektrik, su arıtma tesisleri ve petrol rafinerileri gibi kritik altyapılar dahil olmak üzere çeşitli sektörlerin çalışması için hayati önem taşımaktadır.

Bu sistemler fiziksel olarak güvenli konumlarda özel donanım ve yazılımlar üzerinde çalışıyordu, ancak daha yakın zamanlarda ortak bilgi (BT) teknolojilerini ve uzaktan bağlantıyı kullanıma sundular. Bu değişiklikler, siber güvenlik açıklarını ve anomali olasılığını artırmaktadır [1]. ICS'lere yönelik siber saldırıları tespit etme yeteneği kritik bir görev haline geldi. Bu sorunu çözmek için kullanılan yaklaşımlardan biri, kötü amaçlı etkinliği belirlemek için geleneksel BT ağ tabanlı saldırı tespit Sistemlerini (IDS'ler) kullanmayı içerir. Bu çalışmada, sistemin anomali davranışını fiziksel düzeyde tespit etmeye çalıştığımız bir anomali tespit yaklaşımına odaklanıyoruz. Bu yaklaşım, saldırganın nihai amacının sistemin fiziksel davranışını etkilemek olduğu varsayımına dayanır ve sistemi ağ düzeyindeki savunma hattının ötesinde korumayı amaçlar. Fiziksel seviye tabanlı anomali tespiti, büyük bir ekonomik değere sahip olabilecek hatalı ekipmanın erken tespitini ve düzeltilmesini de kolaylaştırabilir.

Anomali tespit yöntemleri, sistemin kurallarına veya modellerine dayalı olabilir [2]. ICS'lere yönelik siber saldırıları tespit etme yeteneği kritik bir görev haline geldi. Bu sorunu çözmek için kullanılan yaklaşımlardan biri, kötü amaçlı etkinliği belirlemek için geleneksel BT ağ tabanlı saldırı tespit Sistemlerini (IDS'ler) kullanmayı içerir. Bu çalışmada, sistemin anomali davranışını fiziksel düzeyde tespit etmeye çalıştığımız bir anomali tespit yaklaşımına odaklanıyoruz.

Bu yaklaşım, saldırganın nihai amacının sistemin fiziksel davranışını etkilemek olduğu varsayımına dayanır ve sistemi ağ düzeyindeki savunma hattının ötesinde korumayı amaçlar. Fiziksel seviye tabanlı anomali tespiti, büyük bir ekonomik değere sahip olabilecek hatalı ekipmanın erken tespitini ve düzeltilmesini de kolaylaştırabilir.

Anomali tespit yöntemleri, sistemin kurallarına veya modellerine dayalı olabilir [3]. Ne yazık ki, karmaşık fiziksel süreçlerin kesin bir modelini oluşturmak çok zor bir iştir. Zaman alıcı ve büyük ve karmaşık sistemlere ölçeklenemeyen sistemin ve uygulamasının derinlemesine anlaşılmasını gerektirir. Son zamanlarda ilgi odağı haline gelen başka bir yaklaşım, ICS'leri modellemek ve anomali davranışları tespit etmek için makine öğrenimini kullanır. Yakın zamanda, ICS'lerde anomali tespiti için denetimli makine öğrenimini kullanan bir dizi çalışma yayınlandı [4]. Bu yaklaşım, normal ve saldırı senaryoları için etiketlenmiş eğitim verileri gerektirir, ancak siber saldırılar için etiketlenmiş verilerin elde edilmesi zor olabilir ve bu veriler doğal olarak bilinmeyen saldırı sınıflarını içermeyecektir. Son zamanlarda, denetimsiz makine öğreniminin, güvenli siber-fiziksel sistemlerin tasarımıyla ilgili araştırmaları desteklemek için oluşturulmuş özel bir su tesisi test ortamından (WADI) elde edilen verileri kullanarak siber saldırıları tespit etmede etkili olduğu gösterildi.

Bir anomali genellikle, sistem davranışının önceki normal durumdan önemli ölçüde farklı olduğu belirli zaman adımlarındaki noktalar olarak tanımlanır [5]. Anomali tespitinin temel görevi, bir anomalinin meydana gelmiş olabileceği zaman adımlarını belirlemektir. Geleneksel olarak, Cusum, Ewma ve Shewhart çizelgeleri gibi İstatistiksel Proses Kontrolü (SPC) yöntemleri, aralık dışı olan çalışma durumlarını bulmak için endüstriyel proseslerin kalitesini izlemek için popüler çözümlerdi [6]. Bu geleneksel algılama teknikleri, modern CPS'lerin giderek artan dinamik ve karmaşık doğası tarafından üretilen çok değişkenli veri akışlarıyla başa çıkamamaktadır. Bu nedenle, araştırmacılar spesifikasyon veya imza tabanlı tekniklerin ötesine geçtiler ve sistemler tarafından üretilen büyük miktarda veriden yararlanmak için makine öğrenimi tekniklerinden yararlanmaya başladılar [7]. Etiketli verilerin doğası gereği eksikliği nedeniyle, anomali algılama genellikle denetimsiz bir makine öğrenimi görevi olarak değerlendirilir. Bununla birlikte, mevcut denetimsiz yöntemlerin çoğu, çok değişkenli zaman serilerinin içsel korelasyonlarında doğrusal olmayan idare edemeyen doğrusal izdüşüm ve dönüşüm yoluyla oluşturulur. Ayrıca, mevcut tekniklerin çoğu, sistemlerin son derece dinamik doğası göz önüne alındığında yetersiz olabilen anomalileri tespit etmek için mevcut durumlar ve öngörülen normal aralıklar arasında basit karşılaştırmalar kullanır.

Son yıllarda Derin Öğrenme [8] yaklaşımları, doğal dil işleme (NLP), görüntü-video sınıflandırma gibi çalışmalarda oldukça popüler hale gelmiştir. Ağlarda anomali tespiti için çeşitli derin öğrenme yaklaşımları kullanılmıştır [9,10,11]. Derin öğrenmenin en önemli özelliklerinden biri, derin öğrenme modellerinde hiyerarşik özellikleri otonom olarak öğrenmek için denetimsiz yöntemlerin kullanılmasıdır [12,13,14,15,16]. Aslında, verilerin en göze çarpan özellikleri, derin mimarilerin otomatik öğrenme yeteneği kullanılarak denetimsiz bir şekilde öğrenmesi ve bu öğrenilen özelliklerin, anomali verileri normal olanlardan ayırt etmek için bir sınıflandırıcıda kullanılmasıdır. Bu makalede, derin özellik öğrenme yaklaşımını kullanan SCADA ağları ve Generative Adversarial Networks (GAN) dayalı denetimsiz çok değişkenli anomali tespit sistemleri incelenmiştir.

## 2. YÖNTEM

Denetimli algoritmaları eğitmek için etiketlenmiş anomali verilerinin doğal eksikliği göz önüne alındığında, anomali algılama yöntemleri çoğunlukla denetimsiz yöntemlere dayanmaktadır. Denetimsiz algılama yöntemlerini dört kategoriye ayırabiliriz: (i) doğrusal model tabanlı yöntem, (ii) mesafe tabanlı yöntemler, (iii) olasılık ve yoğunluk tahmini tabanlı yöntemler ve (vi) son zamanlarda oldukça popüler olan derin öğrenme tabanlı yöntemler.



Doğrusal model tabanlı denetimsiz anomali tespit yöntemleri için popüler bir yaklaşım Temel Bileşen Analizi (PCA) [14]. PCA, temel olarak, süreç ölçümlerinden çıkarılan önemli değişkenlik bilgilerini koruyan ve büyük miktarda ilişkili veri için boyutu azaltan çok değişkenli bir veri analizi yöntemidir [15]. PLS, model oluşturma ve anomali tespiti için yaygın olarak kullanılan başka birçok değişkenli veri analizi yöntemidir [16] Ancak, bunlar yalnızca yüksek korelasyonlu veriler için etkilidir ve verilerin çok değişkenli Gauss dağılımını takip etmesini gerektirir [17].

Uzaklığa dayalı yöntemler için popüler bir yaklaşım, en yakın k komşusuna olan ortalama mesafeyi hesaplayan ve bu uzaklığa dayalı anomali puanları elde eden K En Yakın Komşu (KNN) algoritmasıdır. Clustering - Based Local Outlier Factor (CBLOF) yöntemi, uzaklığa dayalı yöntemlere başka bir örnektir. Yerel Aykırı Değer Faktörü (LOF) yönteminin geliştirilmiş bir versiyonu olan kümelemeye dayalı anomalileri belirlemek için önceden tanımlanmış bir anomali puanı işlevi kullanır [18]. Bazı durumlarda etkili olmakla birlikte, bu mesafeye dayalı yöntemler, anomali süreleri ve anomalilerin sayısı hakkında önceden bilgi sahibi olduğunda daha iyi performans gösterir.

Olasılıksal model tabanlı ve yoğunluk tahmini tabanlı yöntemler, veri dağılımlarına daha fazla dikkat edilerek mesafe tabanlı yöntemlerin iyileştirilmesi olarak önerilmiştir. Örneğin, Açık Tabanlı Aykırı Değer Algılama (ABOD) yöntemi [19] ve Özellik Paketleme (FB) yöntemi [20] değişken korelasyonları dikkate alarak verilerle ilgilenir. Ancak, bu yöntemler zaman adımları boyunca zamansal korelasyonu dikkate alamamaktadır ve bu nedenle çok değişkenli zaman serisi verileri için iyi çalışmamaktadır.

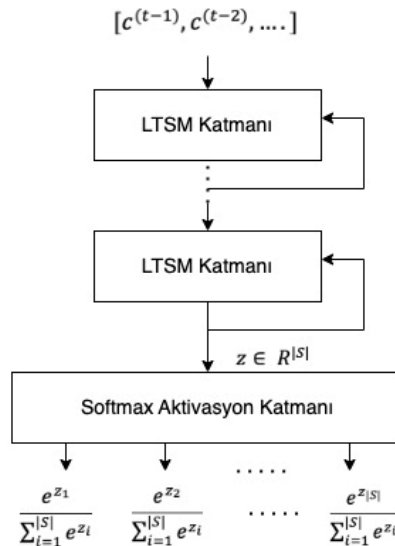
Derin öğrenme tabanlı denetimsiz anomali tespit yöntemleri, gelecek vaat eden performanslarıyla son zamanlarda çok popülerlik kazanmıştır. Örneğin, Otomatik Kodlayıcı (AE) [21], yeniden yapılandırma hatalarını inceleyerek anomali tespiti için popüler bir derin öğrenme modelidir. Derin Otomatik Kodlama Gauss Karışım Modeli (DAGMM) [22] ve LSTM Encoder-Decoder [23] gibi diğerleri de çok değişkenli anomali tespiti için iyi performans bildirmiştir. Bu çalışmada, derin öğrenme tabanlı denetimsiz anomali tespit yöntemlerinin umut verici başarısını takip ediyoruz ve Generative Adversarial Networks (GAN) temelinde oluşturulmuş yeni bir derin öğrenme tabanlı denetimsiz anomali tespit stratejilerini inceliyoruz.

Gerçekleştirilen bu çalışmada çok değişkenli zaman serileri için anomalileri tespit eden GAN tabanlı bir denetimsiz anomali tespit yöntemi olan MAD-GAN incelenmiştir. MAD-GAN mimarisi, GAN tarafından yakalanması için öğrenilen temel modeller olarak Uzun Kısa Vadeli-Tekrarlayan Sinir Ağlarını (LSTM-RNN) benimseyerek çok değişkenli zaman serisi verilerini analiz etmek için görüntü ile ilgili uygulamalar için önceden geliştirilmiş GAN çerçevesini uyarlar. Zamansal bağımlılık, her test numunesi için ayırım sonuçlarını ve yeniden yapılandırma kalıntılarını birleştiren yeni bir anomali skoru kullanarak anomalileri tespit etmek için hem GAN 'ın ayırıcısını hem de oluşturucusu kullanmaktadır. İncelenen çalışmada, MAD-GAN 'ın, iki CPS veri kümesi için siber saldırıların neden olduğu anomalileri tespit etmede mevcut yöntemlerden daha iyi performans ortaya koyduğu gösterilmiştir.

### 3. SCADA ANOMALİ TESPİT SİSTEMLERİNDE DENETİMSİZ ÖZELLİK ÖĞRENİMİNİN İNCELENMESİ

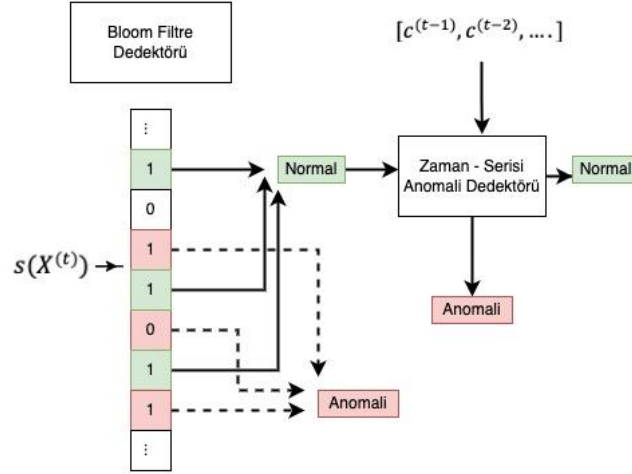
#### 3.1. LSTM/Bloom Filtresi Anomalilik Dedektörü

Bir gaz boru hattı SCADA sistemine veri/komut enjeksiyonu, keşif veya Hizmet Reddi (DoS) saldırılarından kaynaklanan anomalileri tespit etmek için [8], iki detektörden oluşan bir anomali tespit yaklaşımı önermektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Yığılmış LSTM tabanlı softmax modeli.

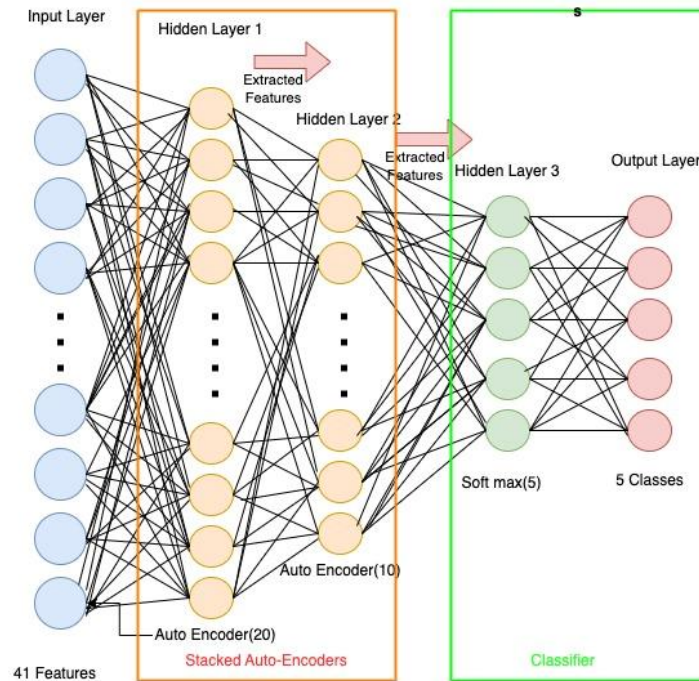
İlki, veri-tabanındaki bir paket imzasını kontrol eden paket düzeyinde bir anomali dedektörüdür. Veri tabanı, bir SCADA sisteminde kararlı oldukları için ağ modellerini ve iletişim modeli imzasını saklar. Bloom filtresi, analiz edilen paketin imzasını içermiyorsa paket anomali kabul edilir. Bir sonraki dedektör, bir sonraki adımın davranışını tahmin etmek için zaman adımlarının sayısı için bilgi ezberleme gücünü kullanan başka bir algılama seviyesi için Bloom filtresini geçen normal paketi alır. Bazı SCADA bileşenlerinin sınırlı bellek ve bilgi işlem kaynakları nedeniyle, Bloom filtresi olarak hızlı ve hafif ağırlıklı bir anomali dedektörü kullanmak büyük önem taşımaktadır. Zaman serilerinin girdisini alan LSTM Anomali Dedektörü (Şekil 2), çok sınıflı sınıflandırmaya uygun bir softmax fonksiyonunu en aza indirmek için eğitilerek bir sonraki veri noktasını tahmin etmek için önemli özelliklerini öğrenir [7,21]. Bir gaz boru hattı SCADA veri seti [22] üzerinde birleşik anomali tespit çerçevesinin değerlendirilmesi, diğer yaklaşımlara kıyasla daha yüksek olan %92'lik bir doğruluk oranı verir. Ancak, 35 dakikalık LSTM modelini 50 dönem boyunca eğitmek için gereken süre oldukça yüksektir.



Şekil 2. Paket ve zaman serisi düzeyinde anomali tespiti için birleşik çerçeve.

### 3.2. Yığılmış Otomatik Kodlayıcı (Stacked Auto-Encoder) Tabanlı Anomali Tespiti

Ağ bant genişliği ve veri artışı nedeniyle [23], DoS, Probe, R2L ve U2R saldırılarının tespitine izin verecek gerekli özelliği öğrenmek için derin bir paket incelemesi önermektedir. Yazarlar, mimarinin, sınıflandırma için bir softmax katmanının eklendiği, özellik öğrenme için yığılmış bir otomatik kodlayıcı olduğu bir Derin Sinir Ağları (DNN) yaklaşımı kullanmışlardır (Şekil 3). Şekil 3 'te yer alan DNN mimarisinden görüleceği üzere, sistem Giriş Katmanı (İnput Layer), Gizli Katmanlar (Hidden Layer 1, Hidden Layer 2, Hidden Layer 3, Auto Encoder) ve Çıkış Katmanı (Output Layer) bölümlerinden oluşmaktadır.



Şekil 3. DNN mimarisi.

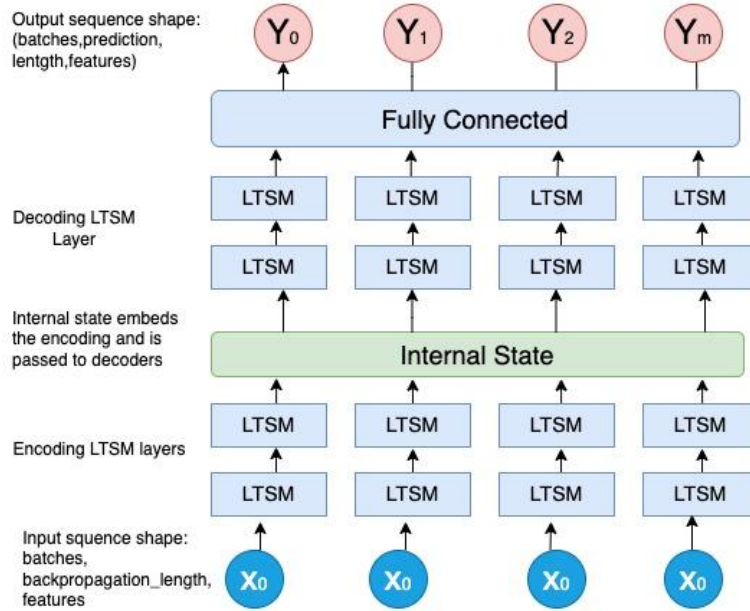
İstiflenmiş otomatik kodlayıcı, biri 20 düğümlü ve ikincisi 10 düğümlü olmak üzere iki gizli katmana sahiptir. Öğrenilen özelliklerin boyutu, NSL-KDD veri setinin 41 orijinal özelliğine kıyasla 10'dur. Genel süreç dört adımı kapsar, yani yığın otomatik kodlayıcı ile bir özellik öğrenme adımı, denetimli bir softmax eğitimi ile ilk ince ayar adımı. Bu ilk ince ayar adımının girdisi, verilerin sıkıştırılmış temsidir. Bir sonraki adım, ilk ince ayar adımından sonra tüm ağ katmanlarına uygulanan bir geri yayılım eğitimi ile ikinci bir ince ayardır. İkinci ince ayar adımı, kayıp fonksiyonunu en aza indirmek için ağ ağırlıklarını ayarlayarak saldırı tespit görevi için daha alakalı hale getirmek için ara katmanların özelliklerini iyileştirmeyi amaçlar.

Son olarak, sürecin son adımı, modelin verimliliğini değerlendirmek için ince ayarlı ağa bir test veri setinin sunulduğu bir sınıflandırma ve test adımıdır. Önerilen yaklaşımı k-means, DBN, SOM, AdaBoost gibi standart tekniklere karşı değerlendirmek için hatırlama, doğruluk, kesinlik ve f-mesure metrikleri kullanılır.

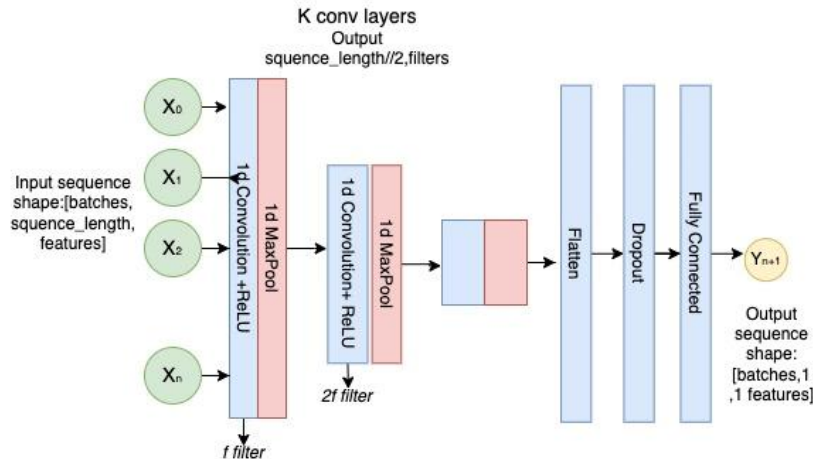
Deneysel sonuçlar, DoS ve Probe saldırıları için iyi algılama doğruluğuna (sırasıyla %97,6 ve %86,34) rağmen, R2L(Remote to user) ve U2R(User to Root) saldırılarının zayıf sonuçlar verdiğini (sırasıyla %12,98 ve %39,62) göstermektedir. Son iki saldırı kategorisinin düşük performansı, R2L ve U2R ile ilgili yeterli miktarda veri bulunmamasından kaynaklanmaktadır (sırasıyla %0,04 ve %0,79). Prob saldırılarında olduğu gibi R2L ve U2R saldırı kategorileri için %9 ila %10 eğitim verisi örnekleri daha iyi tespit sonuçları verebilirdi.

### 3.3. SCADA Üzerinde CNN/LSTM Anomali Tespiti

Güvenli Su Arıtma test yatağı (SWaT) veri seti, 36'ya kadar farklı siber saldırı içerir. Bu tür bir sistemde izinsiz giriş tespiti için denimsiz özellik öğrenmenin kullanımını değerlendirmek için [28], özellik öğrenici olarak LSTM (Şekil 4) veya 1D CNN kullanan iki model önermektedir (Şekil 5).

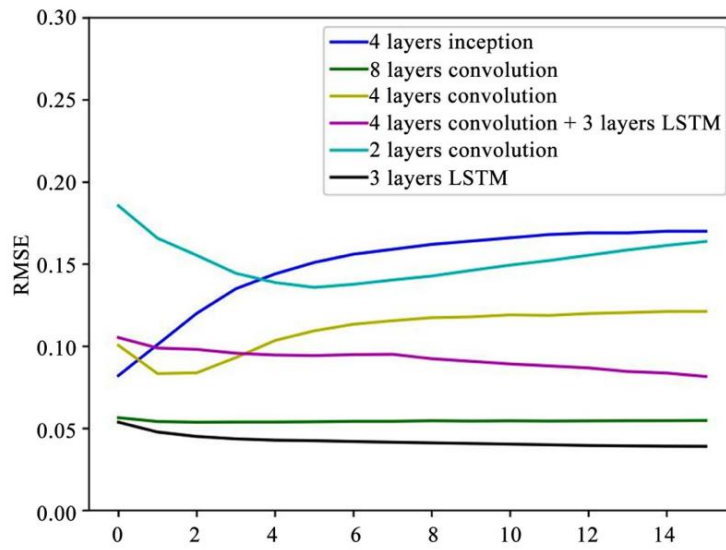


Şekil 4. LSTM autoencoder modeli.



Şekil 5. 1D geleneksel sinir ağları.

Bir hata işlevi olarak ortalama MSE'yi ve ağırlık azalmasıyla AdamOptimizer'ı kullanırlar. Bir düzenleme tekniği olarak ağırlık azalması, modelin fazla takılmasını önler ve AdamOptimizer [29] hesaplama açısından verimlidir ve çok az bellek gerektirir. İlk Derin Sinir Ağı (DNN) mimarisi, sınıflandırma amacıyla en üstte tamamen bağlı bir katmana sahip yığılmış bir LSTM (Long short-term memory)'dir. LSTM modeliyle, bir öğrenme oranı (0,001 ile 0,00001 arasında) ve bir azalma değeri (0,9 ile 0,99 arasında) ayarlayarak, LSTM katmanlarının çeşitli derinliklerini (64'ten 2048'e) ve dizi uzunluklarını (50 ile 1000 arasında) test edebildiler. 1D CNN mimarisi, ReLU-MaxPooling şemasını benimsemiştir. Deneyler için farklı çekirdek boyutları kullanılmıştır. Konvolüsyonlar katmanının üstüne, tahmin için tamamen bağlı bir katman eklenir ve fazla uydurmayı önlemek için bırakma kullanılır. Yazarlar, bir toplu normalleştirme katmanı ekleyerek veya temel CONV-RELU-POOL bloğunu (CONV-RELU)  $\times$  N-MAXPOOL mimarisi ile değiştirerek bu CNN mimarisinin çeşitli varyasyonlarını test ettiler. Ayrıca, evrişim katmanlarını, daha iyi performans ve daha düşük hesaplama maliyeti sağladığı bilinen Başlangıç katmanları [30] ile değiştirdiler. Başlangıç katmanları, evrişim katmanları tarafından kullanılan tam bağlantılar yerine seyrek seyrek bağlantıları kullanır, bu nedenle hesaplama yükü azalır. Deneyler, 36 farklı siber saldırı içeren SWaT veri seti üzerinde gerçekleştirilmiştir. Önerilen 1D CNN modeli %89 algılama oranına sahiptir, bu oldukça iyidir, ancak iyileştirilmesi gerekmektedir.



Şekil 6. Test hataları.

Farklı mimarilerin karşılaştırılması (Şekil 6), LSTM'lerin ve başlangıç tabanlı evrişimin yalnızca daha hızlı yakınsamadığını, aynı zamanda daha düşük eğitim hatası oranı verdiğini de göstermektedir. Anomali algılama yöntemi, sekiz katmanlı evrişimli ağ için yüksek Eğri Altında Alan (AUC), yani 0,967 verir. CNN(Convolutional neural network)'nin eğitim ve test süreleri LSTM ağına göre daha düşüktür. CNN ağları, LSTM ağlarına kıyasla anomali tespiti için iyi performans gösterdi. Önerilen CNN, %100 hassasiyetle %85'e ulaşan algılama oranlarına sahiptir.

### 3.4. Üretken Düşman Eğitimi (Generative Adversarial Training - GAN) ile Anomali Tespiti

Zaman serileri için anomali tespitinin temel görevi, test verilerinin normal veri dağılımlarına uyup uymadığını belirlemektir; uyumsuz noktalara çeşitli uygulama alanlarında anomaliler, aykırı değerler, izinsiz girişler, arızalar veya kirleticiler denir (7). Şekil 7, önerilen GAN'ın genel mimarisini göstermektedir.

#### 3.4.1. GAN Mimarisi

Tipik olarak, bir GAN iki ağdan oluşur: üretici ve ayırıcı (aka eleştirici). Oluşturucu, gizli bir koddan bir örnek, örneğin bir görüntü üretir ve bu görüntülerin dağılımı ideal olarak eğitim dağılımından ayırt edilemez olmalıdır. Durumun böyle olup olmadığını söyleyen bir fonksiyon tasarlamak genellikle mümkün olmadığından, değerlendirmeyi yapmak için bir ayırıcı ağ eğitilir ve ağlar türevlenebilir olduğundan, her iki ağı da doğru yöne yönlendirmek için kullanabileceğimiz bir gradyan elde ederiz. Tipik olarak, üretici ana ilgi konusudur- ayırıcı, üretici eğitildikten sonra atılan uyarlanabilir bir kayıp işlevidir (24).

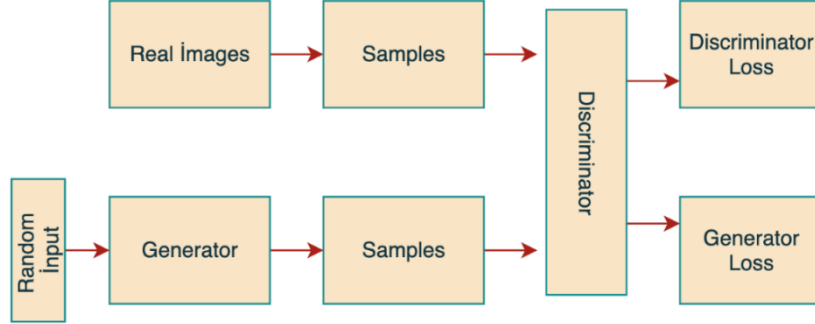
#### 3.4.2. DR-Skoru: Hem Ayırıcılık hem de Yeniden Yapılanma Kullanılarak Anomali Tespiti

GAN kullanmanın bir avantajı, aynı anda eğitilmiş bir ayırıcı ve bir jeneratöre sahip olmamızdır. Anomalileri tanımlamak için normal anatomik değişkenliği temsil etmek üzere ortaklaşa eğitilmiş hem ayırıcı hem de

oluşturucudan yararlanmayı öneriyoruz. (12)'deki formülasyonu takiben, GAN tabanlı anomali tespiti aşağıdaki iki bölümden oluşur.

### Ayrımcılığa Dayalı Anomali Tespiti

Eğitilmiş ayrımcı D'nin sahte verileri (yani anomalileri) gerçek verilerden yüksek hassasiyetle ayırt edebildiği göz önüne alındığında, anomali tespiti için doğrudan bir araç olarak hizmet eder.



**Şekil 7.** Denetimsiz GAN tabanlı anomali algılama. Solda, üretici ve ayrımcının yinelemeli çekişmeli eğitimle elde edildiği bir GAN çerçevesi var. Sağda, hem GAN tarafından eğitilmiş ayrımcının hem de oluşturucunun, ayırım ve yeniden yapılandırmaya dayalı birleşik bir anomali skoru hesaplamak için uygulandığı anomali algılama süreci yer almaktadır.

### Yeniden Yapılandırmaya Dayalı Anomali Tespiti

Gerçekçi örnekler üretebilen eğitilmiş jeneratör  $G$  aslında gizli alandan gerçek veri alanına bir eşlemedir:  $G(Z): Z \rightarrow X$  ve normal verilerin dağılımını yansıtan açık olmayan bir sistem modeli olarak görülebilir. [24]'te bahsedilen gizli uzayın yumuşak geçişlerinden dolayı, gizli uzaydaki girişler yakınsa, jeneratör benzer örnekleri çıkarır. Bu nedenle, test verileri için gizli uzayda karşılık gelen  $Z_k$ 'yi bulmak mümkünse  $X_{tes}$  ve  $G(Z^k)$  (yeniden yapılandırılmış test örnekleri olan) arasındaki benzerlik,  $X_{tes}$ 'in dağılımı ne ölçüde takip ettiğini açıklayabilir.  $G$  tarafından yansıtılır. Başka bir deyişle, test verilerindeki anomalileri belirlemek için  $X_{tes}$  ve  $G(Z^k)$  arasındaki artıkları da kullanabiliriz.

Test verilerine karşılık gelen optimal  $Z^1$ 'yi bulmak için, önce gizli uzaydan rastgele bir  $Z^1$  kümesini numuneleriz ve jeneratöre besleyerek yeniden yapılandırılmış ham numuneler  $G(Z^1)$  elde ederiz. Daha sonra  $X_{tes}$  ve  $G(Z)$  ile tanımlanan hata fonksiyonundan elde edilen gradyanlar ile latent uzaydan örnekleri güncelleriz.  $\min_{Z^k} Er(X_{tes}, G_{rnn}(Z^k)) = 1 - Simi(X_{tes}, G_{rnn}(Z^k))$  burada diziler arasındaki benzerlik basitlik için kovaryans olarak tanımlanabilir.

Hata yeterince küçük olacak şekilde yeterli yineleme turlarından sonra,  $Z$  k örnekleri, test örnekleri için gizli uzayda karşılık gelen eşleme olarak kaydedilir. Test numuneleri için  $t$  zamanındaki artık  $Res(X_t^{tes}) = \sum_{i=1}^n |x_t^{tes,i} - G_{rnn}(Z_t^{k,i})|$  olarak hesaplanır.

## 3.5. CPS ve Siber saldırılar

### 3.5.1. Su Arıtma ve Dağıtım Sistemi

#### SWaT

Güvenli Su Arıtma (SWaT) sistemi, büyük şehirlerde bulunan büyük bir modern su arıtma tesisinin küçük ölçekli bir versiyonunu temsil eden su arıtma için operasyonel bir test yatağıdır [25]. Genel test yatağı tasarımı, genel fiziksel süreç ve kontrol sisteminin sahadaki gerçek sistemlere çok benzemesini sağlamak için ülke çapında su hizmetleri şirketi olan Singapur Kamu Hizmet Kurulu ile koordine edildi. SWaT veri seti toplama süreci, sistem günde 24 saat çalıştırılarak 11 gün sürmüştür. 2016 SWaT veri toplama sürecinin son 4 gününde toplam 36 saldırı başlatıldı [25]. Genellikle saldırıya uğrayan noktalar arasında sensörler (ör. su seviyesi sensörleri, akış hızı ölçer vb.) ve aktüatörler (ör. vana, pompa vb.) bulunur. Bu saldırılar, son dört gün içinde farklı amaçlarla ve çeşitli kalıcı sürelerle (birkaç dakikadan bir saate kadar) test alanında başlatıldı. Ya başka bir saldırı başlatılmadan önce sistemin normal çalışma durumuna gelmesine izin verildi ya da saldırılar art arda başlatıldı.

SWaT 'deki su arıtma işlemi, P1'den P6'ya [26] olarak adlandırılan altı alt süreçten oluşur. İlk süreç ham su temini ve depolaması içindir ve P2, su kalitesinin değerlendirildiği ön arıtma içindir. İstenmeyen materyaller, P3'te ultra filtrasyon (UF) geri yıkaması ile uzaklaştırılır. Kalan korin, Deklorinasyon işleminde (P4) yok edilir. Ardından, inorganik safsızlıkları azaltmak için P4'ten gelen su Ters Ozmos (RO) sistemine (P5) pompalanır. Son olarak, P6 suyu dağıtımına hazır olarak depolar.



## WADI

Tipik olarak güvenli bir yerde bulunan bir su arıtma sistemi tesisinin aksine, bir dağıtım sistemi geniş bir alana yayılan çok sayıda boru hattından oluşur. Bu, bir dağıtım ağına fiziksel saldırı riskini oldukça artırır. Su Dağıtım (WADI) test ortamı, eksiksiz ve gerçekçi bir su arıtma, depolama ve dağıtım ağı oluşturmak için SWaT'lerin ters ozmos permeatını ve ham suyu alarak SWaT sisteminin bir uzantısıdır. Su dağıtım sisteminde üç kontrol süreci vardır. İlk işlem, ham suyun SWaT, Public Utility Board (PUB) girişinden veya WADI'deki dönüş suyundan alınması ve ham suyun iki tankta depolanmasıdır. P2, suyu iki yükseltilmiş rezervuar tankından ve altı tüketici tankından önceden belirlenmiş bir talep modeline göre dağıtır. Su geri dönüştürülür ve üçüncü işlemde P1'e geri gönderilir.

WADI test ortamı benzer şekilde kimyasal dozlama sistemleri, takviye pompaları ve valfleri, enstrümantasyon ve analizörlerle donatılmıştır (27). WADI, ağlar aracılığıyla PLC'lerde gerçekleştirilen saldırıları ve savunmaları simüle etmenin yanı sıra, su sızıntısı ve kötü niyetli kimyasal enjeksiyonlar gibi fiziksel saldırıların etkilerini simüle etme yeteneklerine sahiptir. WADI veri toplama süreci, 14 günü normal operasyonda ve 2 günü saldırı senaryolarında olmak üzere 16 günlük sürekli operasyonlardan oluşmaktadır. Veri toplama sırasında tüm ağ trafiği, sensör ve aktüatör verileri toplanmıştır. WADI veri seti hakkında daha fazla ayrıntı için lütfen WADI web sitesine bakın.

### 3.5.2. Siber Saldırıları

Bir saldırırganın amacı, tesisin normal operasyonlarını manipüle etmektir. Saldırırganın SWaT ve WADI'nin SCADA sistemine uzaktan erişimi olduğu ve sistemlerin nasıl çalıştığı hakkında genel bilgiye sahip olduğu varsayılmaktadır.

İlgili sistem yanıtlarını araştırmak için SWaT ve WADI sistemlerinde çeşitli deneyler yapılmıştır. Toplamda SWaT ve WADI'ye sırasıyla 36 saldırı ve 15 saldırı eklendi [25]. Örnek olarak, her sistem için bir örnek saldırı açıklayalım.

**SWaT** Bir saldırı hedefi, SWaT performansını nominal seviyeden düşürmektir (örneğin, P4'teki Reverse Osmosis (RO) besleme tankının su seviyesi 5 galon. Saldırırgan, LIT401'e saldırarak, RO besleme tankının seviyesini düşürdü. 800mm'den 200mm'ye kadar, bu PLC-4'ün pompayı durdurmasına yol açacaktır P401 ve daha az su P5'e pompalandı. Son olarak, LIT401'e saldıran sensörün olumsuz etkisi, RO ünitesinin çıkış su akış hızına yansıdı (değerler FIT501 ile ölçülen P5). Sistem özelliklerine göre bu debi yaklaşık 1,2cm kalmalıdır.

**WADI** Bir saldırı hedefi, P1'deki su seviyesi sensörünün okumalarını manupile etmektedir. Saldırırgan, sensör değerini tank kapasitesinin %76'sından %10'una değiştirerek "düşük durum" gösterir. Sonuç olarak, PLC-1 (P1 kontrolörü) WADI dönüşünden, SWaT çıkışından veya PUB girişinden daha fazla su almak için giriş suyu pompasını açmak için bir komut gönderir. Aynı zamanda, ham su deposundaki hatalı düşük su seviyesi durumu nedeniyle, P1'den P2'ye su beslemesi kesilirken, P2 tüketici tanklarına su sağlamaya devam eder. Böylece P2'deki tankların su seviyeleri azaldı. Yükseltilmiş tanklardaki (P2) su seviyesi düşük bir seviyeye ulaştığında, tüketici tanklarına (P2) verilen besleme kesildi. Sonuç olarak, P1'deki su seviye sensörünün okumalarını düşük bir seviyeye değiştirerek, P1'in tanklarında bir taşma olacak ve P2'de su akışı olmayacaktır.

**Tablo 1.** Veri kümeleri hakkında genel bilgiler.

|                        | Swat   | WADI    | KDDCUP99 |
|------------------------|--------|---------|----------|
| <b>Değişken</b>        | 51     | 103     | 34       |
| <b>Saldırı</b>         | 36     | 15      | 2        |
| <b>Saldırı Süresi</b>  | 2 – 25 | 1.5 -30 | NA       |
| <b>Training Boyutu</b> | 496800 | 1048571 | 562387   |
| <b>Test Boyutu</b>     | 449919 | 172801  | 494021   |
| <b>N_Rate(%)</b>       | 88.02  | 94.01   | 19.69    |

(1) N oranı, normal veri noktalarının test veri kümelerindeki tümüne oranıdır.

### 3.5.3. SwaT ve WADI Veri Kümeleri

SWaT/WADI veri toplama süreci, sistemlerin günde 24 saat çalıştırılmasıyla 11/16 gün sürmüştür. Son 4/2 günde, test yataklarına farklı amaçlarla ve farklı süreli sürelerle (birkaç dakikadan bir saate kadar) çeşitli siber saldırılar gerçekleştirildi. Sistemlerin ya başka bir saldırı başlatılmadan önce normal çalışma durumuna gelmesine izin verildi ya da saldırılar art arda başlatıldı. Bu iki veri kümesi hakkında bazı genel bilgiler Tablo 1'de özetlenmiştir. Tespit görevlerinin karmaşıklığını daha iyi anlamak için, iki veri kümesinin ve bunlarla ilişkili normal koşulların ve saldırıların aşağıdaki özelliklere sahip olduğunu belirtmekte fayda var.



Farklı senaryolar nedeniyle farklı saldırılar farklı sürelerde sürebilir. Bazı saldırılar hemen etkili olmadı. Sistem istikrar süreleri de saldırılara göre değişir. Değişen akış hızlarını hedefleyen saldırılar gibi daha basit saldırılar, sistemin dengelenmesi için daha az zaman gerektirirken, sistem dinamikleri üzerinde daha güçlü etkilere neden olan saldırılar, istikrar için daha fazla zamana ihtiyaç duyacaktır.

Bir sensöre/aktüatöre yapılan saldırılar, diğer sensörler/aktüatörler veya tüm sistem üzerindeki performansı, genellikle belirli bir zaman gecikmesinden sonra. Ayrıca, benzer türdeki sensörler/eyleyiciler, saldırılara benzer şekilde yanıt verme eğilimindedir. Örneğin, LIT101 sensörüne (SWaT 'nin P1'indeki bir su seviyesi sensörü) saldırılar, hem LIT101'de hem de LIT301'de (SWaT 'nin P3'ünde başka bir su seviyesi sensörü) bariz anomali artışlara neden oldu, ancak diğer sensörlerin ve aktüatörlerin okumaları üzerindeki etkiler nispeten daha küçüktü. Yukarıda bahsedilen gözlemler, farklı alt süreçlerin performanstaki genel değişimi toplu olarak saldırıları daha iyi tanımayaya yardımcı olabileceğinden, anomali tespiti için sistemlerin modellenmesinde çok değişkenli bir yaklaşımın benimsenmesinin önemli olduğunu göstermektedir. Başka bir deyişle, sensörler ve aktüatörler arasındaki temel korelasyonlar, saldırının neden olduğu sistem davranışlarındaki anomalileri tespit etmek için faydalı olabilir.

## 4. KONFIGÜRASYON VE PERFORMANS METRİKLERİ

### 4.1. Veri Hazırlama ve Sistem Mimarisi

SWaT veri setinde, 11 gün boyunca 51 değişken (sensör okumaları ve aktüatör durumları) ölçülmüştür. Ham veriler içerisinde normal çalışma koşullarında (ilk 7 günde toplanan veriler) 496.800 örnek, sonradan sisteme çeşitli siber saldırılar yapıldığında ise 449.919 örnek toplanmıştır. Benzer şekilde WADI veri seti için normal çalışma koşullarında ilk 14 günde 103 değişken için 789371 örnek, son 2 gün içinde sisteme çeşitli siber saldırılar yapıldığında 172801 örnek toplanmıştır. Bu veri setlerinin her ikisi için, sistem [26]'ya göre ilk açıldığında stabilizasyona ulaşması 5-6 saat sürdüğü için eğitim verilerinden (normal veriler) ilk 21.600 örneği çıkarılmıştır. Anomali algılama sürecinde, ham akışlar boyunca kayan bir pencere olarak orijinal uzun çoklu dizileri daha küçük zaman serilerine bölünür. Alt dizi gösterimi için optimal pencere uzunluğuna karar vermek zaman serisi çalışmasında önemli bir konu olduğundan, sistem durumunu farklı çözünürlüklerde yakalamak için bir dizi farklı pencere boyutu denedik, yani  $sw = 30 \times i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 10$ . SWaT verilerinin ilgili dinamiklerini yakalamak için, pencere, kayma uzunluğu  $ss=10$  olan normal ve test veri kümelerine uygulanır.

Bu çalışma için, jeneratör için derinlik 3 ve 100 gizli (dahili) üniteye sahip bir LSTM ağı kullandık. Diskriminatör için LSTM ağı, 100 gizli birim ve derinlik 1 ile nispeten daha basittir. [9]'deki gizli uzay boyutu hakkındaki tartışmadan esinlenerek, farklı boyutlar da denedik ve özellikle çok değişkenli üretirken daha yüksek gizli uzay boyutunun genellikle daha iyi örnekler ürettiğini bulduk. Bu çalışmada latent uzayın boyutunu 15 olarak belirledik.

### 4.2. Değerlendirme Metrikleri

GAN'ın anomali tespit performansını değerlendirmek için Precision (Pre), Recall (Rec) ve F1 puanları gibi standart metrikleri kullanırız:

$$Rec=(TP)/(TP+FN) \quad (1)$$

$$Pre=(TP)/(TP+FP) \quad (2)$$

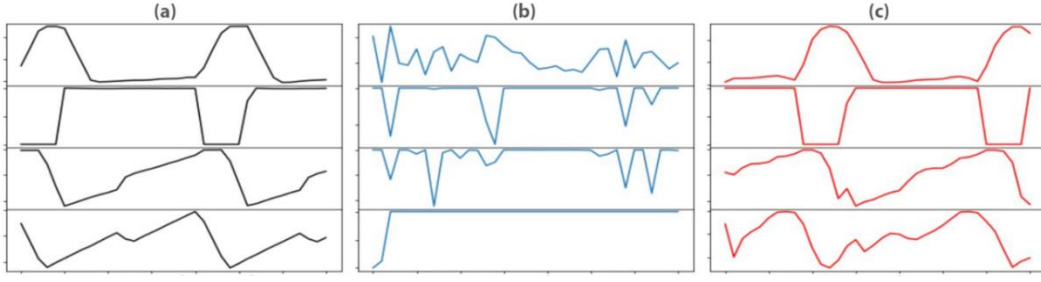
$$F1=2 \times (Pre \times Rec)/(Pre+Rec) \quad (3)$$

Bu çalışmadaki uygulamamız izinsiz girişleri (siber saldırı) tespit etmek olduğundan, sistemin birkaç yanlış alarmı tolere etmeyi gerektirse bile tüm saldırıları tespit etmesi önemlidir. Bu nedenle, gerçek pozitifleri doğru bir şekilde tespit etmeye çalışırken, yanlış pozitifler aşırı olmadığı sürece önemli değildir. Bu nedenle, bu çalışma için anomali tespiti performansını ölçmek için ana metrik olarak hatırlama kullanılır.

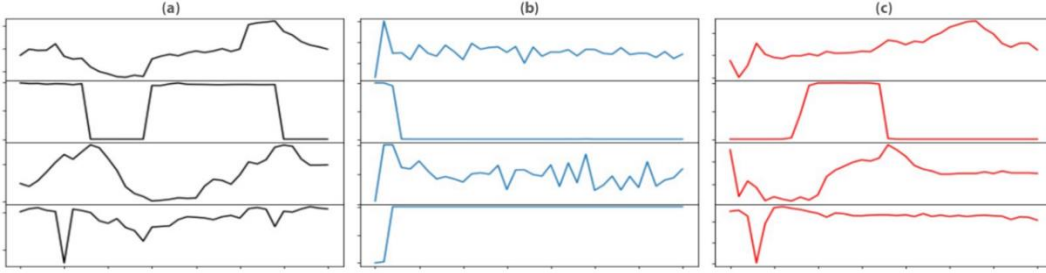
Bu çalışma gerçekleştirilen uygulama izinsiz girişleri (siber saldırı) tespit etmek olduğundan, sistemin birkaç yanlış alarmı tolere etmeyi gerektirse bile tüm saldırıları tespit etmesi önemlidir. Bu nedenle, gerçek pozitifleri doğru bir şekilde tespit etmeye çalışırken, yanlış pozitifler aşırı olmadığı sürece önemli değildir. Bu nedenle, bu çalışma için anomali tespiti performansını ölçmek için ana metrik olarak hatırlamayı kullanıyoruz.

## 5. SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

GAN'ın anomali tespit performansını yukarıda bahsedilen iki veri seti SWaT ve WADI üzerinde değerlendiriyoruz. Daha önce açıklandığı gibi, alt diziler MAD-GAN modeline beslenir. Hesaplama yükünü azaltmak için, PC varyans oranına göre PC boyutunu seçerek orijinal boyutu PCA ile boyut indirgeme yapılmıştır. Anomali algılama performansı üzerinde karşılaştırma yapmak için, veri setlerinde popüler denetimsiz anomali algılama yöntemleri olan PCA, K-En Yakın Komşu (KNN), Özellik Paketleme (FB) ve Otomatik Kodlayıcı (AE) da uyguladık. GAN tabanlı bir yöntemle karşılaştırmak için, GAN'ı, ayırıcısı ve üretici tam bağlı sinir ağları olarak uygulanan [12]'nin Efficient GAN tabanlı (EGAN) yöntemiyle karşılaştırılmıştır.

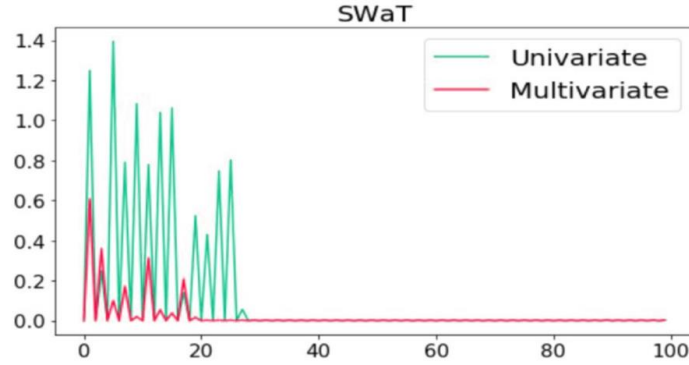


Şekil 8. Farklı eğitim aşamalarında oluşturulan örnekler arasında karşılaştırma: Swat.

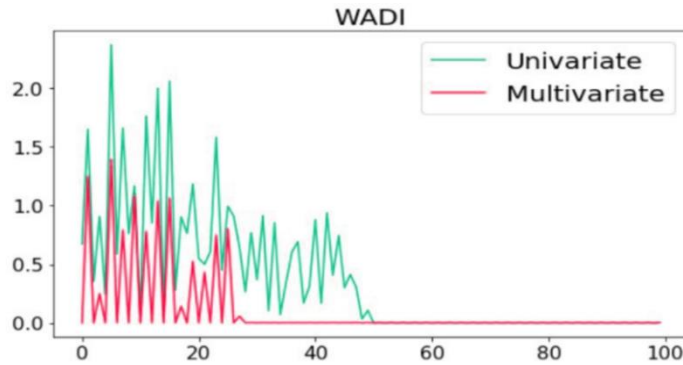


Şekil 9. Farklı eğitim aşamalarında oluşturulan örnekler arasında karşılaştırma: Wadi.

Şekil 4-1'te her iki veri kümesi için çok değişkenli örnekler oluşturmak için GAN eğitim yinelenmelerinde MMD değerleri çizilmektedir. Her iki veri kümesi için 30-50 yinedemeden sonra MMD değerlerinin küçük değerlere yaklaşma eğiliminde olduğunu gözlemleyebiliriz. Ayrıca tek değişkenli numune üretimi için MMD değerleri karşılaştırılmıştır. Çok değişkenli örneklerin erken MMD değerleri tek değişkenli örneklerinkinden daha düşük olması ve çok değişkenli örnekler için MMD de tek değişkenli durumdan daha hızlı yakınsamıştır. Bu, birden fazla veri akışının kullanılmasının GAN modelinin eğitimine yardımcı olabileceğini düşündürmektedir.



Şekil 10. MMD: Çoklu zaman serisi.



Şekil 11. MMD: Tek zaman serisi.

### 5.1. Anomali Tespit Performansı

Tablo 2'de, popüler denetimsiz yöntemlerle (PCA, KNN, FB ve AE) en iyi performansı altı çizili olarak ve genel olarak en iyi performansı koyu renkle gösteriyoruz.

F1 denge hassasiyeti ve geri çağırma bu yana en iyi F1 tarafından seçilen sonuçlara odaklanan SWaT veri seti için ADGAN, AE tarafından kesinlik ve geri çağırma için sırasıyla %26.34 ve %11.11 ile verilen dört popüler yöntemle en iyi performansı geride bıraktı. Aslında, GAN, SWaT için tüm anonim noktaları yanlış alarmlar olmadan doğru bir şekilde algılayarak, burada neredeyse %100 hassasiyet ve geri çağırma elde etti.

Aynı zamanda en iyi F\_1 tarafından seçilen sonuçlara odaklanan WADI veri seti için, GAN tarafından yapılan geri çağırma, AE'ninkinden biraz daha zayıftır (%3.02 daha düşük). Ancak, en iyi hatırlama durumu için, GAN, geri çağırma değerlerine göre %65,64 %94,36 ile diğerlerinden daha iyi performans gösterdi. GAN'ın hassasiyeti zayıf görünse de, %100'e yakın bir geri çağırma değerine ulaşabilir. Yanlış pozitifin maliyeti tüm izinsiz girişleri tespit etmek için tolere edilebilir olduğundan (Bölüm 5.2'de bahsedildiği gibi) bu siber saldırı ortamında kabul edilebilir. Karşılaştırıldığında, popüler tespit yöntemlerinin hiçbiri tatmin edici bir geri çağırma sağlayamaz.

İki veri kümesi arasında GAN, SWaT için belirgin şekilde daha iyi performans gösterdi. Tablo 1'deki "N oranı" ile gösterildiği gibi, WADI veri seti SWaT'den daha dengesizdir (yani daha fazla gerçek negatif), bu da daha fazla yanlış bildirilen pozitiflere yol açar. Ayrıca, Tablo 1'de gösterildiği gibi, WADI veri kümesinin SWaT'den daha büyük bir özellik boyutuna sahip olduğunu da not ediyoruz (WADI 103 değişkene sahipken SWaT yalnızca 51 değişkene sahiptir.).

**Tablo 2.** Farklı veri kümeleri için anomali tespit metrikleri.

| Datasets | Metod  | Precesision | Recall | F1   |
|----------|--|-------------|--------|------|
| Swat     | PCA  | 24.92       | 21.65  | 0.23 |
|          | KNN  | 7.83        | 7.85   | 0.08 |
|          | FB   | 10.17       | 10.17  | 0.1  |
|          | AE   | 72.63       | 52.63  | 0.61 |
|          | EGAN   | 40.57       | 67.73  | 0.51 |
|          | GAN*   | 99.99       | 54.8   | 0.7  |
|          | GAN**  | 12.2        | 99.98  | 0.22 |
|          | GAN***   | 98.97       | 63.74  | 0.77 |
| WADI     | PCA  | 39.53       | 5.63   | 0.1  |
|          | KNN  | 7.76        | 7.75   | 0.08 |
|          | FB   | 8.6         | 8.6    | 0.09 |
|          | AE   | 34.35       | 34.35  | 0.34 |
|          | EGAN   | 11.33       | 37.84  | 0.17 |
|          | GAN*   | 46.98       | 24.58  | 0.32 |
|          | GAN**  | 6.46        | 99.99  | 0.12 |
|          | GAN***   | 41.44       | 33.92  | 0.37 |
| GAN*     | En iyi Precision tarafından seçilen sonuçlar listelenir. |             |        |      |
| GAN**    | En iyi Recall tarafından seçilen sonuçlar listelenir.    |             |        |      |
| GAN***   | En iyi F1 tarafından seçilen sonuçlar listelenir.        |             |        |      |

Burada ayrıca GAN'ı daha dengeli bir veri kümesine, KDDCUP99 veri kümesine uyguladık. Bu veri setinde GAN, %85'in üzerinde hassasiyet ve %94'ün üzerinde geri çağırma ile 0.90 F1 puanına ulaşabilir. KDDCUP99 veri setindeki ([12] tarafından rapor edilen) EGAN sonuçları MAD-GAN'ınkinden daha iyi olsa da, GAN hem SWaT hem de WADI veri setleri (dengesiz veri setleri) için EGAN'dan daha iyi performans gösterdi. Bunun nedeni, GAN'da kullanılan LSTM-RNN'nin, EGAN'da kullanılan CNN'lerden daha iyi karmaşık zaman serilerini öğrenebilmesidir. Aslında, EGAN'ın diğer GAN olmayan yöntemlerle görece performansına baktığımızda, zamansal korelasyonu uygun şekilde modellemesek GAN tabanlı anomali tespitinin diğer geleneksel yöntemlerle rekabet edemediğini görebiliriz.

Genel olarak, GAN, popüler denetimsiz algılama yöntemlerinden tutarlı bir şekilde daha iyi performans gösterdi. Tek dezavantajı, LSTM-RNN'nin daha uzun alt dizilerle uğraşmasının daha fazla zaman almasıdır (spesifik olmak gerekirse, alt dizi uzunluğu sw 200'den büyük olduğunda model yavaşlar). Zamansal korelasyonu dahil etmek için diğer Sinir Ağlarını kullanmayı keşfetmek ve gelecekteki çalışmalar için alt dizi uzunluğu seçimini düşünmek faydalı olacaktır.

Ağa bağlı sensörler ve aktüatörlerle donatılmış günümüzün siber-fiziksel sistemleri, siber saldırıların neden olduğu anomalileri tespit etmek için sistem davranışlarını izlemek için kullanılacak büyük miktarda veri akışı üretir. Bu yazıda, EKS'ler tarafından oluşturulan zaman serisi verilerinde çok değişkenli anomali tespiti için GAN'ın kullanımını araştırdık. LSTM-RNN'leri çok değişkenli zaman serisi verileri üzerinde eğitmek için yeni bir GAN (GAN ile Çok Değişkenli Anomali Tespiti) çerçevesi önerdik ve ardından yeni bir Ayrımçılık ve Yeniden Yapılandırma Anomali Puanı (DR-) kullanarak anomalileri tespit etmek için hem ayırıcıyı hem de oluşturucuyu

kullandık. Puan). GAN'ı Secure Water Treatment Testbed (SWaT) ve Water'dan alınan iki karmaşık siber saldırı CPS veri kümesi üzerinde test edilmiştir.

Dağıtım Sistemi (WADI) ve GAN tabanlı bir yaklaşım da dahil olmak üzere mevcut denetimsiz algılama yöntemlerine göre üstün performans göstermiştir. Dağıtım Sistemi (WADI) ve mevcut denetimsiz algılama yöntemlerine göre üstün performans göstermiştir. Bunun GAN kullanılarak zaman serisi verilerinde çok değişkenli anomali tespiti için erken bir girişim olduğu göz önüne alındığında, daha fazla araştırmayı bekleyen ilginç sorunlar var. Gelecekteki çalışmalar için, çok değişkenli anomali tespiti için özellik seçimi konusunda daha fazla araştırma yapmayı ve teorik garantilerle gizli boyut ve PC boyutunu seçmek için ilkeli yöntemleri araştırmaları yapılabilir. Ayrıca algılama modelinin kararlılığı hakkında ayrıntılı bir çalışma yapmayı umuyoruz. Uygulamalar açısından, akıllı binalar ve makineler için kestirimci bakım ve arıza teşhisi gibi diğer anomali algılama uygulamaları için GAN kullanımını araştırmayı planlıyoruz.

Derin Öğrenme yaklaşımları, SCADA sistemlerinde anomali tespiti için giderek daha fazla kullanılmaktadır. Yüksek anomali algılama oranı sağlamak için mevcut SCADA ağı büyük verilerinden önemli özelliklerin öğrenilmesini mümkün kılan denetimsiz özellik öğrenme yeteneği, derin öğrenme yaklaşımlarına artan ilgiye katkıda bulunur. SCADA veri özelliklerini öğrenmek için CNN, LSTM, DBN, SAE, SDAE veya bunların bir kombinasyonu gibi çoklu mimariler ve Softmax katmanı, Tam bağlı sinir ağı gibi sınıflandırıcılar; Sınıflandırma için ELM, DAE veya MLP kullanılır. Çoğu durumda, derin öğrenme yaklaşımları standart yaklaşımlardan daha iyi performans gösterir, ancak Aşıl topuğu, eğitim(training) için gereken yüksek eğitim süresi bir dezavantaj olarak devam eder. Bilimsel topluluk tarafından yüksek eğitim süresi eksikliğinin üstesinden gelmek için alınan ilginç araştırma yönü, Endüstriyel Kontrol Sistemlerinde anomali tespiti için dağıtılmış derin öğrenme yaklaşımlarının kullanılmasıdır. Gelecekteki bir çalışmada, Endüstriyel Kontrol Sistemlerinde anomali tespiti için dağıtılmış bir derin öğrenme yaklaşımı önerilebilir. Çoğu durumda, derin öğrenme yaklaşımları standart yaklaşımlardan daha iyi performans gösterir.

## Yazar Katkıları

Yazarlar makaleye eşit derecede katkı sağladılar

## Çıkar Çatışması

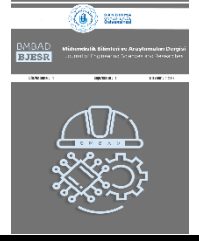
Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler

## KAYNAKÇA

- [1] K.A. Stouffer, J.A. Falco, and K.A. Scarfone "Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security: Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) Systems, Distributed Control Systems (DCS), and Other Control System Configurations Such As Programmable Logic Controllers (PLC)", Gaithersburg, MD, United States: NIST Special Publication vol.82 (800), 2014.
- [2] Y. Zhang, L.Wang, W. Sun, R.C. Green II and M. Alam "Distributed Intrusion Detection System in a Multi-Layer Network Architecture of Smart Grids", IEEE Transactions on Smart Grid. vol. 2, pp. 796-808, 2011
- [3] F. Pasqualetti, F. Dörfler, F. Bullo "Cyber-physical attacks in power networks: Models, fundamental limitations and monitor design", IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, 2011.
- [4] J. M. Beaver, R. Borges, M. Buckner "An Evaluation of Machine Learning Methods to Detect Malicious SCADA Communications", 12th International Conference on Machine Learning and Applications, 2013.
- [5] V. Chandolai, V. Mithal, V. Kumar "Comparative evaluation of anomaly detection techniques for sequence data", In Eighth IEEE International Conference on Data Mining, pp. 743-748. 2008.
- [6] B. Sun, P.B. Luh, Q.-S. Jia, Z.O. Neill, F. Song. "Building energy doctors: An spc and kalman filter-based method for system-level fault detection in hvac systems", IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol. 11, pp. 215-229, 2014.
- [7] K. Donghwoon, H. Kim, J. Kim, S.C. Suh, I. Kim, K. J. Kim "A survey of deep learning-based network anomaly", Cluster Comp., vol. 22, pp. 1-139, 2017.
- [8] O. Mogren "C-rnn-gan: Continuous recurrent neural networks with adversarial training", arxiv:1611.09904, 2016.
- [9] E. Cristbal, S.L. Hyland, and G. Rtsch "Real-valued (medical) time series generation with recurrent conditional gans", arXiv:1706.02633, 2017.
- [10] X. Yuan, T. Xu, H. Zhang, R. Long, and X. Huang "Segan: Adversarial network with multi-scale l1 loss for medical image segmentation", Neuroinform, vol. 16, pp. 383-392, 2018.
- [11] S. Tim, I. Goodfellow, W. Zaremba, V. Cheung, A. Radford, and X. Chen "Improved techniques for training gans", In Advances in Neural Information Processing Systems, arXiv:1606.03498, 2016.
- [12] S. Thomas, P. Seebck, S.M. Waldstein, U. Schmidt-Erfurth, G. Langs "Unsupervised Anomaly Detection with Generative Adversarial Networks to Guide Marker Discovery", Lecture Notes in Computer Science, vol. 10265, pp. 146-157, 2017.
- [13] Z. Houssam, C.S. Foo, B. Lecouat, G. Manek, V.R. Chandrasekhar "Efficient gan-based anomaly detection", arXiv:1802.06222, 2018.

- [14] S. Li and J. Wen “A model-based fault detection and diagnostic methodology based on pca method and wavelet transform”, *Energy and Buildings*, vol. 68, pp. 63–71, 2014.
- [15] S. Wol, E. Kim, P. Geladi “Principal component analysis”, *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, vol. 2, pp. 37–52, 1987.
- [16] S. Kotz and N.L. Johnson “Partial least squares”, In *Encyclopedia of Statistical Sciences*, vol. 6, pp. 581–591, 1985.
- [17] D. Xuewu and Z. Gao “From model, signal to knowledge: A data-driven perspective of fault detection and diagnosis”, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, pp. 2226–2238, 2013.
- [18] M.R. Breuni, P. Kröger, R.T. Ng, J. Sander “Lof: identifying density-based local outlier”, *ACM SIGMOD Record*, vol. 29, no. 2, pp. 93–104, 2000.
- [19] M. Schuber, H.P. Kriegel and A. Zimek “Angle-based outlier detection in high-dimensional data”, *Proceedings of the 14th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining*, pp. 444–452, 2008.
- [20] L. Aleksandar and V. Kumar. “Feature bagging for outlier detection”, *Proceedings of the eleventh ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery in data mining*, pp. 157–166, 2005.
- [21] B. Zong, Q. Song, M.R. Min, W. Cheng, C. Lumezanu, D. Cho, H. Chen “Deep autoencoding gaussian mixture model for unsupervised anomaly detection”, *ICLR 2018 Conference Blind Submission*, 2018.
- [22] H. Edan and A. Shabtai. “Using lstm encoder-decoder algorithm for detecting anomalous ads-b messages”, *Computers and Security*, vol. 78, 2018.
- [23] T. Karras, T. Aila, S. Laine, J. Lehtinen “Progressive Growing Of Gans For Improved Quality, Stability, and Variation”, *ICLR*, pp. 1, 2018.
- [24] A. Mathur N.O. Tippenhauer “Swat: A water treatment testbed for research and training on ics security”, *2016 International Workshop on Cyber-physical Systems for Smart Water Networks (CySWater)*, pp. 31–36, 2016.
- [25] G. Jonathan, S. Adepun, K.N. Junejo, A. Mathur. “A dataset to support research in the design of secure water treatment systems”, *International Conference on Critical Information Infrastructures Security*, vol. 10242, 2017.
- [26] C.M. Ahmed, V.R. Palletti and A.P. Mathur. “Wadi: A water distribution testbed for research in the design of secure cyber physical systems”, In *Proceedings of the 3rd International Workshop on Cyber-Physical Systems for Smart Water Networks*, pp. 25–28, 2017.
- [27] Y. Raymond, C. Chen, T.Y. Lim, M. Hasegawa-Johnson, and M. N. Do. “Semantic image inpainting with perceptual and contextual losses”, *arXiv:1607.07539*, vol. 1607, 2016.
- [28] S. Tim, I. Goodfellow, W. Zaremba, V. Cheung, A. Radford, and X. Chen “Improved techniques for training gans in In *Advances in Neural Information Processing Systems*”, Part of *Advances in Neural Information Processing Systems* vol. 29, pp. 2234–2242. 2016.





## A case study: Understanding The Nature of Memories Architectures in FPGAs to Built-up Bi-CAM

### Bi-CAM İnşa Etmek İçin FPGA'lardaki Belleklerin Mimarilerinin Doğasını Anlamak: Bir Vaka Çalışması

<sup>1</sup>Abdelkader LAZZEM , <sup>2</sup>Halit ÖZTEKİN , <sup>3</sup>İhsan PEHLİVAN 

<sup>1</sup>Department of Electrical-Electronics Engineering, Sakarya University of Applied Sciences, Sakarya, Türkiye

<sup>2</sup>Department of Computer Engineering, Sakarya University of Applied Sciences, Sakarya, Türkiye

<sup>3</sup>Department of Electrical-Electronics Engineering, Sakarya University of Applied Sciences, Sakarya, Türkiye

<sup>1</sup>y190004033@subu.edu.tr, <sup>2</sup>halitoztekin@subu.edu.tr, <sup>3</sup>ipehlivan@subu.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 13 January 2023

Accepted : 14 March 2023

##### Keywords:

Field-programmable Gate Array (FPGA), Search Operation, Binary Content Addressable Memory (BiCAM), Flip-flop (FF), Block Random-access Memory (BRAM)

#### ABSTRACT

This work gives a comparison between two approaches used for improving search operation speed by using FPGA-based Binary Content Addressable Memory (BiCAM), which is a parallel type of computer memory that quickly searches for and retrieves specific data stored within the memory by assigning a unique address to each piece of data. This hardware-based technique is more efficient than traditional software-based techniques. The FPGA-based BiCAM is implemented using two different approaches: using Flip-flops and Block Random Access Memory as the memory element. The performance of these implementations is evaluated through Time complexity analysis, resource utilization, and search speed. The results indicate that both approaches have same Time complexity of  $O(1)$  and differ in resources used and power dissipation. As a result, the increasing demand for faster and more efficient search operations, both approaches can play an important role in optimizing search operations according to the application and the resources available.

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

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 13 Ocak 2023

Kabul : 14 Mart 2023

##### Anahtar Kelimeler:

Alan Programlanabilir Kapı Dizisi(FPGA), Arama İşlemi , İkili İçerik Adreslenebilir Bellek (BiCAM), Flip-flop (FF), Blok Rastgele Erişim Belleği (BRAM)

#### ÖZET

Bu çalışmada, FPGA tabanlı İkili İçerik Adreslenebilir Bellek (BiCAM) kullanarak arama işlem hızını arttırmak için kullanılan iki yaklaşım arasındaki karşılaştırmayı verir. BiCAM, her veri parçasına benzersiz bir adres atayarak bellekte saklı olan belirli verileri hızlı bir şekilde arayan ve alan paralel bir bilgisayar belleğidir. Bu donanım tabanlı teknik, Linear, Binary ve hash tabanlı gibi geleneksel yazılım tabanlı tekniklerden daha verimlidir. FPGA tabanlı BiCAM'a, Flip-flops ve Block Random Access Memory gibi iki farklı yaklaşımla uygulanmıştır. Bu uygulamaların performansları, zaman karmaşıklığı analizi, kaynak kullanımı ve arama hızı açısından değerlendirilmektedir. Sonuçlar, her iki yaklaşımın da  $O(1)$  Zaman karmaşıklığına sahip olduğunu ve kaynak kullanımı ve güç dağılımı açısından farklılık gösterdiğini göstermektedir. Bu nedenle, daha hızlı ve verimli arama işlemlerine olan artan talep göz önüne alındığında, her iki yaklaşım da uygulamanın ve mevcut kaynaklarına göre optimize edilmesinde önemli bir rol oynayabilir.

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

ORCID: <sup>1</sup>0000-0003-0136-356X

<sup>2</sup>0000-0001-8598-4763

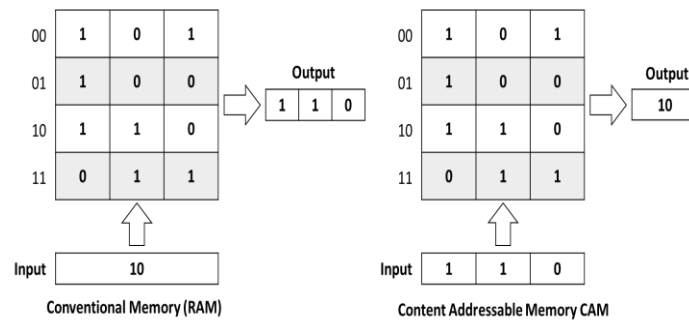
<sup>3</sup>0000-0001-6107-655X



## 1. INTRODUCTION

The search operation is a process of locating a specific piece of information or data within a larger set of information. The search operation typically involves comparing the search term with the data stored in a particular data structure or database and returning the data if a match is found. The search operation can be done using different algorithms and techniques, such as linear search, binary search, or hash table search [1]. Generally, the efficiency of the search operation depends on the type of data structure used, the size of the data, and the search algorithm employed. Search operations are a fundamental operation in computer science and can be a critical factor in time-sensitive applications. It is used in many applications, such as database querying, text search, and image recognition etc.

In recent years, there has been a significant increase in the demand for faster and more efficient search operations due to the rapid development of technologies and the adoption of new methods. There have been various suggestions for improving search speed using software-based approaches, but these methods may be limited due to the structural constraints of the memory, as they do not involve changing in the hardware itself. In this work, we propose an approach for improving search operation speed within a memory using Binary Content Addressable Memory (BiCAM) as a hardware-based technique, rather than the commonly used software-based techniques. This approach relies on changing the structure of memory to improve search performance. BZK.SAU.FPGA assembler is chosen as the case study of this work to demonstrate the effectiveness of using BiCAM as a replacement for the Random-access Memory RAM to implement its search operations [2]. Figure 1 illustrates an example of a search operation performed on both RAM and CAM. In this example, both types of memory are searched for a specific value, but how the search is performed is different.



**Figure 1.** RAM vs. CAM for reading operation.

A Content Addressable Memory (CAM) is a highly parallel type of computer memory that is used to quickly search for and retrieve specific data stored within the memory. It works by assigning a unique address to each data, rather than using the index as in traditional memory systems [3]. When a search is performed, the CAM compares the search data with all the data stored in the memory. If a match is found, the data is retrieved and returned to the user. CAM eliminates the need to search sequentially through the entire memory, making it a faster way to access data. It is commonly used in networking devices, such as switches and routers, to quickly look up and forward data packets based on their destination addresses and applications that require search operations [4,5]. There are two types of Content Addressable Memory (CAM): Binary CAM (BiCAM), in which each memory unit cell can only have binary states of low '0' or high '1', and Ternary CAM (TCAM), which has the same binary states as BiCAM in addition to a third state which is a don't care "x" state [6, 7]. CAMs are typically implemented using specialized hardware, such as dedicated Application-specific integrated circuits (ASICs) or field-programmable gate arrays (FPGAs) [8]. While FPGAs are more flexible and reconfigurable than ASICs, they do not have a dedicated hardware CAM block unit [8]. Therefore, several methods have been developed to implement CAMs on FPGAs, including using Block RAM (BRAM) [9,10], Distributed RAM (DRAM) [11], or Flip-flops (FFs) [12]. For this study, BiCAM was chosen as we are interested in the exact match cases and the don't care state is not needed.

Briefly, the aim of this work is to enhance the understanding of the construction of FPGA-based BiCAMs, which can be used as a hardware-based improvement for searching operations in computing system applications rather than software-based enhancement. To achieve this goal, the study focuses on exploring the diverse memory types available on FPGA boards and how they can be utilized to develop BiCAMs in a more comprehensive and detailed manner and implement the BiCAM using two different approaches. The first approach uses Flip-flops (FFs) as the memory element and the second one uses Block Random access memory BRAM as the memory element. To evaluate both approaches Time complexity analysis, resource utilization, and power efficiency is presented.

The remainder of this thesis is organized as follows: in section 2 a short explanation of the BZK.SAU.FPGA assembler and why a search operation is required. In section 3, an overview of FPGA-based Content Addressable Memories (CAMs) is provided. The section begins with a general introduction to FPGAs and their main components. Then, an explanation of the types of memory that can be utilized in FPGAs to create a BiCAM with their lecturer review is presented. In section 4 the implementation of both approaches is explained. section 5

explains the evaluation of both approaches. In chapter 6 the results are displayed and discussed. Finally, in chapter 7 the conclusion of this work is given.

## **2. RELATED WORK**

The use of FPGA-based CAMs is increasingly popular in the field of computer engineering, particularly with the current advancements in technology and the growing need for fast access to information. Several studies propose using various memory types to construct CAMs, including BRAM-based, LUTRAM-based, and FF-based CAMs. Zahur et al. (2012) proposed a 512x36 HP-TCAM design that utilized 36k x 56 BRAMs and was implemented for the first time on a Virtex-6 Xilinx FPGA device [13]. Weirong (2013) proposed a 1024x150 Scalable TCAM design using a Virtex-7 FPGA device that considered redesign and utilized 512x272 BRAMs [14]. Zhuo and Martin (2014) proposed a 504x180 Hierarchical TCAM design on a Virtex-6 FPGA device that utilized 36K x 140 BRAMs and demonstrated increased hardware efficiency and low latency [15]. Zahur et al. (2015) proposed a 512x36 Z-TCAM design on a Virtex-6 Xilinx FPGA device that reduced search latency but did not consider redesign or data preparation [16]. Inayat et al. (2018) presented a 512x36 multi-pumping TCAM design on a Virtex-6 FPGA device that utilized 36K x 16 BRAMs, demonstrated increased hardware efficiency, and low latency [17]. Moreover, several studies in the literature propose using LUTRAM. Muhammad et al. (2019) proposed a 512x36 Zi-CAM design implemented on a Virtex-7 FPGA device. The design featured low power consumption for certain data sets but had a low speed and did not support ternary bits [19]. Pedro et al. (2019) proposed a 512x40 PR-TCAM design also implemented on a Virtex-7 FPGA device. The design included the feature of partial reconfiguration but had a slow update process [20]. Muhammad et al. (2019) also proposed a 512x36 D-TCAM design implemented on a Virtex-6 FPGA device. The design had high throughput but was unable to update modules [20]. Inayat et al. (2019) presented a 512x36 DURE design implemented on a Virtex-6 FPGA device. This design had easy dynamic updating but low throughput [21]. Finally, for FF-based CAMs, Hassan et al. (2019) proposed a 64x36 RE-TCAM design implemented on a Virtex-6 FPGA device. The design reduced hardware resource utilization but required more I/O pins and needed the input data to be masked [22]. Zahur et al. (2017) proposed a 64x36 LH-CAM design implemented on a Virtex-6 FPGA device. The design had improved speed compared to BRAM-based CAMs but had complex routing and was not scalable [12]. Muhammad et al. (2017) also proposed the first FF-based TCAM design, called G-AETCAM, which was implemented on a Virtex-6 FPGA device and had a size of 64x36. The design had better performance compared to BRAM-based CAMs but was unscalable [23]. Additionally, CAMs can be constructed using a combination of these memory types. For example, Irfan et al. (2022) introduced a type of TCAM called Comp-TCAM, which is constructed by using both BRAM and LUTRAM [24].

In summary, BRAM-based CAMs may have difficulties with the pre-processing of data and may require it to be in a certain order. LUTRAM-based CAMs may have issues with wide bitwise ANDing and high routing complexity. FF-based CAMs use FFs as their memory elements, which can reduce hardware costs per bit, but they may struggle with scalability and high-power consumption. However, they tend to be more effective in terms of throughput, energy consumption, and hardware resource utilization for small CAMs. In the future, CAM designs may be able to reduce the number of resources required per cell, potentially increasing their scalability. This is an area of potential future research.

## **3. CASE STUDY BZK.SAU.FPGA**

BZK.SAU.FPGA is an FPGA-based microcomputer architecture design that was implemented on Altera's Cyclone II Development board by using a Computer Architecture Simulator known as BZK.SAU [25]. BZK.SAU assembler was mainly designed as an educational tool forwarded to undergraduate students to improve their understanding of computer science courses. It has been used by the Computer Engineering Department at Sakarya University since 2009 [13]. It has its own assembler that was designed especially for it. The design has a drawback of not providing a floating-point arithmetic unit, which has been addressed and improved through the study cited in [26]. The Brute-force algorithm was used as a search operation algorithm to convert the user source code to the machine code [27]. BZK.SAU.FPGA, like other programmable devices that use assembly language, relies on RAM to store its instruction sets in mnemonic form and convert them into machine code for internal operations and to communicate with the outside world. However, the search operation using RAM can be slow due to its hardware constraints, which can be problematic in time-sensitive applications. To address this issue, it has been suggested that the RAM be replaced with an FPGA-based BiCAM as its storage unit, that can perform search operations more quickly. Table I. gives a design summary of BZK.SAU.FPGA Microcomputer architecture. For more details about BZK.SAU.FPGA microcomputer architecture references [28, 29] can be checked.

**Table 1.** BZK.SAU.FPGA Microcomputer architecture design summary [17].

| Feature  | Explanation                |
|--|----------------------------|
| <b>Built-in media</b>                                | Altera DE2-70 FPGA         |
| <b>Built-in</b>                                      | Schematic design           |
| <b>Keyboard</b>                                      | Full-stroke “clicky”. keys |
| <b>Text modes (display)</b>                          | 24 lines × 40 columns      |
| <b>Graphics modes (display)</b>                      | 320 × 384                  |
| <b>COLO rsc</b>                                      | Monochrome in VGA mode     |
| <b>RAM</b>   | 64 KB                      |
| <b>ROM</b>   | 4 MB                       |
| <b>Memory endianness</b>                             | Big-Endian                 |
| <b>CPU design</b>                                    | CISC                       |
| <b>CPU architecture</b>                              | Von-neumann (SISD)         |
| <b>Address and data bus</b>                          | 16-bit                     |
| <b>The number of GPRs/data and address registers</b> | 16                         |
| <b>Control unit</b>                                  | Hardware control           |
| <b>The processing of instructions</b>                | Non-pipeline               |
| <b>ALU</b>   | 16-bit (only integers)     |
| <b>Data representation</b>                           | 2's complement             |
| <b>OS</b>  | Single user-single task    |
| <b>Written in language</b>                           | BZK.SAU assembly language  |
| <b>File system</b>                                   | FAT                        |

#### 4. FPGA- BASED CONTENT ADDRESSABLE MEMORY (CAM)

Field Programmable Gate Arrays, which are abbreviated as FPGAs, are a type of integrated circuit that can be programmed to implement various digital circuits. They are made up of configurable logic blocks (CLBs) connected by programmable interconnects [30]. FPGAs have been used in the digital circuit industry since they were first developed in 1985 [31], and they are known for their ability to be configured to design and implement a wide range of digital circuits at various levels of complexity, from high level down to transistor-level architectures. FPGAs can be programmed using Hardware Description Languages (HDL) such as Verilog or VHDL [32]. These programmable integrated circuits have a wide range of applications in various industries due to their ability to perform tasks in parallel, including high-performance computing and data storage, wireless communications, and video & image processing [33].

The use of ASIC-based CAMs, which may be called circuit-level or transistor-level CAMs comes with a difference in cost based on the number of transistors used per CAM cell. This can be caused by the difference in hardware architecture of BiCAM or TCAM and depending on the type of logic gate used. Also, the custom production feature of ASIC-based CAMs makes them unusable in case of manufacturing error as well as unscalable. On the contrary, we find that FPGA-based CAMs are becoming more popular due to their FPGAs' hardware-like performance and software-like reconfigurability, especially in complex reconfigurable systems. This technology could be beneficial for implementing CAMs because it allows fast and parallel search operations that can retrieve the searched word in only a single clock cycle. Although CAMs are useful in certain applications, such as networking (routing), most current FPGA boards do not have a hard intellectual property (IP) core in their architecture [8]. However, modern FPGAs do offer an enormous number of logic and memory resources that can be used to design and implement CAM-based applications, plus some FPGA boards manufacturers such as Xilinx offer CAM soft IP cores [34,35].

Generally, each FPGA device is composed of a specific number of resources, programmable interconnects, and I/O blocks that allow the implementation of reconfigurable digital circuits [36]. A general FPGA structure is presented in Figure 2. The main components of an FPGA's structure are the Configurable Logic Blocks (CLBs) and routing resources, which are arranged in a matrix format. CLBs are the basic logic units of an FPGA and consist of FFs and Lookup Tables (LUTs) that are used to implement logic functions. The routing resources connect the various logic blocks to create the desired digital system. Each switching node in the routing resources is typically made up of six transistors, which are controlled by an SRAM configuration memory [8]. Figure 3 shows the architecture of a modern FPGA.

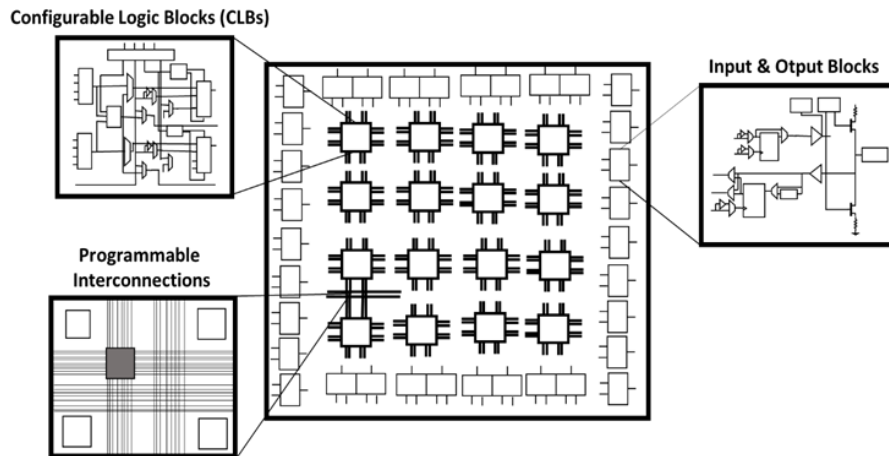


Figure 2. The main components of the conventional FPGAs [36].

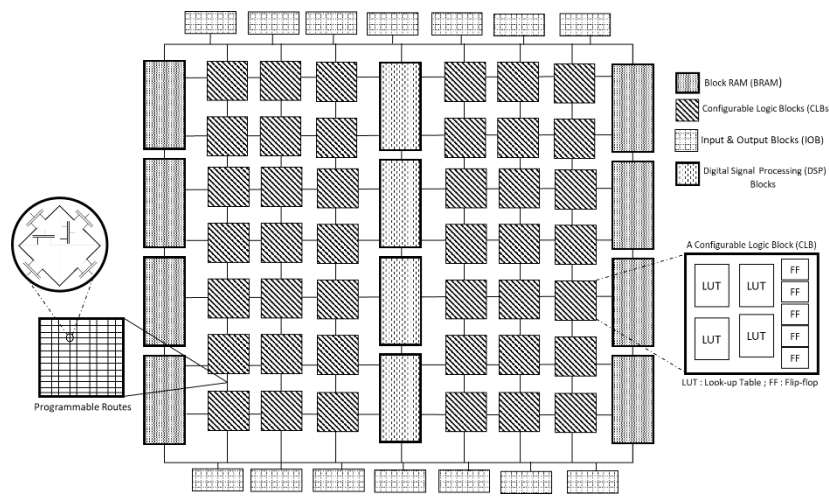


Figure 3. A modern FPGA architecture [8].

#### 4.1. Memories of Modern FPGAs

Understanding the types of memory available in FPGAs is essential as they are typically used to build FPGA-based CAMs. There are three main types of memory that can be found in modern FPGAs: Block RAM (BRAM), Look-up Table (LUT) RAM, and Flip-flops (FFs) [8].

##### 4.1.1. Block RAM (BRAM)

Block Random-access Memory, or BRAM, is a sort of RAM used for data storage that is integrated throughout the FPGA [37]. Figure 4 shows the block diagram of the BRAM. BRAM can be a dual-port memory that allows for fast and efficient access to large amounts of data, making it well-suited for applications that require fast access to large amounts of data. In the literature, many studies on BRAM-based CAMs are proposed.

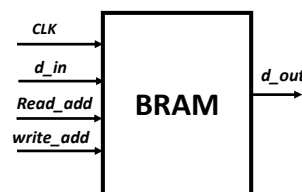


Figure 4. Single-port BRAM block diagram.

##### 4.1.2. Look-up Table RAM (LUTRAM)

Look-Up Table Random-Access Memory (LUTRAM) is a type of memory that combines the features of a LUT and a RAM where LUTs are digital circuits that can be configured to implement any Boolean function by storing a truth table [38]. Figure 5 shows an example of a LUT with its truth table and logic gate symbol. When inputs are applied to a LUT, the output value is determined by looking up the corresponding entry in the truth table. LUTRAMs are like regular RAMs, but they are more flexible because they can be configured to implement any

Boolean function. This makes them useful for storing data such as lookup tables and arrays of coefficients that need to be accessed quickly.

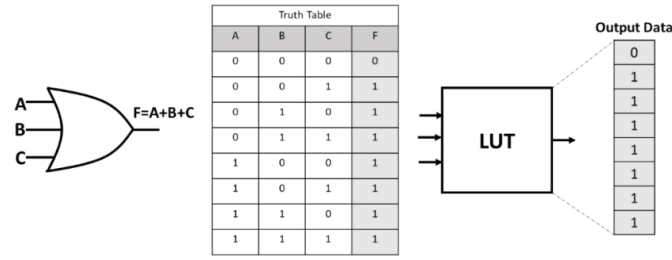


Figure 5. Lookup tables as a Function Generator.

#### 4.1.3. Flip-flop (FF)

Flip-flops are often used as data storage components or pipeline registers in complex digital systems to increase system speed. They have a clock input for synchronization and are available in different types, including SR, D, and JK flip-flops, which each have their own unique characteristics and can be used in different applications. Flip-flops can be combined in large numbers to provide simultaneous access to stored data. Figure 6 shows a block diagram of FF.

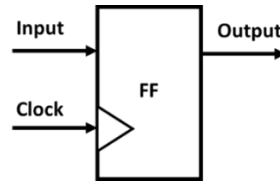


Figure 6. FF's Block diagram.

### 5. IMPLEMENTATION

In this work, a comparison between two approaches to designing FPGA-based BiCAMs is presented. The first is FF-based BiCAM and the second is BRAM-based BiCAM. Where they can be used to replace traditional storage elements such as RAM to improve the speed of computing systems' memory searches. The proposed approaches are designed using the VHDL programming language and implemented at the logic gate level using Altera's Quartus II software. The Cyclone® II 2C70 core FPGA board is selected for implementation because it is the same board used in the implementation of the BZK.SAU.FPGA [25].

#### 5.1. Flip-Flop based BiCAM

The top module of the proposed design is named as BiCAM that includes multiple submodules, including the Bitcell, Decoder, and Encoder. The Bitcell comprises two main components: a D-Type FF for storing and retrieving data, and a logic-based comparison circuit to check for a match between the stored value in the flip-flop and the search value. The comparison operation of the circuit is performed logically by using OR\_gate, AND\_gate, and NOT\_gate according to Equation 1 that is given below [39].

$$M = A_{reg}F_{out} + \overline{A_{reg}}\overline{F_{out}} + \overline{K_{reg}} \tag{1}$$

Where M is equal to the Output of the comparison circuit, F\_out is the output of the Flip-flop, A\_reg is the value of the argument register, and K\_reg is the value of the key register. The decoder module is used to decode the unique addresses of the BiCAM rows. The Encoder module is used to simplify the address of the match flag register for users. The general block diagram for the proposed approach design is shown in Figure 7. It includes 10 inputs and 3 outputs as following the inputs are the clock (CLK), mode-selection (mode\_sel), write or read enable (W\_R), reset, 8-bit address, 8-bit Adres ROM, 64-bit dinROM, 64-bit argument register (Argument\_reg), 64-bit key register (Key\_reg), and 64-bit data input (din). The outputs are the 64-bit BiCAM output (BiCAM\_out), 16-bit machine code (machine\_code), and 8-bit address for the match flag (match\_flag\_adrs).

#### 5.2. BRAM -based BiCAM

The proposed design includes a top module known as Block 1, which comprises several submodules such as a memory module (BRAM), a comparison module, a decoder, an encoder, and a multiplexer. The memory module, which is based on M4k block memory in Cyclone II that is used for data storage and retrieval. The comparison module checks for matches using a logic-based circuit according to Equation 1 mentioned in subsection 4.1.



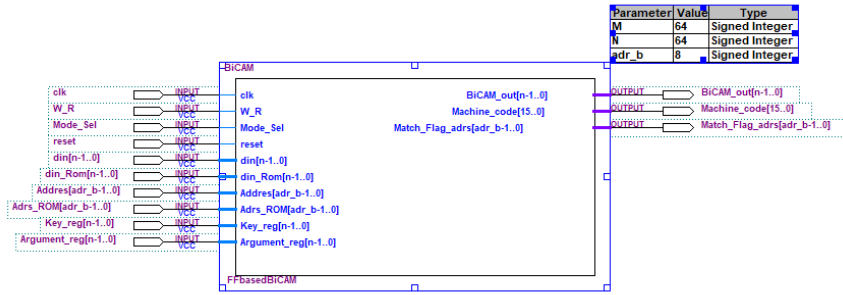


Figure 7. The block diagram of the proposed FF-based BiCAM.

The decoder module decodes unique addresses for BiCAM rows, the encoder simplifies the match flag register address for users, and the multiplexer outputs matched data. The block diagram of the design is illustrated in Figure 8. Where we can observe that the design includes 6 inputs (clock, AddressEnb, 1-bit address, 64-bit argument register, 64-bit key register, and 64-bit data) and 3 outputs (64-bit data\_out, 16-bit machine code, and 8-bit matchaddress for the match flag).

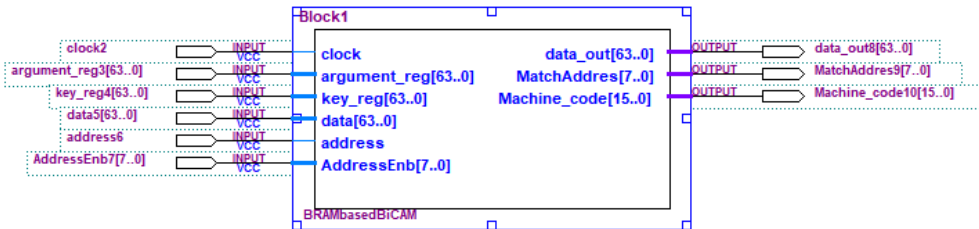


Figure 8. The whole block diagram of the proposed BRAM-based BiCAM.

## 6. EVALUATION

A bunch of randomly picked assembly codes is used for the implementation of both approaches. After that, they have been converted to their American Standard Code for Information Interchange (ASCII) equivalent in hexadecimal notation, as the same format was used for the BZKSAUFPGA assembler. Then, each of the converted codes was mapped into a 16-bit ROM as the BZKSAUFPGA has a 16-bit architecture. Before it can be used, the random assembly codes that are stored in the 16-bit ROM must be rearranged in the standardized format of the argument register. As the argument register consists of 64 bits, the mapping process begins by taking the most significant bits (MSBs) of the random assembly command and replacing them with the relevant MSBs of the argument register until the address mode character is detected, which indicates the end of the desired portion of the assembly command. The remaining bits of the argument register are set to the "don't care" condition, as they will be ignored in the subsequent search operation. The operand of the assembly command is extracted in the same way that was used for the argument register. The same process was followed when initializing the BiCAM with the assembly instruction sets of the BZKSAUFPGA. For a clearer understanding, Figure 9 provides an example of this process.

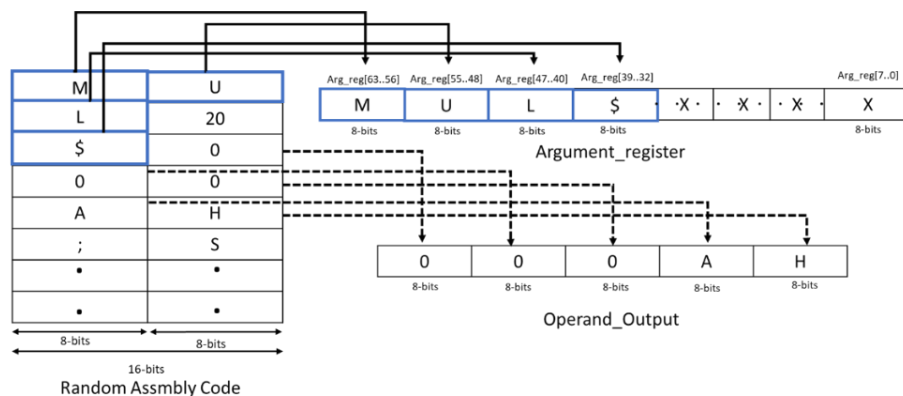


Figure 9. Data preparation of Argument Register.



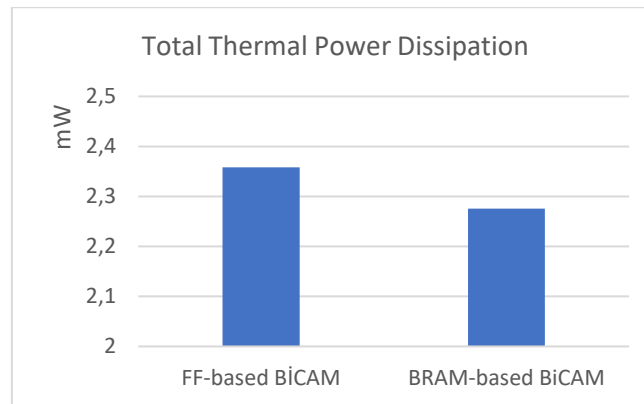
## 7. RESULTS AND DISCUSSION

In computer science, it is important to analyze algorithms to determine which one is the most effective for solving a particular problem. While various algorithms can be used to solve the same problem, it can be challenging to determine which one is the most efficient. One common analysis of algorithms is time complexity, which looks at how much time is required to implement an algorithm based on the size of its input [41]. In another words, it evaluates how the running time of an algorithm changes as the size of its input increases. This is usually represented using big O notation, which provides an upper limit on how quickly the running time of an algorithm will grow as the size of its input increases without bound. As expected, after implementing both approaches to design the BiCAM, the time complexity was found to be a constant value of  $O(1)$  in all cases. This means that it only takes a single clock cycle to find a match if it exists. To gain a more complete understanding of both proposed approaches, in addition to the time complexity analysis, a source utilization and power efficiency analysis was also conducted. A summary of source utilization is shown in Table 2. below. As we can see, the FF approach utilizes more logical elements, with a threefold increase, and dedicated logic registers, with a 97-fold increase. This is expected as it uses a large number of FFs as storage units and includes decoders and encoders in its design. Additionally, no memory bits are used in the FF-based approach. On the other hand, the BRAM-based approach uses memory bits, as it utilizes the factory-specified onboard memory bits (M4K), as the storage element.

**Table 2.** Source utilization of both RAM and BiCAM-based methods.

| Memory Type                   | BRAM-based BiCAM | FF-based BiCAM |
|-------------------------------|------------------|----------------|
| Total Logic Elements          | 4,958            | 14,815         |
| Dedicated Logic Registers     | 127              | 12,288         |
| Total Combinational Functions | 4,958            | 8,799          |
| Total Registers               | 127              | 12,288         |
| Total Pins                    | 290              | 364            |
| Total Memory Bits             | 4,032            | 0              |

In Figure 10, a graph of the power efficiency shows us the total thermal power dissipation by both FF and BRAM based approaches. From the graphs, we can notice that the FF-based approach consumes more power by the percentage of 3.6% as it utilizes more logical elements.



**Figure 10.** Total thermal power dissipation graph of both BiCAM and RAM.

## 8. CONCLUSION

Memory is a crucial component of computing systems that can affect the execution time of the system. It is used to store instructions that the CPU or microcontroller needs to execute. To find a desired instruction within memory, a search operation is required. The speed of search operations can be improved using various techniques, however, many of these are software-based and may be limited by their memory's hardware structure. This work presents a comparison of two approaches for designing FPGA-based BiCAM, which is a hardware-based enhancement to the search operation, as an alternative to existing software-based techniques. This study seeks to provide a more comprehensive and detailed understanding of the various types of memory that can be utilized in constructing FPGA-based BiCAMs to be used as a hardware-based enhancement to searching operation in computing systems applications. This can be accomplished by examining the different memory types that are available on the FPGA boards and how to utilize them to develop the BiCAMs. The first approach uses FFs and the second one uses BRAMs as the memory element. The BZK.SAU.FPGA assembler was used as the case study. Both approaches were used to replace the RAM that implements the search operation for the instruction sets of the assembler. They were designed and implemented in an FPGA environment. Both proposed approaches demonstrated excellent efficiency in terms of time complexity, with a constant time of  $O(1)$  for the search operation regardless of the

number or length of entries. However, the approaches showed different efficiency in terms of resources used and power dissipation due to their different hardware structures. To determine which approach is better, the specific requirements of the application and the resources available on the FPGA board should be considered. To summarize, after implementing both approaches, we found that using FPGA-based BRAM instead of conventional techniques resulted in better search speed despite higher cost. However, the size and cost of both designs increased linearly with the length of the data and the number of entries, particularly for the FF-based approach. As a result, both designs may have scalability issues, which can be a critical factor in applications where larger CAMs are required. Nevertheless, they are suitable for use in applications where large-scale CAMs are not necessary, offering a speed enhancement that can be crucial in time-sensitive applications. Therefore, they can be considered a good trade-off.

### **Author's Contribution**

Abdelkader LAZZEM, Halit ÖZTEKİN, and İhsan PEHLİVAN 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.

### **REFERENCES**



- [1] R.Schlesinger “Developing Real World Software”, Jones and Bartlett Publishers, 2009.
- [2] H. Öztekin, F.Temurtas, and A.Gulbag “BZK.SAU. FPGA10.1: A modular approach to FPGA-based microcomputer architecture design for educational purposes”, *Computer Applications in Engineering Education*, vol. 22, no. 2, pp. 272–282, 2014.
- [3] R. Karam, R. Puri, S. Ghosh and S. Bhunia “Emerging Trends in Design and Applications of Memory-Based Computing and Content-Addressable Memories”, in *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, no. 8, pp. 1311-1330, Aug. 2015,
- [4] H. Öztekin “BiCAM-based automated scoring system for digital logic circuit diagrams”. *Open Chemistry*, vol. 20, no. 1, pp. 1548-1556. Dec.2022
- [5] S. Hirasawa, H. Yamaki and M. Koibuchi “Packet Forwarding Cache of Commodity Switches for Parallel Computers”, 2021 IEEE International Conference on Cluster Computing (CLUSTER), pp. 366-376, Sep.2021,
- [6] D. Jothi, and R. Sivakumar “Design and Analysis of Power Efficient Binary Content Addressable Memory (PEBCAM) Core Cells”, *Circuits, Systems, and Signal Processing*, vol. 37, no. 6, pp. 1422–1451, 2018.
- [7] M.V. Zackriya , and H.M. Kittur “ Precharge-Free Low-Power Content-Addressable Memory”, *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 24, no. 8, pp. 2614-2621, 2016.
- [8] M. Irfan, A.I. Sanka, Z.Ullah, and R.C.C. Cheung “Reconfigurable content-addressable memory (CAM) on FPGAs: A tutorial and survey”, *Future Generation Computer Systems*, vol. 128, pp. 451-465, 2021.
- [9] Z. Ullah, K.Ilgon, and S. Baeg “ Hybrid Partitioned SRAM-Based Ternary Content Addressable Memory”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 59, pp. 2969-2979, 2012.
- [10] A. Ahmed, K. Park, and S. Baeg “Resource-Efficient SRAM-Based Ternary Content Addressable Memory ”, *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 25, pp. 1583-1587, 2017.
- [11] J.G. Nash “Distributed-Memory-Based FFT Architecture and FPGA Implementations”, *Electronics*, vol. 7, no. 7, pp. 116–145, 2018.
- [12] Z. Ullah “LH-CAM: Logic-Based Higher Performance Binary CAM Architecture on FPGA”, *IEEE Embedded Systems Letters*, vol. 9, no. 2, pp. 29–32, 2017.
- [13] Z. Ullah, K. Ilgon, and S.Baeg “Hybrid Partitioned SRAM-Based Ternary Content Addressable Memory”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 59, pp. 2969-2979, 2012.
- [14] W. Jiang “Scalable Ternary Content Addressable Memory implementation using FPGAs”, 9th ACM/IEEE Symposium on Architectures for Networking and Communications Systems, pp. 71-82. Oct. 2013.
- [15] Z. Qian, and M. Margala “Low power RAM-based hierarchical CAM on FPGA”, 2014 International Conference on Reconfigurable Computing and FPGAs (ReConFig14), pp. 1-4, Dec. 2014.
- [16] Z. Ullah, M. K. Jaiswal, and R. C. Cheung “Z-TCAM: an SRAM based architecture for TCAM”, *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 23, no. 2, pp. 402–406, 2015.
- [17] I. Ullah, Z. Ullah, and J. Lee “Efficient TCAM Design Based on Multi Pumping-Enabled Multi ported SRAM on FPGA”, *IEEE Access*, vol. 6, pp. 19940-19947, 2018.
- [18] M. Irfan, Z. Ullah, and R.C. Cheung “Zi-CAM: A Power and Resource Efficient Binary Content-Addressable Memory on FPGAs”, *Electronics*, vol. 8, no. 5, pp. 584-596, 2019.
- [19] P. Reviriego, A. Ullah, and S. Pontarelli “PR-TCAM: Efficient TCAM Emulation on Xilinx FPGAs Using Partial Reconfiguration”, *IEEE*

- Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, vol. 27, no. 8, pp. 1952-1956, 2019.
- [20] M. Irfan, Z. Ullah, and R.C. Cheung “ D-TCAM: A High-Performance Distributed RAM Based TCAM Architecture on FPGAs”, IEEE Access, vol. 7, pp. 96060-96069, 2019.
- [21] I. Ullah, Z. Ullah, U. Afzaal, and J. Lee “DURE: An Energy- and Resource-Efficient TCAM Architecture for FPGAs With Dynamic Updates”, IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, vol. 27, no. 6, pp. 1298-1307, 2019.
- [22] H. Mahmood, Z. Ullah, O.M. Mujahid, I. Ullah, and A. Hafeez “Beyond the Limits of Typical Strategies: Resources Efficient FPGA-Based TCAM”, IEEE Embedded Systems Letters, vol. 11, no. 3, pp. 89-92, 2018.
- [23] M. Irfan, and Z. Ullah “G-AETCAM: Gate-Based Area-Efficient Ternary Content-Addressable Memory on FPGA”, IEEE Access, vol. 5, pp. 20785-20790, 2017.
- [24] M. Irfan, H.E. Yantrı, Z. Ullah and R.C.C. Cheung “Comp-TCAM: An Adaptable Composite Ternary Content-Addressable Memory on FPGAs”, in IEEE Embedded Systems Letters, vol. 14, no. 2, pp. 63-66, 2022.
- [25] H. Öztekin, F. Temurtas, and A. Gulbag “BZK. SAU. FPGA10.0: Microprocessor architecture design on reconfigurable hardware as an educational tool”, 2011 IEEE Symposium on Computers & Informatics, pp. 385-389, Mar. 2010.
- [26] H. Öztekin, H. Kişioğlu, A. Gülbağ, F. Temurtas “The design and implementation of a 16 bit floating point arithmetic unit using BZK.SAU.FPGA microcomputer assembly language”, Computer Applications in Engineering Education. vol. 20, no. 6, pp. 1834–1856, 2022.
- [27] H. Öztekin, A. Gülbağ, and F. Temurtas “ Assembler Design for BZK.SAU. FPGA Micro Computer Architecture”, Electronic Letters on Science and Engineering, vol. 13, no. 1, pp. 1-9, 2017.
- [28] H. Öztekin “ Embedded Operating System Design on Configurable Modular Hardware for Educational Purposes”, Ph.D. Thesis, Sakarya University. Institute of Science and Technology, Sakarya, 2012.
- [29] F. Temurtas, and A. Gulbag “EducationalMicrocomputer Architecture and Embedded Operating System Design on Remote Accessible Configurable Hardware”, Proj. No. 110E069 , TÜBI TAK-EEEAG, 2012.
- [30] A. Boutros, and V. Betz “FPGA Architecture: Principles and Progression”, IEEE Circuits and Systems Magazine, vol. 21, no. 2, pp. 4-29, 2021.
- [31] S. Trimberger “FPGA Technology: Past, Present, and Future”, ESSCIRC '95: Twenty-first European Solid-State Circuits Conference, pp. 12-15, Sept. 1995.
- [32] G. Kasivinayagam, R. Skanda, A.G. Burli, S. Jadon, and R. Sidhu “Hardware Description Language Enhancements for High-Level Synthesis of Hardware Accelerators”, Advances in Computing and Data Sciences, vol. 1613, pp. 1-12, 2022.
- [33] S. Gandhare, and B. Karthikeyan “Survey on FPGA Architecture and Recent Applications”, 2019 International Conference on Vision Towards Emerging Trends in Communication and Networking (ViTECoN), pp. 1-4, Mar. 2019.
- [34] Xilinx “Binary CAM Search LogiCORE IP Product Guide (PG317) ”, Retrieved from <https://docs.xilinx.com/r/en-US/pg317-bcam/Introduction>, 2022.
- [35] Xilinx “Ternary CAM Search LogiCORE IP Product Guide (PG318) ”, Retrieved from <https://docs.xilinx.com/r/2.2-English/pg318-tcam/Introduction>, 2021.
- [36] B. MacCleery, Z. Kassas “New Mechatronics Development Techniques for FPGA-Based Control and Simulation of Electromechanical Systems”, IFAC Proceedings, vol. 41, no.2, pp. 4434-4439,2008.
- [37] G. Dhanabalan, V. Karutharaja and M. Sakthimohan “Realization of Resource Efficient Block RAM Based Eight Bit Adder in FPGA”, 2019 IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS), pp. 1-5, April 2019.
- [38] M.M. Mano “Computer System Architecture”, Prentice Hall, 1993.
- [39] M. Sipser “Introduction to the Theory of Computation”, Cengage Learning , 2012 .



## Haploid ve Diploid Mısırların Aktif Öğrenme Yaklaşımı ile Sınıflandırılması

### Active Learning-Based Classification of Haploid and Diploid Maize Seeds

<sup>1</sup>Ali GÜNEŞ , <sup>2</sup>Emrah DÖNMEZ 

<sup>1</sup>Limunis Information Technologies, 17 Green Lanes, N169BS, London / United Kingdom

<sup>2</sup>Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, 10200, Bandırma/Balıkesir, Türkiye

<sup>1</sup>aligunes@limunis.com, <sup>2</sup>emrahdonmez@bandirma.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 20 January 2023  
Accepted : 12 April 2023

##### Keywords:

Active Learning, Computer Assisted Agriculture, Maize Seed Classification, Support Vector Machine

#### ABSTRACT

Among agricultural products, the maize plant is shown as the main food source. The breeding process is one of the most important issues for maize plants. In breeding processes, determining the haploid and diploid types of seeds is of great importance. Traditionally, expert analysis is used to detection of haploid and diploid corn types in food commodities. Expert analysis is time-consuming, subjective, and expensive. Computer vision-based solutions are very reasonable requirements agricultural applications. This study presents a novel imaging system that utilizes active learning to classify haploid and diploid corns. Unlike traditional techniques, the system utilizes an active learning method to identify and label informative samples for the classifier. As a result, the proposed system allows for training a support vector classifier with improved accuracy using a smaller sample size.

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

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 20 Ocak 2023  
Kabul : 12 Nisan 2023

##### Anahtar Kelimeler:

Aktif Öğrenme, Bilgisayar Destekli Tarım, Destek Vektör Makinesi, Mısır Tohumu Sınıflandırma

#### ÖZET

Tarım ürünleri arasında mısır bitkisi başlıca besin kaynakları içerisinde gösterilmektedir. Mısır bitkilerinde karşılaşılan önemli konulardan birisi ıslah sürecidir. Islah çalışmalarında tohumların haploid ve diploid tiplerinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Geleneksel olarak, gıda ürünlerinde haploid ve diploid mısır türlerinin saptanması için uzman analizi kullanılır. Uzman analizi, zaman alıcı, subjektif ve pahalıdır. Bilgisayarlı görü tabanlı çözümler, tarımsal uygulamalar için oldukça makul gereksinimlerdir. Bu çalışmada, haploid ve diploid mısırların aktif öğrenme kullanılarak saptanması için bir görüntüleme sistemi önerilmiştir. Geleneksel yaklaşımların aksine, sınıflandırıcı ile ilgili örneklerin algılanması ve etiketlenmesi için aktif bir öğrenme şeması kullanılır. Önerilen sistem kullanılarak, daha az sayıda örnekle daha yüksek doğruluğa sahip bir destek vektör sınıflandırıcı eğitilmiştir.

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

## 1. GİRİŞ

Mısır bitkisi dünya üzerinde kullanılan temel besin kaynakları arasında oldukça önemli bir yere sahiptir. Mısırın nitelik ve nicelik olarak yetiştirilmesinde tohumların saf olarak kullanılması organik ve sağlıklı mısır yetiştiriciliği için oldukça önemli bir husustur. Tohumların saflaştırılması amacıyla öncelikle mısır tohumlarının haploid ve diploid olarak ayrıştırılması gerekmektedir. Günümüzde mısır tohumlarının ayrıştırılma işlemi manuel olarak zirai tarım uzmanları tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu işlemin elle yapılıyor olması oldukça zaman alıcı, masraflı, subjektif ve emek yoğun bir süreç gerektirmektedir. Diğer taraftan elle yapılıyor olsa dahi haploid ve diploid mısır tohumu ayrıştırmasında hatalı kararlar verilebilmektedir. Bu sorunların üstesinden gelebilmek amacıyla bilgisayar destekli tarım sistemleri geliştirilmektedir.

Son zamanlarda bilgisayar destekli tarım sistemleri üzerine kayda değer sayıda çalışma gerçekleştirilmiş ve günümüzde de bu kapsamda çalışmalar yapılmaya devam etmektedir. Bilgisayar destekli çözümler, tarım maliyetlerin düşürülmesi, hızlı sonuç alınması, hataların asgari seviyeye indirgenmesi, iş yükünün azaltılması ve güvenliğin artırılması gibi hususlarda oldukça önemli avantajlar sağlamaktadır. Bilgisayar destekli tarım sistemlerinin daha da yaygınlaştırılmasıyla insanoğlunun özellikle tarımda zayıf kalınan bölgeler başta olmak üzere tarımsal ürünlere olan ihtiyaçların yeterli seviyede karşılanması amaçlanmaktadır. Diğer bir husus olarak bu sistemlerin yaygınlaşması ile organik tarım ürünü üretiminde de hızlanmanın sağlanacağı ve daha sağlıklı ürünlerin daha düşük maliyetlerle üretileceği öngörülmektedir. Bilgisayar destekli tarım sistemlerinin haploid ve diploid mısır tohumlarının ayrıştırılmasında da kullanılabilmesi ve bu yolla tohum saflaştırma süreçlerine katkı sağlanacağı düşünülmektedir. Bu amaçla, özellikle son zamanlarda mısır tohumu ayrıştırılması üzerine önemli katkılar sağlayan çalışmalar yapılmıştır.

Gerçekleştirilen çalışmalarda haploid ve diploid mısır tohumu sınıflandırılması çalışmalarında başlarda DNA analizi, tohum yağı analizi, bitkinin yaprak, kök vb. bileşenlerinin biyokimyasal olarak analizi gibi bitki içerik veya özelliklerine dayalı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Daha sonraları ise mısır tohum görüntülerinin yakın kızılötesi, çoklu/hiper spektral ve floresan görüntüleme gibi özel görüntüleme donanımlarıyla elde edilmesi ve tohumların bu görüntülere göre sınıflandırılmasına yönelik çalışmalar yürütülmüştür. Mevcut güncel çalışmalarda ise artık makine öğrenmesi yöntemleri ile mısır tohumlarına ait özelliklerin analiz edilmesiyle haploid ve diploid ayrımı yapılmaya başlanmıştır. Görüntü tabanlı olarak gerçekleştirilen çalışmaların çoğunda mısır tohumu görüntüsü üzerindeki embriyo bölgesinde yer alan ve R1-nj renklenmesi olarak isimlendirilen ayırt edici özellik kullanılarak haploid ve diploid mısır tohumlarının sınıflandırılması işlemi gerçekleştirilmiştir. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda göze çarpan kayda değer bir diğer durum ise özel görüntüleme donanımları kullanarak mısır tohumlarına ait özneliklerin çıkarılması yerine sadece basit bir kamera ile de mısır görüntülerine ait özneliklerin elde edilmesidir. Böylece özel donanımlara olan ihtiyaç azaltılarak daha ucuz maliyetli mısır tohumu sınıflandırma sistemlerinin geliştirilmesine olanak sağlanmaktadır.

Elde edilen özneliklerle sınıflandırma işlemi bilgisayar destekli sistemlerle gerçekleştirmek için makine öğrenmesi algoritmaları geliştirilmiştir. Makine öğrenmesi yöntemleri dijital verilerin sınıflandırılması ve regresyon analizi gibi işlemler için kullanılmaktadır. Makine öğrenmesi yöntemleri üzerinde çalışılacak verilerin yapısına göre seçilir. Verilerin elde edilmesinden sonra tüm veriler üzerindeki ön-tanımlı veya ön işlem ile belirlenmiş özneliklere ait değerler hesaplanır. Bu değerler kararlı bir aralığa oturma kadar özneliklerin güncellenmesine devam edilir. Elde edilen kararlı öznelik değerlerine göre sisteme gelen yeni verinin hangi sınıfa ait olduğu belirlenir. Gelen verilerin doğru bir şekilde sınıflandırılması ise sınıflandırıcı yönteminin başarımını belirler. Bu kapsamda tarım ürünlerine ait veriler de makine öğrenmesi yöntemleriyle sınıflandırılabilir. Mısır tohumlarına ait görüntüler üzerinde elde edilen öznelik değerlerine bağlı olarak haploid ve diploid mısır tohumu ayrıştırılması işlemi gerçekleştirilebilir.

Bu çalışmada, mısır tohumlarının renk moment öznelikleri kullanılarak aktif öğrenme tabanlı yüksek doğruluklu bir sınıflandırıcı önerilmiştir. Sınıflandırıcı olarak Destek Vektör Makinesi kullanılmıştır. Geleneksel sınıflandırma yaklaşımlarından farklı olarak önerilen aktif öğrenme yönteminde minimum sayıda ve en ayırt edici bilgileri taşıyan örnekler ile sınıflandırıcı eğitilmiştir. Böylece en yüksek sınıflandırma başarımının, en az sayıda örneğin etiketlenerek elde edilebilmesine olanak tanınır. Bu makalenin ikinci bölümünde ilişkili çalışmalar sunulmuştur. Çalışmada kullanılan veri-kümesi, öznelik çıkarma, öznelik seçme, sınıflandırıcı ve aktif öğrenme stratejisi üçüncü bölümde sunulmuştur. Deneysel sonuçlar ve elde edilen gözlemler dördüncü bölümde verilmiştir. Beşinci bölümde ise tartışma ve sonuca değinilmiş ve gelecek çalışmalardan söz edilmiştir.

## 2. İLİŞKİLİ ÇALIŞMALAR

Boote vd. [1], floresan mikro spektroskopisi ve görüntüleme yöntemlerinin bir kombinasyonu ile r1-nj renk belirteci kullanarak mısır tohumlarındaki kendilenmiş haploid farklılığını tespit eden yeni bir floresan tabanlı yöntem önerdiler. Yedi farklı kendilenmiş haploid hatları üzerindeki denemelerde %80 ve beş farklı kendilenmiş haploid hatları üzerindeki denemelerde %90 başarıma ulaştılar. Fuente vd. [2], katlanmış haploid'lerin mısır ıslah programlarındaki önemine değindiler. Çalışmada, R1-nj renk belirteci ile haploid mısır tohumlarının manuel tanımlanmasının emek-yoğun ve zaman alıcı bir süreç olduğu ifade edildi. Önerdikleri yaklaşımda altı farklı kendilenmiş hat ana haploid indükleyici ile çaprazlandı. Her bir hat için tohum örneği manuel olarak sıralandı. VideometerLab 3 adında harici bir yazılım kullanarak spektral görüntüleme yöntemini haploid ve melez tohumları

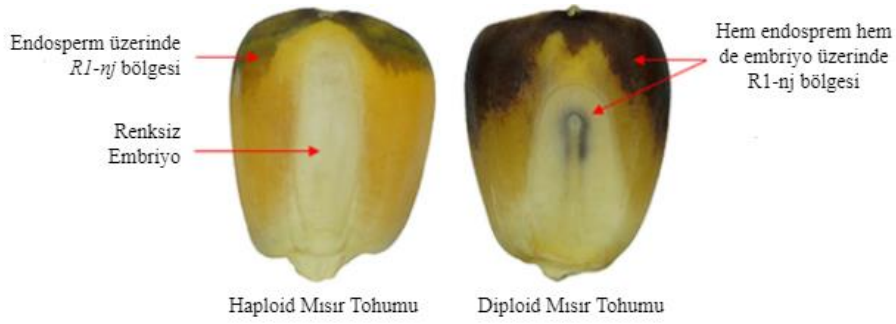


ayrıt etmek için kullandılar. Çalışmada bu yaklaşımla %50 üzerinde bir doğruluğun sağlanmasının mümkün olduğu ifade edildi. Lin vd. [3], mısır ıslahında haploid tohumların tanımlanmasının oldukça önemli olduğunu söylediler. Çalışmada, yakın-Kızılötesi spektroskopide bulunan yaygın aktarım teknolojisi ile NIR spectrum öznelikleri kullanılarak melez haploidlerin tespitinde tanıma oranını düşüren gereksiz öznelikler de olduğu ifade edildi. Zero-phase bileşen analizi, partial least squares regression ve back propagation neural network yöntemleri kullanarak tohum spektrum özelliklerinin düşük boyutlu ve tek tip uzayını tasarlamak için toplanan spektrumun iyileştirilmesini sağladılar. Altuntaş vd. [4], in vivo maternal haploid tekniğinde yapılan haploid seçiminin çok önemli olduğunu ancak bu seçimin elle yapılıyor olmasının zaman alıcı olduğu ve başarımı düşürdüğünü ifade etmektedirler. Yaptıkları çalışmada haploid ve diploid görüntülerini orijinal görüntüden bölütlediler. Bölütlenen imge üzerinde baş farklı öznelik çıkarıldı. Bu öznelikleri de her bir veriye ait öznelik vektörünün oluşturularak SVM yöntemi ile sınıflandırılmasında kullandılar. Çalışmalarında haploid tanıma oranının %94.25 ve diploid tanıma oranının %77.91 olduğunu ifade ettiler. Wang vd. [5], hızlı ve doğru haploid çekirdeği tanıma yönteminin haploid ıslah verimliliğini hızlandırmada büyük öneme sahip olduğunu söylediler. Mevcut otomatikleştirilmiş haploid tanıma yaklaşımları sınırlılıklarının üstesinden gelmek ve daha doğru haploid görüntüleme sağlamak için yakın-spektral görüntüleme teknolojisi kullanarak haploid maize çekirdeğini tanılamada daha hızlı ve doğru bir yöntemin varlığını araştırdılar. Çalışma sonucunda haploid maize tanımda hiperspektral görüntüleme teknolojisinin elverişli olduğu söylendi. Yu vd. [6], yakın-kızılötesi spektroskopi teknolojisinin haploid tohumları melez tohumlardan ayırmak için yıkıcı olmayan, hızlı ve düşük maliyetli olmak gibi avantajları olduğunu söylediler. Diğer taraftan, ışık, sıcaklık, nem, yakın-kızılötesi yoğunluğu, tohum aktivitesinin enstrüman ve dinamik değişimi gibi parametreler yüzünden maize tohumlarını yakın-kızılötesi spektrası yüksek boyutlu non-lineer karakteristikler gösterdiği ifade edilmektedir. Çalışmada, haploid mısır tohumu tanıma görevi için doğrusal olmayan bir özellik analizi yöntemi önerildi. Altuntaş vd. [7], katlanmış haploid kullanımının mısır ıslahında verimliliğin artırılmasını sağladığını ifade ettiler. Haploid mısır tohumlarının belirlenmesinde genellikle zirai uzmanlar elle tayin yapmaktadırlar. Bu süreç ise emek-yoğun ve zaman alıcı bir görevdir. Toplamda 3000 adet veri üzerinde yürüttükleri çalışmada transfer öğrenme ile CNN modellerine ait eğitim parametrelerini güncellemiş ve VGG-19 CNN modeli üzerinde %94.22 oranında başarıya ulaşmışlardır. Dönmez [8], AlexNet CNN modeline toplamda 3000 adet etiketli mısır görüntüsünü girdi olarak verilerek modelin tam bağlı 'FC6', 'FC7' ve 'FC8' katmanlarından öznelik çıkarımı yapılmıştır. Çalışmada CNN modelinin son katmanındaki SoftMax sınıflandırıcısı yerine SVM sınıflandırıcısı kullanılmış ve %89.5 doğruluk oranı elde edilmiştir. Dönmez [9], beş farklı CNN modelini öznelik çıkarıcı olarak kullandı. Elde edilen öznelik vektörleri SVM, KNN ve DT (Decision Tree) sınıflandırıcılarıyla sınıflandırılmıştır. Çalışmada ResNet-50 CNN modeli ile SVM sınıflandırıcı kombinasyonunun %91,4 düzeyinde başarımlı sağladığı rapor edilmiştir. Dönmez [10], altı farklı güncel ön-eğitilmiş CNN mimarisini öznelik çıkarıcı olarak kullandı. Çıkarılan öznelik vektörleri arasından MRMR öznelik seçim algoritması kullanılarak 100 adet öznelik seçimi yapıldı. Seçilen öznelikler daha sonra farklı kombinasyonlarda kaynaştırılarak DT, KNN ve SVM sınıflandırıcılarını eğitmek ve test etmek için kullanıldı. Çalışmada literatürdeki pahalı ekipman ve çıktıları analizi zaman alan çalışmaları da karşılaştırarak, geliştirilen yöntemin %96,74 oranında başarımlı ulaştığı ifade edildi. Güneş vd. [11], hiperspektral görüntüleme ile elde edilmiş aflatoksinli incir görüntülerini aktif öğrenme yaklaşımı ile yüksek başarımlı sınıflandırmışlardır. Bu çalışmada minimum sayıda etiketli örnekle, performanslı bir sınıflandırıcı elde edilmiştir. Kalkan vd. [12], bir başka çalışmada aflatoksin ve küf bulaşık incir örneklerini hiperspektral görüntüleme ve geleneksel sınıflandırıcılar ile tespit etmişlerdir. Literatürdeki yöntemlerin çoğu incelendiğinde çoğunlukla maliyeti yüksek tohum analizi sistemlerinin geliştirildiği görülecektir. Kullanılan DNA, yağ analizi vb. moleküler seviyedeki yöntemler veya IR, multi/hiper spektral ve floresan görüntüleme vb. görüntüleme yöntemleri maliyeti yüksek yöntemlerdir. Bu çalışmada literatürde var olan çalışmalardan da ilham alarak, haploid ve diploid mısır tohumlarının sınıflandırma analizi için aktif öğrenme modeli önerilmiştir. Önerilen model maliyet odaklı ve yüksek performanslı bir yöntem olarak literatürdeki çalışmalardan ayrılmaktadır. Geliştirilen yöntemle mısır tohumlarının sınıflandırılması için gelecek vaat eden sonuçlar ortaya koyulmuştur.

### 3. MATERYAL VE METOTLAR

#### 3.1. Veri Kümesi

Bu çalışmada önerilen yöntemler, uygun laboratuvar koşullarında elde edilen mısır tanelerine ait görüntüler üzerinde test edilmiştir. Veri kümesine ait mısır taneleri Sakarya bölgesinden toplanmış olup, Sakarya Mısır Araştırma Enstitüsündeki konu uzmanlarınca R1-nj renk özneliklerine göre manuel olarak etiketlenmiştir (Şekil 1). Etiketlenen bu veriler daha sonra konvansiyel görüntüleme cihazları kullanılarak dijital ortama aktarılmış ve bu imgeler ön işlemlerden geçirilmiştir [7]. Toplamda 1230 haploid ve 1770 diploid mısır tohumu görüntüsü bulunan veri kümesinden rastgele seçilen 1200 haploid ve 1200 diploid veri kullanılmıştır. Burada amaç farklı sınıflara ait veri sayıları arasında dengeli bir dağılım sağlamaktır.



Şekil 1. R1-nj renk işaretleyicisine göre haploid ve diploid mısır tohumlarının görsel sınıflandırılması.

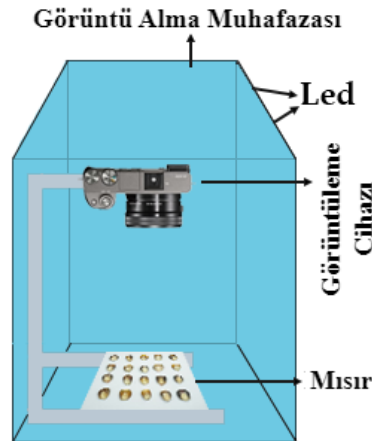
Şekil 2’de veri kümesinden rastgele biçimde seçilmiş diploid (üstte) ve haploid (altta) mısır tohumlarına ait imgeler verilmiştir.



Şekil 2. Örnek mısır tohumu görüntüleri, diploid (üst), haploid (alt)

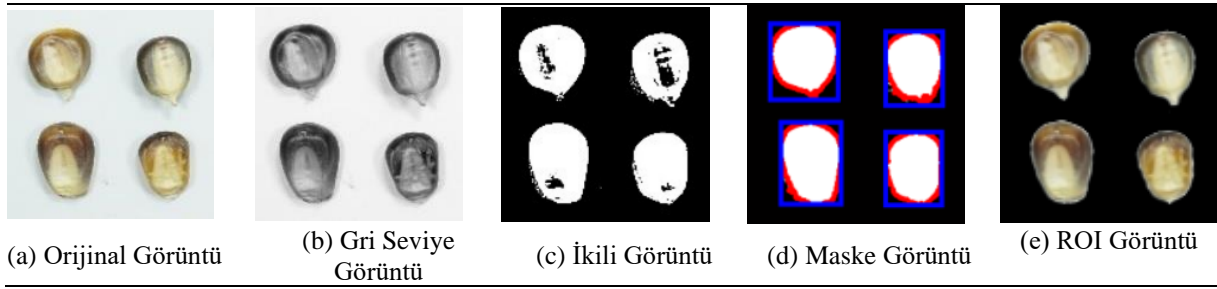
### 3.2. Görüntüleme Sistemi ve Önışlemler

Bu çalışmada önerilen yöntemler, uygun laboratuvar koşullarında elde edilen mısır tanelerine ait görüntüler üzerinde test edilmiştir. Veri kümesine ait mısır taneleri Sakarya bölgesinden toplanmış olup, Sakarya Mısır Araştırma Enstitüsündeki konu uzmanlarınca R1-nj renk özneliklerine göre manuel olarak etiketlenmiştir. Toplamda 2400 adet mısır tohumu görüntüsünden oluşan veri kümesinde 1200 adet haploid ve 1200 adet diploid tipte mısır tohumu görüntüsü bulunmaktadır. Mısır tanelerine ait görüntülerin alınması, laboratuvarında kurulan görüntüleme sistemi (Şekil 3) yardımıyla yapılmıştır.



Şekil 3. Mısır tanelerinin görüntülenmesi için kurulan görüntüleme sistemi.

Kurulan görüntüleme sisteminde kamera olarak SONY ILCE-6000 dijital görüntüleme cihazı kullanılmıştır. Işık kaynağı olarak görüntüleme sisteminin tavanına yerleştirilen LED ışık kaynakları kullanılmıştır. Mısır taneleri, görüntü düzleminde birbirlerine temas etmeyecek şekilde ve her görüntüde 20 mısır tanesi olacak şekilde görüntülenmiştir. Çekim sürecinde fotoğraf makinası M modunda, 1/125 sn enstantene, 200 ISO, diyafram açıklığı f/7,1, odak uzaklığı 24mm, kamera uzaklığı 18 cm ve 4240 x 2832 çözünürlük ayarlarına kurulmuştur [4]. Toplu halde yirmi adetli kümelerden oluşan mısır tanelerinin bulunduğu görüntüler bölütlenerek tekil mısır tane görüntüleri elde edilmiştir. Elde edilen her bir mısır tanesi görüntüsü RGB renk uzayındadır. Elde edilen görüntüler üzerindeki mısır bölgesini (ROI) tespit etmek ve görüntüler üzerindeki gürültüleri temizlemek amacıyla maskeleme işlemi uygulanmıştır. Bu amaçla her bir mısır görüntüsü eşiklenerek ilgili maske görüntüleri oluşturulmuştur (Şekil 4).



Şekil 4. Haploid ve diploid mısır tanelerine ait maske ve ROI görüntüleri.

Elde edilen maske görüntüleri mısır görüntüleri ile çarpılarak her bir mısır tanesine ait ROI görüntü elde edilmiştir (Şekil 4-e).

### 3.3. Öznitelik Çıkarma ve Seçme

Günümüzde yapılan sınıflandırma temelli çalışmalarda sınıflandırma başarımını arttıran faktörlerden birisi de ayırtedici bilgiler taşıyan özniteliklerin mümkün olduğunca fazla olmasıdır. Ancak buna bağlı olarak öznitelik sayısı ile örnek sayısı arasındaki ilinti ve sınıflandırıcı karmaşıklığı sınıflandırıcı performansını etkileyen temel unsurlardır. Sınıflandırma karmaşıklığının fazla olması hafıza gereksinimine olan ihtiyacı artırmakla birlikte sınıflandırıcı hızını da düşürmektedir. İdeal bir sınıflandırıcı sistemi için temel gereklilik, ayırt edici bilgiler taşıyan yeterli sayıda öznitelik kümesinin belirlenebilmesidir. Sınıflandırma problemlerinde boyut indirgeme stratejileri temel olarak öznitelik çıkarma ve seçme başlıkları altında toplanmıştır.

Boyut indirgeme yaklaşımlarından birisi olan özniteliklerin belirlenmesi  $X$  boyutlu bir örnekler kümesinde yer alan bir öznitelik grubunun doğrusal olan veya olmayan algoritmalar yardımıyla yeni bir  $Y$  boyutlu öznitelik grubuna dönüştürülmesidir. Çalışılan probleme bağlı olarak seçilen öznitelik çıkarma yaklaşımları değişebilmektedir. Elde edilen yeni  $Y$  boyutlu öznitelik kümesinde halen gereksiz bilgiler taşıyan öznitelikler yer alabilir. Bu nedenle  $Y$  boyutlu öznitelik kümesi içerisinde veriye ve probleme bağlı olarak çeşitli öznitelik seçme yöntemleri kullanılarak daha küçük boyutlu ( $Y > Z$ ) yeni bir  $Z$  öznitelik kümesi elde edilir. Boyut indirgeme problemlerinde önemli sorulardan birisi de en uygun öznitelik sayısının nasıl belirleneceğidir. Bu konuda herhangi bir kural olmamakla birlikte sistemi geliştiren kişi tarafından problemin yapısına uygun olarak deneysel olarak belirlenir.

Özellik seçme algoritmalarının arkasındaki motivasyon, sorunla en alakalı özelliklerin bir alt kümesini otomatik olarak seçmektir. Özellik seçiminin amacı iki yönlüdür: Alakasız özellikleri veya gürültüyü kaldırarak hesaplama verimliliğini artırmak ve modelin genelleme hatasını azaltmaktır. En temel öznitelik seçme algoritması, sınıflandırma hata oranını en aza indiren bularak özniteliklerin olası her bir alt-öznitelik kümesini test etmektir. Bu şekilde olası tüm öznitelik kümeleri üretilerek değerlendirme ölçütü sağlanana kadar test edilir. Değerlendirme ölçütünün seçimi, algoritmayı büyük ölçüde etkiler ve özellik seçme algoritmalarının üç ana kategorisini (sarmalayıcılar, filtreler ve gömülü sistemler) birbirinden ayıran da bu değerlendirme ölçüleridir.

Ardışık öznitelik seçim algoritmaları, ilk  $d$ -boyutlu öznitelik uzayını,  $k < d$  olan bir  $k$ -boyutlu öznitelik alt uzayına indirgemek için kullanılan bir sıralı arama algoritmaları ailesidir. Düşük karmaşıklığa sahip, başarılı sonuçlar veren ve kolay uygulanabilen yöntemlerdir. Sıralı arama yöntemleri (Sequential Forward Selection, Sequential Backward Selection) sınıflandırıcı performansına bağlı olarak,  $k$  boyutta bir öznitelik alt kümesine ulaşılan kadar her seferinde bir özniteliği kaldırır veya ekler. Kayan (floating) varyantlar SFFS ve SBFS ise daha basit SFS ve SBS algoritmalarının uzantıları olarak kabul edilebilir. Kayan algoritmalar, dahil edildikleri (veya hariç tutuldukları) zaman öznitelikleri kaldırmak için ek bir silme veya ekleme adımına sahiptir, böylece daha fazla sayıda öznitelik alt-kümesi kombinasyonu örneklenebilir. Bu adımın koşullu olduğunu ve yalnızca ortaya çıkan öznitelik alt-kümesinin, belirli bir özneliğin çıkarılmasından (veya eklenmesinden) sonra kriter işlevi tarafından "daha iyi" olarak değerlendirilmesi durumunda gerçekleşir [13]. SFFS yöntemine ait algoritma adımları özetlenirse;

SFFS öznitelik seçim yöntemine ait algoritma adımları aşağıdaki gibi özetlenebilir;

#### Algoritma 1. Sıralı İleri Kayan Arama Algoritma Adımları

1.  $Y_0 = \{\emptyset\}$  öznitelik içermeyen küme ile başla
2. En ayırt edici özniteliği ekle  

$$x^+ = \operatorname{argmax}_{x \in Y_k} [J(Y_k + x)] \quad Y_k = Y_k + x^+; k = k + 1$$
3. En zayıf özniteliği çıkar  $x^- = \operatorname{argmax}_{x \in Y_k} [J(Y_k - x)]$
4. Eğer  $J(Y_k - x^-) > J(Y_k)$   $Y_{k+1} = Y_k - x^-; k = k + 1$

Üçüncü adıma git

Değilse

İkinci adıma git

Bir mısır tanesinin haploid veya diploid olduğunu belirleyen ROI embriyo ve endosperm bölgesi mısır tanelerinde boyut, şekil veya dokusal açıdan bir değişikliğe sebep olmamaktadır. Ancak mısır tanelerinin embriyo ve endosperm bölgelerinde mısırın haploid veya diploid tipte olmasına bağlı olarak renk değişimi gözlemlenebilmektedir. Bu nedenle, haploid bir mısır tanesini diploid bir mısır tanesinden ayıran en güçlü öznelik embriyo ve endosperm bölgesindeki R1-nj renklenmesidir. Bu çalışmada, mısır tanelerine ait ayırt edici öznelik olarak embriyo ve endosperm bölgelerindeki renk momentleri kullanılmıştır. Haploid ve diploid mısır sınıflarını ayırt edebilmek için ayrı ayrı Kırmızı (Red), Yeşil (Green), Mavi (Blue) renk kanallarının ortalama renk yoğunlukları, her bir renk kanalına ait standart sapma değerleri, çarpıklık ve kurtosis değerleri öznelik olarak kullanılmıştır. Bu yolla, haploid ve diploid mısır görüntülerinin ayrıştırılması için bir mısır tanesine ait toplam 12 öznelik elde edilmiştir.

Ortalama (5), standart sapma (6), çarpıklık (7) ve kurtosis (8) değerleri ilk dört dereceden renk momentleri olarak renkli bir mısır görüntüsünün karakteristiğini temsil eden ayırt edici özneliklerdir.

$$\mu = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n piksel_{ij} \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (piksel_{ij} - \mu)^2} \quad (6)$$

$$s = \sqrt[3]{\frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (piksel_{ij} - \mu)^3} \quad (7)$$

$$k = \sqrt[k]{\frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (piksel_{ij} - \mu)^4} \quad (8)$$

Denklem 5, 6, 7 ve 8 'de  $\sigma$  standart sapmayı,  $\mu$  ortalamayı,  $k$  kurtosisi ve  $s$  ise çarpıklığı ifade etmektedir.  $m \times n$  çözünürlükteki bir görüntüde  $piksel_{ij}$   $i$ . satır ve  $j$ . sütundaki ilgili renk kanalında karşılık gelen piksel değerini ifade etmektedir.

Veri kümesinde yer alan tüm haploid ve diploid mısır örnekleri göz önüne alındığında 2400 x 12 ölçekli bir matris elde edilmiştir. Elde edilen 12 adet öznelik, en ayırt edici bilgiler taşıyandan daha az bilgi taşıyana doğru Sequential Floating Forward Selection (SFFS) yöntemiyle sıralanmıştır.

### 3.4. Aktif Öğrenme (AÖ)

Aktif öğrenme, sınıflandırıcı eğitimi için gerekli olan eğitim örneklerinden en ayırt edici öznelikleri elde edebilmek amacıyla geliştirilen özelleştirilmiş bir öğrenme sürecidir. Aktif öğrenme sisteminin temel amacı, çok sayıda sınıflandırıcıya karşı seçilen girdi sorgularını gerçekleştirmektir. Rastgele örnekleme ile karşılaştırıldığında, aktif öğrenmeyi (AÖ) kullanan örnek seçimi daha ayırt edicidir. Genel bir aktif öğrenme modeli beş birim kullanılarak modellenir (G, Q, S, T, U). G, etiketli eğitim seti T üzerinde eğitilen denetimli bir sınıflandırıcıdır. Q, etiketlenmemiş örneklerden oluşan bir U havuzundan en bilgilendirici etiketlenmemiş örnekleri seçmek için kullanılan bir sorgulama işlevidir. S, herhangi bir etiketlenmemiş U örneğine gerçek sınıf etiketi atayabilen bir gözetmendir. AÖ işlemi, S süpervizörünün her yinelemede Q sorgu fonksiyonu tarafından seçilen en bilgilendirici örnekleri yinelemeli olarak etiketleyerek sistemle etkileşime girdiği yinelemeli bir süreçtir. İlk aşamada, sınıflandırıcı G'nin ilk eğitimi için birkaç etiketli numunedan oluşan bir başlangıç eğitim seti T gereklidir.

AL yaklaşımı ile yapılan sınıflandırma işlemlerinde yüksek doğruluklu sınıflandırma oranları korunurken hatalı sınıflandırma oranları azaltılır. Sınıflandırma problemlerinde yaygın olarak kullanılan temel bir Aktif Öğrenme algoritmasına ait algoritma adımları aşağıdaki gibidir;

---

#### Algoritma 2. Temel Aktif Öğrenme Algoritması

---

1.  $G$  sınıflandırıcısı  $T$  eğitim kümesi kullanarak eğit.
2. Etiketsiz  $U$  örnekler havuzunu  $G$  sınıflandırıcısı kullanarak sınıflandır.

#### Döngü:

3. Sorgu fonksiyonu  $Q$  aracılığı ile etiketsiz örnekler  $U$  havuzundan seçilir.
4.  $U$  havuzundan seçilen örneklere  $S$  uzmanı ile etiket atanır.
5. Dördüncü aşamada eğitim kümesi  $T$  'ye etiketlenen örnekler eklenir.
6.  $G$  sınıflandırıcısı yeniden eğitilir.

**Sonlandır:** Ön-tanımlı ölçütler sağlandığında algoritmada çalışması durdurulur.

---

S uzman yorumu mısır tanelerinin sınıflandırılmasında başlangıç eğitim kümesi T için kullanılacak etiketli örnekler ve sorgu fonksiyonu Q ile seçilen örneklerin etiketlenmesi için kullanılmaktadır. AÖ algoritmaları, literatürde iki kategoriye ayrılır: örneklerin belirsizliği (uncertainty) [14] ve komite temelli sorulama (query by committee) yaklaşımları [15]. Belirsizlik temelli AÖ yaklaşımları, sınıflandırıcının en çok zorlandığı, belirsizliği en yüksek olan etiketsiz örnekleri seçmeye odaklanır. Bu örnekler, sınıflandırıcının belirsiz olduğu ve daha fazla bilgiye ihtiyacı olduğu örneklerdir. Bu nedenle, belirsizlik temelli yaklaşımlar, örneklerin belirsizliği ölçütünü kullanarak etiketleme işlemi için en iyi örnekleri seçmeye çalışır. Belirsizlik ölçütü, bir sınıflandırıcının ne kadar güvenilir olduğunu ölçmek için kullanılan bir terimdir. Bu ölçüt, sınıflandırıcının doğruluk veya hata oranı gibi değişkenlere dayanarak hesaplanabilir. Sınıflandırıcıya bağlı olarak, belirsizlik ölçütü farklı yöntemlerle ifade edilebilir. Örneğin, bir lojistik regresyon sınıflandırıcısı için belirsizlik ölçütü olasılık değerleri arasındaki fark olarak hesaplanabilirken, bir destek vektör makinesi için belirsizlik ölçütü uzaklık değerleri olarak ifade edilebilir. Örneğin, Bayes sınıflandırıcı kullanıldığında belirsizlik ölçütü olarak sınıflar temelinde hesaplanan sonrasal olasılıklar kullanılabilir. Ayrıca, diğer sınıflandırıcılar için entropi, çoklu sınıflandırma, güven aralığı gibi farklı belirsizlik ölçütleri kullanılabilir. Belirsizlik ölçütünün seçimi, sınıflandırıcının özelliklerine ve uygulamanın amacına göre değişebilir. Lewis ve Gale [14], yaptıkları çalışmada, Bayes sınıflandırıcı kullanarak hesaplanan sonrasal olasılıklarını etiketsiz örneklerin belirsizlik ölçütü olarak kullanmışlardır. Bu yöntem, etiketsiz örneklerin sınıflandırılması için en uygun olanların seçilmesini sağlar. Örneğin, iki sınıflı bir problemde henüz sınıflandırma yapılmamış bir etiketsiz örneğin belirsiz kategorisine girebilmesi için örneğin sonrasal olasılık değerlerinin sınıflar temelinde 0.5'e oldukça yakın olması gerekir. Lewis ve Gale, bu ölçütü kullanarak etiketsiz örneklerin belirsizliğini ölçerek, en iyi örnekleri seçmeye çalışmışlardır.

İki sınıflı (binary) bir problem ele alındığında, bir etiketsiz örneğin belirsizlik durumuna takılması için sonrasal olasılık değerlerinin sınıflar temelinde yaklaşık bir hesapla 0.5 olması gerekmektedir. Bu, sınıflandırıcının verilen örnek için her iki sınıf için de benzer olasılık değerleri verdiği anlamına gelir. Bu durumda, sınıflandırıcının verilen örnek için bir sınıfın daha uygun olduğunu belirleyememesi, yani belirsiz olduğu anlamına gelir.

Literatürde belirsizlik ölçütleri arasında en yaygın ve popüler olanı, Shannon [16] tarafından önerilen entropi temelli belirsizlik yaklaşımıdır. Bu yaklaşım, sınıflandırıcının belirsizliğini ölçmek için entropi kavramını kullanır. Entropi, sınıflandırıcının sınıflar arasındaki kararsızlığını ölçen bir ölçüttür. Örneğin, sınıflandırıcının belirsizliği yüksekse, entropi de yüksek olacaktır. Bu nedenle, entropi temelli belirsizlik ölçütü, sınıflandırıcının belirsizliğini ölçerek, en iyi etiketleme için örnekleri seçmeye yarar.

$$\text{Belirsizlik}(x) = \sum_i P_{\theta}(y_i|x) \log P_{\theta}(y_i|x) \quad (9)$$

Denklem 9 'da yer alan  $y_i$  parametresi, tüm olası etiketleri ifade etmektedir. Bu parametre, verilen örneğin sınıflandırılması için kullanılan etiketi temsil eder. Çok sınıflı problemlerde,  $y$  parametresi birden fazla değer alabilir, çünkü örnekler birden fazla sınıfa ait olabilir. Örneğin,  $y$  parametresi  $[0,1,0,0,1]$  şeklinde olabilir, bu da örneğin ikinci ve beşinci sınıfa ait olduğunu gösterir. Çok sınıflı problemlerde, belirsizlik ölçütü olarak farklı yaklaşımlar önerilmiştir. Örneğin, entropi temelli belirsizlik ölçütü, çoklu sınıflandırma, güven aralığı gibi farklı ölçütler kullanılabilir. Bu ölçütler, sınıflandırıcının belirsizliğini ölçerek, en iyi etiketleme için örnekleri seçmeye yarar. Ayrıca, çok sınıflı problemler için önerilmiş özel ölçütler vardır, örneğin Marjin Örnekleme (MS) yöntemi, Scheffer ve arkadaşları [17] tarafından önerilen bir örnektir. Bu yöntem sınıflandırıcının önerdiği sınıfın marjini kullanarak belirsizliği ölçer.

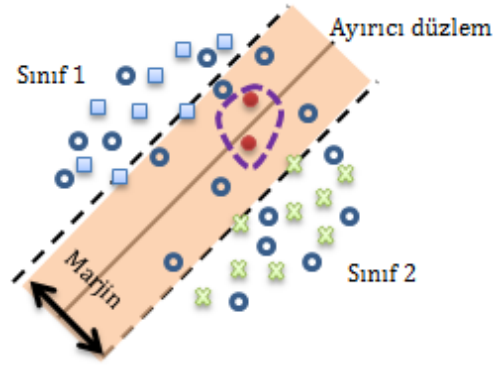
$$\text{Belirsizlik}(x) = \text{argmax} P_{\theta}(y_1/x) - P_{\theta}(y_2/x) \quad (10)$$

En yüksek olasılığa sahip birinci ve ikinci sınıf etiketlerini gösteren  $y_1$  ve  $y_2$  parametreleri Denklem 10' da gösterilmiştir.

Marjin, sınıflandırıcının önerdiği sınıf ile en yakın olası sınıf arasındaki farktır. Örneklerin marjin değeri yüksekse, sınıflandırıcının kararı daha emindir ve bu örnekler etiketleme için daha az önemlidir. Ayrıca, marjin değeri düşükse, sınıflandırıcının kararı daha belirsizdir ve bu örnekler etiketleme için daha önemlidir. Marjin ölçütü belirsizlik ölçütü olarak kullanılır, yüksek marjin değerine sahip örneklerin belirsizliği düşük, düşük marjin değerine sahip örneklerin belirsizliği yüksektir. Örnekler arasındaki marjin değeri küçüldükçe sınıflandırıcının karar vermesi zorlaşmaktadır. Bu nedenle sınıflandırıcının kararsız kalabileceği örnekler etiketleme için seçilmektedir.

DVM sınıflandırıcılar son yıllarda sınıflandırma problemlerinde oldukça başarılı sonuçlar üretmektedirler. Ayrıca, AÖ uygulamalarında farklı bir yaklaşım olarak da çoğunlukla kullanılmaktadırlar. DVM'nin genelleştirme yeteneği AÖ uygulamalarında yüksek başarı sağlamaktadır. En popüler ve etkili AL yaklaşımı olarak DVM tabanlı Marjin Örnekleme (MÖ) kabul edilir. MÖ'da, belirsizlik ölçütü olarak DVM sınıflandırıcı tarafından belirlenen ayırıcı düzlem uzaklıkları kullanılır. En yakın örnekler ayırıcı düzlem olarak seçilir ve iteratif olarak uzman tarafından etiketlenir.





Şekil 5. MÖ aktif öğrenme.

Bu bölümde sunulan aktif öğrenme yaklaşımlarının amacı, uzman tarafından etiketlenen en belirsiz örneklerle sınıflandırıcının performansını arttırmak olarak açıklanmıştır. Ancak, bu yaklaşımların hızının darboğaz oluşturması problem olarak ortaya çıkmıştır. Bu problem için önerilen çözümler arasında, birden fazla belirsiz örnek içeren örnekler kümesinin seçilmesi yerine, sadece en belirsiz örneğin seçilmesi yer almaktadır. Bu yaklaşım, hız artışı sağlamakla birlikte, benzer örneklerin seçilmesi sınıflandırıcı performansını etkileyebilir. Bu problemi çözmek için çeşitlilik (diversity) ölçütü önerilmiştir [18]. Literatürde, çeşitlilik ölçütü için farklı yöntemler mevcuttur, bunlar arasında kümeleme tabanlı, açı tabanlı ve en yakın destek vektör tabanlı yöntemler yer almaktadır.

Bu çalışmada, aktif öğrenme yaklaşımı ile haploid ve diploid mısır taneleri yüksek doğrulukla sınıflandırılmıştır. Önerilen sınıflandırma sisteminde temel strateji, ayırt edici bilgiler taşıyan minimum sayıda mısır örneği kullanarak yüksek başarılı sonuçlar elde etmektir. Böylece yüksek sınıflandırma başarımı korunarak etiketleme maliyetleri en aza indirgenecektir.

#### 4. DENEYLER VE GÖZLEMLER

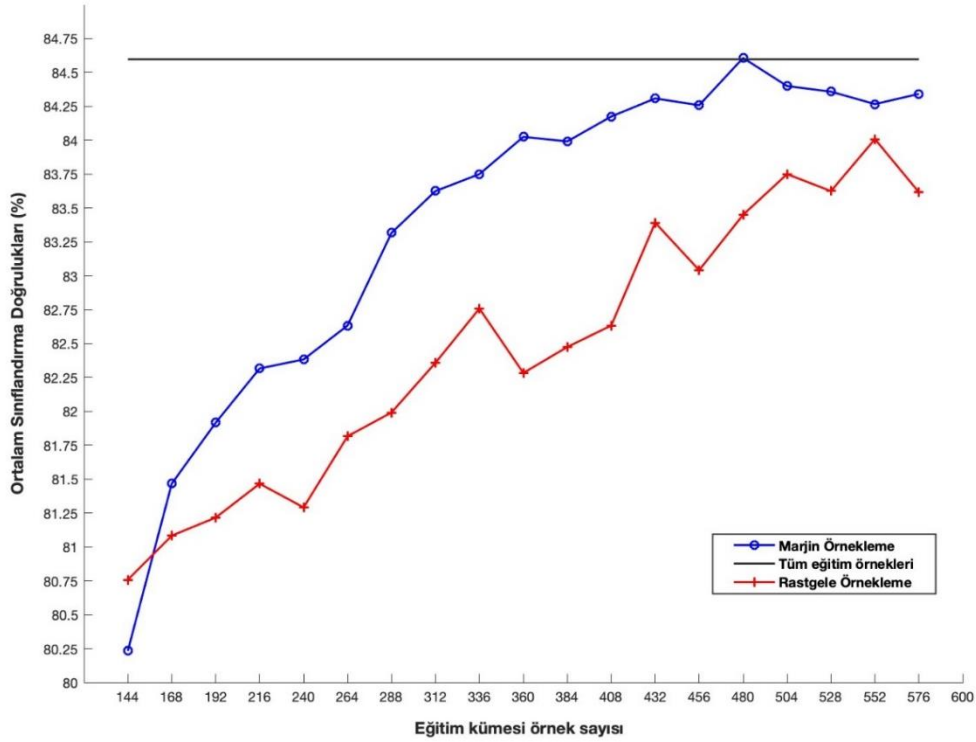
Deneyel çalışmalarda mısır tanesi görüntülerinden elde edilen 12 farklı renk momenti öznelik olarak kullanılmıştır. Sınıflandırma deneyleri için kullanılan eğitim ve test kümeleri 10 farklı deneme ile seçilmiştir. Sınıflandırma çalışmalarında eğitim ve test kümeleri rastgele 10 farklı deneme ile seçilmiş ve kullanılmıştır. 1200 adet diploid, 1200 adet haploid olmak üzere 2400 mısır tanesi kullanılmıştır. Radyal Tabanlı Fonksiyon (RTF) kullanılarak DVM sınıflandırıcısının çekirdek fonksiyonu oluşturulmuştur. İlgili  $C$  ve  $\gamma$  parametreleri ise ızgara-arama (grid-search) yöntemi ile tespit edilmiştir. AÖ deneylerinde başlangıç eğitim kümesi  $T$  için rastgele seçilen 144 mısır örneği kullanılmış ve DVM sınıflandırıcı eğitilmiştir. Başlangıç eğitim kümesi, örnekler havuzu ve test kümesinde yer alan örnek sayıları Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Eğitim ve test kümelerinden yer alan örnek sayıları.

| Mısır Sınıfları | T   | P    | TS   |
|-----------------|-----|------|------|
| Haploid         | 72  | 528  | 600  |
| Diploid         | 72  | 528  | 600  |
| <b>Toplam</b>   | 144 | 1056 | 1200 |

Eğitilen DVM sınıflandırıcı, etiketsiz mısır örnekleri havuzunu sınıflandırmak için kullanılmıştır. Sınıflandırılan örnekler arasından, En İyi Örneklem (MÖ) stratejisi kullanarak en uygun 24 mısır örneği seçilerek eğitim kümesine eklenmiştir. Bu işlem, iteratif olarak etiketsiz örnekler havuzu ( $U$ ) boşaltılana kadar devam eder. Her iterasyonda eğitim kümesine yeni örnekler eklendiği için, DVM sınıflandırıcısı her iterasyonda tekrar eğitilir. Bu çalışmada geliştirilen MÖ yönteminin sonuçları, Rastgele Örneklem (Random Örneklem (RÖ)) yönteminin sonuçları ile karşılaştırılarak performans testi yapılmıştır. Test yöntemi olarak belirlenen RÖ stratejisinde, her bir AÖ iterasyonu için  $U$  etiketsiz örnekler havuzundan rastgele 24 örnek seçilir ve eğitim kümesine etiketlenerek eklenir. Deneyel çalışmalarda elde edilen MÖ, RÖ ve tüm eğitim kümesine ait ortalama sınıflandırma sonuçları grafiksel olarak Şekil 6'da sunulmuştur.

Şekil 6'da yer alan sınıflandırma sonuçlarından görüleceği üzere, eğitim kümesindeki 1200 adet mısır örneğinin tamamı kullanarak yapılan sınıflandırma işleminde %84.59 başarı oranı elde edilmiştir. Aynı parametreleri kullanarak geleneksel sınıflandırma yaklaşımı (eğitim kümesindeki tüm örneklerin kullanılması) ile karşılaştırmak üzere MÖ ve RÖ aktif öğrenme stratejilerine ait sonuçlarda Şekil 6'da sunulmuştur. Sınıflandırma sonuçlarının objektif olması için her iterasyonda 10 farklı sınıflandırma sonucunun ortalaması alınarak sunulmuştur.



**Şekil 6.** Eğitim kümesindeki örnek sayısına bağlı ortalama MÖ ve RÖ sınıflandırma başarımları. Düz çizgi ise tüm örneklerin eğitim kümesinde yer alması durumunda elde edilen ortalama sınıflandırma başarımlarını göstermektedir.

Şekil 6'da yer alan mavi renkli eğriden görüleceği üzere 144 adet mısır örneğinden oluşan başlangıç eğitim kümesi ile yapılan sınıflandırma işlemi, her iterasyonda en çok bilgi taşıyan (ayırıcı düzleme en yakın örnekler) 24 örneğin seçilerek eğitim kümesinin zenginleştirilmesiyle devam etmiştir. Hedef sınıflandırma başarımları olan %84,59 doğruluk oranına 15. iterasyonda 480 örnek kullanılarak ulaşılmıştır. MÖ stratejisine ait sonuçları karşılaştırmak için bu çalışmada Rastgele Örnekleme (RÖ) yöntemi de sınıflandırma süreçlerinde kullanılmıştır. Şekil 6'da kırmızı renkli sınıflandırma sonuçları eğrisi bize MÖ yönteminden farklı olarak örnekler havuzu olan P 'den rastgele olarak seçilen örneklerin eğitim kümesine eklenmesiyle elde edilen sınıflandırma sonuçlarını göstermektedir.

Bu problemde karşılaşılan önemli darboğazlardan birisi örneklerin etiketlenmesi için gereken zaman ve para maliyetidir. Bu çalışmada önerilen Aktif Öğrenme tabanlı sınıflandırma yöntemi ile çok daha az etiketli örnek kullanılarak yüksek sınıflandırma sonuçları elde edilebilmektedir. Geleneksel sınıflandırma yaklaşımlarında 1200 mısır örneği ile bu sınıflandırma işlemi yapılırken, önerilen AÖ yaklaşımındaki sınıflandırıcı sisteminde seçilen en iyi 480 mısır örneği ile aynı sonuçlar elde edilebilmektedir.

## 5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Mısır, çok yönlü kullanım alanı ve verimliliği ile halen dünya popülasyonunun temel gıda ihtiyacını karşılayan altı tahıldan bir tanesidir. 1800'lü yıllardan günümüze kadar mısır hemen hemen tüm dünyada ıslah çalışmalarının en yoğun şekilde sürdürüldüğü bir bitkidir. Mısır ıslah süreçlerinde çeşitli geleneksel yöntemler kullanılarak örneklerin haploid, diploid sınıflandırmaları yapılabilmektedir. Ancak bu yöntemlerin hata oranlarının yüksekliği, zaman ve para maliyetleri önemli dezavantajlardır. Bu çalışmada, yüksek doğruluklu ve minimum maliyetli bir sınıflandırıcı oluşturulabilmesine imkân tanıyan aktif öğrenmeye yaklaşımı kullanılmıştır. Önerilen çalışmada mısır tanelerine ait en iyi renk moment öznelikleri seçilmiş ve AÖ yaklaşımı ile DVM sınıflandırıcı kullanılarak minimum sayıda eğitim örneği kullanılarak tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir. Geleneksel sınıflandırma yaklaşımında 1200 mısır örneği ile sınıflandırıcı eğitilecek iken bu çalışmada aynı sonuçlar 480 mısır örneği kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar DVM sınıflandırıcı için etiketleme maliyetlerini minimuma indirmiştir.

### Yazar Katkıları

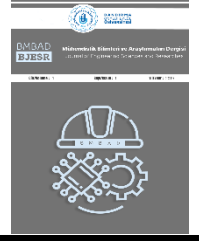
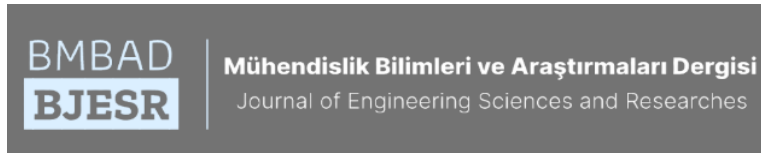
Yazarlar makaleye eşit derecede katkı sağlamıştır.

### Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

## KAYNAKÇA

- [1] B.W. Boote, D.J. Freppon, G.N. de La Fuente, T. Lübberstedt, B.J. Nikolau, and E.A. Smith “Haploid differentiation in maize kernels based on fluorescence imaging”, *Plant Breeding*, vol. 35, no. 4, pp. 439-445 2016.
- [2] G.N. de La Fuente, J.M. Carstensen, M.A. Edberg, and T. Lübberstedt “Discrimination of haploid and diploid maize kernels via multispectral imaging”, *Plant Breeding*, vol. 136, no. 1, pp. 50-60, 2017.
- [3] J. Lin, L. Yu, W. Li, and H. Qin “Method for Identifying Maize Haploid Seeds by Applying Diffuse Transmission Near-Infrared Spectroscopy”, *Applied Spectroscopy*, vol. 72, no. 4, pp. 611-617, 2018.
- [4] Y. Altuntas, A.F. Kocamaz, R. Cengiz, and M. Esmeray “Classification of haploid and diploid maize seeds by using image processing techniques and support vector machines”, *26th IEEE Signal Processing and Communications Applications Conference*, 2018.
- [5] X.-Y. Wang, W.-X. Liao, D. An, and Y. Wei “Maize Haploid Identification via LSTM-CNN and Hyperspectral Imaging Technology”, *CoRR arXiv*, vol. abs/1805.0, 2018.
- [6] L. Yu, W. Liu, W. Li, H. Qin, J. Xu, and M. Zuo “Non-destructive identification of maize haploid seeds using nonlinear analysis method based on their near-infrared spectra”, *Biosystem Engineering*, vol. 172, pp. 144-153, 2018.
- [7] Y. Altuntaş, Z. Cömert, and A.F. Kocamaz “Identification of haploid and diploid maize seeds using convolutional neural networks and a transfer learning approach”, *Comp. and Elect. in Agr.*, vol. 163, pp. 1-11, 2019.
- [8] E. Dönmez “Discrimination of Haploid and Diploid Maize Seeds Based on Deep Features”, *28th Signal Processing and Communications Applications Conference*, 2020.
- [9] E. Dönmez “Classification of Haploid and Diploid Maize Seeds based on Pre-Trained Convolutional Neural Networks”, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 16, no. 3, pp. 323-331, 2020.
- [10] E. Dönmez “Enhancing classification capacity of CNN models with deep feature selection and fusion: A case study on maize seed classification”, *Data and Know. Eng.*, vol. 141, p. 102075, pp. 1-12, 2022.
- [11] A. Gunes, A.S. Bilgi, G. Ortac, H. Kalkan, and K. Tasdemir “Active learning method for classifying the mold contaminated figs”, *24th Signal Processing and Communication Application Conference*, 2016.
- [12] H. Kalkan, A. Güneş, E. Durmuş, and A. Kuşçu “Non-invasive detection of aflatoxin-contaminated figs using fluorescence and multispectral imaging”, *Food Additives and Contaminants - Part A*, vol. 31, no. 8, pp. 1414-1421, 2014.
- [13] P. Pudil, J. Novovičová, and J. Kittler “Floating search methods in feature selection”, *Pattern Recog. Lett.*, vol. 15, no. 11, pp. 1119-1125, 1994.
- [14] D.D. Lewis and W.A. Gale “A sequential algorithm for training text classifiers”, *17th Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*, 1994.
- [15] H.S. Seung, M. Opper, and H. Sompolinsky “Query by committee”, *Fifth Annual ACM Workshop on Computational Learning Theory*, 1992.
- [16] C.E. Shannon “A Mathematical Theory of Communication”, *Bell System Technical Journal*, vol. 27, no. 3, pp. 379-423, 1948.
- [17] T. Scheffer, C. Decomain, and S. Wrobel “Active hidden markov models for information extraction”, *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 2189, 2001.
- [18] K. Blinker “Incorporating Diversity in Active Learning with Support Vector Machines”, *Twentieth International Conference on Machine Learning*, 2003.



## Bright and Dark Solitary Love Waves in a Heterogeneous Semi-Space Coated with a Heterogeneous Elastic Layer

### Elastik Heterojen Bir Tabakayla Kaplı Heterojen Yarım Uzayda Parlak ve Karanlık Soliter Love Dalgaları

<sup>1</sup>Ekin DELİKTAŞ-ÖZDEMİR 

<sup>1</sup>Piri Reis University, Faculty of Engineering, Department of Naval Architecture and Marine Engineering, İstanbul, Turkey

[edeliktas@pirireis.edu.tr](mailto:edeliktas@pirireis.edu.tr)

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 26 January 2023  
Accepted : 17 March 2023

##### Keywords:

Heterogeneous Layered  
Semi-Space, Nonlinear  
Elasticity, Solitary SH  
Waves

#### ABSTRACT

The propagation of nonlinear Love waves in an elastic, vertically heterogeneous crust laid upon an elastic, heterogeneous semi-space is considered. By employing the multiple scales method, the amplitude function of Love waves is represented by a nonlinear Schrödinger equation which includes the nonlinear material and heterogeneity parameters of the layered semi-space in its coefficients. This study numerically investigates the influence of heterogeneity as well as the nonlinear properties of the media on the presence of bright and dark solitary Love waves. Moreover, the remarkable effects of nonlinear and heterogeneous material properties of both layer and semi-space on the wave evolution of bright and dark solitons are graphically shown.

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

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 26 Ocak 2023  
Kabul : 17 Mart 2023

##### Anahtar Kelimeler:

Heterojen Tabakalı Yarım  
Uzay, Doğrusal Olmayan  
Elastisite, Soliter SH  
Dalgaları

#### ÖZET

Bu çalışmada, dalga yayılımına dik yönde heterojen, elastik bir tabakayla kaplı heterojen yarım uzayda doğrusal olmayan Love dalgalarının yayılması problemi göz önüne alınmıştır. Çoklu ölçekler yöntemi kullanılarak, doğrusal olmayan Love dalgalarının öz etkileşimini karakterize eden, katsayıları ortamın malzeme özelliklerine, dolayısıyla tabaka ve yarım uzayı oluşturan malzemelerin heterojenlik parametrelerine bağlı, doğrusal olmayan bir Schrödinger denklemi türetilmiştir. Ortamın doğrusal olmayan özelliklerinin yanı sıra heterojenliğinin de parlak ve karanlık soliter Love dalgalarının varlığı üzerindeki etkileri nümerik olarak incelenmiştir. Ayrıca hem tabakaya hem de yarım uzaya ait doğrusal olmayan ve heterojen malzeme özelliklerinin parlak ve karanlık dalga evrimi üzerindeki kayda değer etkileri grafiksel olarak gösterilmiştir.

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

### 1. INTRODUCTION

Wave evolution in an elastic media is generally determined by three important factors which are dispersion, nonlinearity and inhomogeneity. Love [1] theoretically demonstrated the presence of dispersive waves with displacements perpendicular to the propagation plane in a homogeneous, linear, semi-space underlying a uniform layer with different materials, called Love waves. Love waves, which occur near the surface where the two elastic layers are in contact, are the fastest transverse surface waves which we directly feel throughout an earthquake [2]. Moreover, owing to its extensive application areas such as seismology, continuum mechanics, petroleum engineering, biomechanics and metallurgy, the propagation of horizontally polarized shear (SH) waves in a linear, elastic, homogeneous semi-space coated with a regular layer has been the subject of many studies [3-9]. Especially, considering that the earth is composed of heterogeneous stratified elastic media whose rigidity and density change depending on depth, for more realistic research on the Love wave propagation, the heterogeneous constitutional characteristics of the medium must be taken into account. First, investigation of Love waves has been extended to a heterogeneous semi-space covered with a homogeneous layer by Meissner, who considered the linear variation in density and quadratic variation in rigidity of the semi-space [10]. Then, the surface SH waves in a homogeneous, linear, elastic layer over a heterogeneous semi-space whose shear wave velocity, density and rigidity are functions of depth has been investigated by several authors [11-15]. Since the analysis of wave propagation in a stratified medium for any type of inhomogeneity is very complicated, the researchers have considered the problem for particular types of variations in the constituent materials such as exponential, harmonic, quadratic or linear change with depth, which are summarized in [16]. Since Love waves occur near the surface where the layer and semi-space are in contact, it is desirable to examine a model where not only the semi-space but also the layer are taken as inhomogeneous. Hence, the effects of both the layer and the semi-space's heterogeneity on Love wave propagation have been the subject of many studies [17-21].

The effects of nonlinear constituent materials as well as heterogeneity of the medium on solitary SH wave propagation have been extensively studied in recent years. Teymur has examined SH wave propagation in a homogeneous, nonlinear, elastic semi-infinite medium coated with a nonlinear crust [22]. Deliktas et. al. have studied the nonlinear modulation of SH waves in a vertically heterogeneous two-layered plate and investigate the influence of heterogeneity on the presence of envelope solitary waves [23]. Then, Deliktas has extended the study of Love waves to the heterogeneous nonlinear layer between two different semi-spaces and reveal the remarkable influences of material characteristics of intermediate layer on both existence and nonlinear evolutions of solitary Love-type waves [24].

In the present study, the influence of both nonlinear and nonhomogeneous constituent materials of the media consisting of a layer laid upon a semi-space having different elastic material properties on the bright and dark solitary Love waves is investigated. It is assumed that the densities and strain energy functions of the media have an exponential change in the thickness direction. When nonlinearity is ignored, considered problem reduces to the propagation of Love waves studied by Sidhu [17]. By using the derivative expansion method, an NLS equation whose coefficients depend on the medium's material properties, wave number and also heterogeneity parameters is derived for nonlinear modulation of waves. When heterogeneity parameters of the media tend to zero, derived NLS equation reduce to that for the layer laid upon semi-space consisting of homogeneous elastic materials. The effects of heterogeneity as well as the nonlinearity of the media on both existence and nonlinear evolutions of bright and dark solitary Love wave solutions have been examined and the results are presented graphically.

### 2. FORMULATION

Let the ordered triples  $(x_1, x_2, x_3)$  and  $(X_1, X_2, X_3)$  represent, respectively, the spatial and material coordinates of a point referred to the same rectangular Cartesian system. We take into consideration a layer with uniform thickness over a semi-space consisting of different, vertically nonhomogeneous, nonlinear, elastic materials whose linear shear modulus, nonlinear material functions and densities change exponentially in the depth direction. In the reference frame  $(X_1, X_2, X_3)$ , the regions occupying  $0 < X_2 < h$  and  $-\infty < X_2 < 0$  are the layer ( $P_1$ ) and the semi-space ( $P_2$ ), respectively; here  $h$  is a positive constant (see Figure 1).

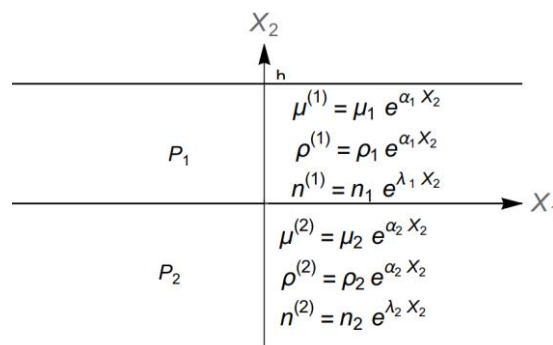


Figure 1. Geometry of the media.



The SH waves are defined as follows

$$x_1 = X_1, \quad x_2 = X_2, \quad x_3 = X_3 + u^{(s)}(X_1, X_2, t) \quad s = 1, 2. \quad (1)$$

Here,  $t$  denotes the time, superscript  $s$  indicates to the region  $P_s$ ,  $u^{(s)}$  represents the particle's displacement in the  $X_3$  direction. It is assumed that  $X_2 = h$  is traction free, displacements and stresses are continuous at  $X_2 = 0$  and radiation condition satisfies in semi-space.

The materials of the media are considered as nonlinear, isotropic, incompressible hyper-elastic and made of different generalized neo-Hookean materials [25]. The densities and strain energy functions of both layer and semi-space are assumed to be functions of thickness variable. For such a material

$$\rho^{(1)} = \rho_1(X_2), \quad \rho^{(2)} = \rho_2(X_2), \quad \Sigma^{(1)} = \Sigma^{(1)}(I^{(1)}, X_2), \quad \Sigma^{(2)} = \Sigma^{(2)}(I^{(2)}, X_2) \quad (2)$$

where  $I^{(s)} = \text{tr } \mathbf{c}^{(-1)}$  such that  $\mathbf{c}^{(-1)} = [x_{k,K} \ x_{l,K}]$ ,  $\Sigma^{(s)}$  is the strain energy function. Let  $X = X_1$ ,  $Y = X_2$ ,  $Z = X_3$ . The following equations of motion and boundary conditions can be obtained (for detailed analysis see e.g., [26])

$$\frac{\partial^2 u^{(1)}}{\partial t^2} - c_1^2 \left( \frac{\partial^2 u^{(1)}}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 u^{(1)}}{\partial Y^2} \right) - \frac{1}{\rho^{(1)}} \frac{d\mu^{(1)}}{dY} \frac{\partial u^{(1)}}{\partial Y} = n^{(1)} \left\{ \frac{\partial}{\partial X} \left( \frac{\partial u^{(1)}}{\partial X} \mathcal{N}(u^{(1)}) \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( \frac{\partial u^{(1)}}{\partial Y} \mathcal{N}(u^{(1)}) \right) \right\} + \frac{\mathcal{N}(u^{(1)})}{\rho^{(1)}} \frac{d(\rho^{(1)} n^{(1)})}{dY} \frac{\partial u^{(1)}}{\partial Y} \quad \text{in } P_1 \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 u^{(2)}}{\partial t^2} - c_2^2 \left( \frac{\partial^2 u^{(2)}}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 u^{(2)}}{\partial Y^2} \right) - \frac{1}{\rho^{(2)}} \frac{d\mu^{(2)}}{dY} \frac{\partial u^{(2)}}{\partial Y} = n^{(2)} \left\{ \frac{\partial}{\partial X} \left( \frac{\partial u^{(2)}}{\partial X} \mathcal{N}(u^{(2)}) \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( \frac{\partial u^{(2)}}{\partial Y} \mathcal{N}(u^{(2)}) \right) \right\} + \frac{\mathcal{N}(u^{(2)})}{\rho^{(2)}} \frac{d(\rho^{(2)} n^{(2)})}{dY} \frac{\partial u^{(2)}}{\partial Y} \quad \text{in } P_2 \quad (4)$$

$$\frac{\partial u^{(1)}}{\partial Y} = 0 \quad \text{on } Y = h, \quad (5)$$

$$u^{(1)} = u^{(2)} \quad \text{and} \quad \frac{d\Sigma^{(1)}}{dI^{(1)}} \frac{\partial u^{(1)}}{\partial Y} = \frac{d\Sigma^{(2)}}{dI^{(2)}} \frac{\partial u^{(2)}}{\partial Y} \quad \text{on } Y = 0, \quad (6)$$

$$u^{(2)} \rightarrow 0 \quad \text{as } Y \rightarrow -\infty. \quad (7)$$

where

$$\mathcal{N}(u^{(s)}) = \left( \frac{\partial u^{(s)}}{\partial X} \right)^2 + \left( \frac{\partial u^{(s)}}{\partial Y} \right)^2, \quad s = 1, 2.$$

Here, linear shear velocities  $c_s$ ,  $s = 1, 2$ , are  $c_s^2 = \mu^{(s)} / \rho^{(s)}$  where  $\mu^{(s)} = 2 \frac{d\Sigma^{(s)}}{dI^{(s)}}(3, Y)$  are the linear shear modulus. Nonlinear material functions of the media are  $n^{(s)} = 2 \frac{d^2 \Sigma^{(s)}}{dI^2}(3, Y) / \rho^{(s)}(Y)$ .

### 3. ASYMPTOTIC ANALYSIS

The self-modulation of small and finite amplitude SH waves by employing the multiple scales method (see e.g. [27]) with the following scales

$$x_i = \varepsilon^i X, \quad t_i = \varepsilon^i t, \quad y = Y, \quad i = 0, 1, 2 \quad (8)$$

where  $\varepsilon > 0$ , a small parameter, represents the strength of non-linearity,  $\{x_1, x_2, t_1, t_2\}$  are the slow variables which describe slow variations, whereas  $\{x_0, t_0, y\}$  are the fast variables representing fast variations. Next, we expand  $u^{(s)}$  in the following asymptotic series:

$$u^{(s)} = \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n u_n^{(s)}(x_0, x_1, x_2, t_0, t_1, t_2, y) \quad s = 1, 2. \quad (9)$$

Rewriting (3)-(7) in terms of (8) and applying (9) give a hierarchy of problems that enable  $u_n^{(s)}$  to be obtained, successively. First three of them can be written as follows:

$$O(\varepsilon): \quad \mathcal{L}_s(u_1^{(s)}) \triangleq \frac{\partial^2 u_1^{(s)}}{\partial t_0^2} - c_s^2 \left( \frac{\partial^2 u_1^{(s)}}{\partial x_0^2} + \frac{\partial^2 u_1^{(s)}}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho^{(s)}} \frac{d\mu^{(s)}}{dy} \frac{\partial u_1^{(s)}}{\partial y} \quad \text{in } P_s, \quad s = 1, 2. \quad (10)$$

$$\frac{\partial u_1^{(1)}}{\partial y} = 0 \quad \text{on } y = h, \quad (11)$$

$$u_1^{(1)} = u_1^{(2)} \quad \text{and} \quad \frac{\partial u_1^{(1)}}{\partial y} - \gamma \frac{\partial u_1^{(2)}}{\partial y} = 0 \quad \text{on } y = 0, \quad (12)$$

$$u_1^{(2)} \rightarrow 0 \quad \text{as } y \rightarrow -\infty. \quad (13)$$

$$O(\varepsilon^2): \quad \mathcal{L}_s(u_2^{(s)}) = 2 \left( c_s^2 \frac{\partial^2 u_1^{(s)}}{\partial x_0 \partial x_1} - \frac{\partial^2 u_1^{(s)}}{\partial t_0 \partial t_1} \right), \quad s = 1, 2. \quad (14)$$

$$\frac{\partial u_2^{(1)}}{\partial y} = 0 \quad \text{on } y = h, \quad (15)$$

$$u_2^{(1)} = u_2^{(2)} \quad \text{and} \quad \frac{\partial u_2^{(1)}}{\partial y} - \gamma \frac{\partial u_2^{(2)}}{\partial y} = 0 \quad \text{on } y = 0, \quad (16)$$

$$u_2^{(2)} \rightarrow 0 \quad \text{as } y \rightarrow -\infty. \quad (17)$$

$$O(\varepsilon^3): \quad \mathcal{L}_s(u_3^{(s)}) = 2 \left( c_s^2 \frac{\partial^2 u_2^{(s)}}{\partial x_0 \partial x_1} - \frac{\partial^2 u_2^{(s)}}{\partial t_0 \partial t_1} \right) + c_s^2 \left( \frac{\partial^2 u_1^{(s)}}{\partial x_1^2} + 2 \frac{\partial^2 u_1^{(s)}}{\partial x_0 \partial x_2} \right) - \frac{\partial^2 u_1^{(s)}}{\partial t_1^2} - 2 \frac{\partial^2 u_1^{(s)}}{\partial t_0 \partial t_2} \\ + n^{(s)} \left( \frac{\partial}{\partial x_0} \left( \frac{\partial u_1^{(s)}}{\partial x_0} \mathcal{N}_0(u_1^{(s)}) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial u_1^{(s)}}{\partial y} \mathcal{N}_0(u_1^{(s)}) \right) \right) + \frac{\mathcal{N}_0(u_1^{(s)})}{\rho^{(s)}} \frac{d(\rho^{(s)} n^{(s)})}{dy} \frac{\partial u_1^{(s)}}{\partial y} \quad \text{in } P_s \quad (18)$$

$$\text{On } y = h \quad \frac{\partial u_3^{(1)}}{\partial y} = 0, \quad (19)$$

$$\text{On } y = 0 \quad \frac{\partial u_3^{(1)}}{\partial y} - \gamma \frac{\partial u_3^{(2)}}{\partial y} = \gamma \beta_2 \frac{\partial u_1^{(2)}}{\partial y} \mathcal{N}_0(u_1^{(2)}) - \beta_1 \frac{\partial u_1^{(1)}}{\partial y} \mathcal{N}_0(u_1^{(1)}) \quad \text{and} \quad u_3^{(1)} = u_3^{(2)}, \quad (20)$$

$$u_3^{(2)} \rightarrow 0 \quad \text{as } y \rightarrow -\infty \quad (21)$$

where

$$\mathcal{N}_0(\Psi) = \left( \frac{\partial \Psi}{\partial x_0} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Psi}{\partial y} \right)^2. \quad \gamma = \mu^{(2)}/\mu^{(1)}, \quad \beta_s = n^{(s)}/c_s^2$$

Note that the first order problem in  $\varepsilon$  is the propagation of linear Love waves in the vertically nonhomogeneous layer overlying the nonhomogeneous semi-space investigated in [17]. For harmonic wave solutions of this problem, different types of variation in  $\rho^{(s)}$  and  $\mu^{(s)}$ ,  $s = 1, 2$ , such as linear, quadratic, harmonic or exponential variation, are examined by several authors [16, 28, 29]. In this analysis, we consider depth dependent exponential variations in the nonhomogeneous constituent materials. Hence, the densities, linear shear modulus and nonlinear material functions are taken to be, respectively,

$$\rho^{(s)} = \rho_s e^{\alpha_s y}, \quad \mu^{(s)} = \mu_s e^{\alpha_s y}, \quad n^{(s)} = n_s e^{\lambda_s y}, \quad s = 1, 2 \quad (22)$$

where  $\mu_s$  and  $\rho_s$ ,  $s = 1, 2$ , are rigidities and densities at the interface, respectively, and  $\alpha_s$  are the linear heterogeneity parameters,  $\lambda_s$  are the nonlinear heterogeneity parameters.  $n_s$  are the nonlinear material constants. When  $n_s > 0$ , the material has the property of shear hardening otherwise softening.

By employing the separation of variables method and using (13), and making the substitution  $u_1^{(s)} = U_1^{(s)}/\sqrt{\mu^{(s)}}$  the solutions of the equations (10) are expressed as follows

$$u_1^{(1)} = \frac{1}{\sqrt{\mu_1 e^{\alpha_1 y}}} \sum_{l=1}^{\infty} \left\{ A_1^{(l)}(x_1, x_2, t_1, t_2) e^{ilkp_1 y} + B_1^{(l)}(x_1, x_2, t_1, t_2) e^{-ilkp_1 y} \right\} e^{il\theta} + c.c. \quad (23)$$

$$u_1^{(2)} = \frac{1}{\sqrt{\mu_2 e^{\alpha_2 y}}} \sum_{l=1}^{\infty} C_1^{(l)}(x_1, x_2, t_1, t_2) e^{lkv_1 y} e^{il\theta} + c.c., \quad (24)$$

where

$$\theta = kx_0 - \omega t_0, \quad p_l = (c^2/c_1^2 - 1 - \alpha_1^2/(4k^2 l^2))^{1/2}, \quad v_l = (1 + \alpha_2^2/(4k^2 l^2) - c^2/c_2^2)^{1/2}.$$

$A_1^{(l)}$ ,  $B_1^{(l)}$ ,  $C_1^{(l)}$  are the first order amplitude functions dependent on  $\{x_1, x_2, t_1, t_2\}$ ,  $k$  and  $\omega$  are the wave number and angular frequency, respectively,  $c = \omega/k$  is the phase velocity and "c.c." represents the complex conjugate of the former terms.

Clearly, a surface SH wave propagates when the following inequality holds for the phase velocity  $c$

$$c_1 \left( 1 + \frac{\alpha_1^2}{4k^2 l^2} \right)^{1/2} < c < c_2 \left( 1 + \frac{\alpha_2^2}{4k^2 l^2} \right)^{1/2}. \quad (25)$$

Substituting of (23)-(24) in (11)-(12) gives

$$\mathbf{W}_l \mathbf{U}_1^{(l)} = \mathbf{0}, \quad l = 1, 2, \dots \quad (26)$$

where  $\mathbf{U}_1^{(l)} = (A_1^{(l)}, B_1^{(l)}, C_1^{(l)})^T$  and  $\mathbf{W}_l$  is dispersion matrix given in the Appendix. For the nontrivial solutions of (26), the condition  $\det \mathbf{W}_1 = 0$  gives the dispersion relation first derived in [17]

$$2kp(2kv - \alpha_2)\gamma_0 - (4k^2 p^2 + 2kv\alpha_1\gamma_0 + \alpha_1(\alpha_1 - \alpha_2\gamma_0))\tan(kph) = 0 \quad (27)$$

where  $v = v_1$ ,  $p = p_1$  and  $\gamma_0 = \mu_2/\mu_1$ . For  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$ , (27) reduces to

$$v\gamma_0 - p \tan(kph) = 0 \tag{28}$$

which coincides with the frequency equation of Love waves in a homogeneous semi-space covered with a homogeneous layer [22]. Since the focus of this work is on the nonlinear self-modulation, the analysis does not include the harmonic-resonance case. Therefore, we assume

$$\det \mathbf{W}_l \neq 0, \text{ for } l \neq 1. \tag{29}$$

Thus, the solutions of (26) can be obtained as

$$\mathbf{U}_1^{(1)} = \mathcal{A}_1 \mathbf{R}, \quad \mathbf{U}_1^{(l)} = \mathbf{0} \text{ for } l \neq 1. \tag{30}$$

Here,  $\mathcal{A}_1$ , a complex function of  $\{x_1, x_2, t_1, t_2\}$ , represents the first order amplitude of the nonlinear modulation. The components of  $\mathbf{R}$  satisfying  $\mathbf{W}_1 \mathbf{R} = 0$  can be found in the Appendix. Thus, (23)-(24) are given as follows

$$u_1^{(1)} = \frac{\mathcal{A}_1}{\sqrt{\mu_1 e^{\alpha_1 y}}} (R_1 e^{ikpy} + R_2 e^{-ikpy}) e^{i\theta} + c. c., \tag{31}$$

$$u_1^{(2)} = \frac{\mathcal{A}_1}{\sqrt{\mu_2 e^{\alpha_2 y}}} R_3 e^{kvy} e^{i\theta} + c. c. \tag{32}$$

Note that the condition

$$kv > \frac{\alpha_2}{2} \tag{33}$$

which is necessary for the  $u_1^{(2)}$  to vanish as  $y \rightarrow -\infty$ , is satisfied only if

$$k^2 \left(1 - \frac{c^2}{c_2^2}\right) > 0, \text{ consequently } c < c_2. \tag{34}$$

It follows from (25) and (34) that

$$c_1 \left(1 + \frac{\alpha_1^2}{4k^2}\right)^{\frac{1}{2}} < c < c_2 < c_2 \left(1 + \frac{\alpha_2^2}{4k^2}\right)^{\frac{1}{2}}. \tag{35}$$

With nondimensional linear heterogeneous parameters  $A_1 = \alpha_1/k, A_2 = \alpha_2/k$  and nondimensional phase velocity  $C = c/c_1$ , (35) can be written as follows

$$\left(1 + \frac{A_1^2}{4}\right)^{\frac{1}{2}} < C < \frac{c_2}{c_1} < \frac{c_2}{c_1} \left(1 + \frac{A_2^2}{4}\right)^{\frac{1}{2}}. \tag{36}$$

Hence a surface SH wave satisfying radiation condition (13) propagates in an exponentially heterogeneous layered semi-space when (36) holds for the phase velocity  $C$ .

To finalize the first order solution, we must determine  $\mathcal{A}_1$ . This can be accomplished by higher order problems. Substituting (31)-(32) in the problem of  $O(\epsilon^2)$ , one can easily solve (14) via method of undetermined coefficients for  $u_2^{(s)}$ . Then the nonhomogeneous boundary conditions (15)-(16) gives the following compatibility condition

$$\mathbf{L} \cdot \mathbf{b}_2^{(l)} = 0 \tag{37}$$

where  $\mathbf{b}_2^{(l)}$  are given as

$$\mathbf{b}_2^{(1)} = -i \left( \frac{\partial \mathcal{A}_1}{\partial t_1} \frac{\partial \mathbf{W}_1}{\partial \omega} - \frac{\partial \mathcal{A}_1}{\partial x_1} \frac{\partial \mathbf{W}_1}{\partial k} \right) \mathbf{R} \text{ and } \mathbf{b}_2^{(l)} = \mathbf{0} \text{ for all } l > 1. \tag{38}$$

$\mathbf{L}$  is a left row vector such that  $\mathbf{L} \mathbf{W}_1 = 0$ . The components of  $\mathbf{L} = (L_1, L_2, L_3)$  are given in the Appendix. From the compatibility condition (37), following equation for  $\mathcal{A}_1$  is obtained

$$\frac{\partial \mathcal{A}_1}{\partial t_1} + V_g \frac{\partial \mathcal{A}_1}{\partial x_1} = 0, \tag{39}$$

where the group velocity,  $V_g$ , is expressed by

$$V_g = - \left( \mathbf{L} \frac{\partial \mathbf{W}_1}{\partial k} \mathbf{R} \right) / \mathbf{L} \frac{\partial \mathbf{W}_1}{\partial \omega} \mathbf{R} \tag{40}$$

(39) implies that

$$\mathcal{A}_1 = \mathcal{A}_1(x_1 - V_g x_1, t_1, t_2) \tag{41}$$

Substituting  $u_1^{(s)}$  and  $u_2^{(s)}$  into the third order perturbation problems (18) yields

$$\mathcal{L}_1(u_3^{(1)}) = \sum_{j=1}^{12} D_j f_j(y) e^{i\theta} + \text{terms in } (e^{\pm 3i\theta}) + c. c. \tag{42}$$

$$\mathcal{L}_2(u_3^{(2)}) = \sum_{j=13}^{16} D_j f_j(y) e^{i\theta} + \text{terms in } (e^{\pm 3i\theta}) + c. c. \tag{43}$$

We give the explicit forms of  $f_j(y)$  and  $D_j, j = 1, 2, \dots, 16$  in the Appendix.  $u_3^{(s)}$  are written as

$$u_3^{(s)} = \bar{u}_3^{(s)} + \hat{u}_3^{(s)}, \quad s = 1, 2 \tag{44}$$

where  $\hat{u}_3^{(s)}$  are the homogeneous solutions. They are constructed as in the (23)-(24) by writing third order amplitude functions  $U_3^{(l)} = (A_3^{(l)}, B_3^{(l)}, C_3^{(l)})$  instead of  $U_1^{(l)}$ . The particular solutions  $\bar{u}_3^{(s)}$  can be solved by means of the method of undetermined coefficients or the method of variation of parameters. For detailed analysis, we refer to [23] and [24] where the methods are applied in detail, respectively. Then, substituting  $u_3^{(s)}$  and  $u_1^{(s)}$  in (19)-(20) one obtains the following system

$$W_l U_3^{(l)} = b_3^{(l)}, \tag{45}$$

Where  $b_3^{(1)} \neq 0, b_3^{(3)} \neq 0$  and  $b_3^{(l)} = 0$  for  $l \neq 1, 3$ .  $b_3^{(1)}$  is symbolized by

$$b_3^{(1)} = \left[ -i \left( \frac{\partial W_1}{\partial \omega} \frac{\partial \mathcal{A}_1}{\partial t_2} - \frac{\partial W_1}{\partial k} \frac{\partial \mathcal{A}_1}{\partial x_2} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial^2 W_1}{\partial \omega^2} \frac{\partial^2 \mathcal{A}_1}{\partial t_1^2} - 2 \frac{\partial^2 W_1}{\partial k \partial \omega} \frac{\partial^2 \mathcal{A}_1}{\partial x_1 \partial t_1} + \frac{\partial^2 W_1}{\partial k^2} \frac{\partial^2 \mathcal{A}_1}{\partial x_1^2} \right) \right] \mathbf{R} + \left( \frac{\partial W_1}{\partial k} \frac{\partial^2 \mathcal{A}_1}{\partial x_1^2} - \frac{\partial W_1}{\partial \omega} \frac{\partial^2 \mathcal{A}_1}{\partial x_1 \partial t_1} \right) \left( \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial k} + V_g \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \omega} \right) + \mathbf{F} |\mathcal{A}_1|^2 \mathcal{A}_1. \tag{46}$$

Here  $\mathbf{F}$  is the constant vector. Since its components are so long, they are not written explicitly. The solvability condition  $L \cdot b_3^{(1)} = 0$  must be satisfied for (45). Consequently, the following NLS equation is obtained

$$i \frac{\partial \mathcal{A}}{\partial \tau} + \Gamma \frac{\partial^2 \mathcal{A}}{\partial \xi^2} + \Delta |\mathcal{A}|^2 = 0 \tag{47}$$

where nondimensional variables are described by

$$\tau = \omega t_2, \quad \xi = k(x_1 - V_g t_1), \quad \mathcal{A} = k \mathcal{A}_1. \tag{48}$$

The simple representation of  $\Gamma$  and  $\Delta$  are

$$\Gamma = \frac{k^2}{2\omega} \frac{d^2 \omega}{dk^2}, \quad \Delta = -\frac{1}{\omega k^2} (\mathbf{L} \cdot \mathbf{F}) / \left( \mathbf{L} \frac{\partial W_1}{\partial \omega} \mathbf{R} \right). \tag{49}$$

Now, we search for the soliton solutions of the NLS equation (47) through the following ansatz

$$\mathcal{A}(\xi, \tau) = g(\xi) e^{i r \tau}, \quad r : \text{constant}. \tag{50}$$

For bright soliton solutions, we choose  $g(\xi) = g_0 \text{sech}(\xi)$  such that  $g_0 \neq 0$ . Hence putting (50) in the NLS equation (47) yields

$$g_0 = \sqrt{\frac{2\Gamma}{\Delta}} \quad \text{and} \quad r = \Gamma. \tag{51}$$

Thus, the following bright soliton solution is constructed by means of (50)

$$\mathcal{A}(\xi, \tau) = \sqrt{\frac{2\Gamma}{\Delta}} \text{sech}(\xi) e^{i \Gamma \tau}, \quad \text{for } \Gamma \Delta > 0. \tag{52}$$

When  $\Gamma \Delta < 0$ , to get the dark soliton solutions, we choose  $g(\xi)$  in (50) as  $g(\xi) = g_0 \tanh(\xi)$ . Putting (50) with  $g(\xi)$  in the NLS equation gives

$$g_0 = \sqrt{-\frac{2\Gamma}{\Delta}} \quad \text{and} \quad r = -2\Gamma. \tag{53}$$

Hence, the dark soliton solution is identified as

$$\mathcal{A}(\xi, \tau) = \sqrt{-\frac{2\Gamma}{\Delta}} \tanh(\xi) e^{-2i \Gamma \tau}, \quad \text{for } \Gamma \Delta < 0. \tag{54}$$

Since it is decisive in the solutions of (47), the  $\Gamma \Delta$  sign should be investigated.

#### 4. NUMERICAL EVALUATION

The effects of nonlinear constituent materials as well as heterogeneity of the layered semi-space on the  $\Gamma \Delta$  sign and hence solitary Love wave propagation are studied. In the calculations, the following parameters are chosen as in the geophysical model given in [7]

$$\gamma_0 = 2.159, \quad c_2/c_1 = 1.297.$$

Firstly, we investigate the influence of dimensionless linear heterogeneity parameters of the layer and semi-space  $A_1 = \alpha_1/k, A_2 = \alpha_2/k$ , respectively, on the change of nondimensional phase velocity  $C = c/c_1$  versus nondimensional wave number  $K = kh$  for the dispersion relation's first branch. Figure 2 illustrates the results for different values of  $(A_1, A_2)$  which have been chosen as  $\{(0.1, 0.3), (0.3, 0.1), (0.1, 0.1), (0.3, 0.3)\}$ . It is seen

that the curves having same  $A_2$  approach to each other for small wave numbers whereas the curves with same  $A_1$  approach to each other for  $K \gg 1$ . Consequently, linear heterogeneity of the layer dominates  $C$  for short waves while that of half space is effective on  $C$  for long waves. It is also observed that the upper limit of  $C$  is  $c_2/c_1$  chosen as 1.297, and the lower limit which is greater than 1 changes depending on  $A_1$ , which is consistent with the inequality (36). The change of  $\Gamma$  versus  $K$  is also shown in Figure 3 for different values of  $(A_1, A_2)$ . The sign of  $\Gamma$ , initially negative, changes at a certain  $K$  values with variation in  $A_1$  and  $A_2$ .

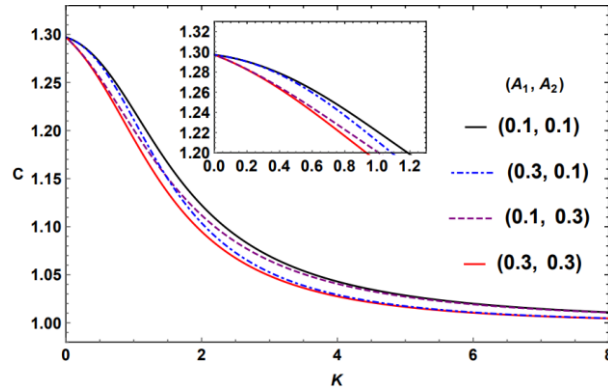


Figure 2.  $C$  vs.  $K$  for various  $(A_1, A_2)$ .

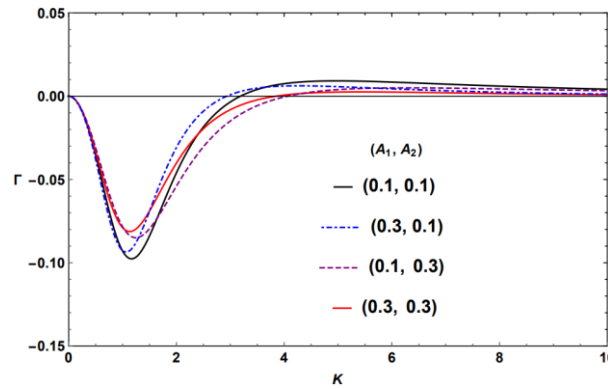


Figure 3.  $\Gamma$  vs.  $K$  for various  $(A_1, A_2)$ .

To examine the effect of heterogeneity associated with the linear constitution of both layer and semi-space on nonlinear wave propagation, in the numerical evaluations of  $\Gamma\Delta$ , nonlinear material constants  $\beta_{01} = n_1/c_1^2$ ,  $\beta_{02} = n_2/c_2^2$  and the nondimensional nonlinear heterogeneity parameters  $\Lambda_1 = \lambda_1 h$  and  $\Lambda_2 = \lambda_2 h$  are fixed while  $(A_1, A_2)$  is being changed. Note that when  $\beta_{0s} > 0$ , the material has shear hardening (H) otherwise softening (S) properties. Firstly, we examine the effect of  $(A_1, A_2)$  choosing as  $\{(0.1, 0.3), (0.3, 0.1), (0.1, 0.1), (0.3, 0.3)\}$  on the sign of  $\Delta$  and  $\Gamma\Delta$  for a softening layer and a hardening semi-space, (S, H) material model, with fixed  $\beta_{01} = -1$ ,  $\beta_{02} = 1$  and the nonlinear heterogeneity parameters  $(\Lambda_1, \Lambda_2) = (0.1, 0.1)$ . The results are illustrated in Figures 4a-4b. As shown in Figure 4a,  $\Delta > 0$  for all  $K > 0$ . Hence  $\Gamma\Delta$  is negative in the interval in which  $\Gamma < 0$ . Therefore, the presence of (54) is possible in this interval that is changing with  $(A_1, A_2)$ .

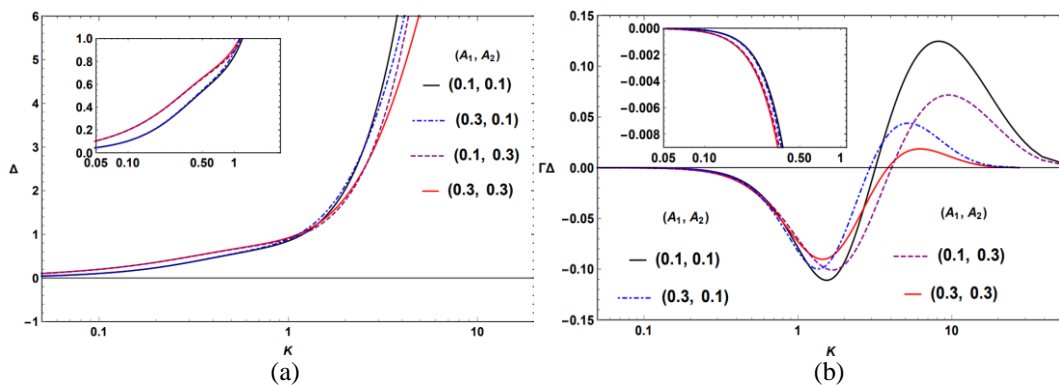
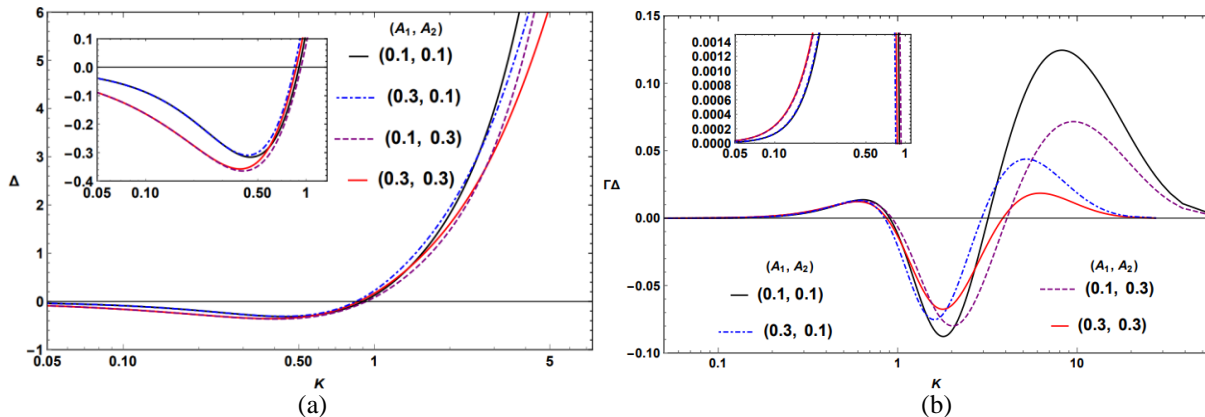


Figure 4. For various  $(A_1, A_2)$  and for (S, H) material model with  $\beta_{01} = -1$  and  $\beta_{02} = 1$ ,  $(\Lambda_1, \Lambda_2) = (0.1, 0.1)$  a)  $\Delta$  vs.  $K$ , b)  $\Gamma\Delta$  vs.  $K$ .

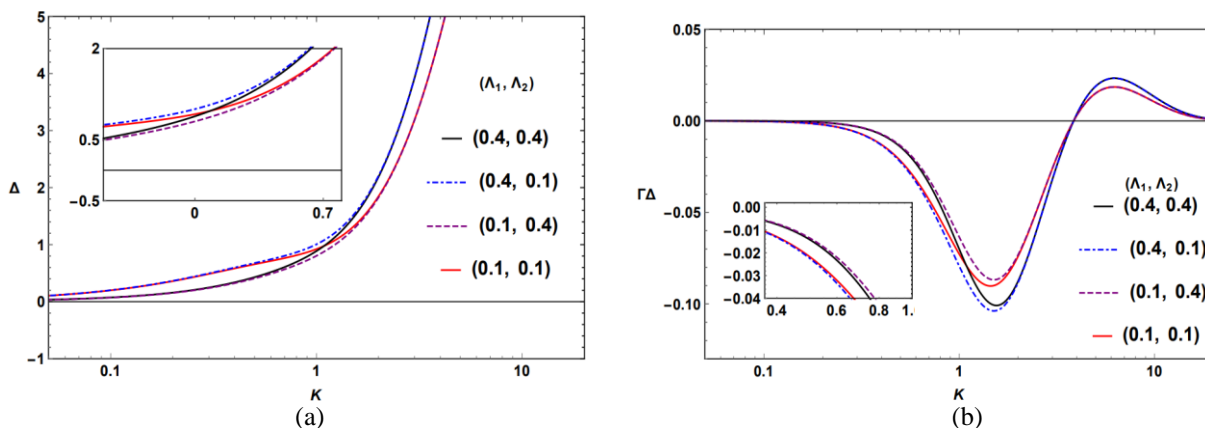


When the media consists of the softening layered half-space, for (S,S) material model having nonlinear material constants  $\beta_{01} = \beta_{02} = -1$ , changes of  $\Delta$  and  $\Gamma\Delta$  versus  $K$  are shown in Figures 5a-5b, respectively, for various values of  $(A_1, A_2)$  and for fixed  $(\Lambda_1, \Lambda_2) = (0.1, 0.1)$ . As can be seen,  $\Gamma\Delta$  is positive initially, thus existence of bright solitary waves is possible. The each  $\Gamma\Delta$  curve has two zeros that belong to  $\Delta$  and  $\Gamma$ , respectively. The positive intervals in which bright solitons (52) exist are varying with the change in  $A_1$  and  $A_2$ . It is seen that the  $\Gamma\Delta$  curves having same  $A_2$  approach to each other for small wave numbers whereas the curves with same  $A_1$  approach to each other for  $K \gg 1$ . Consequently, linear heterogeneity of the layer dominates nonlinear modulation for short waves while that of half space is effective on nonlinear waves for long waves. Note that different choice of  $\beta_{02}$  makes the curves in Figure 4 and Figure 5 different from each other. Thus, the effect of not only  $(A_1, A_2)$  but also  $\beta_{02}$  on the presence of solitary SH waves is demonstrated.

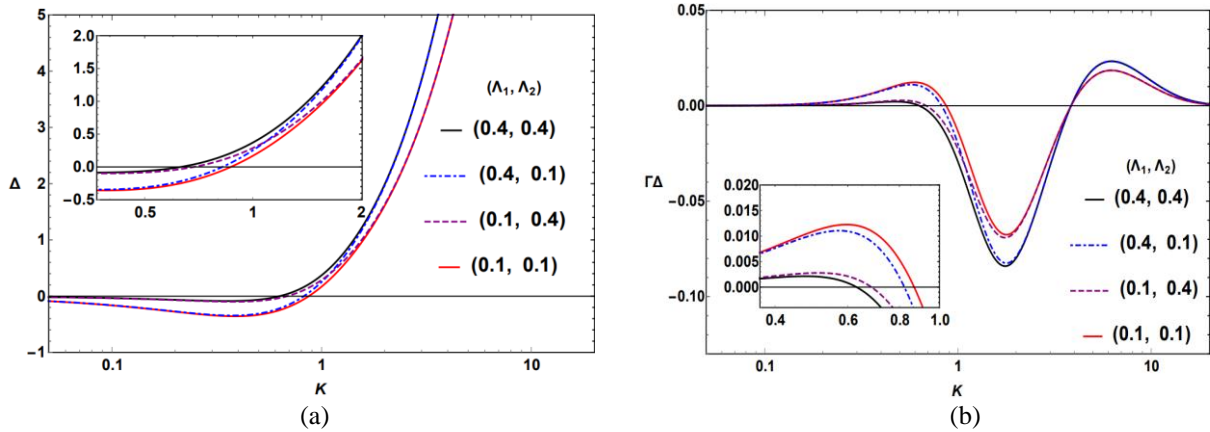


**Figure 5.** For various  $(A_1, A_2)$  and for (S, S) material model with  $\beta_{01} = \beta_{02} = -1$ ,  $(\Lambda_1, \Lambda_2) = (0.1, 0.1)$  a)  $\Delta$  vs.  $K$ , b)  $\Gamma\Delta$  vs.  $K$ .

Now, to investigate the effect of nonlinear heterogeneity of both layer and semi-space,  $\Delta$  and  $\Gamma\Delta$  curves are depicted with fixed  $(A_1, A_2) = (0.3, 0.3)$  and for various values of  $(\Lambda_1, \Lambda_2)$  which have been chosen as  $\{(0.1, 0.1), (0.4, 0.1), (0.1, 0.4), (0.4, 0.4)\}$ .  $\Delta$  and  $\Gamma\Delta$  versus  $K$  for (S, H) material model with  $(\beta_{01}, \beta_{02}) = (-1, 1)$  are presented in Figures 6a-6b, respectively. As can be observed in Figure 6a,  $\Delta > 0$  for all  $K$ . In Figure 6b, the sign of each  $\Gamma\Delta$  curve changes at  $K = 3.85$  in which  $\Gamma = 0$ . Dark solitary SH waves exist for  $0 < K < 3.85$  in which  $\Gamma\Delta < 0$ . Note that, for (S, H) material model, the wave numbers where dark solitary waves exist do not affected by the change in  $(\Lambda_1, \Lambda_2)$ . A similar examination is carried out for the media consisting of the softening layered half-space for  $\beta_{01} = \beta_{02} = -1$ , with Figures 7a-7b. It is seen that  $\Gamma\Delta$  curves have two zeros such that the first belongs to  $\Delta$  and the second belongs to  $\Gamma$ . Since  $\Gamma$  does not depend on nonlinear material parameters, the second zeros do not change, whereas the first zeros vary with the variation of  $(\Lambda_1, \Lambda_2)$ . It is also seen that  $\Gamma\Delta$  curves having same  $\Lambda_2$  approach to each other when  $K \ll 1$ ,  $\Gamma\Delta$  curves with same  $\Lambda_1$  approach to each other for large wave numbers. This observation is consistent with the conclusion highlighted in [22] that the layer's nonlinearity for short waves and the semi-space's nonlinearity for long waves dominate the wave modulation. Consequently, intervals where bright and dark solitons exist change depending on the nonlinear heterogeneous structures of layer and semi-space. The reason why the curves in Figure 6 and Figure 7 are different from each other is the different  $\beta_{02}$  selection. Thus, the effect of not only  $(\Lambda_1, \Lambda_2)$  but also  $\beta_{02}$  of the half-space on the presences of solitons is observed.



**Figure 6.** For various  $(\Lambda_1, \Lambda_2)$  and for (S, H) material model with  $\beta_{01} = -1, \beta_{02} = 1$ ,  $(A_1, A_2) = (0.3, 0.3)$  a)  $\Delta$  vs.  $K$ , b)  $\Gamma\Delta$  vs.  $K$ .

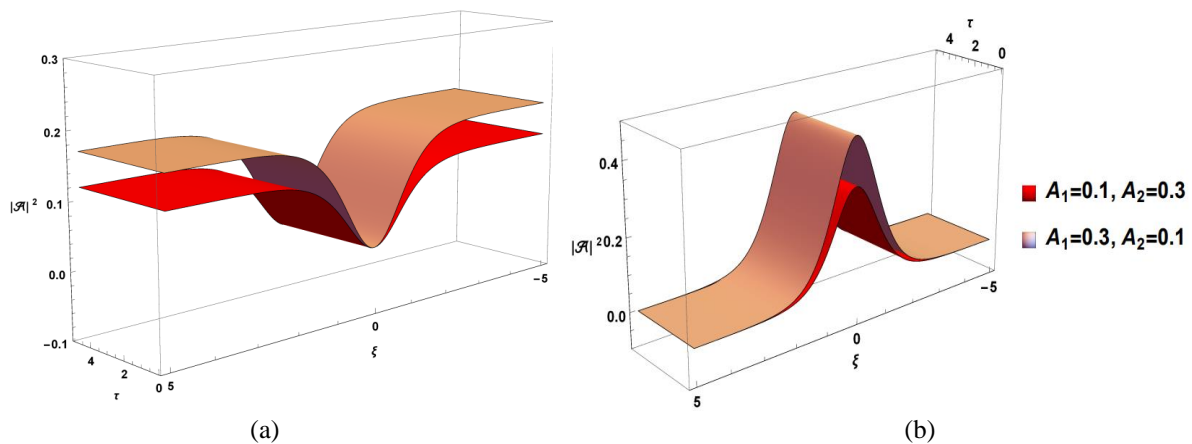


**Figure 7.** For various  $(\Lambda_1, \Lambda_2)$  and for  $(S, S)$  material model with  $\beta_{01} = -1, \beta_{02} = -1, (A_1, A_2) = (0.3, 0.3)$   
**a)  $\Delta$  vs.  $K$ , b)  $\Gamma\Delta$  vs.  $K$ .**

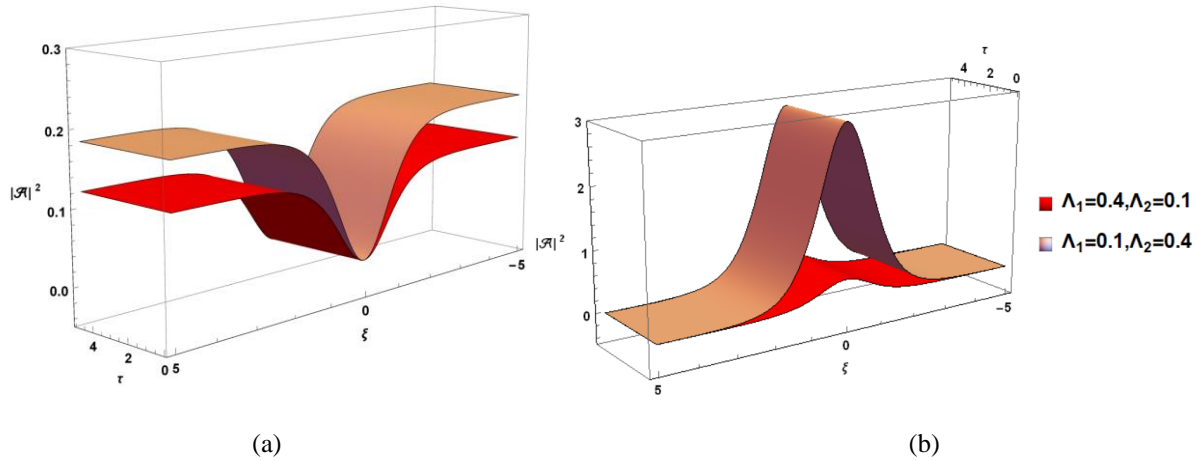
For all models having hardening half-space,  $\Gamma\Delta$  is negative for  $K \ll 1$ , thus dark solitary waves propagate. However, for all models having softening half-space,  $\Gamma\Delta$  is positive for  $K \ll 1$ , hence bright solitons propagate. It is concluded that the semi-space's nonlinearity dominates the wave motion for long waves.

$\Delta$  and  $\Gamma\Delta$  curves for hardening layer overlying the softening half-space and for hardening layer overlying the hardening half-space are not given due to limited space. These curves are symmetrical about the  $K$  axes of the opposite sign  $(\beta_{01}, \beta_{02})$  curves in Figures 4-7.

We also examine the influence of nonlinearity and nonhomogeneity on the evolution of solitary Love waves. As shown in Figures 4b-5b when  $K = 0.6$ , for  $(S, S)$  models  $\Gamma\Delta > 0$  and bright solitons propagate, for  $(S, H)$  models  $\Gamma\Delta < 0$  and dark soliton propagation exists. Hence nonlinear evolutions of dark and bright solitons are presented in Figures 8a-8b for  $(S, H)$  and  $(S, S)$  material models, respectively, for different  $(A_1, A_2)$  selected as  $\{(0.1, 0.3), (0.3, 0.1)\}$ , with fixed  $K = 0.6$  and  $(\Lambda_1, \Lambda_2) = (0.1, 0.1)$ . Consequently, the considerable effects of both  $(A_1, A_2)$  and  $\beta_2$  on the nonlinear evolutions of waves are demonstrated. Similar observation is made for different  $(\Lambda_1, \Lambda_2)$  values selected as  $(\Lambda_1, \Lambda_2) = \{(0.4, 0.1), (0.1, 0.4)\}$  with  $K = 0.6$  and fixed  $(A_1, A_2) = (0.3, 0.3)$  in Figures 9a-9b, respectively, for  $(S, H)$  and  $(S, S)$  models. Thus, the influence of not only  $(\Lambda_1, \Lambda_2)$  but also  $\beta_2$  on the nonlinear evolutions of waves is observed. Notice that for the  $(S, H)$  material model, though the change in  $(\Lambda_1, \Lambda_2)$  does not affect the interval of existence of dark solitons, it has a significant effect on the nonlinear evolution of waves.



**Figure 8.** For various  $(A_1, A_2)$  with  $(\Lambda_1, \Lambda_2) = (0.1, 0.1)$  and  $K=0.6$  **a) Nonlinear evolution of the dark solitons in the  $(S, H)$  model with  $\beta_{01} = -1, \beta_{02} = 1$  b) Nonlinear evolution of the bright solitons in the  $(S, S)$  model with  $\beta_{01} = -1, \beta_{02} = -1$ .**



**Figure 9.** For various  $(\Lambda_1, \Lambda_2)$  with  $(A_1, A_2) = (0.3, 0.3)$  and  $K=0.6$  **a)** Nonlinear evolution of the dark solitons in the (S, H) model with  $\beta_{01} = -1, \beta_{02} = 1$  **b)** Nonlinear evolution of the bright solitons in the (S, S) model with  $\beta_{01} = -1, \beta_{02} = -1$ .

### 5. CONCLUDING REMARKS

Existence and nonlinear evolution of solitary Love waves in a layered semi-space consisting of different nonlinear, elastic, heterogeneous constituent materials varying exponentially with depth are examined. Firstly, dispersion relation is derived, and it is shown that linear heterogeneity of the layer dominates  $C$  for short waves while that of half space is dominant on  $C$  for long waves. Then an NLS equation is obtained for nonlinear modulation of waves via multiple scales method. For two different material models, (S, H) and (S, S), the variation of  $\Gamma\Delta$  sign with heterogeneity of both layer and half-space is examined due to its distinctive effect on the presence of solitary wave solutions. As it is seen in the Figures 4-7, linear and nonlinear heterogeneity parameters of the semi-space affects strongly the existence of envelope solitary waves for long waves while those of layer dominate the existence of solitary waves for short waves. Furthermore, the considerable influence of heterogeneity properties of both layer and semi-space on the nonlinear evolutions of bright and dark solitons are shown graphically. It is observed that for the (S, H) material model, the change in  $(\Lambda_1, \Lambda_2)$  does not affect the interval of existence of dark solitons whereas it has a considerable effect on nonlinear evolution of dark solitons.

### Author's Contribution

Ekin DELİKTAŞ-ÖZDEMİR 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.

### APPENDIX

$$W_l = \begin{pmatrix} (iklp_l - \alpha_1/2)e^{ikp_l h} & (-iklp_l - \alpha_1/2)e^{-ikp_l h} & 0 \\ iklp_l - \alpha_1/2 & -iklp_l - \alpha_1/2 & (-klv_l + \alpha_2/2)\sqrt{\gamma_0} \\ 1 & 1 & -1/\sqrt{\gamma_0} \end{pmatrix}$$

$$R = (R_1, R_2, R_3)^T; R_1 = \frac{(2kp - i\alpha_1)(1 - i \tan(hkp))}{2\sqrt{\gamma_0}(2kp - \alpha_1 \tan(hkp))}, R_2 = \frac{(2kp + i\alpha_1)(1 + i \tan(hkp))}{2\sqrt{\gamma_0}(2kp - \alpha_1 \tan(hkp))}, R_3 = 1$$

$$L = (L_1, L_2, L_3); L_1 = \frac{2kp \sec(hkp)}{-2kp + \alpha_1 \tan(hkp)}, L_2 = 1, L_3 = -\frac{(4k^2 p^2 + \alpha_1^2) \tan(hkp)}{4kp - 2\alpha_1 \tan(hkp)}$$

$$f_1 = n^{(1)}(y) \frac{e^{ikpy}}{(\mu_1 e^{\alpha_1 y})^{3/2}}, f_2 = \frac{dn^{(1)}(y)}{dy} \frac{e^{ikpy}}{(\mu_1 e^{\alpha_1 y})^{3/2}}, f_3 = \frac{e^{ikpy}}{\sqrt{\mu_1 e^{\alpha_1 y}}}, f_4 = y \frac{e^{ikpy}}{\sqrt{\mu_1 e^{\alpha_1 y}}},$$

$$f_5 = n^{(1)}(y) \frac{e^{-ikpy}}{(\mu_1 e^{\alpha_1 y})^{3/2}}, f_6 = \frac{dn^{(1)}(y)}{dy} \frac{e^{-ikpy}}{(\mu_1 e^{\alpha_1 y})^{3/2}}, f_7 = \frac{e^{-ikpy}}{\sqrt{\mu_1 e^{\alpha_1 y}}}, f_8 = y \frac{e^{-ikpy}}{\sqrt{\mu_1 e^{\alpha_1 y}}},$$

$$f_9 = n^{(1)}(y) \frac{e^{3ikpy}}{(\mu_1 e^{\alpha_1 y})^{3/2}}, f_{10} = \frac{dn^{(1)}(y)}{dy} \frac{e^{3ikpy}}{(\mu_1 e^{\alpha_1 y})^{3/2}}, f_{11} = n^{(1)}(y) \frac{e^{-3ikpy}}{(\mu_1 e^{\alpha_1 y})^{3/2}}, f_{12} = \frac{dn^{(1)}(y)}{dy} \frac{e^{-3ikpy}}{(\mu_1 e^{\alpha_1 y})^{3/2}},$$

$$f_{13} = \frac{e^{kvy}}{\sqrt{\mu_2 e^{\alpha_2 y}}}, f_{14} = y \frac{e^{kvy}}{\sqrt{\mu_2 e^{\alpha_2 y}}}, f_{15} = n^{(2)}(y) \frac{e^{3kvy}}{(\mu_2 e^{\alpha_2 y})^{3/2}}, f_{16} = \frac{dn^{(2)}(y)}{dy} \frac{e^{3kvy}}{(\mu_2 e^{\alpha_2 y})^{3/2}}$$

$$D_1 = |A_1|^2 A_1 R_1^2 R_2 \left( \frac{9}{16} \alpha_1^4 - \frac{9}{4} ikp \alpha_1^3 - ik^3 \alpha_1 (p + 9p^3) - k^4 (9 + 2p^2 + 9p^4) \right),$$

$$D_2 = |A_1|^2 A_1 R_1^2 R_2 \left( \frac{i}{8} (9i \alpha_1^3 + 18kp \alpha_1^2 + 12ik^2 \alpha_1 (1 + 3p^2) + 8k^3 p (1 + 9p^2)) \right),$$

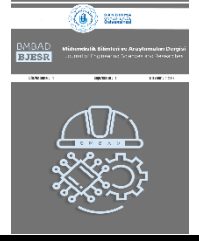
$$\begin{aligned}
 D_3 &= 2iR_1(\mathcal{M}_{12}^{(1)} + \mathcal{M}_{21}^{(1)}) + R_1\mathcal{N}^{(1)} + 2\Lambda_1 \frac{\partial}{\partial x_1} \mathcal{M}_{11}^{(1)}, \\
 D_4 &= -\frac{2iR_1}{pkc_1^2} \left( \omega \frac{\partial}{\partial t_1} + kc_1^2 \frac{\partial}{\partial x_1} \right) \mathcal{M}_{11}^{(1)}, \\
 D_5 &= |A_1|^2 A_1 R_2^2 R_1 \left( \frac{9}{16} \alpha_1^4 + \frac{9}{4} ikp \alpha_1^3 + ik^3 \alpha_1 (p + 9p^3) - k^4 (9 + 2p^2 + 9p^4) \right), \\
 D_6 &= |A_1|^2 A_1 R_2^2 R_1 \frac{1}{8} (-9 \alpha_1^3 - 18ikp \alpha_1^2 - 12k^2 \alpha_1 (1 + 3p^2) - 8ik^3 p (1 + 9p^2)), \\
 D_7 &= 2iR_2(\mathcal{M}_{12}^{(1)} + \mathcal{M}_{21}^{(1)}) + R_2\mathcal{N}^{(1)} + 2\Lambda_2 \frac{\partial}{\partial x_1} \mathcal{M}_{11}^{(1)}, \\
 D_8 &= \frac{2iR_2}{pkc_1^2} \left( \omega \frac{\partial}{\partial t_1} + kc_1^2 \frac{\partial}{\partial x_1} \right) \mathcal{M}_{11}^{(1)}, \\
 D_9 &= |A_1|^2 A_1 R_1^3 \left( \frac{3}{16} \alpha_1^4 - \frac{9}{4} ikp \alpha_1^3 - 9k^2 p^2 \alpha_1^2 + ik^3 p \alpha_1 (-1 + 15p^2) + k^4 (-3 - 2p^2 + 9p^4) \right), \\
 D_{10} &= |A_1|^2 A_1 R_1^3 \frac{1}{8} (-2ikp + \alpha_1) (4k^2 (-1 + 3p^2) + 12 ikp \alpha_1 - 3 \alpha_1^2), \\
 D_{11} &= |A_1|^2 A_1 R_2^3 \left( \frac{3}{16} \alpha_1^4 + \frac{9}{4} ikp \alpha_1^3 - 9k^2 p^2 \alpha_1^2 + ik^3 p \alpha_1 (1 - 15p^2) + k^4 (-3 - 2p^2 + 9p^4) \right), \\
 D_{12} &= |A_1|^2 A_1 R_2^3 \frac{1}{8} (2ikp + \alpha_1) (4k^2 (-1 + 3p^2) - 12 ikp \alpha_1 - 3 \alpha_1^2), \\
 D_{13} &= 2iR_3(\mathcal{M}_{12}^{(2)} + \mathcal{M}_{21}^{(2)}) + R_3\mathcal{N}^{(2)} + 2\Lambda_3 \frac{\partial}{\partial x_1} \mathcal{M}_{11}^{(2)}, \\
 D_{14} &= \frac{2R_3}{vkc_2^2} \left( \omega \frac{\partial}{\partial t_1} + kc_2^2 \frac{\partial}{\partial x_1} \right) \mathcal{M}_{11}^{(2)}, \\
 D_{15} &= \frac{1}{16} (3\alpha_2^4 + 16k^4 (9v^4 + 2v^3 - 3) - 16\alpha_2 k^3 (15v^3 + v) + 144\alpha_2^2 k^2 v^2 - 36\alpha_2^3 kv) R_3^3 |A_1|^2 A_1, \\
 D_{16} &= \frac{1}{8} (2kv - \alpha_2) (4k^2 (3v^2 + 1) - 12\alpha_2 kv + 3\alpha_2^2) R_3^3 |A_1|^2 A_1 \\
 \mathcal{M}_{\beta\gamma}^{(\alpha)} &= \omega \frac{\partial A_\beta}{\partial t_\gamma} + kc_\alpha^2 \frac{\partial A_\beta}{\partial x_\gamma}, \quad \mathcal{N}^{(\alpha)} = c_\alpha^2 \frac{\partial^2 A_1}{\partial x_1^2} - \frac{\partial^2 A_1}{\partial t_1^2}, \quad \Lambda_\alpha = \left( \frac{\partial R_\alpha}{\partial k} + V_g \frac{\partial R_\alpha}{\partial \omega} \right)
 \end{aligned}$$

## REFERENCES

- [1] A.E.H. Love “Some Problems of Geodynamics”, Cambridge University Press, 1911.
- [2] S. Kundu, S. Gupta, and S. Manna “Propagation of Love wave in fiber-reinforced medium lying over an initially stressed orthotropic half-space”, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, vol. 38, no. 11, pp. 1172–1182, 2014.
- [3] J.D. Achenbach “Wave Propagation in Elastic Solids”, Amsterdam: North Holland Publ. Co., 1973.
- [4] K. Bataille, and F. Lund “Nonlinear waves in elastic media”, Physica D: Nonlinear Phenomena, vol. 6, no. 1, pp. 95-104, 1982.
- [5] T. Boxberger, M. Picozzi, and S. Parolai “Shallow geology characterization using Rayleigh and Love wave dispersion curves derived from seismic noise array measurements”, Journal of Applied Geophysics, vol. 75, no. 2, pp. 345-354, 2011.
- [6] A.C. Eringen, and E.S. Suhubi “Elastodynamics”, New York: Academic Press, vol. 1, 1974.
- [7] W.M. Ewing, W.S. Jardetzky, F. Press, and A. Beiser “Elastic waves in layered media”, Physics Today, vol. 10, no. 12, pp. 27, 1957.
- [8] Y. Fukao, and K. Abe “Multi-mode Love waves excited by shallow and deep earthquakes”, Bull Earthq. Res. Inst, vol. 49, pp. 1-12, 1971.
- [9] S.V. Kuznetsov “Love waves in nondestructive diagnostics of layered composites”, Survey Acoustical Physics, vol. 56, no. 6, pp. 877-892, 2010.
- [10] E. Meissner “Elastische Oberflächenwellen mit Dispersion in einem inhomogenen Medium”, Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zurich, vol. 66, pp. 181-195, 1921.
- [11] S.C.D. Gupta “Note on Love waves in a homogeneous crust laid upon heterogeneous medium”, Journal of Applied Physics, vol. 23, no. 11, pp. 1276-1277, 1952.
- [12] S.N. Bhattacharya “Love wave dispersion in a homogeneous crust overlying a continuous mantle with vertical in-homogeneity”, Geophysical Journal International, vol. 19, no. 4, pp. 335-349, 1970.
- [13] K. Watanabe “Plane SH-waves in harmonically inhomogeneous elastic media”, Wave motion, vol. 6, no. 5, pp. 477-488, 1984.
- [14] S. Majhi, P.C. Pal, and S. Kumar “Propagation of SH waves in a visco-elastic layer overlying an inhomogeneous isotropic half-space”, Ain Shams Engineering Journal, vol. 9, no. 4, pp. 675-680, 2018.
- [15] S. Manna, S. Kundu, and S. Gupta “Effect of reinforcement and in-homogeneity on the propagation of Love waves”, International Journal of Geomechanics, vol. 16, no. 2, 2016.
- [16] C.D. Wang, C.S. Tzeng, E. Pan, and J.J. Liao “Displacements and stresses due to a vertical point load in an inhomogeneous transversely isotropic half-space”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. vol. 40, no. 5, pp. 667–685, 2003.
- [17] R.S. Sidhu “Propagation of love waves in a two-layered heterogeneous half space”, Pure and Applied Geophysics, vol. 91, pp. 76-94, 1971.
- [18] S.N. Chatterjee “Propagation of Love waves in a medium containing a heterogeneous layer lying over a heterogeneous half space”, Pure and Applied Geophysics, vol. 90, pp. 53-60, 1971.
- [19] M. Chatterjee, S. Dhua, A. Chattopadhyay and S. A. Sahu “Seismic waves in heterogeneous crust-mantle

- layers under initial stresses”, *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 20, no. 1, pp. 39-61, 2016.
- [20] S. Gupta et al. “Propagation of Love waves in non-homogeneous substratum over initially stressed heterogeneous half-space”, *Applied Mathematics and Mechanics*, vol. 34, no. 2, pp. 249–258, 2013.
- [21] A.M. Abd-Alla, and S.M. Ahmed “Propagation of Love waves in a non-homogeneous orthotropic elastic layer under initial stress overlying semi-infinite medium”, *Applied Mathematics and Computation*, vol. 106, no. 2, pp. 265-275, 1999.
- [22] M. Teymur “Nonlinear modulation of Love waves in a compressible hyperelastic layered half-space”, *Int. J. Eng. Sci.*, vol.26, pp. 907-927, 1988.
- [23] E. Deliktas-Ozdemir, S. Ahmetolan, and D. Tuna “Existence of solitary SH waves in a heterogeneous elastic two-layered plate”, *Z. Angew. Math. Phys.*, vol. 73, pp. 220, 2022.
- [24] E. Deliktas-Ozdemir “Nonlinear Love-type waves in a heterogeneous layer sandwiched between two semi-infinite media”, *Z. Angew. Math. Phys.*, vol. 74, pp. 1-7, 2023.
- [25] J.K. Knowles “The finite anti-plane shear field near the tip of a crack for a class of in-compressible elastic solids”, *International Journal of Fracture*, vol. 13, no. 5, pp. 611-639, 1977.
- [26] E. Deliktas-Özdemir, and M. Teymür “Nonlinear surface SH waves in a half-space covered by an irregular layer”, *Z. Angew. Math. Phys.*, vol. 73, no. 4, pp. 1-18, 2022.
- [27] A. Jeffrey, and T. Kawahara “Asymptotic Methods in Nonlinear Wave Theory”, Boston Pitman, 1982.
- [28] A. Chattopadhyay, S. Gupta, V.K. Sharma, and P. Kumari “Effect of point source and heterogeneity on the propagation of SH-waves”, *Int. J. of Appl. Math and Mech.*, vol. 6, no. 9, pp. 76-89, 2010.
- [29] P. Avtar “Love waves in a two-layered crust overlying a vertically in-homogeneous halfspace”, *I. pure and applied geophysics*, vol. 66, no. 1, pp. 48-68, 1967.





## Ses Dosyalarının ENF Tabanlı Adli Analizine Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü Parametre Seçimlerinin Etkisi

### The Effect of Short-Time Fourier Transform Parameters Choice on ENF-based Forensic Analysis of Audio

<sup>1</sup>Ali Berk YALINKILIÇ , <sup>2</sup>Saffet VATANSEVER 

<sup>1,2</sup>Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Bursa, TÜRKİYE

<sup>1</sup>aliberk425@gmail.com, <sup>2</sup>saffet.vatansever@btu.edu.tr (Sorumlu Yazar)

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 1 February 2023  
Accepted : 11 April 2023

##### Keywords:

ENF,  
Electric Network  
Frequency,  
Audio and Video Forensics,  
Time-of-Recording,  
Time-Stamping.

#### ABSTRACT

Due to the rapidly developing computer technology, digital audio, image, and video can be modified with various techniques. These modifications may be on the media content or the metadata. In this context, forensic analysis of digital media is of great importance. Electrical network frequency (ENF) based forensic analysis is a significant tool that can be used for checking file integrity and detecting time-of-recording. One of the most preferred methods for ENF signal estimation is the Short-Time Fourier Transform (STFT) based approach. The choice of STFT window size and STFT hop size can directly affect the accuracy of ENF signal to be estimated from media, and hence the performance of the ENF-related forensic applications. This work investigates how the STFT parameters choice affects the performance in time-of-recording verification. A comparative analysis is made for various STFT window sizes and STFT hope sizes by experimenting with different audio lengths.

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

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 1 Şubat 2023  
Kabul : 11 Nisan 2023

##### Anahtar Kelimeler:

ENF,  
Elektrik Şebeke Frekansını,  
Ses ve Videoların Adli  
Analizi,  
Kayıt Zamanı,  
Zaman Damgası.

#### ÖZET

Hızla gelişmekte olan bilgisayar teknolojisi sayesinde çeşitli tekniklerle dijital ses, görüntü ve video dosyaları üzerinde modifikasyonlar yapılabilmektedir. Bu modifikasyonlar doğrudan dosya içeriğinde olabileceği gibi bazen de meta data üzerinde olabilmektedir. Bu bağlamda dijital medyaların adli analizi büyük önem arz etmektedir. Elektrik şebeke frekansını (ENF) tabanlı adli analiz yaklaşımı dosya bütünlük kontrolünde ve dosyaların kayıt zamanı tespitinde kullanılabilen önemli bir araçtır. ENF sinyali kestiriminde en çok tercih edilen yöntemlerden biri, kısa zamanlı Fourier dönüşümü (Short-Time Fourier Transform - STFT) temelli yaklaşımdır. STFT yönteminde, pencere boyutu ve kaydırma miktarı parametrelerinin seçimi büyük öneme sahip olup, kestirimi yapılan ENF sinyali doğruluğunu, dolayısıyla da ENF tabanlı adli analiz uygulamalarının performansını doğrudan etkileyebilmektedir. Bu çalışmada, STFT parametreleri seçiminin, ENF tabanlı dosya kayıt zamanı doğrulamada performansa ne derece etki ettiği araştırılmıştır. Farklı uzunluktaki ses dosyaları, çeşitli STFT pencere boyutu ve STFT kaydırma miktarlarına göre ayrı ayrı test edilerek karşılaştırmalı bir analiz yapılmıştır.

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

## 1. GİRİŞ

Günümüz bilgi çağında dijital kayıtların çok kolay bir şekilde manipüle edilebilir ya da yapay olarak oluşturulabilir olması; ses, görüntü ve video dosyalarının adli analizini önemli bir araştırma konusu haline getirmiştir. Bu bağlamda, elektrik şebeke frekansı (ENF - Electric Network Frequency) tabanlı adli analiz son yıllardaki en popüler ve en önemli araştırma konuları arasında göze çarpmaktadır. ENF, elektrik şebeke geriliminin frekansı olup, harcanan ve üretilen güçteki farklılığa bağlı olarak bir nominal değer (Türkiye’de 50 Hz) etrafında (genelde  $\pm 0.1$  Hz) sürekli dalgalanmalar yapar [1]. Enterkonnekte bir elektrik şebekesi üzerindeki tüm jeneratörlerin senkron çalışması sonucu şebeke üzerindeki tüm noktalarda aynı ENF değişimleri gözlenir [1].

ENF, elektrik şebeke gerilimi kaynaklı elektromanyetik alan ya da akustik gürültünün (akustik şebeke gürültüsü) var olduğu ortamlarda yapılan ses kayıtlarına istemsiz olarak girişim yapar [2-7]. Ayrıca, ENF, elektrik şebekesinden beslenen bir ışık kaynağı ile aydınlatılan ortamlarda yapılan video kayıtlarına gömülür [8-19]. Zaman veya frekans uzayı temelli çeşitli tekniklerle bu kayıtlardan ENF’in zamana bağlı değişimleri (ENF sinyali) yakalanabilir [2, 6, 20-23].

ENF sinyali; dosya kayıt zamanı doğrulama, içerik doğrulama, videolarda ses ve görüntü senkronizasyonu, elektrik şebekesi tanılama gibi çeşitli adli analiz işlemlerinde kullanılabilir. Örneğin; adli bir vakada suçun işlendiği tarihte, olay yerinden başka bir yerde (ev, işyeri, çocuk parkı, cadde, sokak vs.) sanığa ait güvenlik kamerası ile çekilmiş bir video tespit edilip bu videonun kayıt zamanı zamanı doğrulanabilirse ilgili tarihte şüpheli kişinin başka yerde olduğu kanıtlanabilir. Bir başka örnek uygulama olarak; bilinmeyen bir sebeple gizli kalmış geçmişe ait video dosyalarının gün yüzüne çıkması durumunda dosyaların orijinalliği, bütünlüğü ve çekildiği tarih ve saat aydınlığa kavuşturulabilir.

Elektrik üretimindeki arz ve talep dengesizliği, dolayısıyla da ENF’teki değişimler zaman içinde kısa süreliğine de olsa benzerlikler gösterse de zaman uzadıkça bu değişimler eşsiz hale gelir. Bu sebeple, bir ses ya da video dosyasının ENF tabanlı adli analiz uygulamalarının performansı kayıt dosyasının uzunluğu ile, dolayısıyla da dosyadan kestirimi sağlanan ENF zaman serisinin (ENF sinyalinin) uzunluğu ile doğru orantılıdır.

Medya dosyalarından (ses ya da video) ENF sinyali kestiriminde sıklıkla tercih edilen en önemli yöntemlerden biri kısa zamanlı Fourier dönüşümü (Short-Time Fourier Transform - STFT) tabanlı yaklaşımdır [2, 3, 22-25]. STFT yöntemi ile ENF sinyali kestiriminde, STFT pencere boyutu ve kaydırma miktarı parametrelerinin seçimi, medyadan elde edilen ENF sinyalinin doğruluğuna, dolayısıyla da ENF tabanlı adli analiz uygulamalarının performansına doğrudan etki edebilmektedir.

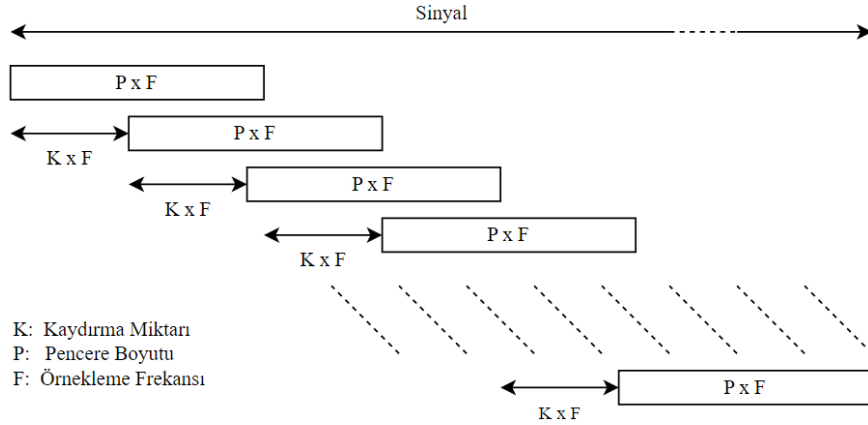
Bu çalışmada, farklı uzunluktaki ses dosyaları için STFT parametre seçimlerine göre ENF tabanlı kayıt zamanı doğrulamada performansın nasıl etkilendiği üzerine kapsamlı bir araştırma yapılmıştır. Bu amaçla, ENF-WHU veri tabanındaki ([22, 23]) 130 adet ses dosyasının ilk 90 sn., ilk 120 sn., ilk 180 sn., ve ilk 240 sn.’lik klipleri 8 sn. ile 64 sn. arasında değişen STFT pencere boyutları ve 1 sn. ile 32 sn. arasında değişen STFT kaydırma miktarları için ayrı ayrı test edilmiş ve performans analizi yapılmıştır. Daha iyi performans elde edebilmek için, hangi koşullarda hangi parametre seçimlerinin yapılmasının daha uygun olabileceği araştırılmıştır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

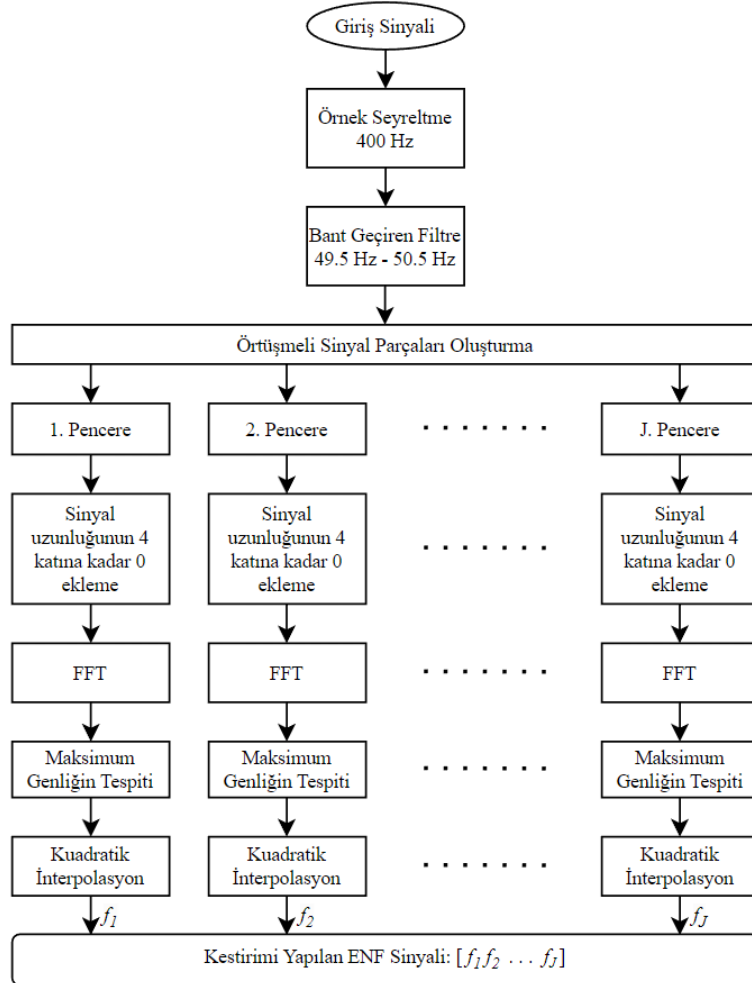
Sayısal medya dosyalarının (ses ya da video) adli analizi kapsamında kullanılmak üzere, ENF sinyali kestiriminde en çok tercih edilen yöntemlerden biri kısa zamanlı Fourier dönüşümü (Short-Time Fourier Transform - STFT) yaklaşımıdır [2, 3, 22-25]. Kısa zamanlı Fourier dönüşümü, bir sinyalin frekans ve faz bileşenlerinin zamana bağlı değişimlerini hesaplamada kullanılabilen önemli bir yöntemdir. STFT, birbirini izleyen iki temel aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, STFT uygulanacak ana sinyal belirli oranda örtüşmeli olarak eşit uzunluktaki sinyal parçalarına ayrılır. Bu işlem, Şekil 1’de resmedilmiştir. Burada pencere boyutu ( $P$ ), her bir sinyal parçasının saniye cinsinden uzunluğunu belirler. Sinyalin her 1 saniyelik kısmındaki örnek sayısı (örnekleme frekansı)  $F$  ile ifade edilirse, her bir sinyal parçası  $F \times K$  örnekten oluşmaktadır. Kaydırma miktarı ( $K$ ), saniye cinsinden kaydırma boyutunu belirler. Buna göre ardışık iki sinyal parçası arasındaki örtüşme miktarı  $(P-K) \times F$  örnek kadardır. STFT’nin ikinci aşamasında, hızlı Fourier dönüşümü (Fast Fourier Transform - FFT) algoritması yardımı ile, ilk aşamada elde edilen her bir sinyal parçasının ayrık Fourier dönüşümü hesaplanır. Ardından, her bir dönüşüm için istenen frekans bandındaki frekans ve/veya faz bilgisi elde edilir.

STFT tabanlı ENF kestirim algoritması ([3]), Şekil 2’de blok diyagramı halinde sunulmuştur. Bu algoritmada ilk olarak gereksiz işlem yükünden kurtulmak için sinyalin örnekleme frekansı nominal ENF frekansının en az 2 katı olacak şekilde azaltılır (Nyquist kriteri [26]). ENF harmoniklerinin de kullanılabilmesi düşünülerek örnekleme frekansını 400 Hz’e indirmek iyi bir seçim olacaktır. Ardından, aşağı örneklenmiş sinyal merkez frekansı nominal frekans olan bir bant geçiren filtreden geçirilir. ENF’in nominal değerden  $\pm 0.1$  Hz kadar sapmalar yapabileceği ([1]) düşünülürken, 49.5 Hz ile 50.5 Hz aralığındaki bir frekans geçirme bandı, bu filtre için iyi bir seçim olacaktır. Filtreleme işlemi sonucu ilgilenilmeyen frekanslardan yüksek oranda arındırılan sinyal,  $J$  adet örtüşmeli sinyal parçasına bölünür (Şekil 1’de olduğu gibi). Burada  $J$ , seçilen STFT pencere boyutu ve kaydırma miktarına göre sinyalden elde edilebilen sinyal parçalarının sayısını ifade eder. Her bir sinyal parçasından 1 ENF örneği elde edileceği düşünülürken,  $J$  aynı zamanda seçilen STFT parametrelerine göre sinyalden elde edilebilecek ENF örneği sayısını ifade eder. Daha sonra, her bir sinyal parçasının sonuna sıfırlar eklenip (zero padding) FFT’si alınır. FFT işleminden önce sıfır ekleme işlemi, sinyal parçasının frekans spektrumuna ait frekans

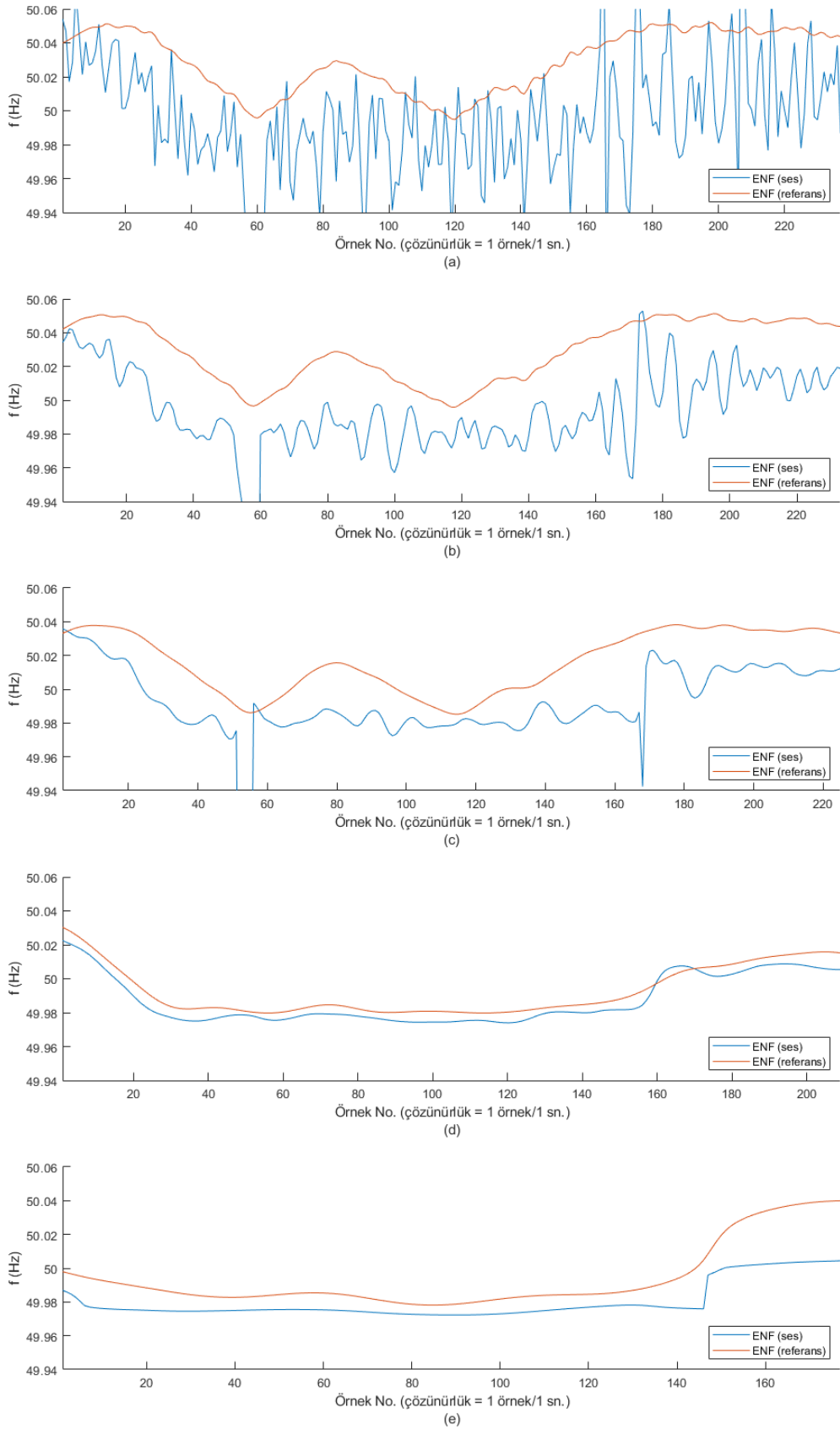
noktaları arasındaki mesafeyi azaltarak daha küçük frekans değişimlerini yakalayabilmeye olanak sağlar. Ancak, gereğinden fazla sıfır eklemek hafıza kullanımını önemli ölçüde artırır. Dahası, hafıza yetersizliğinde diskin hafızasının kullanımına, sonrasında da işlemlerin durma seviyesine gelecek kadar yavaşlamasına sebep olur. Bu sebeple, eklenen sıfırlarla birlikte sinyal boyutu 4 katını geçmeyecek şekilde ekleme yapmak uygun olacaktır. Sıfır ekleme işlemi ile yeterince küçültülemeyen frekans aralıkları kuadratik (ikinci derece) interpolasyon ile istenen seviyelere getirilir [3]. Bir sinyal parçası için uygulanan FFT ve kuadratik interpolasyon sonucu, frekans spektrumunda maksimum genliğe karşılık gelen frekans değeri o sinyal parçası için hesaplanmış ENF örneğine karşılık gelir. Sırasıyla her bir parça için ENF örneklerinin elde edilmesi sonucu ENF zaman serisi, yani ENF sinyali hesaplanmış olur.



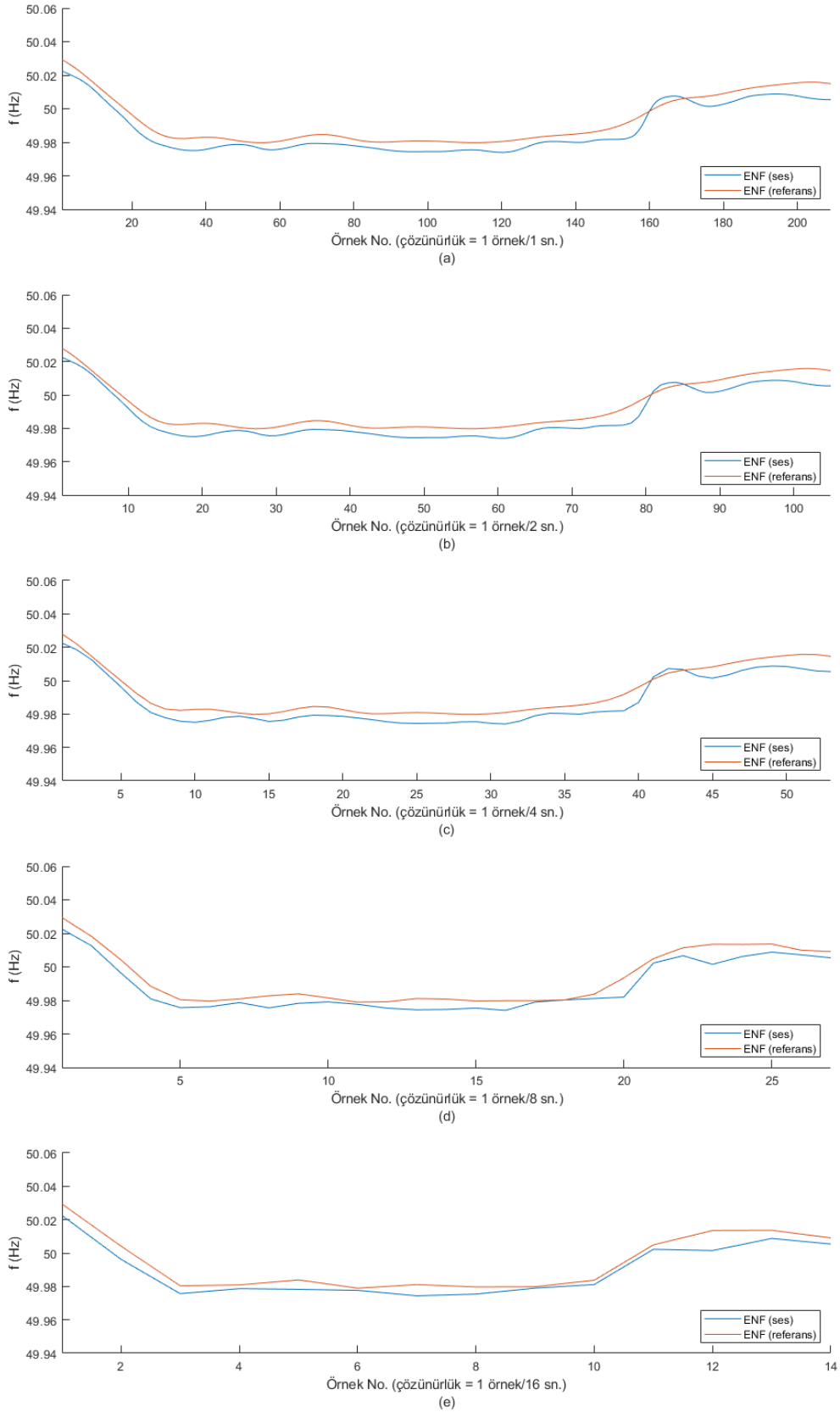
Şekil 1. Kısa zamanlı Fourier dönüşümünde örtüşmeli sinyal parçaları oluşturma işlemi [3].



Şekil 2. Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü Tabanlı ENF Kestirim Algoritması [3].



**Şekil 3.** 1 sn. uzunluklu STFT kaydırma miktarı için farklı STFT pencere boyutu ((a) 4 sn. (b) 8 sn. (c) 16 sn. (d) 32 sn. (e) 64 sn.) seçimlerine göre örnek bir ses dosyasından kestirimi sağlanan ENF sinyalleri ile aynı parametre seçimlerine göre elde edilmiş referans ENF sinyalleri karşılaştırması. (a), (b), ve (c) için ses dosyasının kayıt zamanı doğrulanamamış olup hatalı eşleşme elde edilmiştir. (d) ve (e) için ses dosyasının kayıt zamanı doğrulanabilmiştir.



**Şekil 4.** 32 sn. uzunluklu STFT pencere boyutu için farklı STFT kaydırma miktarı ((a) 1 sn. (b) 2 sn. (c) 4 sn. (d) 8 sn. (e) 16 sn.) seçimlerine göre örnek bir ses dosyasından kestirimi sağlanan ENF sinyalleri ile aynı parametre seçimlerine göre elde edilmiş referans ENF sinyalleri karşılaştırması. (a), (b), ve (c) için ses dosyasının kayıt zamanı doğrulanabilmiştir. (d) ve (e) için ses dosyasının kayıt zamanı doğrulanamamış olup hatalı eşleşme elde edilmiştir.



### 3. ENF HESABINDA STFT PARAMETRELERİ SEÇİMİNİN ÖNEMİ VE ETKİSİ

Ses ya da video dosyalarının ENF tabanlı adli analiz uygulamalarında elde edilen performans, kestirimi sağlanan ENF sinyalinin doğruluğu ve çözünürlüğü ile doğrudan ilişkilidir. Bu sebeple, incelenen medya dosyasından yüksek doğrulukta ve uygun çözünürlükte ENF hesabı kritik önem arz etmektedir. Medya dosyalarından STFT yaklaşımı ile ENF sinyali kestiriminde, STFT pencere boyutu ve kaydırma miktarı parametrelerinin seçimi hesaplanan ENF sinyalinin çözünürlüğünü belirleyen ve doğruluğuna etki eden iki anahtar etmendir.

STFT tabanlı ENF sinyali kestiriminde seçilen pencere boyutu ve kaydırma miktarı, sinyalden elde edilebilecek örtüşen sinyal parçası sayısını (Şekil 1), dolayısıyla da medyadan elde edilebilecek ENF zaman serisinin uzunluğunu (kestirilen ENF sinyalindeki örnek sayısını) tayin eder. STFT kaydırma miktarı tek başına, ENF çözünürlüğünü, yani kaç saniye aralıklarla ENF örneklerinin hesaplanacağını belirler. STFT pencere boyutu, örtüşmeli sinyal parçalarının uzunluğunu (Şekil 1), dolayısıyla da her bir ENF örneği kestiriminde (Şekil 2) kullanılan veri sayısını belirler. Buna göre, pencere boyutunun çok küçük ya da çok büyük olması, ENF hesabını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Çok küçük bir pencere boyutu, FFT işleminde yetersiz veri kullanımına bağlı olarak düşük güçlü ve gürültülü frekans bileşenleri elde etmeye, dolayısıyla da kestirimi sağlanan ENF sinyalinde bozulmalara neden olabilmektedir. Çok büyük bir pencere boyutu kullanımı ise yüksek güçlü frekans bileşenleri elde etmeyi sağlasa da ENF değişimindeki detayları kaybetmeye neden olabilir.

Özet olarak, STFT parametre seçimlerine göre; ENF çözünürlüğü, ENF örneği hesabında kullanılan verinin boyutu ve elde edilen ENF örneği sayısı şekillenmekte ve bunlara bağlı olarak medyadan elde edilen ENF sinyalinin doğruluğu ve hassasiyeti değişebilmektedir. Bu bağlamda, ses ve video dosyalarının kayıt zamanının ENF sinyali kullanılarak doğrulanmasında STFT parametrelerinin doğru seçimi, kestirilen ENF sinyali ve referans ENF sinyali arasındaki ilintiyi doğru noktada yakalamaya yardımcı olmaktadır.

Şekil 3'te, 1 sn. uzunluklu sabit STFT kaydırma miktarı için sırasıyla 4 sn., 8 sn., 16 sn., 32 sn. ve 64 sn.'lik STFT pencere boyutu seçimlerine göre 240 sn. uzunluktaki örnek bir ses dosyasından ayrı ayrı kestirimi sağlanan ENF sinyalleri ile aynı parametre seçimlerine göre hesaplanmış referans ENF sinyalleri görülmektedir. Buna göre, 32 sn. ve 64 sn. uzunluklu STFT pencereleri kullanımı ile ses dosyasından yüksek doğrulukta ENF kestirimi sağlanabildiği halde, 4 sn., 8 sn. ve 16 sn.'lik STFT pencereleri kullanılarak kestirimi sağlanan ENF sinyalleri oldukça gürültülü olarak elde edilmiştir. Hesaplanan ENF sinyallerinin referans sinyale benzerliğini ölçebilmek için açık ifadesi aşağıda verilen normalize çapraz korelasyon işlemi kullanılmıştır.

$$c(k) = \frac{\sum_{n=1}^N [F_r(n) - \mu_r] [F_s(n-k) - \mu_s]}{\sqrt{\sum_{n=1}^N [F_r(n) - \mu_r]^2 \sum_{n=1}^N [F_s(n) - \mu_s]^2}} \quad (1)$$

Burada,  $F_r$  ve  $F_s$  sırasıyla referans ENF ve ses dosyalarında kestirimi sağlanan ENF sinyallerini,  $\mu_r$  ve  $\mu_s$  ise ortalama değerleri ifade eder. Normalize çapraz korelasyon sonucu, ses ENF sinyali ile referans ENF sinyali (ses kaydının yapıldığı zaman periyodunu içeren güne ait) arasındaki en yüksek benzerlik (normalize çapraz korelasyon işlemi ile) 32 sn. ve 64 sn. uzunluklu STFT pencereleri için doğru noktada (lag point) tespit edilerek ses dosyasının kayıt zamanı doğrulanabilmiştir. 4 sn., 8 sn. ve 16 sn. uzunluklu STFT pencereleri ile hesaplanan maksimum korelasyon katsayısı ise yanlış noktada (lag point) bulunmuş olup ses dosyasının kayıt zamanı doğrulanamamıştır (Kayıt zamanı doğrulama işlemi Bölüm 4'te daha detaylı anlatılmıştır). Referans ENF sinyallerinin, küçük boyutlu STFT pencereleri için dahi yüksek doğrulukta hesaplanabilmiş olması, zayıflatılmış şebeke sinyalinden doğrudan elde edilmelerinin doğal bir sonucudur (ENF frekans bandına girişim yapan başka sinyal yoktur).

Şekil 4'te, 32 sn. uzunluklu sabit STFT pencere boyutu için sırasıyla 1 sn., 2 sn., 4 sn., 8 sn. ve 16 sn.'lik STFT kaydırma miktarı seçimlerine göre 240 sn. uzunluktaki örnek bir ses dosyasından ayrı ayrı kestirimi sağlanan ENF sinyalleri ile aynı parametre seçimlerine göre hesaplanmış referans ENF sinyalleri görülmektedir. 1 sn., 2 sn. ve 4 sn. uzunluklu kaydırma miktarları kullanılarak ses dosyasından kestirimi sağlanan ENF sinyalleri ile ses dosyasının kayıt zamanı doğrulanabilmiştir. Buna karşın, 8 sn. ve 16 sn. uzunluklu kaydırma miktarları kullanımı ile ses dosyasının kayıt zamanı doğrulanamamış olup hatalı eşleşme elde edilmiştir. Çok yüksek kaydırma miktarları için doğru eşleşme bulunamamış olması, yetersiz sayıda ENF örneği elde edilmesinden kaynaklanmaktadır. 8 sn.'lik kaydırma miktarı için 8 sn.'de 1 ENF örneği, 16 sn.'lik kaydırma için ise 16 sn.'de 1 ENF örneği hesaplanmış olup frekans değişimindeki detaylar tam olarak yakalanamamıştır.

### 4. BULGULAR

Bu bölümde, STFT pencere boyutu ve kaydırma miktarı seçiminin ENF temelli medya kayıt zamanı doğrulama performansını nasıl etkilediği, ENF-WHU veri tabanına ([22, 23]) ait uzunlukları 4.5 dk. ile 16 dk. arasında değişkenlik gösteren 130 adet ses dosyası üzerinde yapılan testlerle incelenmiştir. Ses dosyalarının tamamı akustik şebeke gürültüsü ya da elektromanyetik alan içeren ortamlarda kaydedilmiş olup, ENF içerdiği bilinmektedir. ENF-WHU veri tabanı ayrıca, bu ses kayıtlarının yapıldığı günlere ait zayıflatılmış şebeke sinyali kayıtlarını (referans (ground-truth) ENF sinyali kestirimi için) da içermektedir.

ENF-WHU veri tabanındaki her bir ses dosyasının sırasıyla ilk 240 sn., ilk 180 sn., ilk 120 sn. ve ilk 90 sn.'lik kliplerinden kısa zamanlı Fourier dönüşümü (STFT) yardımıyla farklı pencere boyutları (8 sn., 16 sn., 32 sn., 64 sn.) ve seçilen pencere boyutunun en fazla yarısı olacak şekilde farklı kaydırma miktarlarına göre ayrı ayrı

kestirimi yapılan ENF sinyalleri, aynı yöntemle zayıflatılmış şebeke sinyali kaydından (ses dosyalarına ait kayıt zaman periyodunu kapsayan) elde edilen referans ENF sinyalleri (24 saatlik) ile normalize çapraz korelasyon işlemine sokulmuş ve maksimum korelasyon katsayısının yeri analiz edilmiştir. Maksimum korelasyon katsayısının bulunduğu nokta ses kaydının başlatılma anına tekabül ediyorsa, yani referans ENF sinyalinin başlangıç anına maksimum korelasyon katsayısının bulunduğu zaman noktası (lag point) eklendiğinde (saniye cinsinden) ses kaydının başlangıç anına karşılık geliyorsa (30 sn.'lik tolerans dahilinde) kayıt zamanının doğru bir şekilde tespit edildiği sonucuna ulaşılır.

**Tablo 1.** 130 adet ses dosyası üzerinde yapılan ENF tabanlı kayıt zamanı doğrulama analizinde, **64 sn.** uzunluklu STFT pencere boyutu için farklı STFT kaydırma miktarı ve farklı klip uzunluğu seçimine göre elde edilen doğru eşleşme sayıları.

| Klip Uzunluğu | STFT Kaydırma Miktarına Göre Doğru Eşleşme Sayısı (130 dosyada) |       |       |       |        |        |
|---------------|---|-------|-------|-------|--------|--------|
|               | 1 sn.   | 2 sn. | 4 sn. | 8 sn. | 16 sn. | 32 sn. |
| Tamamı        | 117   | 118   | 115   | 115   | 112    | 100    |
| 268 sn.       | 107   | 109   | 108   | 103   | 68     | 46     |
| 240 sn.       | 99  | 99    | 99    | 91    | 60     | 27     |
| 180 sn.       | 54  | 56    | 55    | 39    | 26     | 5      |
| 120 sn.       | 7   | 7     | 7     | 4     | 4      | 1      |
| 90 sn.        | 2   | 1     | 0     | 1     | 0      | -      |

**Tablo 2.** 130 adet ses dosyası üzerinde yapılan ENF tabanlı kayıt zamanı doğrulama analizinde, **32 sn.** uzunluklu STFT pencere boyutu için farklı STFT kaydırma miktarı ve farklı klip uzunluğu seçimine göre elde edilen doğru eşleşme sayıları.

| Klip Uzunluğu | STFT Kaydırma Miktarına Göre Doğru Eşleşme Sayısı (130 dosyada) |       |       |       |        |
|---------------|---|-------|-------|-------|--------|
|               | 1 sn.   | 2 sn. | 4 sn. | 8 sn. | 16 sn. |
| Tamamı        | 115   | 115   | 113   | 113   | 107    |
| 268 sn.       | 97  | 99    | 99    | 100   | 78     |
| 240 sn.       | 99  | 102   | 102   | 99    | 73     |
| 180 sn.       | 97  | 99    | 98    | 86    | 51     |
| 120 sn.       | 71  | 71    | 64    | 40    | 12     |
| 90 sn.        | 43  | 43    | 32    | 18    | 1      |

**Tablo 3.** 130 adet ses dosyası üzerinde yapılan ENF tabanlı kayıt zamanı doğrulama analizinde, **16 sn.** uzunluklu STFT pencere boyutu için farklı STFT kaydırma miktarı ve farklı klip uzunluğu seçimine göre elde edilen doğru eşleşme sayıları.

| Klip Uzunluğu | STFT Kaydırma Miktarına Göre Doğru Eşleşme Sayısı (130 dosyada) |       |       |       |
|---------------|---|-------|-------|-------|
|               | 1 sn.   | 2 sn. | 4 sn. | 8 sn. |
| Tamamı        | 105   | 102   | 98    | 93    |
| 268 sn.       | 80  | 83    | 85    | 81    |
| 240 sn.       | 81  | 84    | 84    | 80    |
| 180 sn.       | 80  | 82    | 82    | 71    |
| 120 sn.       | 69  | 69    | 67    | 44    |
| 90 sn.        | 54  | 51    | 42    | 21    |

**Tablo 4.** 130 adet ses dosyası üzerinde yapılan ENF tabanlı kayıt zamanı doğrulama analizinde, **8 sn.** uzunluklu STFT pencere boyutu için farklı STFT kaydırma miktarı ve farklı klip uzunluğu seçimine göre elde edilen doğru eşleşme sayıları.

| Klip Uzunluğu | STFT Kaydırma Miktarına Göre Doğru Eşleşme Sayısı (130 dosyada) |       |       |
|---------------|---|-------|-------|
|               | 1 sn.   | 2 sn. | 4 sn. |
| Tamamı        | 91  | 93    | 92    |
| 268 sn.       | 68  | 67    | 67    |
| 240 sn.       | 67  | 67    | 63    |
| 180 sn.       | 61  | 68    | 66    |
| 120 sn.       | 59  | 60    | 51    |
| 90 sn.        | 44  | 44    | 36    |

Tablo 1, Tablo 2, Tablo 3, ve Tablo 4'te; sırasıyla 64 sn., 32 sn., 16 sn. ve 8 sn. uzunluklu pencere boyutları için farklı klip uzunluklarına ve farklı kaydırma miktarlarına göre elde edilen doğru eşleşme sayıları görülmektedir. Buna göre, belirli bir STFT pencere boyutu için kaydırma miktarının 1 sn. ya da 2 sn. seçimi klip uzunluğu fark etmeksizin performansta önemli bir değişime sebep olmamıştır. 4 sn.'lik bir kaydırma miktarı seçildiğinde ise, pencere boyutu ve klip uzunluğuna bağlı olarak performansta kısmi farklılıklar görülmüştür. Bu bulgu, ENF'in çok ani değişimler göstermemesinin doğal bir sonucu olarak düşünülebilir. Kaydırma miktarının 4 sn. 'den daha büyük seçilmesi, klip uzunluğu fark etmeksizin doğru eşleşme sayısında genel bir azalmaya, dolayısıyla da performansta bir düşüşe sebep olmuştur.

Uzun klipler (240 sn.'den büyük) için, STFT pencere boyutu büyüdükçe doğru eşleşme sayısında genel bir artış görülmüştür. Diğer bir deyişle, bu uzunluktaki klipler için pencere boyutunu yüksek seçmek performansı kayda

değer oranda arttırmıştır. Ancak kısa klipler (180 sn. ve 180 sn.'den küçük) için STFT pencere boyutu büyüdükçe performansın düştüğü, yani doğru eşleşme sayısında bir azalma gözlenmiştir. Bu bulgu, kısa kliplerde büyük pencere boyutunu seçiminin hesaplanan, dolayısıyla da benzerlik testinde değerlendirmeye katılan ENF örneği sayısının önemli ölçüde azalmasının doğal bir sonucu olarak düşünülebilir.

240 sn.'den büyük ses klipleri için en iyi performansın 64 sn.'lik pencere boyutu için elde edildiği görülmüştür. 240 sn. ile 120 sn. aralığındaki ses klipleri için en yüksek performans 32 sn. uzunluklu pencere boyutu kullanıldığında elde edilmiştir. 120 sn.'lik ses klipleri için 16 sn. uzunluklu pencere boyutu kullanılarak elde edilen performans, 32 sn. uzunluklu pencere boyutu kullanılarak elde edilen performansa çok yakındır. 90 sn.'lik ses klipleri için en iyi performans 16 sn. uzunluklu pencere boyutu kullanılarak elde edilmiştir. Sinyal boyutu düştükçe performanstaki genel düşüşün sebebi, ENF sinyalinin kısa aralıklarla benzer örüntüler göstermesinden kaynaklanır. Sinyal boyutu büyüdükçe, yani kestirimi sağlanan ENF zaman serisinin uzunluğu arttıkça, bu benzerlikler azalmakta ve gittikçe daha emsalsiz hale gelmektedir.

## 5. TARTIŞMA

Guang Hua ve arkadaşları tarafından ENF-WHU veri tabanındaki videoların tamamı üzerinde tüm klip uzunlukları kullanılarak 16 sn.'lik STFT penceresi ve 1 sn.'lik STFT kaydırma miktarı seçimi ile yapılan karşılaştırmalı deneylerde ([23]); [27]'deki yöntem ile 105 eşleşme, [20]'deki yöntem ile 116 eşleşme, [23]'teki yöntem ile ise 129 eşleşme bulunmuştur. Karşılaştırılan bu yöntemlerin her biri, çeşitli filtreleme işlemleri ve veri iyileştirmeleri uygulanarak ve çoklu sayıda harmonik kullanarak elde edilen sonuçlardır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ise, tek bir harmonik üzerinden dosyalara hiçbir ön işleme uygulamadan yalnız STFT ile elde edilen sonuçlardır. Bu durumda bile, 64 sn. pencere boyutu ve 2 sn. kaydırma miktarı için 118 eşleşme (Tablo 1) ile, [20] ve [27]'deki yöntemlerin 16 sn. pencere ve 1 sn. kaydırma kullanılarak uygulanmış durumuna göre daha iyi performans elde edilmiştir. [20] ve [27] için daha doğru parametre seçimleri yapılmış olsa sonuçlarda kayda değer ölçüde iyileşmeler olması beklenmektedir. Dahası, bu veri tabanı üzerindeki her bir ses dosyasının kendi uzunluğuna özgü farklı STFT parametre seçimlerinin yapılması ile [23]'e yakın ya da daha iyi sonuçlar elde edilmesi ihtimal dâhilindedir.

## 6. SONUÇ

Bu çalışmada, medyadan (ses ya da video dosyası) elektrik şebeke frekansı (ENF) sinyali kestiriminde tercih edilen en önemli yöntemlerden biri olan kısa zamanlı Fourier dönüşümü (STFT) yaklaşımında; STFT pencere boyutu ve kaydırma miktarı parametreleri seçiminin, hesaplanan ENF sinyali doğruluğuna ve dolayısıyla da ENF tabanlı adli analiz uygulamaları performansına ne derece etki edebildiği incelenmiştir. Bu amaçla ENF-WHU veri tabanındaki ([22, 23]) 130 adet ses dosyasının sırasıyla ilk 240 sn., ilk 180 sn., ilk 120 sn. ve ilk 90 sn.'lik kliplerinden farklı STFT pencere boyutu (8 sn., 16 sn., 32 sn. ve 64 sn.'lik) ve kaydırma miktarlarına (pencere boyutunun en fazla yarısı olacak şekilde 1 sn., 2 sn., 4 sn., 8 sn., 16 sn. ve 32 sn.'lik) göre ayrı ayrı hesaplanan ENF sinyalleri ile kayıt zamanı doğrulama testleri yapılmış ve her birinin performansına etkisi analiz edilmiştir. 240 sn.'den daha büyük ses klipleri için en yüksek performans 64 sn. uzunluklu pencere boyutu kullanıldığında elde edilmiştir. 120 sn. ile 240 sn. aralığındaki ses klipleri için en iyi performansın 32 sn.'lik pencere boyutu için elde edildiği görülmüştür. 90 sn.'lik ses klipleri için ise en iyi performansın 16 sn. uzunluklu pencere boyutu kullanılarak elde edildiği görülmüştür. Belirli bir pencere boyutu için kaydırma miktarını arttırmak performansın genel olarak düşmesine sebep olmakla birlikte en iyi sonuçlar 2 sn.'lik kaydırma miktarı için elde edilmiştir. 180 sn.'den büyük klipler için kaydırma miktarının 4 sn. seçimi de benzer sonuçlar vermiştir. Ancak kaydırma miktarının 4 sn.'den büyük seçilmesi klip uzunluğundan bağımsız olarak performansın kayda değer oranda düşürdüğü görülmüştür.

Bu çalışmada, benzer konuda çalışmalar yapacak araştırmacılara kayıt süresi uzunluğuna bağlı olarak STFT parametre seçimlerine dikkat edilmesi yönünde ışık tutması amaçlanmış ve literatürde sıklıkla kullanılan 2'nin katları olan pencere boyutları ve kaydırma miktarları analiz edilmiştir. Gelecek çalışmalarda, 8 sn. ile 64 sn. arasında test edilmeyen diğer pencere boyutları analiz edilerek performansı optimize eden parametrelerin tespit edilmesi hedeflenmiştir.

## Yazar Katkıları

Ali Berk YALINKILIÇ - Deneyleri yapmış ve makaleyi yazmıştır.

Saffet VATANSEVER - Araştırmanın ortaya çıkmasını sağlamış; deneylerin yapılmasında, makale yazımında, düzeltmelerinde ve iyileştirmelerinde yardımcı olmuştur.

## Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

## Teşekkür

Bu çalışma Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi tarafından 211N022 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

## KAYNAKÇA

- [1] M.H. Bollen and I.Y. Gu “Signal Processing of Power Quality Disturbances,” John Wiley and Sons, 2006.
- [2] C. Grigoras “Digital audio recording analysis—the electric network frequency criterion”, *International Journal Speech Language Law*, vol. 12, no. 1, pp. 63–76, 2005.
- [3] A. Cooper, “The electric network frequency (ENF) as an aid to authenticating forensic digital audio recordings—an automated approach”, *Audio Engineering Society Conference*, pp. 1–10, 2008.
- [4] E.B. Brixen “Techniques for the authentication of digital audio recordings”, *Audio Engineering Society Conference*, vol. 122, pp. 1–8, 2007.
- [5] J. Chai, F. Liu, Z. Yuan, R. Conners, and Y. Liu “Source of ENF in battery-powered digital recordings”, *Audio Engineering Society Conference*, vol. 135, pp. 1–7, 2013.
- [6] N. Fechner and M. Kirchner “The humming hum: Background noise as a carrier of ENF artifacts in mobile device audio recordings”, *8th International Conference IT Secure Incident Management IT Forensics*, pp. 3–13, 2014.
- [7] S. Vatansever and A.E. Dirik “Forensic analysis of digital audio recordings based on acoustic mains hum”, *24th Signal Processing Communication Application Conference*, pp. 1285–1288, 2016.
- [8] R. Garg, A.L. Varna, and M. Wu “Seeing ENF: Natural time stamp for digital video via optical sensing and signal processing”, *19th ACM International Conference Multimedia*, pp. 23–32, 2011.
- [9] R. Garg, A.L. Varna, A. Hajj-Ahmad, and M. Wu “Seeing ENF: Powersignature-based timestamp for digital multimedia via optical sensing and signal processing”, *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 8, no. 9, pp. 1417–1432, 2013.
- [10] H. Su, A. Hajj-Ahmad, R. Garg, and M. Wu “Exploiting rolling shutter for ENF signal extraction from video”, *IEEE International Conference Image Processing*, pp. 5367–5371, 2014.
- [11] M. Wu, A. Hajj-Ahmad, and H. Su “Techniques to extract ENF signals from video image sequences exploiting the rolling shutter mechanism; and a new video synchronization approach by matching the ENF signals extracted from soundtracks and image sequences”, *U.S. Patent US9916857B2*, 2015.
- [12] S. Vatansever and A.E. Dirik “Videoların ENF tabanlı adli kanıt analizine ışık kaynağı etkisi”, *Journal of Uludag University Faculty of Engineering*, vol. 22, pp. 53–64, 2017.
- [13] S. Vatansever, A.E. Dirik, and N. Memon “Detecting the presence of enf signal in digital videos: A superpixel-based approach”, *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 24, no. 10, pp. 1463–1467, 2017.
- [14] S. Vatansever, A.E. Dirik, and N. Memon “Analysis of rolling shutter effect on enf based video forensics”, *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 14, no. 9, pp. 2262–2275, 2019.
- [15] S. Vatansever “Modern techniques in forensic analysis of multimedia signals”, Ph.D. Dissertation, Department of Electronics Engineering, Bursa Uludağ University, Bursa, 2019.
- [16] J. Choi and C.-W. Wong “ENF signal extraction for rolling-shutter videos using periodic zero-padding”, *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, pp. 2667–2671, 2019.
- [17] S. Fernández-Mendiña and F. Pérez-González “Temporal localization of non-static digital videos using the electrical network frequency”, *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 27, pp. 745–749, 2020.
- [18] P. Ferrara, G. Draper-Gil, I. Sanchez, H. Junklewitz, and L. Beslay “Modelling gop structure effects on ENF-based video forensics”, *International Conference on Digital Forensics and Cyber Crime*, pp. 121–138, 2020.
- [19] D. Nagothu, Y. Chen, A. Aved, and E. Blasch “Authenticating video feeds using electric network frequency estimation at the edge”, *EAI Endorsed Transactions on Security and Safety*, vol. 7, no. 24, pp. 168648, 2021.
- [20] D. Bykhovsky and A. Cohen “Electrical network frequency (ENF) maximum-likelihood estimation via a multitone harmonic model”, *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 8, no. 5, pp. 744–753, 2013.
- [21] S. Vatansever, A.E. Dirik, and N. Memon “ENF based robust media time-stamping”, *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 29, pp. 1963–1967, 2022.
- [22] G. Hua and H. Zhang “ENF signal enhancement in audio recordings”, *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 15, pp. 1868–1878, 2020.
- [23] G. Hua, H. Liao, H. Zhang, D. Ye, and J. Ma “Robust ENF estimation based on harmonic enhancement and maximum weight clique”, *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 16, pp. 3874–3887, 2021.
- [24] C. Grigoras, A. Cooper, and M. Michalek “Best practice guidelines for ENF analysis in forensic authentication of digital evidence”, *Forensic Speech Audio Analysis Working Groups*, vol. 1, no. 1, pp. 1–10, 2009.
- [25] A. Hajj-Ahmad, R. Garg, and M. Wu “Instantaneous frequency estimation and localization for ENF signals”, *Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference*, pp. 1–10, 2012.
- [26] J.G. Proakis and D.G. Manolakis “Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications”, 4th Edition, Pearson, 2007.
- [27] A. Hajj-Ahmad, R. Garg and M. Wu “Spectrum Combining for ENF Signal Estimation”, *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 20, no. 9, pp. 885–888, 2013.





## Yapay Zekâ Yaklaşımlarını Kullanarak Retinopati Hastalığının Tespiti

### Detection of Retinopathy Solutions Using Artificial Intelligence Approaches

<sup>1</sup>Abdulrahman ÇAVLI , <sup>2</sup>Mesut TOĞAÇAR 

<sup>1</sup>Teknoloji ve Bilgi Yönetimi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>2</sup>Yönetim Bilişim Sistemleri, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>1</sup>acavli525@hotmail.com.tr, <sup>2</sup>mtogacar@firat.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 14 February 2023

Accepted : 24 March 2023

##### Keywords:

Artificial Intelligence, Machine Learning, Nasnet Mobile, Feature Extraction; Diabetic Retinopathy

#### ABSTRACT

Retinopathy is a disease that usually causes vision loss or blindness in diabetic patients. Diabetic retinopathy occurs as a result of damage to the blood vessels in the retina of the eye. This disease is one of the leading diseases that cause vision loss worldwide. Retinopathy is seen in 30% of diabetic patients. Early diagnosis of the disease is important to prevent vision loss in diabetic patients. In many studies carried out in the field of health recently, artificial intelligence approaches have been used for the diagnosis-treatment processes of diseases. In this study, a hybrid artificial intelligence model is proposed for the early diagnosis of retinopathy disease. The images in the dataset used in the study were created by fundus imaging technique and were graded in five stages according to the severity of the disease. In the proposed approach, using preprocessing step techniques, the unnecessary parts of the original images are left in the background and trained by the deep learning model (Nasnet mobile). Machine learning methods were used in the classification process of the proposed approach. In addition, feature selection algorithms were used to improve the time-performance process of model training. As a result of the experimental analysis, 100% overall accuracy was achieved with the proposed approach. It was observed that this study contributed to the diagnosis process of diabetic retinopathy patients.

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

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 14 Şubat 2023

Kabul : 24 Mart 2023

##### Anahtar Kelimeler:

Yapay Zekâ, Makine Öğrenmesi, Nasnet Mobil, Özellik Çıkarma, Diyabetik Retinopati

#### ÖZET

Retinopati, diyabet hastalarında görülen genelde görme kaybına veya körlüğe sebep olan hastalıktır. Bu hastalık dünya genelinde görme kaybına neden olan hastalıkların başında gelmektedir. Retinopati, diyabet hastalarının %30'unda görülmektedir. Hastalığın erken teşhisi diyabet hastalarının görme kaybını önlemek için önem arz etmektedir. Yakın zamanda sağlık alanında gerçekleştirilen birçok çalışmada hastalıkların tanı-tedavi süreçleri için yapay zekâ yaklaşımlarından faydalanılmıştır. Bu çalışmada retinopati hastalığının erken teşhisine yönelik hibrit bir yapay zekâ modeli önerilmiştir. Çalışmada kullanılan veri kümesindeki görüntüler fundus görüntüleme tekniği ile oluşturulmuş ve hastalığın ciddiyetine göre beş evrede basamaklandırılmıştır. Önerilen yaklaşımda ön işlem adımları teknikleri kullanılarak orijinal görüntülerin gereksiz kısımları geri planda bırakılarak derin öğrenme modeli (Nasnet mobile) tarafından eğitilmesini sağlamaktadır. Önerilen yaklaşımın sınıflandırma sürecinde makine öğrenme yöntemleri kullanıldı. Ayrıca model eğitiminin zaman-performans sürecini iyileştirmek için özellik seçim algoritmaları kullanıldı. Deneysel analizlerin sonucunda önerilen yaklaşım ile %100 genel doğruluk başarısı elde edildi. Bu çalışma ile diyabetik retinopati hastalarının tanı sürecine katkı sağlandığı görülmüştür.

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



## 1. GİRİŞ

Diyabet hastalığı, pankreasın insan vücudu için yeterli miktarda insülin salgılamaması veya salgılanan insülinin vücut tarafından etkin bir biçimde kullanılmaması sonucunda ortaya çıkan bir hastalıktır. Diyabet hastalığı dünya genelinde bireylerde sık görülmeye başlanmıştır. Uluslararası Diyabet Federasyonu (IDF) 2021 verilerine göre yaklaşık 537 milyon yetişkinde diyabet hastalığı görülmektedir ve bu sayı 2030 yılında 643 milyona ulaşması beklenmektedir [1]. Genel belirtileri; ağızda kuruluk, iştahsızlık, bulanık görme, ayaklarda uyuşma, idrar yollarında enfeksiyon, halsizlik ve yorgunluktur [2].

Diyabetes mellitus (DM) göz dışı kaslar, göz içi mercek, görme siniri ve retina dâhil olmak üzere göz yapısındaki birçok yapıyı etkilemektedir [3]. Diyabetik Retinopati (DR) dünya genelinde genellikle çalışma yaşındaki diyabet hastalarının görme kaybı ve körlükle sonuçlanan retinal bir hastalıktır. 2030 yılına kadar dünya genelinde DR'li hasta sayısının yaklaşık 130 milyon olacağı tahmin edilmektedir. Bu sayının 2045 yılına kadar 160 milyona yaklaşacağı ön görülmektedir [4]. DR klinik olarak erken evrede proliferatif olmayan DR (NPDR) ve ileri evrede proliferatif DR (PDR) olmak üzere iki grupta incelenir [3]. Hastalığın erken teşhisi ve tedavisi diyabet hastalarının görme kaybını veya körlüğü önleme açısından büyük önem arz etmektedir.

Yapay zekâ, canlılar ve insanların hal ve hareketlerinden yola çıkarak sistemlerin modelleme çalışmasına denir. Bu kavram ilk olarak 1950 yıllarında 'Artificial Intelligence' olarak ortaya çıkmıştır [5]. Yapay zekâ insanların iş yükünü azaltmanın yanında yapılan işlemi daha kısa sürede daha doğru bir sonuçla tamamlamasına imkân sunar. Yapay zekâ ve makine öğrenimi, sağlık alanında da günümüzde etkin bir şekilde kullanılmaktadır [6]. Özellikle hastalığın teşhisinde kullanılan bu yöntemler erken teşhis ve tedavi sürecini hızlandırmaktadır. Bu nedenle, diyabetik retinopati hastalığının semptomlarını belirleyerek erken müdahale imkânı sunan bilgisayar destekli bir yapay zekâ uygulaması geliştirmek gereklidir.

Literatürde DR hastalığının tespiti için birçok çalışma yer almaktadır. Bunlardan bazıları incelenirse; Özçelik ve arkadaşları [7] DR hastalığının erken tanı ve tedavisinde kullanılmak üzere fundus görüntülerini kullanarak derin öğrenme tabanlı bir model geliştirmişlerdir. Çalışmaları iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada, fundus görüntülerine iki boyutlu sinyal işleme yöntemi uygulayarak modelin aşırı öğrenmesinin önüne geçmeye çalışmışlardır. İkinci aşamada, sınıflandırma yöntemi için Evrişimsel Sinir Ağı (ESA) ve transfer öğrenmesi yöntemleri oluşturulmuş. 5100 fundus görüntüsü ile modeli eğitmişlerdir. Bu model ile DR yok, hafif, orta, şiddetli ve çok şiddetli olarak sınıflandırılan 900 fundus görüntüsü ile test gerçekleştirmişlerdir. Doğrulama yöntemi olarak 10 kat çapraz doğrulama yöntemi kullanılarak analizler gerçekleştirilmiş. Hastalığın erken tanı ve tedavisi için önerdikleri modelin performansını %97,8 olarak ölçmüşlerdir. Yalçın ve arkadaşları [8] DR hastalığının erken teşhisi için retina görüntülerinden derin öğrenme tabanlı bir model geliştirmişlerdir. İki aşamalı bir yaklaşım önermişlerdir. Modelin birinci aşamasında veri kümesinden alınan retina görüntüleri ön işlemden geçirilerek görüntünün boyutu standart hale getirip görüntü gürültülerinden arındırılarak daha kesin sonuca ulaşmayı hedeflemişlerdir. İkinci aşamada derin öğrenme modellerinden olan ESA'yı kullanarak sınıflandırma yapılmış ve %98,5 başarıya ulaşmışlardır. Geleneksel yöntem yerine ESA modelini kullanılarak öznetelik kümeleri eğitilmiştir. Ayrıca, grafiksel tabanlı ekran kartı kullanılarak karmaşık problemleri hızlı ve daha doğru bir şekilde çözümlenmişlerdir. Gulshan ve arkadaşları [9] derin sinir ağlarını kullanarak DR hastalığının derecesine göre sınıflandırmaya çalışmışlardır. Çalışmalarında büyük veri kümeleri kullanarak, lezyon bazı özellikleri belirtmek zorunda kalmadan eğitilebileceğini göstermişlerdir. DR hastalığının tespitinde kullandıkları otomatik sistem, yorumladığı veriler tutarlı, yüksek hassasiyet, özgün sonuç vermesi ve hızlı raporlanma avantajı sunmuştur. Bu çalışma sonucunda geliştirdikleri modelin performansı %97,5 ve %96,1 olarak ölçülmüştür. Qummar ve arkadaşları [10] renkli fundus görüntülerinden DR hastalığının teşhisinde ESA topluluğu tabanlı bir model önermişlerdir. Araştırma sonucunda, önerdikleri topluluk modelinin diğer yöntemlerden daha iyi sonuç verdiği ve DR'nin tüm aşamalarını tespit edebildiği sonucuna ulaşmışlardır. Şen [11] yaptığı tez çalışmasında DR ve katarakt hastalıklarını tespit etmek için derin öğrenme modelleri kullanmışlardır. Hastalığın tespitinde kullanılan veri kümeleri ön işlem adımlarından geçmiş ve transfer öğrenme modeliyle eğitilmiştir. Veri kümesini sınıflandırmada %96,6 doğruluğa ulaşmıştır.

Bu makalede DR hastalığının erken teşhisi ve tedavisinde kullanılmak üzere yapay zekâ tabanlı hibrit bir model önerilmiştir. Önerilen yaklaşım;

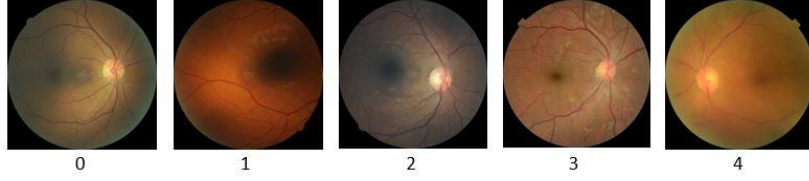
- Uzman doktorların hastalığı erken teşhis etmelerine olanak sağlamayı,
- Objektif karar veren, hızlı ve doğru sonuçlar elde etmeyi amaçlamıştır.

Makalenin diğer bölümleri şu şekilde özetlenir; veri kümesi hakkında detaylı bilgiler ikinci bölümde verilmiştir. Önerilen yaklaşımda kullanılan yöntemler ve modeller hakkında detaylı bilgiler üçüncü bölümde değinilmiştir. Deneysel sonuçlar ve tartışma kısmına dördüncü bölümde yer verilmiştir. Makalenin son bölümünde sonuç yer almıştır.

## 2. VERİ KÜMESİ

Veri kümesi, fundus tabanlı görüntüleme yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur. Fundus fotoğrafçılık, DR hastalığının tespiti için kullanılan bir görüntüleme yöntemidir. Düşük maliyet avantajına sahip olan bu görüntüleme yöntemi, fotoğrafları yüksek büyütme ile retinanın daha iyi incelenmesine olanak tanımıştır. [12].

Veri kümesi erişime açık, toplam 2111 fundus görüntüsünden oluşmaktadır. Bu görüntülerin her biri ortalama 512×510 piksel çözünürlüğe sahiptir ve dosya uzantısı JPG formatındadır. Veri kümesi DR hastalığının derecelendirilmesine göre toplam 5 sınıftan oluşmaktadır. Bu dereceler; 0-4 arasında kategorize edilmiştir. En çok fundus görüntüsü şiddet derecesi 2 olarak gösterilen orta proliferatif olmayan diyabetik retinopati (orta NPDR) hastalık türünde yer almaktadır. Görüntüler sınıf olarak dengeli dağıtılmamıştır. Veri kümesi sınıflandırmalarını gösteren örnek görüntüler Şekil 1’de verilmiştir.



**Şekil 1.** Veri kümesine ait örnek görüntüler;  
0: DR yok, 1: Hafif NPDR, 2: Orta NPDR, 3: Şiddetli NPDR, 4: PDR.

Veri kümesine ait istatistik bilgiler Tablo 1’de verilmiştir. Bu tabloya göre; (0: DR yok) görüntü sayısı 537, (1: Hafif NPDR) görüntü sayısı 537, (2: Orta NPDR) görüntü sayısı 559, (3: Şiddetli NPDR) görüntü sayısı 290, (4: PDR) görüntü sayısı 188 adettir [13].

**Tablo 1.** Veri kümesine ait görüntü sayıları

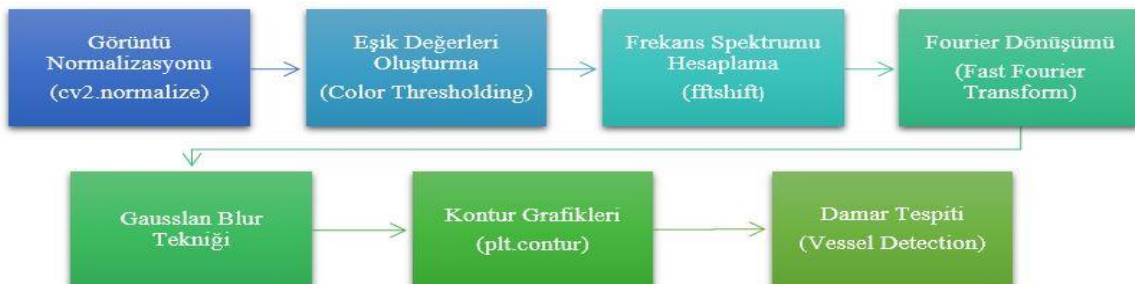
| Sınıf / Derece | Görüntü Sayısı |
|----------------|----------------|
| 0              | 537            |
| 1              | 537            |
| 2              | 559            |
| 3              | 290            |
| 4              | 188            |
| <b>Toplam</b>  | <b>2111</b>    |

### 3. YÖNTEM VE YAKLAŞIMLAR

#### 3.1. Ön İşlem Adımları

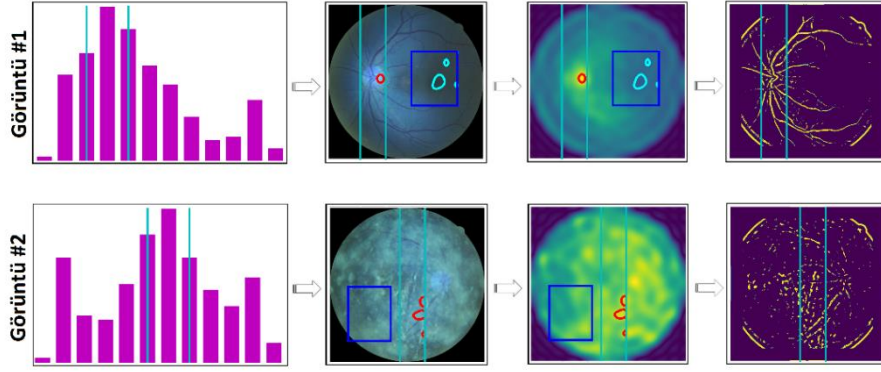
Önerilen yaklaşımda veri kümesindeki her bir görüntüyü iyileştirmek ve istenilen bölgeleri ön plana çıkarmak için ön işlem adımları uygulandı. Bu adımlarda kullanılan yöntem ve tekniklerin özeti Şekil 2’de gösterilmiştir. Kullanılan yöntem ve teknikler hakkında bilgiler aşağıda ifade edilmiştir;

- Görüntü Normalizasyonu (cv2.normalize): Görüntüde çekime bağlı olarak değişen renk değer dağılımı, aydınlatma şartları, kamera vb. varyasyonları telafi etmek amacıyla piksel yoğunluk değer aralığını değiştiren yöntemdir [14].
- Eşik Değerleri Oluşturma (Color Thresholding): Bir görüntüdeki nesnelere arka plandan ayırtmak için kullanılan yöntemdir [15].
- Frekans Spektrumu Hesaplama (fftshift): Görüntü küçük alanlara bölünerek sayısal değere haline dönüştürülmesi işlemini gerçekleştirir [16].
- Görüntü Bölütleme İçin Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform): Görüntü pikselleri frekans alanına dönüştürülür, görüntüdeki önemli olan bilgiler çıkartılıp bunların analiz edilmesini sağlayan yöntemdir [17].
- Gausslan Blur Tekniği: Bulanık görüntü oluşturarak uzamsal ve frekans alanları açısından etkili geçiş filtreleri oluşturur [18].
- Kontur Grafikleri (plt.contour): Hazırda olan veya ölçümü yapılmış ulaşılan veri setindeki verilerin hangi değer çevresinde toplandığını gösterir [19].
- Damar Tespiti (Vessel Detection): Girdi görüntülerinde damar bölgelerinin ön plana çıkartılmasında eşik değeri aralıkları kullanarak, damarlı bölgelerin eşik değeri aralığında ise ön plana çıkartılmasını sağlar [19].



**Şekil 2.** Veri kümesine uygulanan ön işlem adımları.

Ön işlem adımlarının veri kümesine uygulanarak elde edilen örnek görüntü kümesi Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Ön işlem adımlarının veri kümesine uygulanmasından elde edilen örnek görüntü kümesi.

### 3.2. Makine Öğrenme Yöntemleri

En Yakın Komşu (k-EYK), veri madenciliğinde kullanılan, nesnelere sınıflandıran en basit sınıflandırma yöntemidir. İki adet veri kümesi bulunmaktadır. Bunlar; test ve eğitim veri kümeleridir. Eğitim kümelerindeki veriler sınıflandırılmış olan verilerden oluşmakta, test kümelerinde olan verilerin sınıflandırılması bilinmemekle birlikte eğitim kümeleri ile tespiti yapılabilmektedir [20]. k-EYK yöntemi kullanımı; basit kullanılabilir olması, yüksek performansı, eğitim verileri yüksek olan durumlarda kullanılması olumlu sonuçlar vermektedir.

Naif Bayes (NB), doküman sınıflandırması için kullanılan bir yöntemdir. Anlaşılabilir ve kolay uygulanabilir en basit makine öğrenme algoritmalarından biridir. NB yöntemi, bir örneğin hedef niteliğinin sınıf değerine ait olma olasılığını bulabilmektedir [21].

Dar Sinir Ağı (DSA) eğitim verilerini işleyen, gizli katmanlara sahip olan makine öğrenme modelleri ile çalıştığı için çok daha faydalı özellikleri öğrenerek, sınıflandırır ve tahmin doğruluğunu artırır [22].

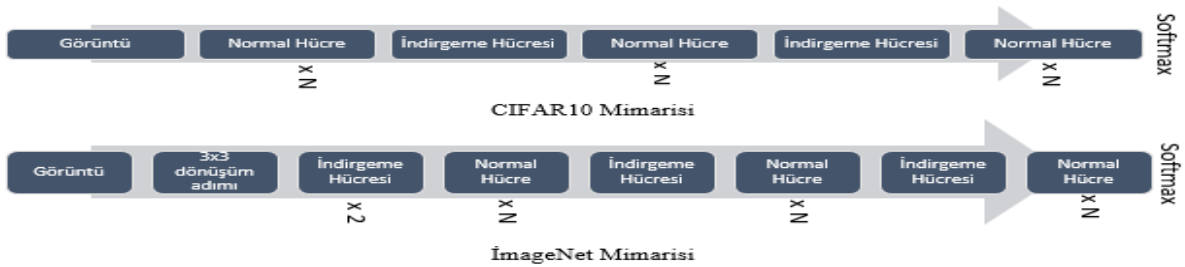
Destek Vektör Makinesi (DVM), uzaktan tespit yöntemlerinde son zamanlarda kullanılan başarılı sınıflandırma yöntemlerinden biridir. Veriyi daha büyük boyutlara dönüştürerek oluşturduğu bir hiper-düzlem ile iki sınıfı birbirinden ayırmayı prensibini esas alır. Yüksek boyuta dönüşüm aşamasında farklı özelliklere ait fonksiyonlar kullanır. Kullanılan bu fonksiyonlar karnel fonksiyonlar olarak adlandırılır [23].

### 3.3. Sinir Mimarisi Araması – Mobil (SMA-M)

SMA-M, pekiştirmeli öğrenme kullanılarak optimize edilmiş temel hücrelerden oluşan, ölçeklenebilir bir ESA mimarisidir. Bir hücre birkaç işlemden oluşur ve ağırlıklı kapasitesine göre birçok kez tekrarlanır [24].

SMA'da temel mimari kısmı önceden tanımlanır, hücreler önceden tanımlanmaz. Temel mimari yapısı; evrimsel katmanları, havuzlama katmanları ve tam bağlantılı katmanlardan oluşur. Evrimsel katmanın görevi, girdi verisinin boyutundan daha küçük filtreler seçerek, girdi verisini adım adım dolaştırır. Bu esnada girdi verisinden aktivasyon haritalarının çıkartılmasını gerçekleştirir. Havuzlama katmanı, genellikle evrimsel katmanın ardından kullanılır ve girdi boyutunu küçültürken ESA modelinin daha verimli öğrenmesini sağlar. Tam bağlantılı katman ise önceki katmanlardan çıkartılmış nöronları tek bir katmanda düzleştirir. Nöronlar tam bağlantılı katman sayesinde çıkış katmanına düzleştirilerek bağlanır ve ardından sınıflandırma süreci işler [25], [26].

SMA'da bulunan hücreler normal ve indirgeme hücreleridir. Benzer büyüklükte bir özellik haritası çeviren evrimsel hücrelere normal, genişliği ve yüksekliği iki kat düşürülerek özellik haritasına çeviren evrimsel hücrelere indirgeme hücreleri denir. SMA-M, SMA mimarisinin mobil cihazlar için değişken sayısını azalttığı sürümdür. SMA-M, 12 hücre ve 5,6 milyon değişken bulundurmaktadır [27]. SMA-M modelinin hücresel işlem adımlarını gösteren diyagram Şekil 4'te gösterilmiştir.



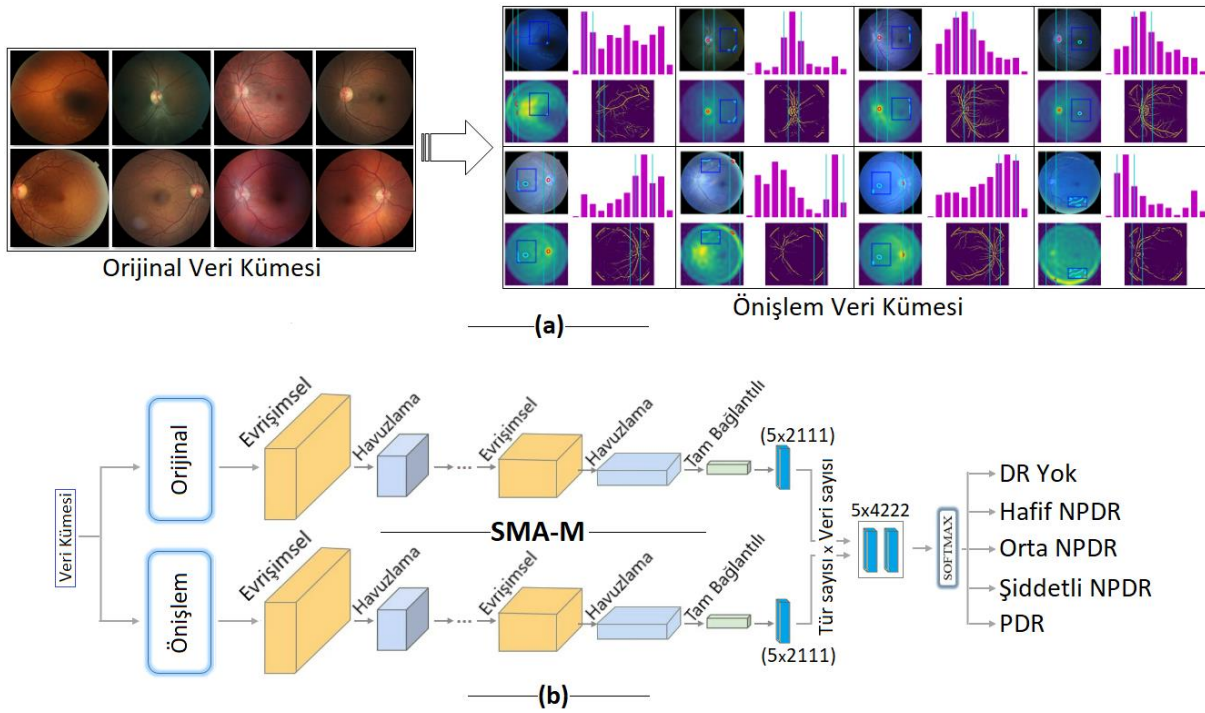
Şekil 4. CIFAR-10 ve ImageNet veri kümeleri için tasarlanmış SMA-M modeli.

(Normal Hücre: giriş ve çıkış özellik haritaları aynı boyuta sahiptir. İndirgeme Hücresi: Çıktı haritasının genişliği ve yüksekliği yarı yarıya azaltılmıştır. N: deneylerde değişkenlik gösterir.)

### 3.4. Önerilen Yaklaşım

Önerilen yaklaşım DR hastalığına ait fundus görüntülerini kullanarak, şiddet derecesine göre sınıflandırabilen ön işleme dayalı hibrit bir modelden oluşmaktadır. Fundus görüntülemeye hastalığın türünü daha belirgin hale getirmek için ön işlem adımları uygulanmıştır. Ön işlem adımları Şekil 2’de belirtilen teknikler ve yöntemlerden oluşmaktadır. Bu sayede Şekil 3’te gösterilen örnek görüntü kümeleri elde edilmiştir. İşlenmiş girdi verileri SMA-M modeli tarafından eğitilerek sınıflandırma süreci gerçekleştirilmiştir. Ön işlem adımlarının ESA modeline katkısı performans başarısını (hız, zaman, doğruluk, vs.) artırmaktır.

SMA-M modeli ile hem orijinal veri kümesi hem de ön işlem adımlarıyla işlenmiş veri kümesi eğitildi. SMA-M modelinin sınıflandırma sürecinde DSA, DVM, k-EYK, NB ve Softmax yöntemleri kullanıldı. İki veri kümesinin eğitilmesiyle ESA modelinin son katmanından öznelik setleri çıkartıldı. Öznelik setlerini birleştirme sürecinde uçtan uca bir ESA modelini sağlamak ve zamandan kazanç sağlamak için Softmax yöntemi tercih edildi. ESA modelinden çıkartılmış öznelikler makine öğrenme yöntemlerine el ile işlenerek girdi olarak verilmesi bir zaman kaybına yol açmıştır. Bu sebeple önerilen yaklaşımın son katmanında kullanılan Softmax yöntemi ile modele eğitilmesi için verilen girdi verileri son aşamada (sınıf sayısı x görüntü sayısı) boyutunda öznelik setlerine dönüştürüldü. Ardından iki öznelik seti birleştirilerek tekrardan Softmax yöntemi ile sınıflandırıldı. Öznelik birleştirilmesi sayesinde sınıflandırma performansının başarısı artırıldı. Önerilen yaklaşımın genel tasarımı Şekil 5’te gösterilmiştir.



Şekil 5. Önerilen yaklaşımın genel tasarımı; a) Ön işlem adımları örnek çıktıları, b) Tasarlanmış ESA mimarisi.

## 4. DENEYSEL ANALİZLER

Bu çalışmanın ön işlem adımları Python diliyle tasarlandı ve analizler Google Colab sunucusu kullanılarak gerçekleştirildi. Önerilen ESA modeli ve makine öğrenme yöntemleri Matlab 2022 yazılımı kullanılarak gerçekleştirildi. Matlab 2022 yazılımı için kullanılan donanım kaynakları şu şekildedir; geçici hafıza birimi 8 GB, işlemci birimi Intel® Xeon® CPU @3.20 GHz ve ekran kartı 4 GB GPU desteklidir. Analiz ölçümlerinde karmaşıklık matrisi kullanıldı. Karmaşıklık matrisinin hesaplanmasında kullanılan metrikler şunlardır; geri çağırma ( $G_{\text{çağ}}$ ), kesinlik (kes), f-skor (f-skr) ve doğruluk (doğ)[28],[29]. Metriklerin hesaplanma işlemleri için Denklem 1-4 kullanıldı. İlgili denklemlerde; (D): doğru, (Y): yanlış, (N): negatif, (P): pozitifdir[30]. Makine öğrenme yöntemleri ve SMA-M modeli için tercih edilen önemli parametreler Tablo 2’de gösterildi.

$$G_{\text{çağ}} = \frac{DP}{DP+YN} \quad (1)$$

$$\text{Kes} = \frac{DP}{DP+YP} \quad (2)$$

$$F\text{-skr} = \frac{2 \times DP}{2 \times DP + YP + YN} \quad (3)$$

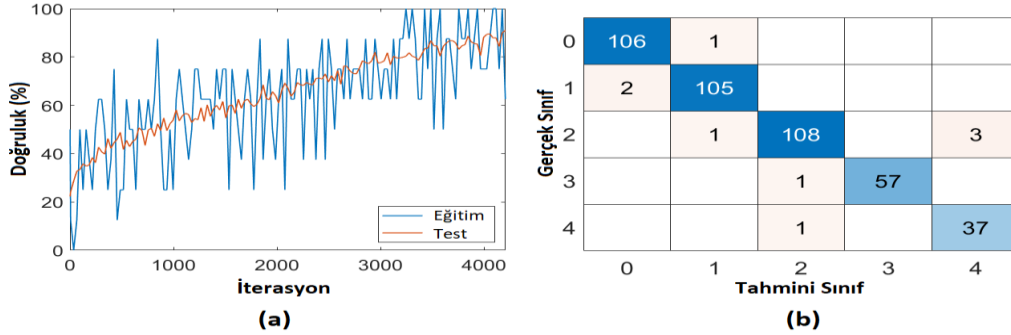
$$\text{Doğ.} = \frac{DP+DN}{DP+DN+YP+YN} \quad (4)$$



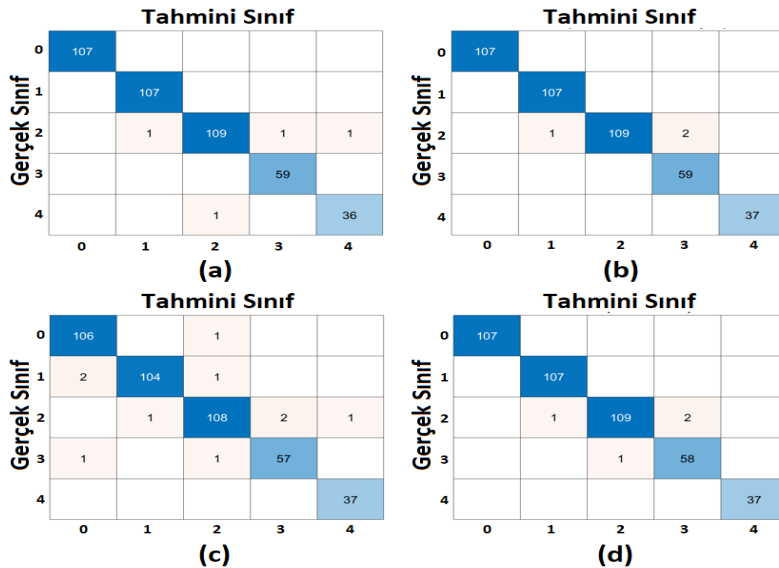
**Tablo 2.** Önerilen yaklaşımda kullanılan model ve yöntemlerin parametreleri ve değerleri.

| Model / Yöntem | Parametre                    | Tercih / Değer |
|----------------|------------------------------|----------------|
| SMA-M          | İterasyon sayısı             | 4208           |
|                | Öğrenme oranı                | 1e-4           |
|                | Optimizasyon                 | SGD            |
|                | Sınıflandırıcı               | Softmax        |
|                | Devir Sayısı                 | 16             |
|                | Mini – topluluk (mini-batch) | 8              |
|                | Eğitim oranı: test oranı     | 0.8:0.2        |
| k-EYK          | Komşu sayısı (k)             | 1              |
|                | Mesafe metriği               | Öklid          |
|                | Mesafe ağırlığı              | Eşit           |
| NB             | Sayısal Dağıtım fonksiyonu   | Gauss          |
| DVM            | Kernel fonksiyon             | Lineer         |
|                | Kutu kısıtlama düzeyi        | 1              |
|                | Çok sınıflı yöntem           | Bire bir       |
| DSA            | Birinci katman boyutu        | 10             |
|                | Tam bağlantılı katman sayısı | 1              |
|                | Aktivasyon                   | ReLU           |
|                | İterasyon sınırı             | 1000           |

Bu çalışmanın tüm analizlerinde eğitim seti %80 olarak ayarlandı. Deneysel analizler 3 adımdan oluştu. Birinci adımda orijinal veri kümesi SMA-M modeli ile eğitildi. Bu analizden elde edilen eğitim-test başarı grafikleri ve karmaşıklık matrisi Şekil 6'da gösterilmiştir. Ardından SMA-M modelinin son katmanından çıkartılan özellik seti makine öğrenme yöntemlerine girdi olarak verildi. Bu yöntemlerden elde edilen karmaşıklık matrisleri Şekil 7'de gösterilmiştir. İkinci adımda önışlem veri kümesi SMA-M modeli ile eğitildi. İkinci adımın analizinden elde edilen eğitim-test başarı grafikleri ve karmaşıklık matrisi Şekil 8'de gösterilmiştir. Ardından SMA-M modelinin son katmanından çıkartılan özellik seti makine öğrenme yöntemlerine girdi olarak verildi. Bu yöntemlerden elde edilen karmaşıklık matrisleri Şekil 9'da gösterilmiştir.

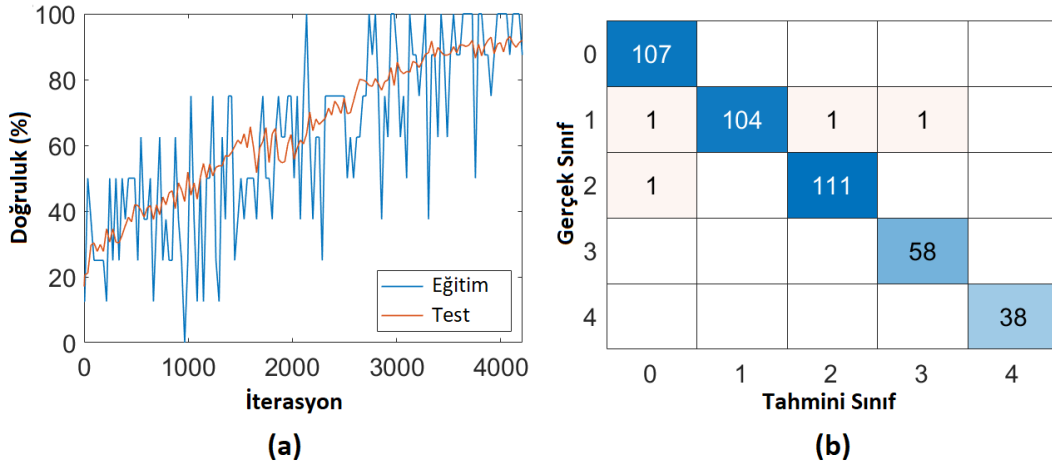


Şekil 6. Orijinal veri kümesinin SMA-M modeli ile eğitimi; a) Genel doğruluk başarısı, b) Karmaşıklık matrisi (Softmax).

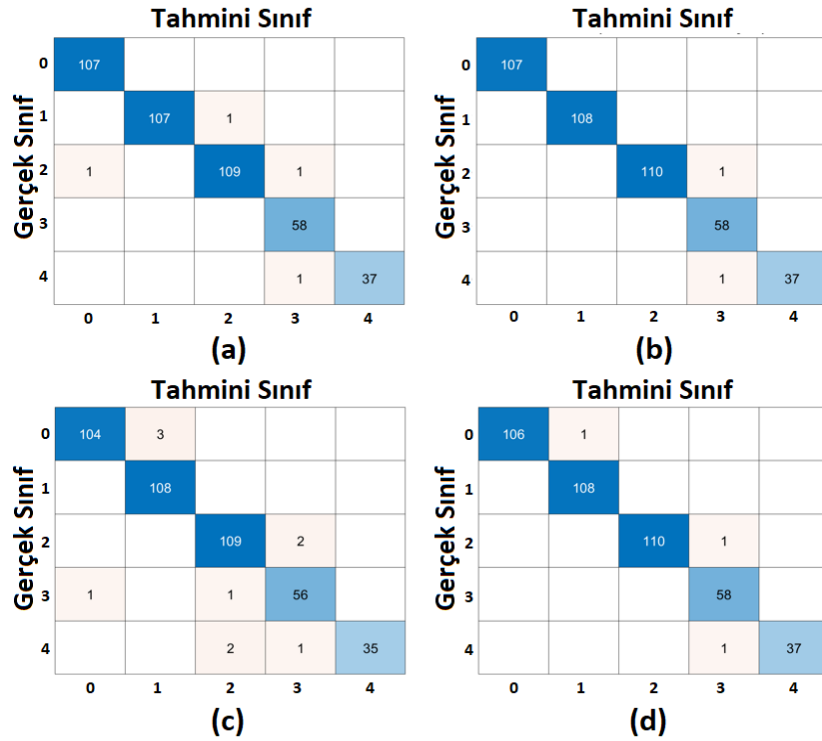


Şekil 7. Orijinal veri kümesinin makine öğrenme yöntemleri ile elde edilmiş karmaşıklık matrisleri; a) k-EYK, b) NB, c) DSA, d) DVM.





Şekil 8. Önişlem veri kümesinin SMA-M modeli ile eğitimi; a) Genel doğruluk başarısı, b) Karmaşıklık matrisi (Softmax).



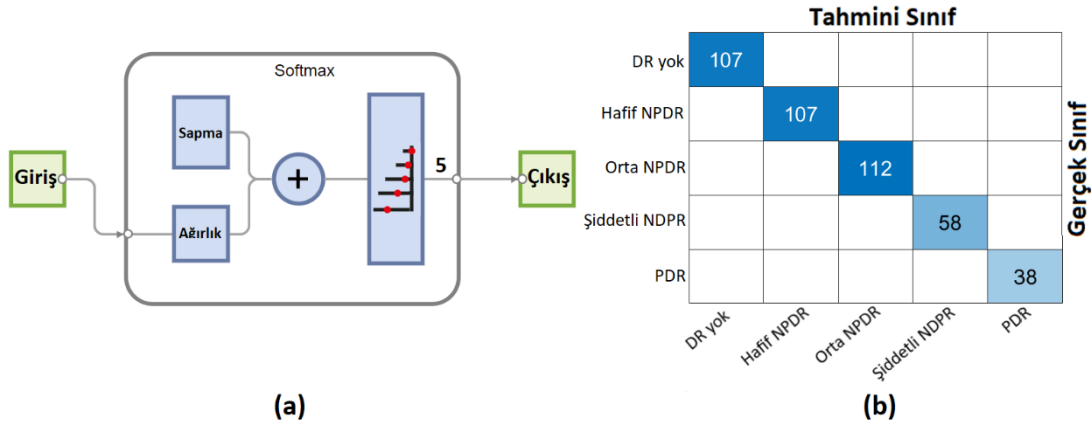
Şekil 9. Önişlem veri kümesinin makine öğrenme yöntemleri ile elde edilmiş karmaşıklık matrisleri; a) k-EYK, b) NB, c) DSA, d) DVM.

Tablo 3 incelendiğinde orijinal veri kümesiyle gerçekleştirilen analizler önişlem veri kümesine göre gerçekleştirilen analizlere göre ya eş değer olduğu ya da daha düşük performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Orijinal veri kümesine göre en iyi performans NB yöntemi ile gerçekleşti ve bu yöntem %99,28 genel doğruluk başarısı verdi. Orijinal veri kümesiyle eğitilmiş SMA-M modelinin genel doğruluk başarısı %97,86'ydı. Önişlem veri kümesine göre en iyi performans NB yöntemi ile gerçekleşti. NB yöntemiyle %99,52 genel doğruluk başarısı sağlandı. Önişlem veri kümesiyle eğitilmiş SMA-M modelinin genel doğruluk başarısı %99,05'ti. Tüm bu analizlerde en iyi performansı NB yöntemi verdi. Ancak genel doğruluk performansındaki artış miktarı (%1,19) göz önüne alındığında en iyi performans SMA-M modeli vermiştir. SMA-M modeli ayrıca diğer yöntemlere göre uçtan uca bir modele sahiptir (Modelin son katmanında Softmax sınıflandırıcısı otomatik işlem yapmaktadır.). Diğer yöntemler ise ek maliyet (zaman kaybı, el ile gerçekleşen işlemler, vb.) gerektirmektedir. Dolayısıyla deneysel analizin üçüncü adımı SMA-M modeliyle gerçekleşti.

**Tablo 3.** Orijinal veri kümesi ile önışlem ile oluşturulmuş veri kümesinin analiz sonuçları.

| Veri kümesi | Model / Yöntem  | Genel Doğ. (%) |
|-------------|-----------------|----------------|
| Orijinal    | SMA-M (softmax) | 97,86          |
|             | k-EYK           | 99,05          |
|             | NB              | 99,28          |
|             | DSA             | 97,63          |
|             | DVM             | 99,05          |
| Önışlem     | SMA-M (softmax) | 99,05          |
|             | k-EYK           | 99,05          |
|             | NB              | 99,52          |
|             | DSA             | 97,63          |
|             | DVM             | 99,28          |

Deneyel analizlerin son adımında amaç, SMA-M modelinden çıkartılmış iki özellik setini (orijinal veri kümesinden ve önışlem veri kümesinden) kullanarak özellik birleştirme yaklaşımını uygulamaktır. Özellik birleştirme yaklaşımı genel olarak başarı performansını artırabilmektedir. Bu amaç doğrultusunda, orijinal veri kümesiyle eğitilmiş modelin son katmanından çıkartılan (5x2111) boyutundaki özellik seti ile önışlem-veri kümesiyle eğitilmiş modelin son katmanından çıkartılan (5x2111) boyutundaki özellik seti birleştirildi ve iki özellik setinin birleştirilmesi ile (5x4222) boyutunda tek bir özellik seti elde edildi. Son aşamada birleştirilen tür/sınıf tabanlı özellik seti Softmax yöntemi ile yeniden sınıflandırıldı ve elde edilen genel doğruluk başarıları %100'dü. Bu sonuç önerilen yaklaşımda kullanılan özellik birleştirme işleminin katkı sunduğunu göstermiştir. Önerilen yaklaşımda kullanılan Softmax yönteminin işleyiş yapısı ve son aşamadaki analizden elde edilmiş karmaşıklık matrisi Şekil 10'da gösterilmiştir. Şekil 10(b) 'de gösterilmiş karmaşıklık matrisinin metrik sonuçları Tablo 4'de verilmiştir.

**Şekil 10.** Birleştirilmiş özellik setinin Softmax yöntemi ile sınıflandırılması; a) Softmax'ın işlevi, b) Karmaşıklık matrisi.**Tablo 4.** Önerilen yaklaşım ile elde edilmiş karmaşıklık matrisinin metrik sonuçları.

| Model             | Sınıf         | Kes | G_çağ | F-skr | Genel Doğ. (%) |
|-------------------|---------------|-----|-------|-------|----------------|
| Önerilen yaklaşım | DR yok        | 1,0 | 1,0   | 1,0   | 100            |
|                   | Hafif NPDR    | 1,0 | 1,0   | 1,0   |                |
|                   | Orta NPDR     | 1,0 | 1,0   | 1,0   |                |
|                   | Şiddetli NDPR | 1,0 | 1,0   | 1,0   |                |
|                   | PDR           | 1,0 | 1,0   | 1,0   |                |

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

DR hastalarının tedavisinde erken tanı önemlidir. Bu süreç teknolojik gelişmelere paralel olarak ilerlemektedir. Ayrıca bu hastalığının popülasyonu her geçen gün artmaktadır. Kişiyeye özel ekspertiz muayeneleri ile bu süreci doğru bir şekilde yürütmek mümkün olmayacaktır. Önerilen yaklaşım sayesinde sistem aynı anda gelen birçok görüntüyü işleyebilmekte ve görüntülerin analiz sonuçlarını kısa sürede verebilmektedir. Göz doktorlarının bu tür hastaları bire bir incelemesi zaman alıcıdır. Ayrıca uzman doktorlar aynı DR hastasının tanı-tedavi sürecini farklı zamanlarda farklı yorumlayabilir. Benzer şekilde DR hastasının tanı-tedavi süreçleri de diğer doktorlar tarafından

farklı yorumlanabilmektedir. Kısacası gözlemciler arası değişkenlik olabilir. Önerilen yaklaşım bir karar destek sistemine dayandığından, çoklu girdi görüntülerinin model tarafından işlenmesi çıktı sonucunu etkilemez. Önerilen yaklaşımın hesaplamalı ve nesnel bir değerlendirme gerçekleştirmesi en önemli avantajıdır.

Görüntü kümesinin yeterli olmaması durumunda yapılması gereken adımlardan biri veri artırma tekniğidir. Makine öğrenme yöntemleri ve klasik yöntemler küçük veri kümelerinde iyi performans sergileyebilirler. Ancak derin öğrenme modelleri yeterli sayıda görüntü içeren veri kümesi olmadığı takdirde aynı performansı sergileyemeyebilirler. Veri artırma, ESA modellerinin eğitimi için ayrılan görüntü kümesine uygulanarak performans artırımını sağlayan, medikal imajlarda sıklıkla tercih edilen popüler bir tekniktir. Veri artırma tekniği sayesinde; geometrik dönüşümler, renk alanı dönüşümleri, filtreleme, vb. işlemler uygulanır [31]. Bu çalışmada orijinal görüntüler kullanılarak analizler gerçekleştirildi ve genel performans başarısı iyi sonuç verdiği için veri büyütme teknikleri kullanılmadı.

Önerilen yaklaşımda fundus görüntülerinin şiddet türleri, yapay zekâ tabanlı karar destek sistemi kullanılarak sınıflandırıldı. Bu yaklaşım; ön işleme adımları, ESA modeli, makine öğrenme yöntemleri ve özellik birleştirme yaklaşımından oluşmaktadır. Veri kümesi, ön işleme adımları ile işlenerek retinal bölgedeki damarların daha ön plana çıkarılması sağlandı. Özellik setleri, SMA-M modeli kullanılarak çıkarıldı ve veri kümelerinden çıkarılan özellik setleri birleştirilerek %100 genel doğruluk başarısı elde edildi. Makine öğrenme yöntemleri başarılı sonuçlar vermesine rağmen, el ile işlemlerin gerçekleşmesi hem zaman kaybına neden olmuş hem de önerilen yaklaşımın uçtan uca bir model olmasının önüne geçmiştir. Softmax yönteminin deneysel analizlerde gösterdiği performans artışı diğer sınıflandırıcılara göre daha iyi olduğu için deneysel analizin son adımında tercih edilmiştir. Gelecek çalışmada, veri kümesi sayısı artırılarak, DR hastalığına ait fundus görüntüler üzerinde farklı bölütleme yöntemleri denenecektir. ESA modelleri çeşitlendirilerek ve özellik birleştirme yaklaşımından sonra daha az özellik kullanma imkânı sunan ama daha verimli özellikleri ön plana çıkarabilecek meta-sezgisel yöntemler kullanılacaktır.

## Not

Bu makale, Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü tarafından yürütülen “Diyabetik Retinopati Teşhisine Yönelik Yapay Zekâ Tabanlı Karar Destek Modeli” adlı yüksek lisans tezine dayanmaktadır.

## Yazar Katkıları

Abdulrahman ÇAVLI: Çalışmanın deneylerini gerçekleştirmiştir ve makaleyi yazmıştır.

Mesut TOĞAÇAR: Makalenin konusunun ve kapsamının belirlenmesine ve sonuçların yorumlanmasına katkı sunmuştur.

## Veri Kullanılabilirliği Bildirimi

Makalede özetlenen tüm veriler Kaggle Web Veri Havuzunda mevcuttur ve açık erişime sunulmuştur. Veri kümesi bağlantı linki: <https://www.kaggle.com/datasets/ahmedghazal54/diabetic-retinopathy-detection>

## Çıkar Çatışması

Makale yazarları, herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

## KAYNAKÇA





- [1] URL-1 <https://idf.org/aboutdiabetes/what-is-diabetes/facts-figures.html> (Erişim Tarihi: 28.12.2022).
- [2] M. Balcı "Diyabet Tanı ve Tedavi Rehberi", Türkiye Diyabet Vakfı, İstanbul, 2019.
- [3] Ş. İmamoğlu and C. Özyardımcı Ersoy, Eds. "Diabetes Mellitusun Tanı, Tedavi ve İzleme", Uludağ Üniversitesi Tıp Fakültesi, Bursa, 2022.
- [4] Q. Jian, Y. Wu, and F. Zhang "Metabolomics in Diabetic Retinopathy: From Potential Biomarkers to Molecular Basis of Oxidative Stress", Cells, vol. 11, no. 19, p. 3005, 2022.
- [5] İ. Sucu and E. Ataman "Dijital Evrenin Yeni Dünyası Olarak Yapay Zeka Ve Her Filmi Üzerine Bir Çalışma", Electron. J. New Media, vol. 4, no. 1, pp. 40–52, 2017.
- [6] S. Subramanian, S. Mishra, S. Patil, K. Shaw and E. Aghajari "Machine Learning Styles for Diabetic Retinopathy Detection: A Review and Bibliometric Analysis", Big Data Cogn. Comput., vol. 6, no. 4, p. 154, 2022.
- [7] Y.B. Özçelik and A. Altan "Diyabetik Retinopati Teşhisi için Fundus Görüntülerinin Derin Öğrenme Tabanlı Sınıflandırılması", Eur. J. Sci. Technol., no. 29, pp. 156–167, 2021.
- [8] N. Yalcin, S. Alver, and N. Uluhatun "Classification of retinal images with deep learning for early detection of diabetic retinopathy disease", in 2018 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2018.
- [9] V. Gulshan et al. "Development and validation of a deep learning algorithm for detection of diabetic retinopathy in retinal fundus photographs", JAMA -

- J. Am. Med. Assoc., vol. 316, no. 22, pp. 2402–2410, 2016.
- [10] S. Qummar et al. “A Deep Learning Ensemble Approach for Diabetic Retinopathy Detection”, IEEE Access, vol. 7, pp. 150530–150539, 2019.
- [11] C. Şen “Derin Öğrenme Tabanlı Oftalmoloji Görüntülerinde Veri Analizi ve Güvenliği”, Yüksek Lisans Tezi, Bilgisayar Müh., Bursa Uludağ Üni., Türkiye, 2022.
- [12] J. Grauslund “Diabetic retinopathy screening in the emerging era of artificial intelligence”, Diabetologia, vol. 65, no. 9, pp. 1415–1423, 2022.
- [13] URL-2  
<https://www.kaggle.com/datasets/ahmedghazal54/diabetic-retinopathy-detection> (Erişim Tarihi: 17.01.2023).
- [14] B. Bakir Gungor, B. Adanur Dedeturk, and K. Taşdemir “Cilt Kanseri Görüntü Sınıflandırması için Görüntü Ön İşlemenin Evrimsel Sinir Ağları Performansı Üzerindeki Etkileri”, Erciyes Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg., vol. 38, no. 2, pp. 190–200, 2022.
- [15] T. Kurban, P. Civicioglu, R. Kurban, and E. Besdok “Comparison of evolutionary and swarm based computational techniques for multilevel color image thresholding”, Appl. Soft Comput. J., vol. 23, pp. 128–143, 2014.
- [16] T. Olğar “Mathematical Evaluation of Image Quality in Fluoroscopic Units”, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg., vol. 3, no. 2, pp. 201–207, 2008.
- [17] K. Hanbay “Görüntü Bölütleme için Fourier Dönüşümü, Hessian Matris ve Özdeğerler Kullanılarak Yeni bir Aktif Kontur Modeli”, Türk Doğa ve Fen Derg., vol. 10, no. 2, pp. 242–247, 2021.
- [18] A. İ. Öztürk, O. Yıldırım, A. Yavuz, and A. Kuru “Cyst Detection Using Filtering Technique in Kidney Images”, Eur. J. Sci. Technol., no. 38, pp. 198–204, 2022.
- [19] İ. Duman, R. Kara, and E. Çetiner “C # Kullanarak Mesafeye Bağlı Ters Ağırlık Yöntemi ile Gridleme ve Kontur Çizimi Gridding and Contouring with Inverse Distance Weight Method by C #”, Karaelmas Fen ve Mühendislik Derg., vol. 6, no. 1, pp. 16–21, 2016.
- [20] D. C. Samuk and F. M. Nuroğlu “A new wide area-based algorithm to determine faulted line in series-compensated grid using k-nearest neighbor (k-NN) classification method”, J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ., vol. 36, no. 2, pp. 871–882, 2021.
- [21] S. Tuzcu “Çevrimiçi Kullanıcı Yorumlarının Duygu Analizi ile Sınıflandırılması Classification of Online User Reviews with Sentiment Analysis”, Estud. Bilişim Derg., vol. 1, no. 2, pp. 1–5, 2020.
- [22] A.V. Setinde “Yüz Tanıma Sistemlerinde Kullanılan ESA , YGH-DVM ve DSA Algoritmalarının Performans Testleri Performance Tests of ESA , YGH-DVM and DSA Algorithms Used in Face Recognition Systems”, Fırat Üniversitesi Fen Bilim. Derg., vol. 34, no. 1, pp. 39–48, 2022.
- [23] T. Kavzoğlu and İ. Çölkesen “Destek Vektör Makineleri ile Uydu Görüntülerinin Sınıflandırılmasında Kernel Fonksiyonlarının Etkilerinin İncelenmesi”, Harit. Derg., vol. 144, no. 4, pp. 73–82, 2010.
- [24] F. Saxen, P. Werner, S. Handrich, E. Othman, L. Dinges and A. Al-Hamadi “Face attribute detection with mobilenetv2 and nasnet-mobile”, Int. Symp. Image Signal Process. Anal. ISPA, vol. 9, pp. 176–180, 2019.
- [25] A. Arı “Analysis of EEG signal for seizure detection based on WPT”, Electron. Lett., vol. 56, no. 25, pp. 1381–1383, 2020.
- [26] A. Arı, F. AYAZ and D. HANBAY “EMG Sinyallerinin Kısa Zamanlı Fourier Dönüşüm Özellikleri Kullanılarak Yapay Sinir Ağları ile Sınıflandırılması”, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg., vol. 31, no. 2, pp. 443–451, 2019.
- [27] E. Şafak and N. Barışçı “Hafif Evrimsel Sinir Ağları Kullanılarak Sahte Yüz Görüntülerinin Tespiti”, El-Cezeri Fen ve Mühendislik Derg., vol. 2022, no. 4, pp. 1282–1289, 2022.
- [28] M.Z. Uzun, Y. Celik and E. Basaran “Micro-Expression Recognition by Using CNN Features with PSO Algorithm and SVM Methods”, Trait. du Signal, vol. 39, no. 5, pp. 1685–1693, 2022.
- [29] A. Çalışkan “Detecting human activity types from 3D posture data using deep learning models”, Biomed. Signal Process. Control, vol. 81, 2023.
- [30] A. Çalışkan “Diagnosis of malaria disease by integrating chi-square feature selection algorithm with convolutional neural networks and autoencoder network”, Trans. Inst. Meas. Control, vol. 45, no. 5, pp. 975–985, 2023.
- [31] P. Chlap, H. Min, N. Vandenberg, J. Dowling, L. Holloway and A. Haworth “A review of medical image data augmentation techniques for deep learning applications”, J Med Imaging Radiat Oncol, vol. 65, pp. 545-563, 2021.



## Evrişimli Sinir Ağlarında Transfer Öğrenmesi ile GAN tarafından Üretilen Sahte Görüntü Tespiti

### GAN-Generated Fake Image Detection with Transfer Learning in Convolutional Neural Networks

<sup>1</sup>Ece ECEMİŞ , <sup>2</sup>Kemal GÜNER , <sup>3</sup>Umut KURAN , <sup>4</sup>Emre Can KURAN 

<sup>1,2,3</sup>Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Haliliye/Şanlıurfa, Türkiye

<sup>4</sup>Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Bandırma/Balıkesir, Türkiye

<sup>1</sup>eececemis2@gmail.com, <sup>2</sup>kguner@harran.edu.tr,

<sup>3</sup>ukuran@harran.edu.tr, <sup>4</sup>ekuran@bandirma.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 27 February 2023

Accepted : 22 March 2023

##### Keywords:

Fake Face Image Detection, Generative Adversarial Networks, Transfer Learning, BFKL Layer

#### ABSTRACT

The Generative Adversarial Network (GAN) is known as a generative deep learning model. It consists of generator and discriminator structures. Very successful examples of GAN model outputs known as synthetic data are known. It is a very difficult problem to detect synthetic data, which can be used for different purposes, in case of successful generation. In this study, a Laplace filter and a new dissimilarity-based Convolutional Neural Network (CNN) layer is proposed in order to distinguish synthetic and real images, in which different and popular CNN models are used as feature extractors. The success results of the GAN model on different models have been determined. Thus, it has been understood that using CNN models is a suitable alternative for the detection of synthetic data that cannot be distinguished by the naked eye. The best success was achieved with DenseNet with an accuracy rate of 98.75%.

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

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 27 Şubat 2023

Kabul : 22 Mart 2023

##### Anahtar Kelimeler:

Sahte Yüz Görüntüsü Tespiti, Çekişmeli Üretken Ağlar, Transfer Öğrenmesi, BFKL Katmanı

#### ÖZET

Çekişmeli Üretken Ağ (GAN), üretken bir derin öğrenme modeli olarak bilinir. Üretici (generator) ve ayırt edici (discriminator) yapılarından oluşmaktadır. Sentetik veri olarak bilinen GAN modeli çıktılarının oldukça başarılı örnekleri bilinmektedir. Farklı amaçlar ile kullanılabilen sentetik verilerin, başarılı bir şekilde üretilmesi durumunda insan gözü ile tespit edilebilmesi oldukça güç bir problemdir. Bu çalışmada farklı ve popüler Evrişimli Sinir Ağı (CNN) modellerinin öznelik çıkarıcı olarak kullanıldığı, sentetik ve gerçek görüntüleri ayırt eden bu problem için Laplace filtresi ve benzemezlik tabanlı yeni bir CNN katmanı önerilmiştir. GAN modelinin farklı modeller üzerindeki başarı sonuçları tespit edilmiştir. Böylece, gözle ayırt edilemeyen sentetik verilerin tespiti için CNN modellerinden yararlanmanın uygun bir alternatif olduğu anlaşılmıştır. En iyi başarı %98.75 doğruluk oranıyla DenseNet ile elde edilmiştir.

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

ORCID: <sup>1</sup>0009-0002-8214-4499

<sup>2</sup>0000-0002-7506-6114

<sup>3</sup>0000-0001-5508-1870

<sup>4</sup>0000-0002-0987-3866



## 1. GİRİŞ

Çekişmeli üretici ağlar (Generative Adversial Networks, GAN) sentetik veri üretimi amaçlı geliştirilmiş modellerdir. GAN yöntemlerinin kullanımının yaygınlaşması ile birlikte oldukça farklı sahalarda çok başarılı sentetik veriler üretebilmektedir. Özellikle görüntü üretimi konusunda şaşırtıcı örnekleri mevcuttur. Bu verilerin göz ile ayırt edilebilmesi çoğu durumda mümkün olmamaktadır [1]. Sentetik veri üretimi yeterli veri bulunmayan alanlarda çalışma yapmak isteyen araştırmacılar için önemli bir alternatiftir. Örneğin derin öğrenme modelleri eğitimleri için büyük miktarda veriye ihtiyaç duymaktadır, bazı problemler için oldukça sınırlı miktarda veri bulunabilmektedir. Bu öznelikleri içeren verilerin uzmanlar tarafından dahi oluşturulabilmesi mümkün olmayabilmektedir. [2]. Ayrıca eğlence amaçlı ya da insanları yanıltma amaçlı olarak da sentetik bilgilerin kullanımı mümkün olabilmektedir [3]. Sentetik veri üretimi için kullanılan GAN yalnızca yeterli miktarda eğitim verisine ihtiyaç duyar. Bu verilerin etiketli olmalarına dahi gerek duyulmamaktadır. Gerçekleşen öğrenme işleminde eğitim verileri üzerinden oldukça karmaşık öznelilikler, istatistikler çıkarılmaktadır [4].

GAN modellerinin yaptıkları iş temel olarak bir üretken modelleme sistemi oluşturmaktadır. Üretken modelleme girdi verilerinden öğrendiği verilerinde yer alan kalıpları, örüntüleri öğrenip bu verilere benzer sentetik veriler üreten bir stratejidir. Bir derin sinir ağı olan GAN modelleri, bunlardan farklı olarak üretici (Generative, G) ve ayırıcı (discriminator, D) olmak üzere iki farklı derin ağ içermektedir [5]. İsmi bu iki ağı çekişmeli olarak çalışmasından almaktadır. GAN modelleri ile literatürde oldukça farklı sahalarda başarılı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Stoll vd. tarafından önerilen çalışmada GAN modelleri kullanılarak işaret dili verileri üretilmiştir [6]. Nazeri, GAN modelleri ile gri seviyeli görüntülerin renklendirilmesi amacıyla bir yöntem geliştirmiştir [7]. Fabbri ise GAN modellerinin su altı görüntülerinin iyileştirilmesi için kullanılan bir çalışma gerçekleştirmiştir [8]. Antipov ise GAN modellerini yüz yaşlandırma uygulaması oluşturma amacıyla kullanmıştır [9].

Marra vd. başarılı GAN sentetik verilerinin özellikle görüntülerinin insan gözü ile gerçek görüntülerden ayırmaları nedeniyle sentetik veri tespiti yapmak için de çalışmalar gerçekleştirilmiştir. GAN görüntülerinin tespiti problemi için derin öğrenme tabanlı klasik yöntemlerin performansları karşılaştırılmıştır. Sahte görüntülerin ve videoların sosyal medyada yayılmasının hızla büyüyen bir sorun olmasından kaynaklı olarak sahte görüntülerin tespit edilmesinin oldukça önemli olduğu vurgulanmıştır. GAN üretimi görüntülerin tespit edilmesi için Marra tarafından önerilen bir çalışmada, sosyal medya üzerinde yer alan görüntüler kullanılmaktadır. Bu yöntemde gerçek görüntüler GAN modeli aracılığı ile görüntüden görüntüye çeviri işlemine maruz bırakılmıştır. Daha sonra GAN üretimi ile gerçek görüntüler CNN modelleri vasıtasıyla sınıflandırılmıştır. [10]. Yine, model olarak Cozzolino 2017 [11] kullanılarak yapısal kısaltmalar kaldırılmış ve ağa ince ayar yapılarak performansı optimizasyonu yapılmıştır. Diğer bir model olan Bayar2016 [12] ile evrimsel katmanda yüksek geçirgen filtreler kullanılan bir CNN modeli kullanmışlardır ve

Nataraj vd. GAN ürettiği sentetik ile gerçek verileri tespit etmek için ortak oluşum ve derin öğrenmenin bir kombinasyonu kullanılarak GAN tarafından oluşturulan sahte görüntülerin tespit etmek için yöntem önerilmiştir. Pksel alanındaki üç renk kanalında eş oluşum matrislerini (co-occurrence matrix) çıkarılmış ve derin bir CNN modeli kullanılarak bir model eğitilmiştir. Görüntünün RGB kanallarından ortak oluşum matrisleri hesaplanır. Bu ortak oluşum matrisleri derin öğrenme modeli vasıtasıyla sınıflandırılarak GAN üretimi olan görüntüler tespit edilmektedir. Bu çalışmada görüntüler ortak oluşum matrislerine dönüştürülerek eğitilmekte önerilen yöntem ile benzer olarak ikili sınıflandırma şeklinde çalışan bir yöntem olup, yine benzer şekilde CNN tabanlı yöntem fakat bizim çalışmamızda ise görüntüler doğrudan verilmiştir. Bu modelin bu alanda bilinen iki veri kümesinde de başarılı sonuçlar ürettiği görülmüştür [13].

McCloskey ve Albright, bir GAN modelinin üretici ağına yapısını analiz ederek ağı işleminin gerçek kamera görüntüsünün yapısından farklı olduğunu iki farklı doğrulama şekli ile (renk ve doygunluk) ile GAN üretimi görüntüleri tespit etmişlerdir. Bunu da görüntülerin GAN üretimi olup olmadığının tespitinde kullanmışlardır. GAN'lerden gelen üretici ağlarının öznelik temsillerini kırmızı, yeşil ve mavi piksel yoğunluklarına dönüştürme şekli ile ilgili farklı özelliğin etkinliği belirlenmiş ve değerlendirilmiştir. Özellikle aşırı pozlanmış piksellerin frekansına dayanan nispeten basit bir adli bilişimin, bağımsız olarak oluşturulmuş bir sorgulama veri seti ile deneyler yoluyla GAN tarafından oluşturulan ve kamera görüntüleri arasında iyi bir ayırım sağlandığı gösterilmiştir. Üretici ağı özneliklerini kullanarak belirlenmiş iki özel öznelik bilgisi kullanılarak sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir [14].

Bu çalışmada GAN modelleri vasıtasıyla üretilen sahte insan görüntülerini tespit edebilmek için CNN tabanlı bir görüntü sınıflandırma yöntemi önerilmiştir. CNN modellerinin hangisinin bu problem için daha başarılı performans sergilediğini saptayabilmek amacıyla ayrıca sentetik ve gerçek görüntüler içeren yeni ve özgün bir veri kümesi oluşturulmuş ve önerilen yöntemin eğitim ve test işlemlerinde kullanılmıştır. Diğer çalışmalarda farklı yaklaşımlar kullanılmıştır, fakat görülmüştür ki sentetik görüntüler ve gerçek görüntüler arasındaki bazı düşük seviyeli özneliklerin sınıflandırmaya dahil edilmesi daha başarılı sonuçlara sebep olacaktır. Bu sebeple yeni bir özelleştirilmiş katman önerilmiştir. Çalışmanın literatüre ana katkıları şunlardır:

- İnternet ortamında hazır bulunan görüntülerden yeni bir veri seti derlenmiştir.
- Hafif bir blok eğitilmiş modellerin sonuna eklenerek yüksek bir performans elde edilmiştir.

- Yüksek geçirgen Laplace filtreye ve bensemezliğe (dissimilarity) dayalı yeni bir katman önerilmiştir. Önerilen bu katman, sentetik görüntüler ve gerçek görüntülere karşı ağırlık farklı tepki vermesini sağlayarak ağırlık başarısını artırmıştır.

Bu çalışmanın organizasyonu şu şekildedir: ikinci bölümde CNN ve kullanılan CNN modelleri hakkında genel bilgiler verilmektedir. Üçüncü bölümde önerilen yöntem ve kullanılan veri kümesi ile ilgili bilgiler verilmektedir. Dördüncü bölümde ise deneysel sonuçlar ve yorumlamalar yer almaktadır. Beşinci bölümde ise deneysel sonuçlar yorumlanmış, önerilen yöntemin avantajlarından ve dezavantajlarından bahsedilmiştir. Ayrıca gelecekteki çalışmalara yönelik önerilerde bulunulmuştur.

## 2. EVRİŞİMLİ SİNİR AĞLARI (CNN)

Evrışimli sinir ağları genellikle görüntü verileri üzerinde kullanılmaktadır. Evrişim ya da konvolüsyon (convolution) adı verilen filtreler aracılığıyla giriş görüntüsünden öznitelik haritaları çıkarılmaktadır. Problem türüne göre öznitelik haritalarının boyutu büyütüp küçültülebilme işlemleri de gerçekleştirilen CNN modellerinin temel bileşenleri evrişim katmanı, aktivasyon fonksiyonu, havuzlama katmanı, tam bağlı katman, seyreltme katmanı ve yığın normalizasyonu katmanı olarak listelenebilir. Aşağıda bu bileşenler hakkında kısa bilgiler aktarılmıştır [15]–[17].

**Evrışim Katmanı (convolutional layer):** CNN modellerinin en önemli bileşenidir. Bu katmanın görevi kendisine gelen girişten sahip olduğu filtre sayısı, filtre büyüklüğü gibi parametreler ölçüsünde öznitelik çıkarmak ve bu öznitelikleri kendinden sonraki katmana iletmektir.

**Aktivasyon Fonksiyonu (activation function):** CNN modellerinde oldukça önemli bir göreve sahiptir. Çıkış sinyalinin doğrusal, basit bir fonksiyon olmasını engellemek için kullanılan aktivasyon fonksiyonları modelin öğrenme performansının artması için kullanımına ihtiyaç duyulmaktadır. En yaygın kullanılan aktivasyon fonksiyonları ReLu ve sigmoid fonksiyonlarıdır.

**Havuzlama Katmanı (pooling layer):** Veri boyutunu ve parametre sayısını azaltmak amacıyla kullanılan havuzlama katmanı en büyüğe havuzlama ve ortalamaya havuzlama olmak üzere iki çeşiti bulunmaktadır.

**Tam Bağlı Katman:** Klasik bir yapay sinir ağıdır. Genellikle CNN modellerinin çıkışında kullanılarak sınıflandırıcı olarak kullanılmaktadır.

**Yığın Normalizasyonu (Batch Normalization):** CNN modelinde yer katmanların aynı anda öğrenmesine yardımcı olduğu için öğrenmeyi artırdığı, eğitimi hızlandırdığı bilinmektedir. Bu nedenle yaygın olarak kullanılmaktadır.

### 2.1. Kullanılan CNN Modelleri

Önerilen yöntemde ön-eğitilmiş olarak kullanılan, görüntü sınıflandırma konusunda oldukça popüler CNN modelleri Resnet18, Resnet50, VGG19, AlexNet, DenseNet ve SqueezeNet denenmiştir. Literatürde bu ağlarla ilgili çalışmalar oldukça yaygındır [18] Bu kısımda bu modellerle ilgili kısa bilgiler verilmektedir.

1) Resnet18 [19]: Residual Neural Network kısaca adı resnet olarak bilinen ağ mimarisinin 18 derin katmana sahip olan evrişimli sinir ağıdır. Tipik olarak evrişim, yığın normalizasyonu ve ReLu aktivasyon fonksiyonu içeren bloklardan meydana gelmektedir. Girişte 224x224x3 boyutlarında RGB görüntüler alır, çıkışta ise 512 uzunluğunda bir öznitelik vektörü üretilmektedir. Yaklaşık olarak 11 milyon parametre eğitilmektedir [20].

2) Resnet50 [19]: Yine bir resnet versiyonu olan resnet50'de adından da anlaşılacağı gibi 50 derin katman yer almaktadır. Yaklaşık olarak 23 milyon eğitilebilir parametre içermektedir. Girişte 224x224x3 boyutlarında RGB görüntüler alır, çıkışta ise 2048 uzunluğunda bir öznitelik vektörü üretilmektedir. Yaklaşık 23 milyon eğitilebilir parametre içermektedir. ResNet 50 ile yeni görüntüler sınıflandırılabilir.

3) VGG19 [21]: 16 evrişim ve 3 tam bağlı katmandan oluşmaktadır. Yapısında iki adet iki evrişim bir en büyüğe havuzlama bloğu, üç adet de dörtlü evrişim ve bir en büyüğe havuzlama bloğu içermektedir. VGG19 modeli girişte 224x224x3 boyutlarında RGB görüntü alıp, çıkışta 7x7x512 boyutlarında öznitelik vektörleri üretmektedir. Yaklaşık 144 milyon eğitilebilir parametresi vardır.

4) AlexNet [22]: Alex Krizhevsky tarafından tasarlanan bir CNN modelidir. Toplamda 5 evrişim katmanı ve 3 tam bağlı katman içermektedir. Diğer yöntemlere kıyasla daha sade bir mimarisi olduğu söylenebilir. Bu model girişte 227x227x3 boyutlarında RGB görüntüler alır, çıkışta ise 9216 elemanlı bir öznitelik vektörü elde edilir. Yaklaşık 60 milyon parametre içermektedir.

5) DenseNet [23]: DenseBlock adı verilen evrişim katmanları kümeleri içermektedir. Geçiş katmanı (Transition Layer) adı verilen yapılar vasıtasıyla bileşenler arası veri alışverişini sağlayan bu model karmaşık bir mimaride tasarlanmıştır. 224x224 boyutundaki girişlere karşılık 1024 elemanlı bir öznitelik vektörü üretir. Yaklaşık 7 milyon eğitilebilir parametre içermektedir.

6) SqueezeNet [24]: 3x3 boyutlarında filtreler tercih edilen bu modelde eğitilebilir parametre sayısı ve çıkış boyutları diğer modellere göre daha az miktardadır. Maliyeti düşürme amacıyla üretilmiş bir modeldir. 227x227 boyutlarında giriş görüntülerine karşılık, 1000 elemanlı bir öznitelik vektörü üretmektedir. Yaklaşık 1.2 milyon eğitilebilir parametre içermektedir.

7) GoogleNet [25]: Inception adı verilen derin öğrenme katmanları temel alınarak önerilmiş bir evrişimli sinir ağı modelidir. Bu mimarideki temel motivasyon, ağ içindeki işlem kaynaklarının gelişmiş bir biçimde kullanımınıdır.

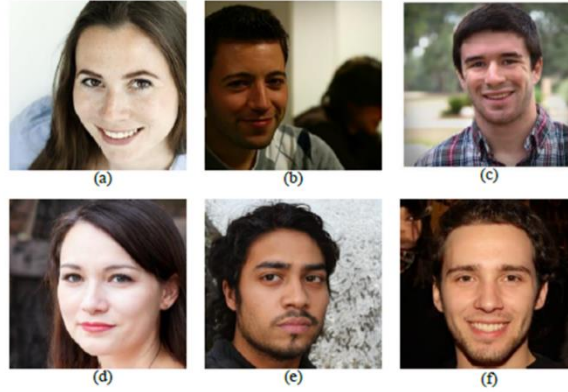
Yani hesaplama bütçesi sabitken ağdaki derinlik ve genişliğin artırılabilmesine imkan sağlamıştır. 22 katmanlı bir yapıya sahiptir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde kullanılan materyal ve yöntemlerden bahsedilmiştir. Bölüm 3.1’ de veri setine değinilmiş, özellikleri verilmiştir. Bölüm 3.2’de uygulama detaylarından ve çalıştırma ortamında bahsedilmiştir. Bölüm 3.3 ve Bölüm 3.4’te kullanılan tekniklerin temelleri hakkında bilgiler verilmiş, Bölüm 3.5 ve Bölüm 3.6’ da ise önerilen yöntem detaylarıyla birlikte açıklanmıştır.

#### 3.1. Veri Seti

Bu çalışma kapsamında kullanılan veri kümesi sentetik ve gerçek insan görüntülerinden oluşmaktadır. Görüntüler çeşitli kaynaklardan hazır olarak elde edilmiştir. Sentetik görüntüler thispersondoesnotexist [26] web sitesinden elde edilmiş olup, gerçek görüntüler Flickr [27] platformunda yer alan lisanssız fotoğraflar toplanarak elde edilmiştir. Kullanılan veri kümesinde 1000 sentetik, 1000 gerçek görüntü olmak üzere toplamda 2000 görüntü bulunmaktadır. Bu görüntülerin %80’i (1600 adet) eğitim, %20’si (400 adet) de test için kullanılmıştır. Görüntüler PNG formatında olup 3 kanallı RGB (Renkli) görüntülerdir. Boyutları 256x256 olarak ayarlanmıştır ve her bir kanal 8-bit derinliğe sahiptir. Her kanal için piksel değerleri [0-255] dahili aralığında değişmektedir. Görüntülerin etiketleri dosya adlarından çıkarılmaktadır. Gerçek görüntüler için dosya adında “g”, sahte görüntüler için ise “s” kullanılmıştır. Veri seti daha sonra dosyalardan görüntüler okunarak hazır hale getirilmiştir. Şekil 1’de veri kümesi içerisinde örnek görüntüler gösterilmiştir.



Şekil 1. Veri setinden örnek görüntüler: (a-c): Gerçek Görüntüler, (d-f): Sentetik GAN görüntüleri.

#### 3.2. Uygulama Detayları

Kullanılan makine Nvidia RTX3050 Ti grafik işleme birimine, 16 GB RAM belleğe ve 2.90 GHz işlemciye sahip olup, eğitim ve test işlemleri Cuda ile gerçekleştirilmiştir. Epoch sayısı 10 olarak tercih edilmiştir. Kayıp fonksiyonu olarak ikili sınıflandırma yapıldığı için İkili Çapraz Entropi (İÇE-Binary Cross Entropy) [28] tercih edilmiş olup, ağ eğitimi için Stokastik Gradyan İnişi (SGİ-Stochastic Gradient Descent) yöntemi tercih edilmiştir. Momentum değeri 0.9 ve öğrenme oranı 0.005 olarak eğitimler gerçekleştirilmiştir. Uygulama Python dilinde, PyTorch kullanılarak ve Windows 10 işletim sisteminde gerçekleştirilmiştir. Uygulama detayları daha ayrıntılı olarak Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Uygulama detayları.

| Cihaz Özellikleri                       | Ekran Kartı              | Nvidia RTX3050 Ti                      |
|---|--------------------------|--|
|   | İşlemci                  | AMD Ryzen 7 4800H with Radeon Graphics |
|   | RAM                      | 16 GB                                  |
| Hiper parametreler                      | Epoch (Adım) Sayısı      | 10                                     |
|   | Öğrenme Katsayısı        | 0.005                                  |
|   | Momentum                 | 0.9                                    |
|   | Toplu Boyut (Batch Size) | 4                                      |
| İşletim Sistemi Bilgileri               | İşletim Sistemi          | Windows 10                             |
|   | Sistem Türü              | 64-bit                                 |
| Kullanılan Kütüphane / Programlama Dili | PyTorch / Python         |  |
| Kayıp Fonksiyonu                        | İkili Çapraz Entropi     |  |
| Optimize Edici Fonksiyon                | Stokastik Gradyan İnişi  |  |
| Aktivasyon Fonksiyonu                   | Son Katman               | Sigmoid                                |
|   | Ara Katmanlar            | ReLU (ReLU katmanları)                 |

Bölüm 4'te verilen çalışma süreleri, Tablo 1'de verilen donanım özelliklerinden farklı özellikleri sahip bir cihazda değişebilir. Daha yüksek doğruluk düzeyleri için hiper parametreler değiştirilebilir, özellikle adım sayısı değiştirilerek ağına daha uzun bir süre eğitilmesi sağlanabilir. Öğrenme katsayısı küçültülerek veya artırılarak daha farklı yakınsamalar gerçekleştirilebilir. Görece çok büyük öğrenme katsayıları, optimum ağırlıkları kaçırmaya sebep olabilir. Momentum, SGI için dalgalanmaları engelleme yardımcı olup, modelin daha tutarlı olmasını sağlar. Bu çalışmada 0.9 seçilmiştir, daha düşük momentumlar iterasyonlar boyunca model başarısında dalgalanmalara sebep olabilir. İkili Çapraz Entropi, iki sınıflı bir sınıflandırma yapıldığı için tercih edilmiştir. Benzer şekilde Sigmoid fonksiyonu da son katmanda bu sınıflandırma için yeterlidir.

### 3.3. Gri Düzey Eş Oluşum Matrisi (GDEOM) Öznitelikleri

GDEOM, görüntü işleme ve analizinde kullanılan matematiksel bir araçtır. İlk olarak 1973'te Haralick, Shanmugam ve Dinstein tarafından önerilmiştir [29] ve o zamandan beri görüntü doku analizleri için popüler bir yöntem haline geldi. GDEOM, bir görüntüdeki piksel çiftleri arasındaki uzamsal ilişkiyi tanımlayan bir matristir. Spesifik olarak, belirli bir yoğunluk değerine ve uzamsal ilişkiye sahip piksel çiftlerinin bir görüntüde ne sıklıkta meydana geldiğini tutar. Bu matrisi analiz ederek, görüntü sınıflandırma, segmentasyon vb. uygulamalar için yararlı olan bir dizi doku özelliği çıkarılabilir. Önce yatay, dikey veya köşegen gibi bir mesafe ve yön seçilerek ve ardından belirli bir yoğunluk değerine ve bu mesafe ve yönde uzamsal ilişkiye sahip piksel çiftlerinin sayısı sayılarak hesaplanır. Bu işlem, yoğunluk değeri ve uzamsal ilişkinin olası her bir kombinasyonu için tekrarlanır ve her öğenin belirli bir piksel değeri çiftinin oluşma sıklığını temsil ettiği bir kare matrisle sonuçlanır. Matris elde edildikten sonra kontrast, enerji, homojenlik, benzemezlik ve entropi gibi bir dizi doku öznitelikler matristen çıkarılabilir. Bu farklı öznitelikler, görüntünün farklı bölgelerini ayırt etmek veya görüntüyü sınıflandırmak için kullanılabilir. Bu çalışmada, 0 derece, 45 derece, 90 derece ve 180 derece olan açılar kullanılarak GDEOM elde edilmiştir, oluşan matristen Denklem 1 ile verilen benzemezlik özniteliği kullanılmıştır. Benzemezlik, görüntüdeki iki bitişik piksel çiftinin arasındaki kontrast farkını ölçer, ve böylece birbirine komşu olan iki pikselin ne kadar farklılık gösterdiğini anlayabiliriz.

$$\text{Benzemezlik} = (1/N) \times \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} |i-j| \quad (1)$$

Denklem 1'de N, görüntüdeki toplam piksel sayısıdır,  $|i-j|$  iki pikselin gri seviye değerleri arasındaki mutlak farktır ve  $P(i, j)$ , belirli bir mesafe ve yönde gri seviye değerleri olan  $i$  ve  $j$ 'nin birlikte olma olasılığıdır. Burada Benzemezlik, iki bitişik pikselin farklı gri seviye değerlerine sahip olma sayısının görüntüdeki toplam piksel sayısına bölünmesiyle ölçülür.

### 3.4. Laplace Filtresi

Laplace filtresi [30], görüntü işleme ve bilgisayar görüşünde yaygın olarak kullanılan bir görüntü filtresi türüdür. Adını 19. yüzyılın başlarında Laplace operatörünü tanıtan matematikçi Pierre-Simon Laplace'dan almıştır. Laplacian filtresi, bir görüntüdeki kenarları ve ince ayrıntıları vurgulamak için geliştirilmiştir ve bu da onu görüntü keskinleştirme, kenar algılama ve öznitelik çıkarma gibi çeşitli uygulamalar için kullanışlı bir araç haline getirir. Laplace filtresi, bir görüntüyü 3x3 veya 5x5 sayı matrisi olan Laplace filtresiyle evriştirerek (konvolüsyon işlemi) çalışır. Filtre, farklı nesnelere arasındaki kenarlar veya sınırlar gibi yoğunluğun hızla değiştiği görüntü alanlarını vurgulamak için tasarlanmıştır. Laplace filtresi, yoğunluk gradyanındaki değişim oranının bir ölçüsü olan görüntü yoğunluğunun ikinci türevini hesaplayarak çalışır. Sonuçlar kullanılan renk uzayına bağlı olarak değişebilir de, Laplace filtresi hem gri tonlamalı hem de renkli görüntülere uygulanabilir. Bu çalışmada kullanılan Laplace matrisi, aşağıda Denklem 2 ile verilmiştir.

$$\text{LAP} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

### 3.5. Benzemezlik Filtreli Konvolüsyonel Laplace (BFLK) Katmanı

Bu çalışma kapsamında geliştirilen yöntemde yeni ve özelleştirilmiş bir katman olan BFLK katmanı önerilmiştir. BFLK katmanı, ağına, sentetik yüz görüntüleri ve gerçek yüz görüntüleri arasındaki ayrımı yapabilme yeteneğini geliştirmek için tasarlanmıştır. Gatys, Ecker ve Bethge tarafından yapılan bir çalışmada [31], doğal görüntülerin üstel kanun dağılımını [32] takip ettiği görülmüştür. Bu da doğal görüntülerin düşük frekanslı bileşenlere ve daha az yüksek frekanslı bileşenlere sahip olduklarını gösterir. Buna karşılık, sinir ağları vb. tarafından oluşturulan sentetik görüntüler, doğal görüntülerle aynı fiziksel kısıtlamalara sahip olmadıkları için daha yüksek frekanslı bileşenlere sahiptir. Her ne kadar doğal görüntüler taklit edilse de doğal görüntülerden farklı bir dokuya veya görünüme sahip sentetik görüntüler ortaya çıkabilmektedir. Yapılan bir çalışmada [33], GAN ile üretilen görüntülerin tespiti için GDEOM kullanılmıştır. GDEOM, sahte olan görüntülerdeki istatistiksel öznitelikleri elde etmek için faydalı bulunmuştur. Bu çalışmada, GDEOM ve Laplace filtresi birleştirilerek doğal olan görüntülerin ve sahte görüntülerin kolayca ayırt edilmesini sağlayan bir katman oluşturulmuştur.

BFLK katmanı, basitçe iki ayrı öznitelikten ve ağırlık yapılandırmasından oluşur: girdiye tamamen duyarlı olan konvolüsyon ve girdiye duyarlı olan konvolüsyon. Her iki konvolüsyon işlemi için konvolüsyon katmanı



filtrelerinin ağırlıkları ayırdır. Girdiye duyarlı olan konvolüsyon için Denklem 3 ile verilen delta matrisi kullanılır ve Denklem 4 ile hesaplanır:

$$M_{\Delta} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{Çıktı}(i,j) = \sum_{k,l} (\text{girdi}(i+k-1, j+l-1) * M_{\Delta}(k,l)) \quad (4)$$

Denklem 4 ile verilen çıktı değeri, konvolüsyon sonucu oluşan çıktıdır. Girdi ve  $M_{\Delta}$  arasında konvolüsyon işlemi yapılır ve ağırlıklar güncellenir. Girdiye duyarlı konvolüsyon işlemi ise Denklem 5 ile verilebilir:

$$\text{Çıktı}(i,j) = \sum_{k,l} (\text{girdi}(i+k-1, j+l-1) * \text{LAP}(k,l)) \quad (5)$$

Denklem 5 ile verilen çıktı değeri, girdi ile Denklem 2 ile verilen Laplace matrisinin evriştirilmesi sonucu elde edilmektedir. Böylece duyarlı olan ağırlıklar güncellenir. Bu iki ayrı işlem bu şekilde açıklanabilir. Duyarlılık, her parça (batch) ile model eğitildikçe hesaplanmaktadır. Her parça geldikçe konvolüsyonel katmanda hesaplamalar yapılır. Hesaplama için Denklem 1 ile verilen Benzemezlik metriği kullanılır. Parçadaki her görüntü için 0 derece, 45 derece, 90 derece ve 135 derece ile ilgili olan Benzemezlik metriklerinin ortalaması alınır. Daha sonra tüm parça için Benzemezlik ortalaması alınır. Bu ortalama belli bir eşik değerinin üstündeyse, duyarlı konvolüsyon aksi halde duyarlı konvolüsyon uygulanır ve ağırlıklar güncellenir. Böylece sahte görüntülere daha duyarlı bir katman oluşturulmuş olur. Benzemezlik filtresi,  $B_s$  parça boyutu,  $G_0, G_{45}, G_{90}, G_{135}$  sırasıyla 0 derecelik, 45 derecelik, 90 derecelik ve 135 derecelik GDEOM olmak üzere, Denklem 6 ile verilebilir:

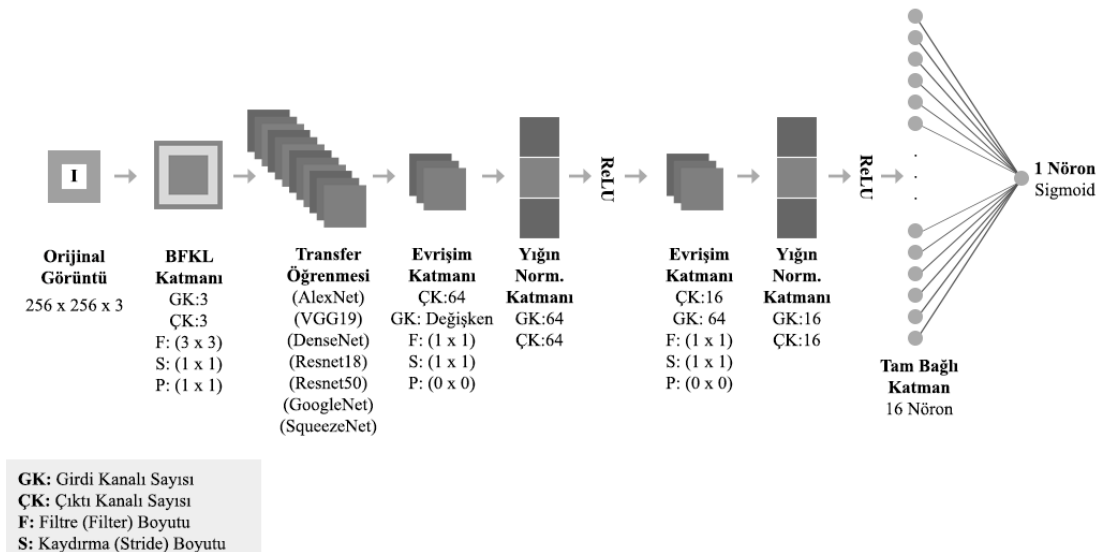
$$\text{Çıktı}(i,j) = \left(\frac{1}{B_s}\right) \times \sum_{i=1}^{B_s} \left(\frac{1}{4}\right) \times \text{Benzemezlik}(G_0, G_{45}, G_{90}, G_{135}) \quad (6)$$

Ağ, tek bir örnek üzerinde çalıştırılmak istenildiğinde benzer şekilde sadece bu örnek için 4 farklı açıda benzemezlik hesaplanır ve katmandan geçirilir.

### 3.6. Transfer Öğrenme ile BFKL Katmanının Birleştirilmesi

Transfer öğrenme, eğitilmiş bir modelin tekrar kullanılmasını hedefler ve böylece oluşan model yeni örnekleri daha iyi sınıflandırır [34]. Önceden eğitilmiş bir model kullanırken, eğitim sırasında güncellenmelerini önlemek için modelin bazı veya tüm katmanlarını dondurmak popüler bir uygulamadır. Bu katmanlar dondurularak eğitim süreci hızlandırılabilir ve veriyi ezberleme önlenir. Bu çalışmada, sadece son katman dondurularak eğitilmiş modellerden öznetelikler çıkartılmıştır. Böylece binlerce veya milyonlarca veri üzerinde eğitilen bir modelin çıkardığı özneteliklerden fayda sağlanabilmektedir.

Şekil 2 incelendiğinde soldan ikinci sırada yer alan, en büyük boyutlu bileşen olarak göze çarpan ön-eğitilmiş model, Bölüm 2.1’de belirtilen ön eğitilmiş CNN modellerini temsil etmektedir. Her bir çalışmada öneğitilmiş model yerine sırasıyla kullanılmıştır. Ön-eğitilmiş modelin çıkışı sırasıyla evrişim, yığın normalizasyonu, ReLU aktivasyon fonksiyonundan oluşan iki bloktan geçerek tam bağlı katmana iletilmektedir. Yığın normalizasyonu modelin daha hızlı yakınsamasını sağlar [35]. Aynı zamanda modelin veriyi ezberlemesini engeller. ReLU ağı lineer olmayan bir yapı kazandırır. Tam bağlı katman aracılığıyla sınıflandırması gerçekleştirilen görüntüler için ağı ürettiği çıkışlar, sigmoid aktivasyon fonksiyonu ile 0-1 aralığına ölçeklenmiştir. Bu sayede çıkış için 0.5’ten küçük değerler gerçek, 0.5’ten büyük değerler ise sentetik görüntüler anlamına gelmektedir.



Şekil 2. Önerilen yöntemin mimarisi.



Şekil 2 ile verildiği üzere, girdi görüntüsü girdi katmanına verilir. Daha sonra BFKL katmanı ile filtreleme yapılır. Bu yapıldıktan sonra, ilgili transfer öğrenme mimarisine BFKL katmanında uygulanan konvolüsyon sonucu iletilir. Burada boyutlar spesifiktir, mimariden mimariye değişmektedir. Transfer öğrenmesi modelinden sonra gelen ve 2 defa tekrarlayan (sırasıyla evrişim katmanı, yığın normalizasyonu katmanı ve ReLU katmanı) katmanlar bulunmaktadır. Evrişimli katmana, hazır modelden çıkartılan öznetelikler girdi verilir. Evrişim katmanının girdisi, modelin çıktısına göre değişmektedir (256, 512 vb.). İlk evrişimli katmanın 64 çıktı kanalı vardır. Bu katmandan yığın normalizasyonu katmanına 64 girdi (öznetelik) boyutuna sahip bir girdi verilir. Daha sonra bu öznetelikler ReLU katmanına iletilir. 2. Blokta benzer şekilde, Evrişim katmanı için 64 girdi kanalı ve 16 çıktı kanalı bulunurken, yığın normalizasyonu katmanı için ise 16 girdi boyutu mevcuttur. En sonunda tüm öznetelikler 16 nöronlu tam bağlı katmana iletilir ve sigmoid aktivasyon fonksiyonu ile ağın çıktısı belirlenir.

#### 4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Önerilen yöntem üzerinde farklı öznetelik çıkarıcı yöntemler transfer öğrenmesi mimarileri ile denenmiş ve ikili sınıflandırma doğruluğuna ilişkin sayısal değerler Tablo 2’de paylaşılmıştır. Sonuçlar değerlendirilirken Doğruluk (Accuracy), Hassasiyet (Sensitivity), Kesinlik (Precision), F1 skoru olarak bilinen dört metriktir yararlanılmıştır. Doğruluk, Denklem 7’de verilmiştir. Hassasiyet ve Kesinlik ise sırasıyla Denklem 8 ve Denklem 9 ile verilmiştir. Ayrıca, öznetelik dengesez veri setlerine karşı daha güvenilir bir metrik olan [36] ve Denklem 10 ile verilen F1 skoru kullanılmıştır.

$$\text{Doğruluk} = \frac{TP+TN}{TP+FP+TN+FN} \quad (7)$$

$$\text{Hassasiyet} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (8)$$

$$\text{Kesinlik} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (9)$$

$$F1 = 2 \times \frac{\text{Kesinlik} \times \text{Hassasiyet}}{\text{Kesinlik} + \text{Hassasiyet}} \quad (10)$$

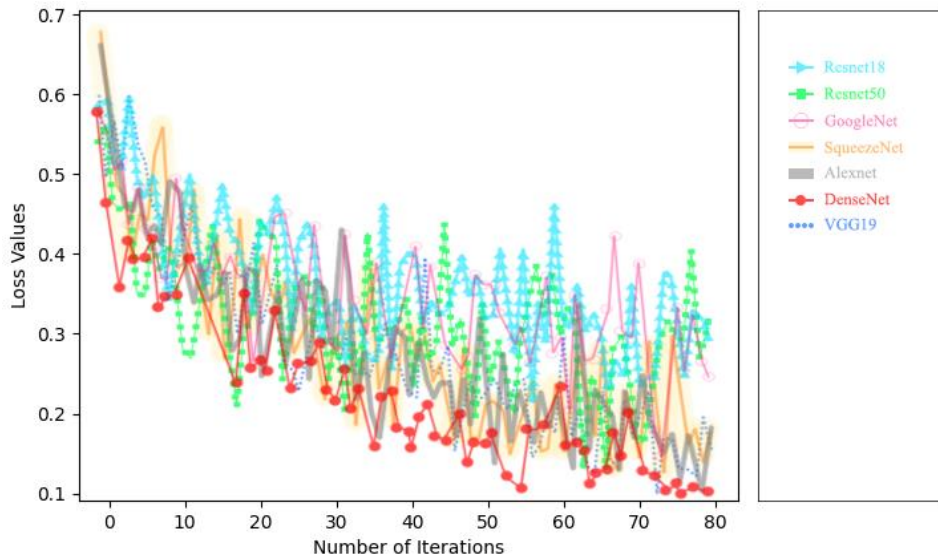
Burada, TP 1 sınıfına ait olup 1 olarak tahmin edilen görüntü sayısını, TN 0 sınıfına ait olup 0 olarak tahmin edilen görüntü sayısını, FP 0 sınıfına ait olup 1 olarak tahmin edilen görüntü sayısını, FN ise 1 sınıfına ait olup 0 olarak tahmin edilen görüntü sayısını temsil eder. 7-9 arasındaki denklemlerde doğru tahmin edilen görüntü sayısının tüm görüntü sayısına oranı hesaplanmaktadır. Şekil 3 ile modellerin kayıp grafikleri verilmiştir. Tablo 2’de farklı modellerin doğruluk açısından elde edilen en iyi sonuçlarının kıyaslamaları, Doğruluk, Hassasiyet, Kesinlik, F1 Skoru ve Çalışma Süresi (Sn.) metrikleri ile yapılmıştır. Tablo 2 incelendiğinde, eşit şartlarda, SqueezeNet dışında hemen hemen tüm CNN modellerinin oldukça başarılı performanslar gösterdiği görülmüştür. Resnet18 ile %95.50 doğruluk oranı ve %95.60 F1 skoru, Resnet 50 ile %94.75 doğruluk oranı ve %94.48 F1 skoru, VGG19 ile 92.50 doğruluk oranı ve %91.97 F1 skoru, AlexNet ile %94.75 doğruluk oranı ve %94.57 F1 skoru, DenseNet ile %98.75 doğruluk oranı ve %98.75 F1 skoru, SqueezeNet ile %93.75 doğruluk oranı ve %93.36 F1 skoru, GoogleNet ile ise %93.50 doğruluk oranı ve %93.71 F1 skoru elde edilmiştir. Çalışma süresi bakımından en yavaş model VGG19 olurken, en hızlı model ise SqueezeNet olmuştur. Çalışma süresi önemsenmediğinde her açıdan göreceli olarak en yüksek performansa sahip olan modelin DenseNet olduğu açıkça görülmektedir. Ayrıca SqueezeNet modelinin başarı açısından performansı açık ara artarken, çalışma süresi de düşük olduğu için tercih edilebilir bir modeldir. BFKL katmanı olmadan her ne kadar modeller daha hızlı çalışmış olsa da, model eğitildikten sonra kullanılması daha hızlıdır. Ayrıca iterasyon sayısı vb. parametreler değiştirilerek BFKL katmanlarından daha fazla verim alınabilir. Bu çalışmada minimal bir yaklaşımla modellerin başarısı gözlemlenmiştir. Çalışma süresi kullanılan donanıma bağlı olarak değişebilir, diğer sonuçlar ise ağı en iyi durumu göz önüne alındığında ortalama olarak yaklaşık  $\pm$  % 1.22 sapma gösterebilir (10 defa çalıştırılma sonucu elde edilmiştir).

**Tablo 2.** Farklı modellerin performans açısından kıyaslaması.

| Öznetelik Çıkarıcı           | Doğruluk     | Hassasiyet   | Kesinlik     | F1 Skoru     | Eğitim ve Test Aşamalarındaki Toplam Çalışma Süresi (Sn.) |
|------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---|
| <b>Resnet18</b>              | 94.50        | 90.00        | 98.90        | 94.24        | 196.215   |
| <b>Resnet18 (BFKL ile)</b>   | 95.50        | 98.00        | 93.33        | 95.60        | 337.160   |
| <b>Resnet50</b>              | 94.50        | 90.00        | 98.00        | 94.24        | 313.239   |
| <b>Resnet50 (BFKL ile)</b>   | 94.75        | 90.00        | <b>99.44</b> | 94.48        | 497.189   |
| <b>VGG19</b>                 | 91.00        | 84.00        | 97.67        | 90.32        | 526.983   |
| <b>VGG19 (BFKL ile)</b>      | 92.50        | 86.00        | 98.85        | 91.97        | 736.976   |
| <b>AlexNet</b>               | 86.00        | 72.00        | 100.00       | 83.72        | 173.426   |
| <b>AlexNet (BFKL ile)</b>    | 94.75        | 91.50        | 97.86        | 94.57        | 330.110   |
| <b>DenseNet</b>              | 98.00        | 97.5         | 98.48        | 97.98        | 283.756   |
| <b>DenseNet (BFKL ile)</b>   | <b>98.75</b> | <b>99.50</b> | 98.02        | <b>98.75</b> | 586.547   |
| <b>SqueezeNet</b>            | 79.50        | 60.00        | 99.17        | 74.76        | 151.027   |
| <b>SqueezeNet (BFKL ile)</b> | 93.75        | 88.00        | 99.43        | 93.36        | <b>319.526</b>  |
| <b>GoogleNet</b>             | 96.50        | 99.00        | 94.28        | 96.58        | 227.067   |
| <b>GoogleNet (BFKL ile)</b>  | 93.50        | 97.00        | 90.65        | 93.71        | 383.121   |

DenseNet modeli, %98,00 doğruluk ve %97,5 hassasiyet elde ederek genel olarak en iyi performansı göstermiştir. BFKL ile birleştirildiğinde modelin performansı daha da iyileşerek %98,75 doğruluk ve %99,50 hassasiyet elde edilmiştir. Bu durum BFKL katmanının iyileştirilmiş performans için derin öğrenme modellerinde etkili bir yöntem olabileceğini düşündürmektedir. Resnet18 ve Resnet50 modelleri de BFKL ile sırasıyla %95,50 ve %94,75 doğruluk oranı elde ederek iyi performans göstermiştir. Resnet50 modeli %99,44 gibi yüksek bir kesinlik elde etmiştir. VGG19 modeli, BFKL ile uygulandığında %92,50'lik bir doğruluk elde etmiştir; bu durum, BFKL olmadan %91,00 olan doğruluğa göre bir gelişmedir. AlexNet modeli, bu çalışmada değerlendirilen diğer modellere kıyasla nispeten düşük olan %86,00'lik bir doğruluk elde etmiştir. Ancak BFKL ile birlikte, modelin doğruluğu %94,75'e yükselmiştir ve bu da önemli bir gelişmedir. Bu, BFKL katmanının başlangıçta daha az doğruluk oranına sahip olan bazı modellerin performansını iyileştirmek için etkili bir yöntem olabileceğini düşündürmektedir. SqueezeNet modeli ile, BFKL katmanı olmadan %79,50 ile en düşük doğruluk ve %60,00 ile en düşük hassasiyet elde edilmiştir. Yine bu model de BFKL katmanı ile birleştirildiğinde, modelin doğruluğu ve hassasiyeti önemli ölçüde iyileşerek %93,75 doğruluk ve %88,00 hassasiyet elde edilmiştir. Hassasiyetin artması, modelin pozitif sınıfa ait olan örnekleri (gerçek yüzler) daha iyi sınıflandırabileceğini göstermektedir. GoogleNet modeli, BFKL olmadan %96,50 doğruluk ve %94,28 kesinlik elde etmiştir. BFKL ile uygulandığında, modelin doğruluğu biraz düşerek %93,50 olurken, kesinliği %90,65'e düşmüştür. Bu, BFKL katmanının her zaman iyilştirilmiş bir performansa yol açmayabileceğini ve başarının belirli modele veya veri kümesine bağlı olabileceğini düşündürmektedir. F1 skorları incelendiğinde doğruluk oranlarına paralel olduğu, başarı modeller için de yüksek olduğu görülmektedir.

Genel olarak, bu çalışmanın sonuçları, DenseNet, AlexNet ve Resnet (18 ve 50) modellerinin göreceli olarak sahte yüz görüntülerini sınıflandırmak için etkili olduğunu ve BFKL katmanının derin öğrenme modellerinin performansını iyileştirmek için etkili bir yöntem olabileceğini göstermektedir. Modellerin büyük çoğunluğunda başarı oranı BFKL ile artmıştır. Bununla birlikte, bazı modeller için BFKL ile sağlanan verim, belirli modele veya veri kümesine bağlı olarak değişebilir. Nitekim bu durum, GoogleNet için gözlemlenmiştir.



Şekil 3. Model kayıp grafikleri (BFKL ile).

Şekil 3'te verilen kayıp grafikleri incelendiğinde, modellerin genel olarak dalgalanma ile birlikte iterasyonlar boyunca kayıplarının da azaldığı görülmektedir. Bu dalgalanma, yüz görüntüsü verilerinin gürültülü olmasından dolayı (farklı arka planlar, farklı yüzler vb.) ağır öğrenirken karşılaştığı bir zorluk olarak değerlendirilebilir. Yine kayıp grafikleri incelendiğinde, DenseNet modelinin özellikle son 10 iterasyonda kayıp değerinin ve kayıptaki dalgalanmalarının azaldığı, daha stabil duruma geldiği gözlemlenmiştir. DenseNet modelinin kaybının son iterasyonda, mevcut diğer kayıplardan daha düşük olması bu modelin hedefe daha hızlı yakınsadığını göstermektedir. Bir tarafta Resnet50, GoogleNet ve Resnet18 birbirine yakın bir performans izlerken, diğer taraftan AlexNet, SqueezeNet ve VGG19 birbirine yakın bir performans izlemiştir. DenseNet modelinin daha hızlı yakınsadığı ve daha başarılı olduğu söylenebilir, çünkü kaybın minimum olması beklenir.

## 5. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular göz önüne alındığında, sentetik verilerin tespiti için evrişimli sinir ağlarının kullanımının makul bir tercih olduğu gözlemlenmiştir. İnsan gözü ile tespit edilemeyen sentetik görüntülerin evrişimli sinir ağı modelleri aracılığıyla çok yüksek oranda başarı sağlayarak tespit edilebileceği gösterilmiştir. Laplace filtresi ve benzemezlik, yeni özelleştirilmiş katmanda kullanıldığında yüksek frekanslı öğelerin tespit edilmesini ve ağı benzer öznelikleri değerlendirmesini sağlamış, böylece sahte görüntülerin ayırt

edilmesini kolaylaştırmıştır. Bunun yanında farklı evrişimli sinir ağlarının öznetelik çıkarıcı olarak kullanımına ilişkin bir karşılaştırma gerçekleştirilmiş olup, mimari açıdan karmaşık bir yapıya sahip olan DenseNet modelinin göreceli olarak en başarılı performansı sergilediği gözlemlenmiştir. DenseNet için %98 olan doğruluk oranı, %98.75'e yükselerek modelin başarısını artırmıştır. Ayrıca başka dikkat çekici bir sonuç olan SqueezeNet modelinin başarısının %79.50 doğruluk oranından %93.75 doğruluk oranına çıkması, oldukça önemli bir iyileşmedir. Bu durum sonuç olarak BFKL katmanının farklı modellerin yapısına entegre edilerek ilgili modelin başarısını artırabileceğini vurgulamaktadır. Bununla birlikte, GoogleNet için aynı şey geçerli değildir. GoogleNet modelinin doğruluk oranı %3 kadar düşmüştür. Model ve veri seti seçilirken, bu sebepten dolayı dikkatli olunması gerekmektedir. Fakat modellerin çoğunluğu için konuşursak, BFKL katmanı iyileştirici bir performans göstermiştir. Gelecek çalışmalarda veri setindeki görüntü sayısı artırılabilir gibi, sentetik görüntüler üzerinde farklı türde çalışmalar yapılabileceği düşünülmektedir. Özellikle farklı yüksek geçirgen filtrelerin uygulanması tavsiye edilmektedir.

## Yazar Katkıları

Yazarlar çalışmaya eşit oranlı katkı sunmuşlardır.

## Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

## KAYNAKÇA

- [1] I. Goodfellow vd. "Generative adversarial networks", Commun. ACM, vol. 63, no. 11, pp. 139-144, 2020.
- [2] S. Motamed, P. Rogalla, ve F. Khalvati "Data augmentation using Generative Adversarial Networks (GANs) for GAN-based detection of Pneumonia and COVID-19 in chest X-ray images", Informatics Med. Unlocked, vol. 27, p. 100779, 2021.
- [3] N. Sharma, R. Sharma, ve N. Jindal "Comparative analysis of CycleGAN and AttentionGAN on face aging application", Sādhana, vol. 47, no. 1, p. 33, 2022.
- [4] R. Huang, L. Ma, J. He, ve X. Chu "T-GAN: A deep learning framework for prediction of temporal complex networks with adaptive graph convolution and attention mechanism", Displays, vol. 68, p. 102023, 2021.
- [5] A. Creswell, T. White, V. Dumoulin, K. Arulkumaran, B. Sengupta, ve A.A. Bharath "Generative Adversarial Networks: An Overview", IEEE Signal Processing Magazine, vol. 35, no. 1, pp. 53-65, 2018.
- [6] S. Stoll, N. C. Camgoz, S. Hadfield, ve R. Bowden "Text2Sign: Towards Sign Language Production Using Neural Machine Translation and Generative Adversarial Networks", Int. J. Comput. Vis., vol. 128, no. 4, pp. 891-908, 2020.
- [7] K. Nazari, E. Ng, ve M. Ebrahimi "Image colorization using generative adversarial networks", içinde Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), LNCS, vol. 10945 pp. 85-94, 2018.
- [8] C. Fabbri, M.J. Islam, ve J. Sattar "Enhancing Underwater Imagery Using Generative Adversarial Networks", içinde Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 7159-7165, 2018.
- [9] G. Antipov, M. Baccouche, ve J.L. Dugelay "Face aging with conditional generative adversarial networks", içinde Proceedings - International Conference on Image Processing, ICIP, pp. 2089-2093, 2018.
- [10] F. Marra, D. Gragnaniello, D. Cozzolino, ve L. Verdoliva "Detection of GAN-Generated Fake Images over Social Networks", IEEE 1st Conference on Multimedia Information Processing and Retrieval, MIPR, pp. 384-389.
- [11] D. Cozzolino, G. Poggi, ve L. Verdoliva "Recasting residual-based local descriptors as convolutional neural networks: An application to image forgery detection", Proceedings of the 2017 ACM Workshop on Information Hiding and Multimedia Security, pp. 159-164, 2017.
- [12] B. Bayar ve M.C. Stamm "A deep learning approach to universal image manipulation detection using a new convolutional layer", Proceedings of the 2016 ACM Information Hiding and Multimedia Security Workshop, pp. 5-10, 2016.
- [13] L. Nataraj vd. "Detecting GAN generated Fake Images using Co-occurrence Matrices", Electron. Imaging, vol. 31, no. 5, pp. 532-1-532-7, 2019.
- [14] S. McCloskey ve M. Albright "Detecting GAN-Generated Imagery Using Saturation Cues", International Conference on Image Processing, ICIP, pp. 4584-4588.
- [15] Y. LeCun ve Y. Bengio "Convolutional networks for images, speech, and time series", Handb. brain theory neural networks, vol. 3361, pp. 255-258, 1995, [Çevrimiçi]. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.32.9297&rep=rep1&type=pdf>.
- [16] T. Rahman vd. "Transfer Learning with Deep Convolutional Neural Network (CNN) for Pneumonia Detection Using Chest X-ray", Appl. Sci., vol. 10, no. 9, p. 3233, 2020.
- [17] S. Raghu, N. Sriraam, Y. Temel, S.V. Rao, ve P.L. Kubben "EEG based multi-class seizure type classification using convolutional neural network and transfer learning", Neural Netw., vol. 124, pp. 202-212, 2020.

- [18] A.M. Ismael ve A. Şengür “Deep learning approaches for COVID-19 detection based on chest X-ray images”, *Expert Syst. Appl.*, vol. 164, 2021.
- [19] K. He, X. Zhang, S. Ren, ve J. Sun “Deep Residual Learning for Image Recognition”, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 770–778, 2016.
- [20] E. Cengil ve A. Cinar “Multiple Classification of Flower Images Using Transfer Learning”, *International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)*, pp. 1–6, 2019.
- [21] K. Simonyan ve A. Zisserman, “Very deep convolutional networks for large-scale image recognition”, 2015.
- [22] A. Krizhevsky, I. Sutskever, ve G. E. Hinton “2012 AlexNet”, *Adv. Neural Inf. Process. Syst.*, pp. 1–9, 2012.
- [23] G. Huang, Z. Liu, L. Van Der Maaten, ve K. Q. Weinberger “Densely connected convolutional networks”, *IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 4700–4708, 2017.
- [24] F.N. Iandola, S. Han, M.W. Moskewicz, K. Ashraf, W.J. Dally, ve K. Keutzer “SqueezeNet: AlexNet-level accuracy with 50x fewer parameters and < 0.5 MB model size”, *arXiv Prepr. arXiv1602.07360*, 2016.
- [25] C. Szegedy vd. “Going deeper with convolutions”, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, ss. 1–9, 2015.
- [26] “This Person Does Not Exist”. <https://thispersondoesnotexist.com/>.
- [27] “Flickr”. <https://www.flickr.com/>.
- [28] Usha Ruby Dr. A “Binary cross entropy with deep learning technique for Image classification”, *Int. J. Adv. Trends Comput. Sci. Eng.*, vol. 9, no. 4, pp. 5393–5397, 2020.
- [29] R.M. Haralick, K. Shanmugam, ve I. Dinstein “Textural Features for Image Classification”, *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.*, c. SMC-3, vol. 6, pp. 610–621, 1973.
- [30] R.C. Gonzalez, R.E. Woods, ve B.R. Masters “Digital Image Processing, Third Edition”, *J. Biomed. Opt.*, vol. 14, no. 2, p. 029901, 2009.
- [31] L.A. Gatys, A.S. Ecker, ve M. Bethge “Image Style Transfer Using Convolutional Neural Networks”, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 2414–2423, 2016.
- [32] D.L. Ruderman “Origins of scaling in natural images”, *Vision Res.*, vol. 37, pp. 3385–3398, 1996.
- [33] M. Goebel, L. Nataraj, T. Nanjundaswamy, T.M. Mohammed, S. Chandrasekaran, ve B.S. Manjunath “Detection, Attribution and Localization of GAN Generated Images”, *Electron. Imaging*, vol. 33, no. 4, pp. 276-1-276–11, 2021.
- [34] F. Zhuang vd. “A Comprehensive Survey on Transfer Learning”, *IEEE*, vol. 109, no. 1. pp. 43–76, 2021.
- [35] C. Garbin, X. Zhu, ve O. Marques “Dropout vs. batch normalization: an empirical study of their impact to deep learning”, *Multimed. Tools Appl.*, vol. 79, no. 19–20, pp. 12777–12815, 2020.
- [36] Z. DeVries vd. “Using a national surgical database to predict complications following posterior lumbar surgery and comparing the area under the curve and F1-score for the assessment of prognostic capability”, *Spine J.*, vol. 21, no. 7, pp. 1135–1142, 2021.



## OFDM-IM Sisteminde SLM Yöntemini Kullanarak Tepe Gücü/Ortalama Güç Oranının Düşürülmesi

### Reduction of Peak-to-Average Power Ratio Using SLM Method in OFDM-IM System

<sup>1</sup>Kemal AKÖZLÜ , <sup>2</sup>Necmi TAŞPINAR 

<sup>1</sup>Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, Türkiye

<sup>2</sup>Erciyes Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

<sup>1</sup>kemalakoğlu@gmail.com, <sup>2</sup>taspinar@erciyes.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 1 March 2023

Accepted : 25 March 2023

##### Keywords:

OFDM-IM, Spectral Efficiency, Power Amplifier, PAPR, SLM

#### ABSTRACT

Orthogonal Frequency Division Multiplexing with Index Modulation (OFDM-IM) system stands out with its superior features such as high spectral efficiency, flexibility and immunity to inter-carrier interference. However, OFDM-IM system has a high peak-to-average power ratio (PAPR) problem. High PAPR negatively affects system performance by distorting the transmitted signal in case of non-linear power amplifiers. In this paper, it is aimed to reduce the high PAPR in the system by using the selective mapping (SLM) method. The computer simulation results show that the SLM method used in the OFDM-IM system significantly reduces the PAPR value compared to the original system. In addition, the effects of the changes in the number of subcarriers, phase rotation factor and modulation index parameters on the PAPR performance of the OFDM-IM system were examined and evaluations were made.

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

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 1 Mart 2023

Kabul : 25 Mart 2023

##### Anahtar Kelimeler:

OFDM-IM, Spektral Verimlilik, Güç Kuvvetlendiricisi, PAPR, SLM

#### ÖZET

İndis modülasyonlu dikgen frekans bölmeli çoğullama (OFDM-IM) sistemi yüksek spektral verimlilik, esneklik ve taşıyıcılar arası girişime karşı bağımsızlık gibi üstün özellikleri ile öne çıkmaktadır. Fakat OFDM-IM sisteminde yüksek tepe gücü/ortalama güç oranı (PAPR) problemi bulunmaktadır. Yüksek PAPR, güç kuvvetlendiricilerinin doğrusal olmaması durumunda, iletilen sinyali bozarak sistem performansını olumsuz etkilemektedir. Bu makalede, sistemde oluşan yüksek PAPR'ı seçici eşleme (SLM) yöntemi kullanılarak düşürmek hedeflenmektedir. Bilgisayar benzetim sonuçları OFDM-IM sisteminde kullanılan SLM yönteminin, orijinal sisteme kıyasla PAPR değerini önemli ölçüde düşürdüğünü göstermektedir. Ayrıca OFDM-IM sisteminde alt taşıyıcı sayısı, faz rotasyon faktörü ve modülasyon indisi parametrelerindeki değişiminin sistemin PAPR performansına etkisi de incelenerek değerlendirilmeler yapılmıştır.

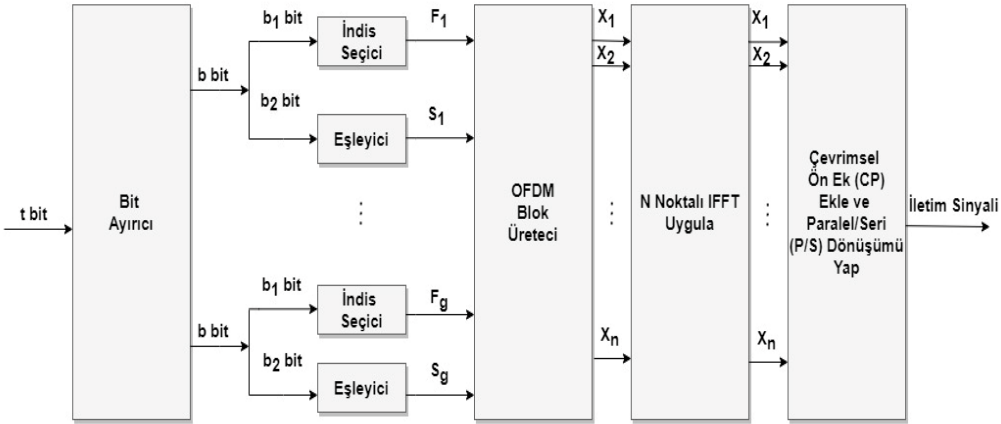
© 2023 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.



## 1. GİRİŞ

Mobil veri trafiğindeki benzeri görülmemiş artış, geleceğin kablosuz ağlarının hem yüksek spektral verimliliği hem de enerji verimliliğini desteklemesini gerektirmektedir. Şu anda kullanılan dikgen frekans bölmeli çoğullama (OFDM) tekniği, bu tür gereklilikleri karşılama yeteneğine sahip değildir. OFDM sistemi, Doppler kaynaklı taşıyıcılar arası girişime duyarlıdır. Yapısı gereği yüksek tepe gücü/ortalama güç oranı (PAPR) bulunur. Bu da geniş güç spektrumuna sahip yüksek maliyetli doğrusal güç kuvvetlendiricileri gerektirir. Bu bağlamda, yeni gelişmiş modülasyon tekniklerine çok ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlar arasında son zamanlarda ortaya çıkan indis modülasyonu büyük ilgi görmüştür [1]. İndis modülasyonlu dikgen frekans bölmeli çoğullama (OFDM-IM), uzaysal modülasyon ilkesini OFDM alt taşıyıcılarına genişleten, yakın zamanda geliştirilmiş bir iletim tekniğidir. OFDM-IM'de, kısmi alt taşıyıcılar bilgi sembollerini taşımak için etkinleştirilir ve aktif olmayan alt taşıyıcıların indisleri ise indis modülasyonu yoluyla bilgi taşır [2]. Burada, gelen bit akışı iki bölüme ayrılmıştır. Biri, hangi alt taşıyıcıların aktif olacağını ve sinyalleri geçireceğini belirlemek için kullanılan indis seçim bitleridir. Diğeri ise OFDM sistemine benzer şekilde aktif alt taşıyıcıları modüle etmek için kullanılan eşleyici kısmıdır. OFDM-IM sistemi, belirli bir konfigürasyonda klasik OFDM sisteminden önemli ölçüde daha iyi bit hata oranı (BER) performansı sağlar [3]. OFDM-IM'de, bitler indis modülasyonu (IM) kullanılarak iletilir; bu da daha iyi hata performansı sağlar ve yüksek işaret/gürültü oranı (SNR) bölgesinde daha etkilidir. İndis modülasyonunun öne çıkan diğer özelliği ise ek bilginin, yayılan sinyal üzerinden çok az veya sıfır güç pahasına dolaylı olarak iletilmesi ve spektral verimlilik ve enerji verimliliği açısından önemli faydalar sağlamasıdır. Ayrıca IM sayesinde, ergodik ulaşılabilirlik oranı açısından klasik OFDM'den daha iyi performans sağlamaktadır [4]. Bununla birlikte, çok taşıyıcılı bir modülasyon şeması olarak OFDM gibi, OFDM-IM de yüksek PAPR'a maruz kalmaktadır. Yüksek güçlü kuvvetlendiricilerden (HPA'lar) geçtiğinde bant dışı bozulma ile karşı karşıya kalır [5-6]. Bu sorunu çözmek için çeşitli yöntemler önerilmiştir. Geleneksel PAPR düşürme yöntemlerinden bazıları seçici eşleme (SLM) yöntemi [7-9], kısmi iletim dizisi (PTS) [10] yöntemi ve aktif takımyıldız uzantısı (ACE) [11-12] yöntemidir. Bu yöntemlerle ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu makalede, OFDM-IM sisteminde SLM yöntemi kullanılarak PAPR düşürülmesi hedeflenmektedir. Makale aşağıdaki şekilde organize edilmiştir: 2. Bölümde OFDM-IM sistemi anlatılmıştır. 3. Bölümde SLM PAPR yönteminin çalışması ile ilgili bilgi verilmiştir. 4. Bölümde benzetim sonuçları verilmiş ve değerlendirilmiştir. 5. Bölüm makalenin sonuç bölümüdür.

## 2. OFDM-IM SİSTEMİ



Şekil 1. OFDM-IM sistemi blok diyagramı.

Bir OFDM-IM sisteminin blok diyagramı Şekil 1'de görülmektedir. İletim için vericiye gönderilen  $t$  bit, her biri  $b$  bit ( $t = b \cdot g$ ) içeren  $g$  adet kümeye bölünür. Her  $b$  bit dizisi,  $n=N/g$  uzunluğundaki bir OFDM alt bloğuna eşlenir. Burada  $N$ , alt taşıyıcıların sayısıdır. Geleneksel OFDM'nin aksine, bu eşleme işlemi modüle edilmiş sembollerin yanında alt taşıyıcı indisleriyle de gerçekleştirilir. Uzaysal modülasyon (SM) tekniklerinden esinlenerek, her alt blokta  $n$  alt taşıyıcıdan yalnızca  $k$  alt taşıyıcı kullanılır ve bu aktif alt taşıyıcıların indisleri,  $b$  bit bilgi dizisinin ilk bitleridir. Etkin olmayan alt taşıyıcılara denk gelen semboller sıfırlanır ve bu alt taşıyıcılar üzerinde hiçbir veri iletilmez. OFDM-IM alt bloklarında hangi alt taşıyıcıların aktif olduğunu belirlemek için bir tarama tablosu veya bir algoritma kullanılarak aktif alt taşıyıcı indisi belirlenir. Küçük alt bloklar için tarama tablosu yöntemi, büyük alt bloklara sahip sistemler için ise algoritma kullanılır. Bu makalede tarama tablosu kullanılarak bir alt grupta bulunan alt taşıyıcı sayısı  $n=4$  ve aktif alt taşıyıcı sayısı  $k=2$  olan örnek bir OFDM-IM sisteminin tarama tablosu Tablo 1'de gösterilmektedir [3, 13].

**Tablo 1.** Tarama tablosu (n=4, k=2).

| Bitler | Aktif alt taşıyıcı indisleri | Alt bloklar                |
|--------|------------------------------|----------------------------|
| [0 0]  | [1,2]                        | $[S_{i1}, S_{i2}, 0, 0]^T$ |
| [0 1]  | [2,3]                        | $[0, S_{i1}, S_{i2}, 0]^T$ |
| [1 0]  | [3,4]                        | $[0, 0, S_{i1}, S_{i2}]^T$ |
| [1 1]  | [1,4]                        | $[S_{i1}, 0, 0, S_{i2}]^T$ |

b bit dizisinin geri kalan bitleri  $b_2 = k \cdot \log_2 M$ , aktif alt taşıyıcıları modüle etmek için veri sembollerini belirlemek için kullanılır. Bir başka ifadeyle, OFDM-IM sistemlerinde bilgi sadece M işaret uzayının sembolleri tarafından değil, aynı zamanda bu semboller tarafından modüle edilen aktif taşıyıcı indisleri tarafından da taşınır. Her  $\beta$  alt bloğu için, gelen  $b_1$  bitleri indis seçiciye iletilir. Bir indis seçici, n olası indisten k tanesini seçer. Seçili dizin [3, 14]:

$$F_\beta = \{f_{\beta,1}, \dots, f_{\beta,k}\} \quad (1)$$

şeklinde olup, burada  $f_{\beta, y} \in [1, \dots, n]$ ,  $\beta=1, \dots, g$  ve  $y=1, \dots, k$  'dır [3, 14]. Bu nedenle, OFDM bloğunun aktif indisinin konumu ile aktarılan toplam bit sayısı:

$$t_1 = b_1 g = \lceil \log_2(C(n,k)) \rceil g \quad (2)$$

şeklinde olup [14]. Başka bir ifadeyle  $F_{\beta,c} = 2^{b_1}$  farklı şekilde gerçekleştirilebilir. Bu sistemde N alt taşıyıcıdan K = kg tanesi etkindir. Eşleyici çıkışında ki M modülasyon indisleriyle taşınan bitlerin toplam sayısı:

$$t_2 = b_2 g = k(\log_2(M))g \quad (3)$$

şeklinde olup [14]. Bu şekilde tek OFDM bloğu ile  $t = t_1 + t_2$  bit iletilmektedir. Eşleyiciden çıkan  $s_\beta$  sembol vektörü:

$$s_\beta = [s_\beta(1), \dots, s_\beta(k)] \quad (4)$$

olarak bulunur [14]. OFDM blok üretici vasıtasıyla, öncelikle indis seçici ve eşleyici çıkış vektörleri gözönüne alınarak tüm alt bloklar oluşturulur. Daha sonra bu alt bloklar birleştirilerek  $N \times 1$ 'lik ana OFDM bloku elde edilir [14]:

$$x_F = [x(1) \ x(2) \ \dots \ x(N)]^T \quad (5)$$

Ana blok oluşturulduktan sonra bilinen OFDM işlemleri uygulanır. Önce ters hızlı Fourier dönüşümü (IFFT) uygulanıp, L uzunluğunda periyodik bir önek (CP) eklenir ve paralel seri dönüşümünden sonra kanal üzerinden iletim sağlanır [3].

### 3. SEÇİCİ EŞLEME (SLM) PAPR YÖNTEMİ

SLM yöntemi, PAPR'ı azaltmak için kullanılan çok yaygın bir tekniktir. Farklı sinyal adaylarının üretilmesini ve iletim için en düşük PAPR adayının seçimini içerir. Şekil 2 de bulunan OFDM-IM sisteminde uygulanan SLM yönteminde, t bilgi verisi, bit ayırıcı ile her biri b bit içeren g adet alt kümeye ayrılır. İndis seçici ve eşleyici işlemi vasıtasıyla OFDM blok üretici çıkışında QAM sembollerinden oluşan bir  $X = [X_0, X_1, \dots, X_{N-1}]$  vektörü elde edilir. Ardından belirli sayıda N uzunluklu U farklı rastgele üretilmiş olan faz rotasyon faktörü dizisi üretilir:

$$c^{(u)} = [c_0^{(u)}, c_1^{(u)}, \dots, c_{N-1}^{(u)}] \quad , \quad u=0, 1, \dots, U-1 \quad (6)$$

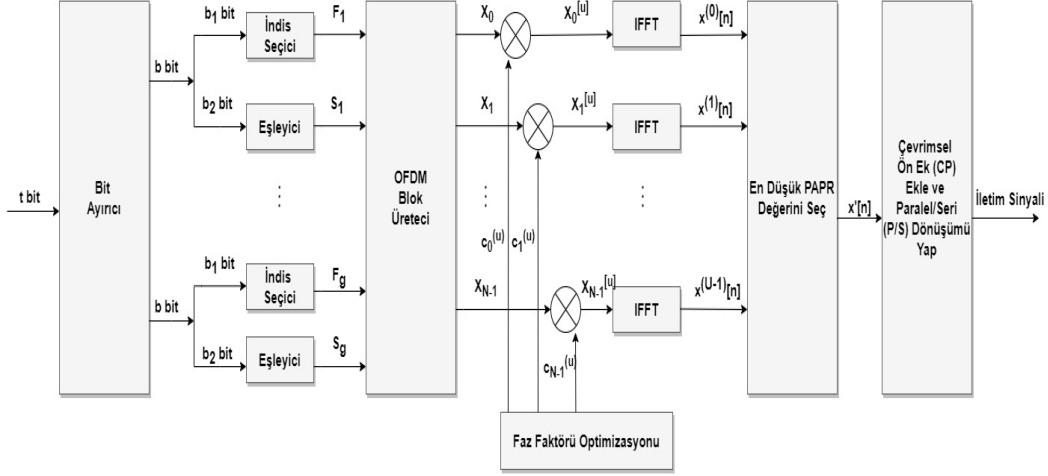
Burada  $c_k^{(u)} \in \{-1, +1\}$ ,  $k=0, 1, \dots, N-1$  değerleri bulunmaktadır. Daha sonra X vektörü ile rastgele üretilen faz rotasyon faktörü dizileri aşağıdaki gibi çarpılır:

$$X^{(u)} = [X_0 \cdot c_0^{(u)}, X_1 \cdot c_1^{(u)}, \dots, X_{N-1} \cdot c_{N-1}^{(u)}] = [X_0^{[u]}, X_1^{[u]}, \dots, X_{N-1}^{[u]}] \quad , \quad u=0, 1, \dots, U-1 \quad (7)$$

Burada  $X^{(u)}$  mesaj vektörü,  $c^{(u)}$  faz dizisi ile X vektörünün çarpılması sonucu bulunur [17]. Faz rotasyonu u'ncü veri dizisini temsil etmektedir [6, 17]. Bulunan  $X^{(u)}$  vektörlerine (L-1)N tane sıfır ekleyerek ve IFFT işlemini uygulayarak, bu vektörlerin üst örneklenmiş zaman domaini versiyonları aşağıdaki gibi elde edilir:

$$x^{(u)}[n] = \text{IFFT}(X^{(u)}) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \cdot c_k^{(u)} \cdot e^{j2\pi kn} \quad , \quad 0 < n \leq LN-1 \quad , \quad u=0, 1, \dots, U-1 \quad (8)$$

Son olarak alınan aday sinyaller arasında PAPR değeri en düşük olan sinyal iletim için seçilir. Seçilen aday sinyali üretmek için kullanılan faz rotasyon dizisi, en uygun faz dizisi olarak belirlenir. SLM yönteminin amacı,  $x^{(n)}$  sinyali için en düşük PAPR değerini sağlayan en uygun faz dizisini elde etmektir [15-16].



Şekil 2. SLM OFDM-IM blok diyagramı.

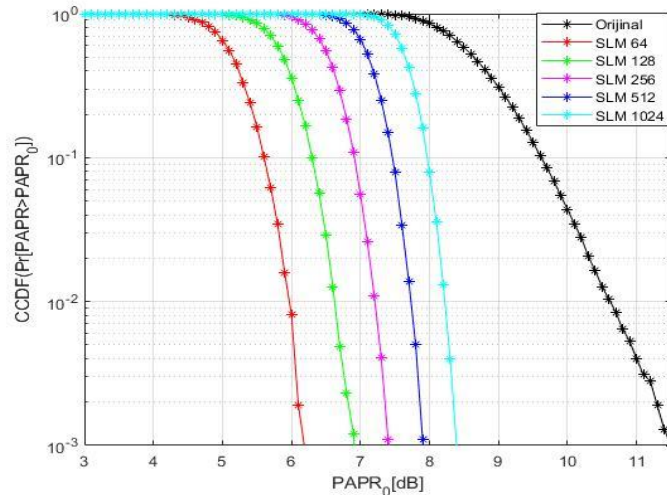
#### 4. BENZETİM SONUÇLARI

Bu bölümde, OFDM-IM sistemine uygulanan SLM yöntemiyle tepe gücü/ortalama güç oranını düşürülmesi bilgisayar benzetimleri ile gerçekleştirilmiştir. Benzetimlerde sırasıyla alt taşıyıcı sayısı, faz rotasyon faktörü ve modülasyon indisine göre tamamlayıcı birikimli dağılım fonksiyonunun (CCDF)  $PAPR_0$ 'e göre değişimi grafiklerde gösterilmiştir. OFDM-IM sisteminde SLM yönteminin farklı alt taşıyıcı sayısına göre PAPR değişimine ait benzetim parametreleri Tablo 2 de sunulmaktadır.

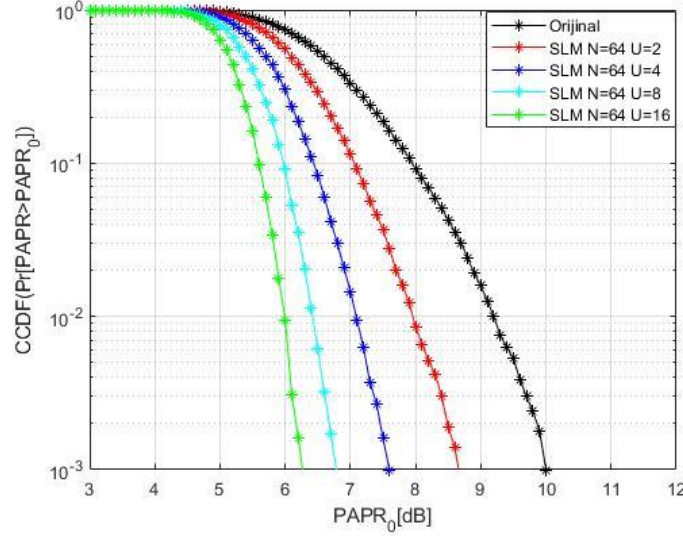
Tablo 2. Benzetim parametreleri.

| Parametre                              | Değer                         |
|--|-------------------------------|
| FFT alt taşıyıcı sayısı                | $N = 64, 128, 256, 512, 1024$ |
| Alt bloktaki alt taşıyıcı sayısı       | $n = 4$                       |
| Alt bloktaki aktif alt taşıyıcı sayısı | $k = 2$                       |
| Alt blok sayısı                        | $g = 16, 32, 64, 128, 256$    |
| Monte Carlo iterasyon sayısı           | 10000                         |
| M-li takımyıldız                       | $M = 4, 8, 16, 64$            |
| Modülasyon tipi                        | M-QAM                         |
| Faz rotasyon faktörü                   | $U = 2, 4, 8, 16$             |

OFDM-IM sisteminde SLM yönteminin farklı alt taşıyıcı sayısına göre CCDF'nin  $PAPR_0$ 'e göre değişimi Şekil 3'te görülmektedir. Her bir alt blokta bulunan 4 adet alt taşıyıcı içinde 2 adeti aktif alt taşıyıcı olacak şekilde belirlenmiştir. 4-QAM modülasyonu kullanılmış ve  $10^5$  iterasyonla sistem çalıştırılmıştır. Orijinal OFDM-IM sinyalinin PAPR değeri 11.5 dB iken SLM yöntemiyle PAPR düşümü sağlanan OFDM-IM sinyalinin PAPR değerleri CCDF=  $10^{-3}$  değerinde  $N = [64, 128, 256, 512, 1024]$  için sırasıyla 6.2 dB, 6.9 dB, 7.4 dB, 7.9 dB ve 8.4 dB'dir. Grafikten görüldüğü üzere, alt taşıyıcı sayısı azaldıkça daha fazla PAPR düşürümü elde edilmektedir. Bu sebeple diğer benzetim işlemleri alt taşıyıcı sayısı  $N=64$  için gerçekleştirilmiştir.

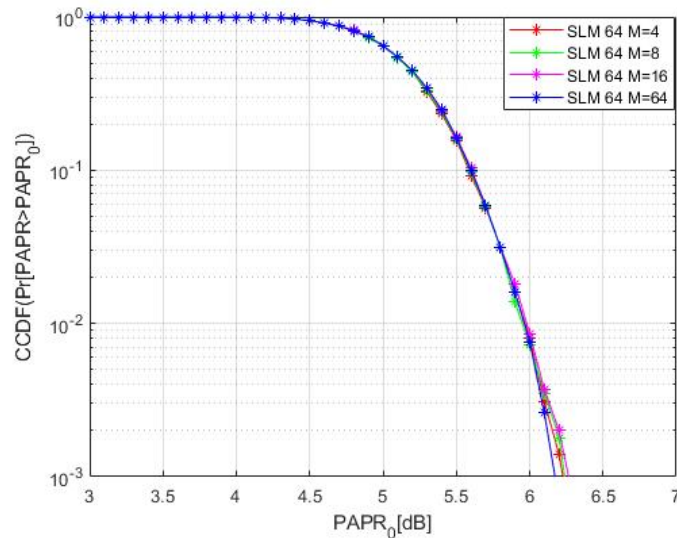
Şekil 3. Alt taşıyıcı sayısına göre CCDF'nin  $PAPR_0$ 'e göre değişimi.

OFDM-IM sisteminde SLM yönteminin farklı rotasyon faktörü fazları sayısına göre CCDF'nin  $PAPR_0$ 'e göre değişimi Şekil 4'te görülmektedir. 64 alt taşıyıcılı OFDM-IM sistemi, 16 alt bloğa ayrılmıştır. Her bir alt blokta bulunan 4 adet alt taşıyıcı içinde 2 adeti aktif alt taşıyıcı olacak şekilde belirlenmiştir. 4-QAM modülasyonu kullanılmış ve  $10^5$  iterasyonla benzetim gerçekleştirilmiştir. Sisteme SLM işlemi uygulanmadan CCDF=  $10^{-3}$  için PAPR değeri 10 dB olarak elde edilmiştir. OFDM-IM sistemine SLM PAPR düşürme işlemi uygulandığında CCDF=  $10^{-3}$  için  $U=2,4,8,16$  değerlerine sahip faz rotasyon faktörleri için sırasıyla 8.6 dB, 7.6 dB, 6.8 dB ve 6.2 dB' değerleri elde edilmiştir.

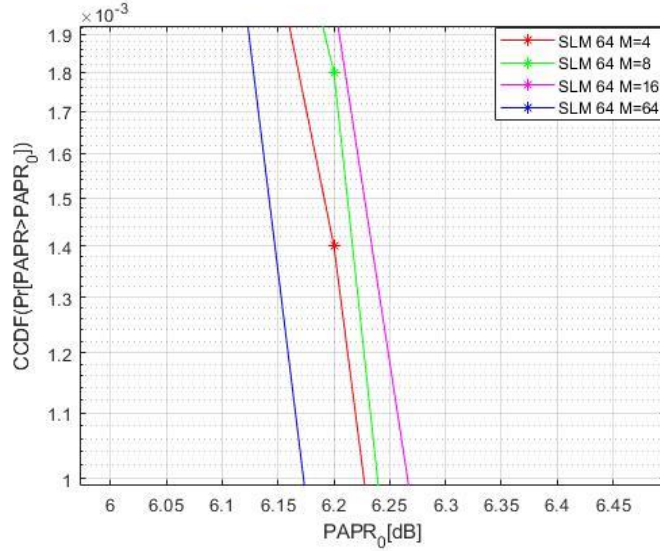


Şekil 4. Faz rotasyon faktörüne göre CCDF'nin  $PAPR_0$ 'e göre değişimi.

OFDM-IM sisteminde SLM yönteminin farklı modülasyon indisi (M) değerlerine göre CCDF'nin  $PAPR_0$ 'e göre değişimi Şekil 5'te görülmektedir. Benzetim sonucu, M'nin 4'ten 64'e yükseltilmesi için yaklaşık 0,05 dB'ye ulaşan çok küçük bir değişikliğe gerek olduğunu göstermektedir. M'nin değiştirilmesinin PAPR değeri üzerinde çok az bir etkisi bulunmaktadır. Şekil 6. da yakın gösterimde OFDM-IM sinyalinin PAPR değerleri  $M = [4,8,16,64]$  için sırasıyla 6.23 dB, 6.24 dB, 6.27 dB ve 6.17 dB'dir. Grafikten görüldüğü üzere modülasyon indisi  $M=64$  seçildiğinde PAPR düşümü daha iyi sonuç vermektedir.



Şekil 5. Modülasyon indisine göre CCDF'nin  $PAPR_0$ 'e göre değişimi.



Şekil 6. Şekil 5'te bulunan grafiğin yakın gösterimi.

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada, OFDM-IM sisteminin olumsuz özelliği olan yüksek PAPR'ın SLM yöntemiyle düşürülmesi incelenmiştir. Bilgisayar benzetimi ile yapılan çalışmalarda SLM yönteminin orijinal OFDM-IM sisteminde çok iyi PAPR düşürme performansı sergilediği gözlemlenmiştir. Buna ek olarak alt taşıyıcı sayılarındaki azalmaya bağlı olarak PAPR düşürme performansının arttığı gözlemlenmiştir. En iyi sonuçlar, sistem N=64 alt taşıyıcı ile çalıştırıldığında elde edilmiştir. Ayrıca faz rotasyon faktörü parametresindeki değişimden etkilenen sistemde bu defa faz rotasyon faktörü sayısı arttıkça daha iyi PAPR düşürme performansı elde edilmiştir. En iyi sonuçlar, U=16 faz rotasyon faktöründe elde edilmiştir. Diğer parametre olan modülasyon indisi değişiminde sistemin PAPR düşürme performansının diğer parametrelere göre daha az değişime sebep olduğu görülmektedir. En iyi sonuçlar, M=64 modülasyon indisi ile sistem çalıştırıldığında gözlemlenmiştir.

## Teşekkür

Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi BAP Birimi tarafından FDK-2022-12295 proje numarası ile desteklenmiştir.

## Yazar Katkıları

**Kemal Aközlü:** Benzetim çalışmaları, makalenin yazılması.

**Necmi Taşınar:** Makalenin kontrol edilmesi.

## Çıkar Çatışması

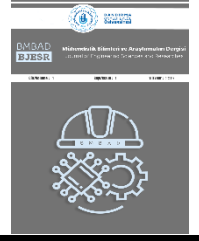
Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

## KAYNAKÇA

- [1] M. Wen, Q. Li, and X. Cheng "Index Modulation for OFDM Communications Systems", Springer, 2021.
- [2] M. Wen, X. Cheng, M. Ma, B. Jiao, and H. V. Poor "On the achievable rate of OFDM with index modulation", IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 64, no. 8, pp. 1919–1932, 2016.
- [3] E. Başar, Ü. Aygözü, E. Panayırıcı, and H.V. Poor "Orthogonal Frequency Division Multiplexing with Index Modulation", IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 61, no. 22, pp. 5536–5549, 2013.
- [4] E. Basar, M. Wen, R. Mesleh, M.D. Renzo, and Y. Xiao "Index modulation techniques for next-generation wireless networks", IEEE Access, vol. 5, pp. 16693-16746, 2017.
- [5] N. Ishikawa, S. Sugiura, and L. Hanzo "Subcarrier-index modulation aided OFDM—will it work?, IEEE Access, vol. 4, pp. 2580–2593, 2016.
- [6] S.Y. Zhang, and B. Shahrava "A hybrid PAPR reduction scheme for OFDM systems using perfect sequences", IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 66, no. 1, pp. 177–186, 2020.
- [7] S. Gopi, and S. Kalyani "An optimized SLM for PAPR reduction in non-coherent OFDM-IM", IEEE Wireless Communications Letters, vol. 9, no. 7, pp. 967-971, 2020.
- [8] S.Y. Zhang, and B. Shahrava "A SLM scheme for PAPR reduction in polar coded OFDM-IM systems without using side information", IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 67, no.2, pp. 463-472, 2021.



- [9] K.-H. Kim “On the phase sequences and permutation functions in the SLM scheme for OFDM-IM systems”, IEEE Access, vol. 8, pp. 121733-121743, 2020.
- [10] L. Dan, Q. Ma, F. Li, and Y. Xiao “Performance of subcarrier-Index-modulation OFDM with partial transmit sequences for PAPR reduction”, IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Porto Portugal, 2018.
- [11] Y. Liu, Y. Wang and B. Ai “An Efficient ACE Scheme for PAPR Reduction of OFDM Signals With High-Order Constellation”, in IEEE Access, vol. 7, pp. 118322-118332, 2019.
- [12] B.S. Krongold and D.L. Jones “PAR reduction in OFDM via active constellation extension”, in IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 49, no. 3, pp. 258-268, Sept. 2003.
- [13] A. Kaplan, G.K. Kurt, İ. Altunbas, U. Altun, F.A. Onat, and D. Küçükyavuz “Impact of channel estimation on the performance of OFDM-IM with barrage jamming”, 28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2020.
- [14] E. Başar, Ü. Aygözü, and E. Panayırıcı “A new technique for OFDM: OFDM-index modulation”, 21st Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2013.
- [15] Ş. Şimşir, and N. Taşpınar “A Novel Selective Mapping Method based on Cumulative Symbol optimization for PAPR minimization in low complexity GFDM transmitter”, European Journal of Science and Technology, vol. 35, pp. 168-176, 2022.
- [16] R. Bauml, W. Fischer, R.F.H, and J.B. Huber “Reducing the peak-to-average power ratio of multicarrier modulation by selected mapping”, Electronics Letters, vol. 32, no. 22, pp. 2056-2057, 1996.
- [17] A. Jaśkiewicz, J. Matkowski ve A.S. Nowak “Persistently Optimal Policies in Stochastic Dynamic Programming with Generalized Discounting”, Mathematics of Operations Research, vol. 38, no. 1, pp. 108-121, 2013.



## Araç Sınıflandırılmalı Trafik Hız Sınırı Ceza Sisteminin Bulanık Mantık Temelli Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi

### Fuzzy Logic Based Design and Implementation of Vehicle Classified Traffic Speed Limit Penalty System

<sup>1</sup>Yalçın IŞIK , <sup>2</sup>Mehmet KEHYA , <sup>3</sup>Ahmet KAYABAŞI 

<sup>1</sup>Selçuk Üniversitesi, Silifke-Taşucu Meslek Yüksekokulu, Silifke/Mersin, Türkiye

<sup>2</sup>Silifke Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, Silifke, Mersin, Türkiye

<sup>3</sup>Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Karaman, Türkiye

[isiky@selcuk.edu.tr](mailto:isiky@selcuk.edu.tr), [mehmetkehya@hotmail.com](mailto:mehmetkehya@hotmail.com), [ahmetkayabasi@kmu.edu.tr](mailto:ahmetkayabasi@kmu.edu.tr) Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 2 March 2023

Accepted : 2 April 2023

##### Keywords:

Traffic, Radar, Speed Limit, Fuzzy Logic, Fuzzy

#### ABSTRACT

In our country, the speed limits for the vehicles are determined according to the nature of the road and type of the vehicle, and some sanctions are applied to those who do not comply with these speed limits. The most commonly used of these sanctions is fines. The fine applied to drivers who violate the speed limit rule consists of three levels, and the drivers are fined according to these levels. This fine is applied as 314 TL, 652 TL and 1339 TL for 2021 when ordered according to levels. As can be seen, there is a very wide range between the fines in these three levels. It was thought that it would be more appropriate to create more intermediate stages by reducing these intervals. In this work, by researching the traffic radar system in our country, two different vehicle classes, private and commercial, were considered for regions with four different speed limits (50 Km/h, 90 Km/h, 110 Km/h, 120 Km/h). According to the class of the vehicles and the speed limit region, the fines to be imposed on the drivers were calculated using the fuzzy logic method, thus a fairer fine system was applied.

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

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 2 Mart 2023

Kabul : 2 Nisan 2023

##### Anahtar Kelimeler:

Trafik, Radar, Hız Sınırı, Bulanık Mantık, Fuzzy

#### ÖZET

Ülkemizde yolun özelliğine ve aracın cinsine göre araçların uyması gereken hız sınırları belirlenerek bu hız sınırlarına uymayanlara bazı yaptırımlar uygulanmaktadır. Bu yaptırımlardan en çok kullanılanı para cezasıdır. Hız sınırı kural ihlali yapan sürücülere uygulanan para cezası üç kademededen oluşmakta ve sürücülere bu kademelere göre para cezası kesilmektedir. Bu para cezası kademelere göre sıralandığında 2021 yılı için 314 TL, 652 TL ve 1339 TL olarak uygulanmaktadır. Görüldüğü üzere bu üç kademedeki para cezalarının aralarında bir hayli geniş bir aralık bulunmaktadır. Bu aralıkların azaltılarak çok daha fazla ara kademe oluşturulmasının daha uygun olacağı düşünülmüştür. Bu çalışmamızda ülkemizdeki trafik radar sistemi araştırılarak, dört farklı hız sınırı olan (50 Km/h, 90 Km/h, 110 Km/h, 120 Km/h) bölgeler için hususi ve ticari olmak üzere iki farklı araç sınıfı göz önünde bulundurulmuştur. Araçların sınıflarına ve bulunulan hız sınırı bölgesine göre sürücülere kesilecek olan para cezası bulanık mantık yöntemi ile hesaplatılmış böylelikle daha adil bir para cezası sistemi uygulanmıştır.

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

ORCID: <sup>1</sup>0000-0001-9223-5381

<sup>2</sup>0000-0002-2532-4082

<sup>3</sup>0000-0002-9756-8756

## 1. GİRİŞ

Karar verme sürecinde insan beyni zaman, mekân, fiziksel şartlar, artılar-eksiler vb. durumları dikkate alır ve sonuçta var veya yok mantığının dışına çıkarak var ile yok arasındaki opsiyonları da göz önünde bulundurup bir sonuç ortaya çıkarır. Bu özellik Lutfi Aliasker Zadeh'in 1965 yılında Bulanık Mantığı temel alan makalesini yayımlayınca kadar insan beynini makinelerden ayıran en büyük özellikti. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin geride kalmamak için ciddi yatırımlar yaptıkları önemli kontrol yöntemlerinden biri olan Bulanık Mantık, bilgisayarları siyah veya beyaz, var veya yok, az veya çok gibi kesin yargıya varılmış kavramlardan kurtarıp onların insan beyni gibi düşünebilmelerinin yolunu açmayı hedeflemekteydi. Böylelikle bilgisayarların karar verirken kullandıkları 0-1 mantığı aşılabacak ve programcının tercihine göre 0 ile 1 arasında yüzlerce hatta binlerce değerler üretmesi sağlanabilecekti.

O tarihten sonra Bulanık Mantık üzerinde birçok çalışma yapıldı ve bu çalışmalar günlük hayatımıza uyarlanarak yaşam kalitemizi azımsanmayacak derecede arttırdı. Örnekler verecek olursak bilgisayar kontrollü bir asansöre binildiğinde asansör kabini aniden harekete geçmeyecek veya istenilen kata geldiğinde aniden durmayacak bunun yerine insanlara hissettirmeden harekete geçip durması mümkün olabilecek, aynı mantıkla tren, metro, metrobüs gibi toplu taşıma araçlarının da kullanıcıları rahatsız eden ani kalkış ve duruşları engellenip daha rahat bir kalkış ve duruşları sağlanabilecekti. Klimalar çok daha hassas derecelere ayarlanarak oda sıcaklıkları istenilen değerlerde sabit tutulabilecek, çamaşır makineleri kullanılacak deterjan miktarını, su sıcaklığını, çalışma süresini ve devir sayısını otomatik olarak kendileri ayarlayabileceklerdi. Yıllar içerisinde bu projeler hayata geçirildi ve çok başarılı olundu. Evlerde, iş yerlerinde, fabrikalarda, organize ve savunma sanayinde, tarım sektöründe ve hayatımızın teknolojiye temas eden birçok alanında Bulanık Mantık ile kontrol edilen elektronik cihazları görmek mümkündür.

Ülkemizde otomobiller için uygulanan hız sınırları yolun bulunduğu bölgeye ve durumuna göre değişmektedir. Genellikle şehir içinde 50 km/h, şehirlerarası yollarda hususi araçlar için, 90 km/h, 110 km/h ve otoyollarda 120 km/h gibi değerler olmaktadır. Bu hız sınırlarına uymayan sürücülere Maliye Bakanlığı tarafından belli oranlarda trafik cezası verilmektedir [1,2]. Günümüzde hız sınırı aşımı durumunda sürücülere uygulanan para cezaları üç kademeli olarak uygulanmakta ve bu kademeler arasındaki aralık oldukça geniş tutulmaktadır. Böylece aynı kademedeki para cezası alan sürücülerin hızlarının birbirlerinden çok farklı oldukları görülmektedir. Bu hız aralığının 10 Km/h'ten 24 Km/h'e, para cezası aralığının ise 338 TL'den 687 TL'ye kadar çıktığı görülmektedir. Bu çalışmada mevcut sistemdeki para cezası kademelerinin Bulanık Mantık yöntemi ile doldurularak sürücülere aşılacak hız kadar para cezası kesilmesi amaçlanmış, böylelikle sürücülere verilen para cezalarının araçların hız aşımına göre daha adil bir şekilde hesaplanmasını sağlamak amaçlanmıştır.

Yapılan uygulamada hangi hız sınırı bölgesinde bulunduğu (50 Km/h, 90 Km/h, 110 Km/h, 120 Km/h) bir arayüz ile seçilecek, araçların plakaları plaka tanıma sistemi ile sayısal veriye dönüştürülecek, bu bilgi kullanılarak veri tabanında kayıtlı olan bilgilerden aracın hangi sınıfta (ticari, hususi) olduğu belirlenecek ve Bulanık Mantık yöntemi kullanılarak hız sınırı ihlali yapan aracın sürücüsüne aşacağı hız kadar para cezası kesilecektir. Plaka tanıma işlemi ve veri tabanından aracın cinsini çekme işlemi için Python programlama dilinde OpenCv, Tensorflow, Keras, Numpy, PyQt5, sqlalchemy kütüphaneleri, Bulanık Mantık ile ceza belirlenmesi işleminde de bu kütüphanelere ek olarak skfuzzy kütüphanesi kullanılarak kodlama yapılmıştır.

Trafikte seyreden araçlar arttıkça araç plakasını tanıyan sistemlerin kullanımı da artmıştır. Plaka tanıyan sistemler otoyol girişlerinde, otopark girişlerinde ve daha pek çok yerde kullanılmaktadır. Plaka tanıma sürecinde kullanılan görüntü işleme tekniklerinde eski yıllarda pek çok önışlem kullanılırken, artık önışlem ihtiyacının daha az olduğu teknikler kullanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan plaka tanıma yöntemlerinde plakanın konumu ve plakadaki karakterlerin tespiti iki ardışık işlem olarak gerçekleştirilmektedir. Daha önceleri kullanılan plaka tanıma yapılarında kenar bulma, renk bulma, doku bulma veya karakter tespiti gibi yöntemler kullanılmaktayken, günümüzde kullanılan yeni tekniklerle ham görüntü üzerinden plaka tanıma işlemleri yapılabilmektedir [3].

Bulanık mantık düşüncesini öncelikle 1964 yılında Azeri A.Zadeh önermiştir. Bulanık mantık yönteminde standart sayısal sistemlerde kullanılan sıfır ve bir seviyeleri yerine, çıkışlar ve girişler pek çok üyelik fonksiyonlarına sahip olabilmektedirler. Bulanık mantık sisteminde öncelikle girişler bulandırılır. Bulandırma işlemi üyelik fonksiyonları kullanarak yapılır. Bulandırma işleminden sonra kural çıkartma yapılır. Belirlenen kurallara göre sistemin çıkış vermesi sağlanarak gereken kontrol işlemi daha hassas olarak sağlanır [4].

Bulaşık Makinesinin Bulanık Mantık ile Modellenmesi isimli çalışmada günlük hayatımızın bir parçası olan bulaşık makinelerinin kontrolü bulanık mantık ile modellenmiştir. Bu çalışmada girişler bulaşık miktarı, kirlilik derecesi ve bulaşığın cinsi olarak, çıkışlar ise yıkama süresi, deterjan miktarı, su sıcaklığı, üst sepet pompa devri ve alt sepet pompa devri olarak belirlenmiştir. Sistemin girişlerini A ve B, çıkışı ise C olarak belirlendikten sonra kuralları  $EGER A = x$  ve  $B = y$  ise  $O HALDE C = z$  olacak şekilde ele alınmıştır. Böylece bulaşığın kirlilik derecesine, bulaşık miktarına ve bulaşığın cinsine göre en ekonomik yıkama şartları sağlanmıştır [5].

Bir çalışmada da akademik performans değerlendirme sistemlerinde daha objektif olabilmek için bulanık mantık yaklaşımını kullanılmıştır. Değerlendirme esnasında gerekli kriterleri baz alarak çıkış üyelik dereceleri hesaplatılmıştır. Bu üyelik derecelerini hesaplatırken "ÇOK YETERSİZ", "YETERSİZ", "NORMAL", "BAŞARILI", "ÇOK BAŞARILI" olarak üçgen üyelik fonksiyonunu kullanılmıştır. Sonuç olarak klasik yöntem ile değerlendirme mantığından bulanık mantık değerlendirme yöntemine geçilmesi ile daha esnek ve objektif değerlendirmeler yapılabileceği görülmüştür [6]. Bir başka çalışmada da otoyollarda değişken hız sınır kontrolü

bulanık mantık kullanılarak yapılmış ve kontrolsüz duruma göre seyahat zamanında % 12.39 azalma sağlanmıştır [7]. Bir çalışmada da bulanık mantık yine aracın hızını belirlemek için kullanılmış, ancak bu kez aracın hızını belirlemek için yolun durumu, araca ait özellikler, sürücüye ait özellikler gibi pek çok faktör dikkate alınarak üyelik fonksiyonları belirlenmiştir [8]. Benzer başka bir çalışmada da üyelik fonksiyonuna hava şartları ve yoldaki araç sayısı gibi daha farklı kriterler eklenerek uygun hız değerleri belirlenmiştir [9]. Benzer bir başka çalışmada yine bulanık mantık temelli hız belirleme işlemi otonom araçlar için uygulanmıştır [10]. Brezilya’da yapılan bir çalışmada, Brezilya otoyollarının değişik kısımlarında uygulanacak hız sınırları bulanık mantık yöntemiyle belirlenmiştir [11]. Bizim yaptığımız çalışma ile çok az hız sınırı aşım farklılıklarının büyük ceza farkı oluşturmasının önlenmesi amaçlanmakta, bunu sağlamak için de Bulanık Mantık yöntemi kullanılmaktadır. Hız sınırı aşım miktarına bağlı olarak Bulanık Mantık yöntemi daha makul cezalar üretebilmektedir. Farklı üyelik fonksiyonu tanımlamalarıyla istenen oranlarda ceza değeri üretilebilir. Çünkü değişen bakış açılarına bağlı olarak hız sınırı aşım değeri büyüdükçe az farklılıkların daha büyük ceza artışları oluşturması da gerekebilir. Bu çalışmayla ceza kesim işlemi ilgili memurun birtakım değerler girerek ceza belirlemesine gerek kalmadan ceza belirleme işlemi otomatik olarak gerçekleştirilmektedir.

## 2. GÖRÜNTÜ İŞLEME

Çok geniş bir kullanıma alanına sahip olan görüntü işleme teknikleri bilim insanlarının ilgisini gün geçtikçe üzerine toplamaktadır. Hızla gelişen teknolojiler arasında yer alan görüntü işleme temel olarak üç aşamadan oluşur. Bunlar, görüntüyü kamera, fotoğraf makinesi gibi elektronik cihazlar kullanarak alıp sayısal ortama aktarma, kamera, fotoğraf makinesi gibi elektronik cihazlar kullanarak dış ortamdan görüntü alma ve alınan bu görüntüyü sayısal ortama atma işlemidir. Sayısal ortama atılmış olan görüntünün üzerinde bazı teknikler kullanarak görüntüyü değiştirme, düzeltme, alan belirleme, çıkarma ve ekleme işlemleri yapma, renk değiştirme, karakter tespit etme gibi işlemler yapılır. Parlaklık dönüşümü yapılarak pikselin parlaklığı ve kontrastı değiştirilebilir, ancak bu dönüşüm pikselin renk özelliklerine bağlıdır. Çıkış pikselinin alacağı parlaklık ve kontrast değerini yalnızca ona karşılık gelen giriş pikselinin değeri belirler. Gri tonlamalı dönüşüm de bu teknik ile gerçekleştirilir. RGB uzayındaki görüntü üç ana renk olan kırmızı yeşil ve mavi renklerini içermektedir. Görüntüyü gri seviyeli bir resme dönüştürmek için kırmızı kanalın %30’u yeşil kanalın %59’u, mavi kanalın %11’i alınmaktadır. Üzerinde işlemler yapılacak bir görüntünün gri tonlamaya dönüştürülmesi onun üzerinde daha kolay bir yer tespiti yapabilmemize olanak tanır [12].

Görüntü üzerinde bazı işlemler gerçekleştirilir. Histogram eşitleme renk değerleri düzgün dağılımlı olmayan resimler için uygun bir iyileştirme metodudur. Bir resimdeki renk değerlerinin belli bölgelerde kümelenmiş olmasından kaynaklanan renk dağılımı bozukluğunu gidermek için kullanılan histogram eşitleme yöntemi plaka tanıma sisteminde karakterlerin tanınması sırasında daha doğru sonuçlar almamızı sağlamaktadır. Görüntü işleme programlarında kolaylıkla yapılabilen bu işlem Matlab, C++, Python gibi gelişmiş programlama dillerine ait kodlarla da yapılabilmektedir. Görüntü filtreleme işlemiyle, işlenecek olan görüntüden alınması istenen bölümün çekilmesi ya da istenmeyen kısımların çıkarılması yapılır. HSV renk uzayı parlaklık, doygunluk ve renk özü değerlerini kullanır. RGB uzayından HSV renk uzayına dönüştürülmüş olan görüntüden belirli değerlere sahip olan kısımların alınması ya da bu değerinin altında kalan bölgenin atılması yapılabilir. Gürültü, işlenecek olan resmin üzerinde benekli bir görünüm oluşturur [13]. Fotoğraf çekimi sırasında kullanılan sayısal sensörün düşük bir sinyal/gürültü oranına sahip olmasından kaynaklanır. Ayrıntıları gizlemesi ve görüntünün kötü görünmesine sebep olur. Fotoğraf sayısal ortamda yakınlaştırıldığında belirgin bir şekilde gözükür. Görüntü işleme algoritmaları fotoğraflarımızın gürültülerden büyük oranda temizlenmesini sağlar. Eşiklemeye, istenmeyen kısımları görüntü arka planından ayırmak için kullanılan bir yöntem olan eşikleme, görüntü bölümlenme için kullanılan en önemli yöntemlerden biridir [14]. Daha çok nesne tespiti için kullanılır. Bu yöntem ile görüntü ikili sayı sistemine dönüştürülür. Daha açık bir ifade ile gri tonlarına dönüştürülmüş bir fotoğrafta belirlenen bir eşik değerinin altında kalan piksellerin siyaha, üstünde kalan pikselleri ise beyaza dönüştürülme işlemidir. Bu eşik değeri belirleme işlemi 1979 yılında Nyoboki OTSU tarafından belirlenmiş ve Otsu metodu olarak adlandırılmıştır. Bu yöntem daha çok plaka tanıma sistemlerinde fotoğraftan plaka görüntüsünü çıkarmak için kullanılmaktadır.

Karakter tespit etme, görüntü üzerinde karakterlerin olduğu alan tespiti ve ayrıştırılması işlemi yapıldıktan sonra bu karakterlerin okunup sayısal ortama aktarılabilmesi için geliştirilen algoritmadır. Ayrılan alan üzerindeki harfler ve rakamlar gibi karakterleri diğer nesnelere ayırma işlemi yapılır [15]. Okunacak olan bölgeyi görüntüden çıkardıktan sonra karakterleri birbirinden ayırma işlemine geçilir. Bu işlemin ardından bir birden ayrılmış olan her bölümün pikselleri x ekseninde soldan sağa doğru taranır ve bu ekseninde bulunan siyah piksel sayıları bulunur. Yapay sinir ağları yöntemi karakterleri tanımak için son zamanlarda kullanılan yaygın yöntemlerden biridir. Yapay sinir ağlarında amaç insan beyninden yararlanılarak bir olayı öğrenebilmektir. Farklı bir hesaplama yöntemi ile bulunduğu ortama uyum sağlayan, yetersiz bilgi olsa bile karar verebilen bir sistemdir. [16]. Siyah-beyaz renklere dönüştürülmüş ve karakterleri birbirinden ayrılmış bir görüntü alanında siyah renkleri 1 ve beyaz renkleri 0 olarak tanımlayacak olursak, tüm rakam ve harflere ait matrislerin sisteme tanıtılması gerçekleştirildikten sonra resimde bulunan rakam ve harflere ait matrisler sisteme yüklenerek YSA’dan okunan karakterlerin sayısal karşılığı elde edilir [17].

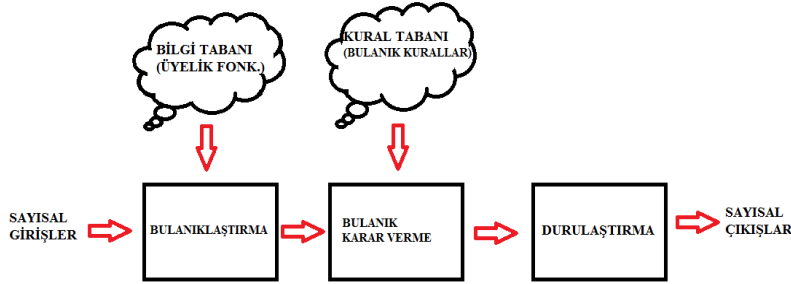
### 3. BULANIK MANTIK

#### 3.1. Bulanık Mantık Kavramı

Bulanık Mantık, ilk olarak bulanık kümelerle bir dizi kural oluşturma süreci ve ikinci evrede bulanık karar verme sürecidir. Bulanık küme kuramı, şayet eldeki veriler belirsiz, eksik ve kesin olmayan veriler ise bunları değerlendirebilmek ve yaklaşık da olsa sonuçlar üretmek için bize matematiksel araçlar sağlar. Az, çok, sıcak, soğuk, hızlı, yavaş gibi sözel ifadeler bu sayede bilgisayarların hesap yapabileceği bulanık kümelere çevrilir. Bu kuramın mühendislik veya diğer alanlarda uygulanmasındaki temel amaç, kesin olmayan veriler ışığında tutarlı sonuçlar elde edebilmektir.

Bizler karşımıza çıkan problemleri aşmak için vereceğimiz kararlarda bilgilerimizi ve tecrübelerimizi kullanırız. Bu kararların ne kadar doğru olduğu muhakkak ki zamanla kendini göstermektedir. Bilgisayarların bu gibi durumlarda doğru değerlendirmeler yapabilmesi ile birlikte etkili sonuçlar üretebilmesi için bilgi ve tecrübelerimizden oluşan bir dizi kuralı onlara aktarabilmemiz gerekmektedir. Bilgisayarların ortamın ışığını kontrol ettikleri bir çalışmada “Eğer ortamın ışığı az ve aynı ortamda hareket var ise aydınlatma lambalarının ışık şiddetlerini bir miktar artır” gibi sözel kuralların sayısal karşılıklarını makinelere aktarma sırasında bulanık kümeler oluşturmamız ve bu bulanık kümeleri birbirleri ile uygun bir şekilde bağlamamız gerekmektedir. Bu süreç bulanık karar verme sürecidir ve Şekil 1’de bulanık karar verme sisteminin yapısı blok diyagram şeklinde gösterilmiştir.

Bulanıklaştırma aşamasında genellikle sensörler vasıtası ile dışarıdan alınan ve sayısal değerlere sahip olan giriş verileri bilgi tabanındaki üyelik fonksiyonları vasıtası ile sözel ifadelere ve giriş verisinin bu ifadeyi hangi oranda desteklediğini gösteren üyelik derecelerine dönüştürülür. Bulanık karar aşamasında ise bulanıklaştırma aşamasının çıkışından alınan sözel ifadeler kural tabanındaki önermelerle karşılaştırılarak yine sözel yargı sonuçları elde edilir. Bu sonuçların hangi oranda geçerli olduğu yine girişteki üyelik dereceleri tarafından belirlenir. Bulanık karar verme sürecinin çıkışından alınan sözel ifadeler ve bunların destek dereceleri bulanık çıkışlar olarak ifade edilir. Bulanık çıkışlar bir makinenin anlayamayacağı sözel ifadelerdir. Eğer bu çıkışlar ile bir makine kontrol edilecekse tekrar sayısal ifadelere dönüştürülmesi gerekmektedir ki bu işlemi gerçekleştiren katman durulaştırma katmanıdır. Yapılan bir çalışmada son 20 yılda Bulanık Mantık ile yapılan çalışmalar özetlenmiştir [18].



Şekil 1. Bulanık karar verme sisteminin yapısı.

Bulanık Mantık esaslarını Zadeh şu şekilde ifade etmiştir [19].

- Bulanık Mantık sisteminde kesin değerler yerine yaklaşık değerler kullanılır.
- Bulanık Mantıkta bilgi çok az, az, küçük, büyük gibi sözel olarak ifade edilir.
- Bulanık Mantık sisteminde bütün değerler [0-1] aralığında bir üyelik derecesine sahip olur.
- Her bir mantıksal ifade bulanık ifadeye dönüştürülebilir.
- Sistemlerde matematiksel modeli oluşturmak çok karmaşıksa Bulanık Mantık çok rahatlıkla kullanılabilir.

Bulanık Mantık kavramı ilk olarak Assilian ve Mandami tarafından 1975 yılında bir buhar makinesinin kontrol edilmesinde kullanılarak uygulamaya geçmiştir. “Eğer türbinin hızlanma ivmesi yükseliyorsa basınç çok düşünce buhar vanasını bir miktar aç” şeklindeki kurallar ile bu sistemi gerçekleştirmişlerdir [20]. Japonya’nın Sendai şehrindeki bir metroda Bulanık Mantık kuramının uygulanması ile enerjide %10 tasarruf sağlanmasının yanında trenin istenilen konumda durması üç kat daha iyi hale getirilmiştir. Ayrıca finans sektöründe kullanılmak üzere Yamaichi Securities tarafından tasarlanan Bulanık Mantık temelli sistemin Tokyo Borsasında 1988 yılında yaşanan krizi 18 gün önceden tahmin etmiş olması bu kurama olan ilgiyi Dünya geneline yaymıştır. Bu başarılı sonuçların elde edilmesinin ardından 1989 yılında IBM, Matsuhita, Toshiba, Omron, SGS, Thomson gibi büyük firmalarında aralarında bulunduğu 51 firma birlik oluşturarak Laboratory for Interchange Fuzzy Engineering laboratuvarını oluşturmuşlardır [4].

#### 3.2. Klasik Küme ve Bulanık Küme Kavramları

Klasik kümelere bir nesnenin bir kümeye ait olması ya da olmaması söz konusudur (Şekil 2). Bu yaklaşıma bir okulun dönem sonunda başarılı ya da başarısız sayılacak öğrencilerini konu alan bir örnek verilecek olunursa,

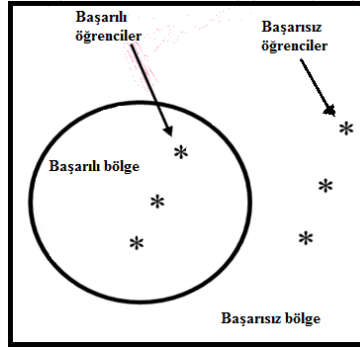


okulun belirlemiş olduğu kriterleri karşılayan öğrenciler başarılı diğer öğrenciler başarısız olarak kabul edilir. Öğrenciler bu kriterleri ya karşılarlar ya da karşılamazlar. Kısacası var ya da yok mantığı olarak tanımlanabilir. Bu kümeleri ifade etmekte karakteristik fonksiyonlar kullanılır ve 1 ya da 0 olarak tanımlanır. Klasik mantık kavramında bir A kümesine ait x elemanının alabileceği değerler Eş. 1' de gösterilmiştir.

$$\chi_A: X \rightarrow \{0,1\}$$

$$\forall x \in X, \chi_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases} \quad (1)$$

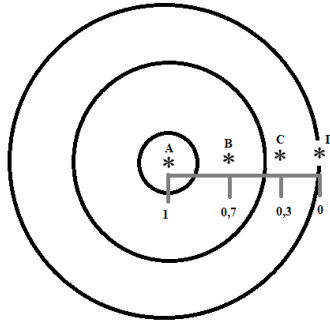
Söz konusu fonksiyonda görüldüğü gibi A kümesine ait elemanlar 1 değerini alırken, ait olmayan elemanlar ise 0 değerini almaktadır.



Şekil 2. Klasik küme kavramı.

Bulanık küme kuramı, bir elemanın bir kümeye kısmi üyeliğine olanak sağlar. Eğer üyelik derecesi olarak adlandırılan üyelik fonksiyonunun değeri 1'e eşit ise x elemanı bulanık kümeye tamamen aittir. Eğer bu değer 0 ise x bulanık kümeye ait değildir. Eğer üyelik derecesi sıfır ile bir arasında ise x elemanı bulanık kümenin kısmi üyesidir [21].

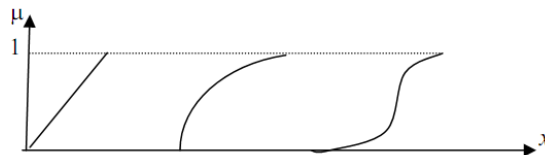
Şekil 3 incelendiğinde bulanık küme kavramının klasik küme kavramına göre ara değerler içerdiği daha net anlaşılmaktadır. Şekil 3'te merkezi başarılı, dış çemberi ise başarısız olarak kabul edersek A, B, C ve D ile gösterilen öğrencilerin başarı durumları ve bu durumlara ait üyelik dereceleri 0 ile 1 aralığında gösterilmektedir. Buna göre A harfi ile gösterilen öğrencinin üyelik derecesi 1 olduğundan başarılı sayılacağı, B ve C harfleri ile gösterilen öğrencilerin üyelik dereceleri (0,7 - 0,3) oranında kısmen başarılı sayılacakları, D harfi ile gösterilen öğrencinin ise üyelik derecesi 0 olduğu için başarısız sayılacağı görülmektedir. Bu şekilde öğrencilerin kümeye kısmi üyeliğine olanak sağlanmaktadır.



Şekil 3. Bulanık küme kavramı.

### 3.3. Bulanık Mantıkta Üyelik Fonksiyonları

Üyelik fonksiyonları üyelik derecelerinin 0'dan 1'e ne şekilde değişeceğini gösterir (Şekil 4). Üyelik fonksiyonunun şekli, kümenin ifade etmek istediği uygulama alanına göre değişiklik gösterir. En çok kullanılan üyelik fonksiyonları üçgen, yamuk, Gauss dağılımlı, çan eğrisi şekillerinde ya da Z veya S tipi sigmoid'ler şeklindedir.



Şekil 4. 0'dan 1'e üyelik değerlerinin değişim grafiği.

## 4. MATERYAL VE YÖNTEM

### 4.1. Hız Sınırı Cezalarının Hesaplanması

Ülkemizde otomobiller için uygulanan hız sınırları yolun bulunduğu bölgeye ve durumuna göre değişmektedir. Genellikle şehir içinde 50 km/h, şehirlerarası yollarda, 90 km/h, 110 km/h ve otoyollarda 120 km/h gibi değerler olmaktadır. Bu hız sınırlarına uymayan sürücülere Maliye Bakanlığı tarafından belli oranlarda trafik cezası verilmektedir.

Mevcut hız sınırı cezası hesaplama sistemi üç kademeli ve bu kademelerin arasındaki aralık çok açıktır. Hız sınırının 90 Km/h olduğu durum için örnek verecek olursak 100 Km/h hızla giden bir araç ile 117 Km/h hızla giden bir araca aynı kategoriden yani 1. kademedeki ceza uygulanmakta ve bu ceza 314 TL olmaktadır. Aynı durumda 118 Km/h hızla gitmekte olan bir araca ise 2. kademedeki yani 652 TL ceza verilmektedir. Her üç kademe için de bu duruma örnekler vermek mümkündür. Yani şu an kullanılan sistem trafik hız sınırı cezalarının uygulanmasında adil olmayan bir durum ortaya çıkarmakla birlikte sürücülerin araçlarının hızlarını ayarlamalarında zorluklar yaşamalarına sebep olmaktadır.

### 4.2. Plakalarına Göre Araç Bilgilerinin Veri Tabanına Yüklenmesi

DB Browser (SQLite) programında veri tabanı oluşturulmuş ve fotoğrafları çekilen araçlar veri tabanına yüklenmiştir. Uygulamada 10 adet aracın resmi çekilmiş, her bir aracın plaka bilgisi, sahiplerinin isim-soy isim bilgileri ile birlikte aracın hangi sınıfa (hususî-ticari) girdiği bilgisi de veri tabanına yüklenmiştir. Böylelikle fotoğrafı çekilecek olan ya da depolama alanındaki dosyadan seçilecek olan araca yazılacak olan cezanın hesaplanması için programa aracın fotoğrafı yüklendiğinde programda kullanacağımız bilgiler veri tabanından çekilerek işlem yapılmaya başlanacaktır.

### 4.3. Bölgenin Hız Sınırının Girilmesi

KGM'den alınan bilgilere göre ülkemizde hız sınırları yerleşim yeri içi, şehirlerarası çift yönlü karayolu, bölünmüş yollar ve otoyollar olmak üzere 4 guruba ayrılmıştır ve bu gurupların her biri için ayrı hız sınırları belirlenmiştir. Ayrıca araçların sınıflarına göre de otomobil, minibüs, otobüs, kamyonet, panelvan, kamyon, çekici, motosiklet, motorlu ve motorsuz bisiklet, lastik tekerlekli traktörler, arızalı bir aracı çeken araçlar ve iş makineleri gibi guruplara ayrılmış ve araç sınıflarına göre azami hızları ayrı ayrı belirlenmiştir.

Tablo 1'de görüldüğü gibi bu çalışmada hız sınırı bölgelerini 50 Km/h, 90 Km/h, 110 Km/h, 120 Km/h olacak şekilde 4 gurupta, araç sınıflandırmasını ise otomobil (hususî) ve otobüs (ticari) olacak şekilde iki gurupta ele almış bulunmaktayız.

Tablo 2' de ülkemiz'de hız sınırlarının aşılması durumunda sürücülere verilecek olan para cezalarının 2021 yılı için ne kadar olduğu gösterilmiştir.

### 4.4. Kameradan ve Dosyadan Araçların Görüntülerinin Yüklenmesi

Python programlama dilinde yazmış olduğumuz programda tasarlanan arayüze kameradan ve dosyadan fotoğraf alınabilecek şekilde iki adet buton eklenmiştir. Kameradan butonu seçildiğinde bilgisayarın web kamerası devreye girip fotoğraf almakta, dosyadan butonu seçildiğinde ise daha önceden resimleri çekilip yerel diske kaydedilmiş olan on adet aracın içerisinden herhangi birinin fotoğrafının seçilmesi sağlanmıştır. Böylelikle kameradan görüntüsü alınacak ya da dosyadan seçilecek olan araç bilgisayar programında işleme alınacaktır.

**Tablo 1.** Türkiye'de araçların uymaları gereken yasal hız sınırı.

| Araç Cinsi        | Yerleşim Yeri İçinde (Km) | Yerleşim Yeri Dışında                           |                        | Otoyollarda (Km) |
|-------------------|---------------------------|---|------------------------|------------------|
|                   |                           | Şehirlerarası Çift Yönlü Bölünmüş Yollarda (Km) | Bölünmüş Yollarda (Km) |                  |
| Otomobil (Hususî) | 50                        | 90  | 110                    | 120              |
| Otobüs (Ticari)   | 50                        | 80  | 90                     | 100              |

**Tablo 2.** Hız limiti aşımalarına uygulanan cezalar.

| %1-%10        | %11-%30 | %31-%50 | %51 VE ÜZERİ |
|---------------|---------|---------|--------------|
| Ceza yazılmaz | 314 TL  | 652 TL  | 1339         |

#### 4.6. Aracın Hızının Sisteme Girilmesi

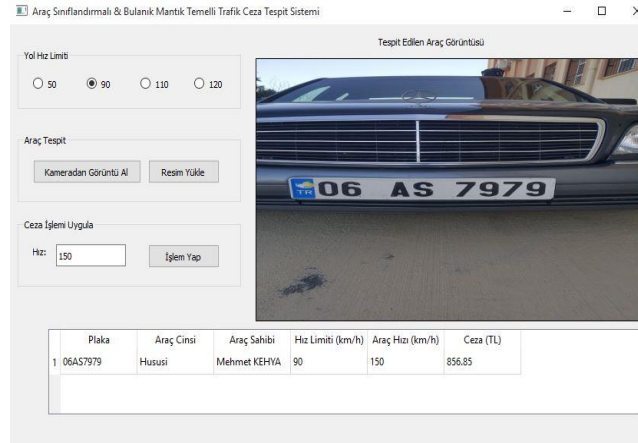
Hız sınırı cezası belirlemeden önceki son aşamada ise aracın yapmış olduğu hızın girilmesi gerekmektedir. Hazırlanmış olan arayüzde aracın hızı textbox kutusuna elle girilmektedir. Bu adımdan sonra arayüzde bulunan işlem yap butonuna tıklanacak ve plaka tanıma sistemi devreye girecektir (Şekil 5).

#### 4.7. Plaka Tanıma Sistemi

Teknolojinin gelişmesi insanlara daha rahat ve konforlu bir yaşam sunmakla birlikte bazı karmaşaların ortaya çıkmasına yol açmaktadır. Trafikte gün geçtikçe artan motorlu taşıt sayıları sürücülerin kurallara uymalarını kontrol etmekte zorlanmamıza sebep olsa da bu zorlukları teknolojik gelişmelerle kolayca aşabilmek mümkündür. Her motorlu taşıtın kendine ait ve tek olan bir plakası vardır ve son yıllarda oldukça gelişen görüntü işleme teknikleri ile bu taşıtların plakaları yüksek çözünürlüklü kameralar ile kolaylıkla okunarak sayısal ortama atılmaktadır.

Kameralar aracılığı ile dış ortamdan alınan görüntüler içerisindeki yazı ve rakamları sayısal ortama atmak için o görüntü üzerinde özel işlemler yapılması gerekmektedir.

Görüntü üzerinde okunacak bölgenin seçilmesi ve ayrılması işleminin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için fiziksel koşulların (hava, parlaklık, aydınlık, kamera camı temizliği) iyi olması gerekmektedir. Kameradan aldığımız görüntü RGB uzayındadır. İlk olarak RGB uzayında bulunan görüntüdeki renkler griye dönüştürülüp gürültü temizleme işlemi yapılır. Gri tonlarına dönüştürülen görüntüye daha iyi sonuç elde etmek için histogram eşitleme işlemi uygulanır. Daha sonra sırası ile dikdörtgen yapı elemanı ile morfolojik açılım, morfolojik açılımı yapılmış görüntüyü histogram eşitlenmiş görüntüden çıkarma işlemi, görüntü eşikleme işlemi ve Canny Edge işlemi uygulanır. Son olarak kenarları belirlenen bölge görüntü üzerinden alınır. Böylece okunacak olan plaka karakter okumaya hazır hale getirilmiş olur.



Şekil 5. Sistem arayüzü.

Ülkelerde taşıt plakalarındaki alanlar farklı farklı yerleştirilmiştir. Türkiye’de bu alanlar üç bölüme ayrılmış, birinci bölümde illerin kodları, ikinci bölümde harfler ve üçüncü bölümde rakamlar bulunmaktadır. İlk olarak bu alanların, daha sonra ise bu alanlardaki karakterlerin birbirlerinden ayrılması gerekmektedir. Plakalar üzerindeki bölgeler arasındaki boşluklar karakterler arasındaki boşluklardan daha fazladır. Bu sebeple plaka üzerindeki boşlukların hesaplanması işlemi yapılır. Bulunan boşluklara göre plaka üzerindeki bölgeler tespit edilir. Alanlar ayrıştırıldıktan sonra aynı yöntemle karakterlerin ayrıştırılması işlemi yapılır ve böylece harflerin ve rakamların tanınması işlemine geçilir [7].

Harfler ve rakamlar tespit edilirken görüntü piksel piksel soldan sağa doğru taranır. Birinci satır tarandıktan sonra ikinci satıra geçer. Bu işlem satırlar bitene kadar devam ettirilir. Tarama işleminde beyaz piksellere 0, siyah piksellere 1 değeri atanarak bir her karaktere ait matris elde edilir. Bulunan matrisler YSA ile eğitilmiş olan sisteme yüklenerek karakterin hangi harf ya da rakam olduğu belirlenmiş olur.

Karakterler tespit edildikten sonra sayısal ortamda yan yana getirilerek hangi plaka olduğu belirlenip veri tabanından hangi araca ait olduğu bilgisi çekilir. Aracın yaptığı hız bilgisi de sistem arayüzüne girildikten sonra bulanık mantık yöntemi ile araca yazılacak olan para cezasını hesaplama işlemine geçilir.

#### 4.8. Bulanık Mantık Temelli Para Cezası Hesaplanması

##### 4.8.1. Projenin tasarlanması

Uygulamanın sonucunda en uygun sonuçları alabilmek için öncelikle kurallar tablosunun oluşturulması gerekmektedir (Tablo 3). Bu tabloda hız sınırını belirlenen değerlerde sabit tutmamız, aracın gerçekleştirdiği hızı ise hız yok, yavaş, normal, hızlı ve çok hızlı gibi sözel ifadelerle hazırlamamız gerekmektedir. Aşağıdaki gibi bir tablo hazırlandıktan sonra projenin MATLAB programı Fuzzy editöründeki aşamasına geçilmiştir.

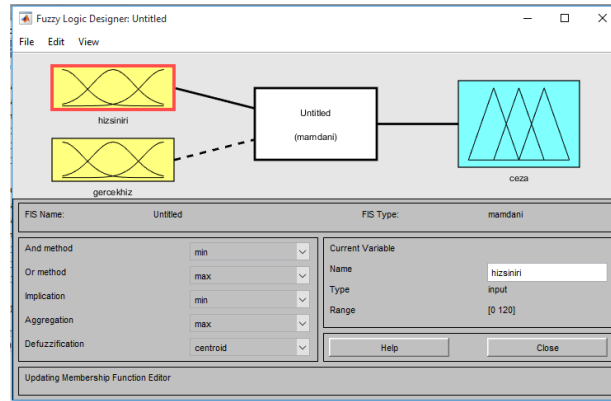
Kurallar tablosunun oluşturulmasından sonra MATLAB programında FUZZY LOGIC DESIGNER aracı ile ‘hız sınırı’ ve ‘gerçek hız’ adında iki giriş parametresi ve ‘ceza’ adında bir çıkış parametresi oluşturmamız gerekmektedir (Şekil 6). Kurallar tablosunda ise Mamdani yaklaşımını kullanmaktayız.

Hız sınırı ifadesi sürücülerin akıllarında net bir ifade olmalıdır (Hız sınırı 50 Km/h gibi). Günlük hayatta hız sınırlarını sözel ifadelerle (yavaş, normal vs.) kullanmak karışıklığa sebep olacaktır. Bu yüzden bu girişimizi sabit değerlerde tutmamız gerekecektir ve üyelik derecelerini 1 olarak almamız uygun olacaktır. Nihayetinde Şekil 7’teki gibi bir tasarım oluşturmamız gerekmektedir.

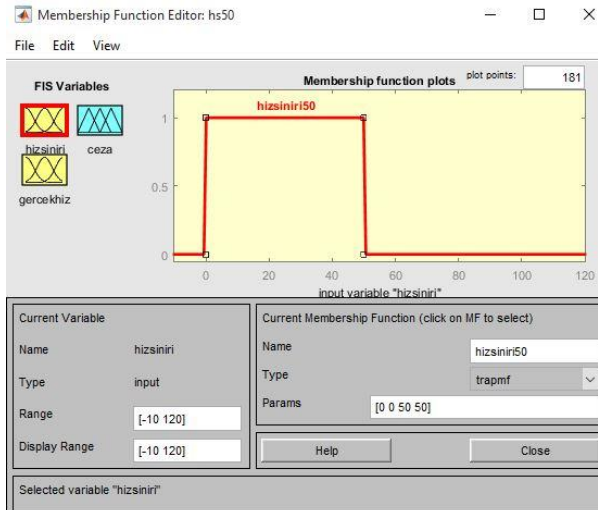
Gerçek hız girişini oluşturmada Şekil 8’de görülen kurallar tablosundaki gibi araçların hızlarını sözel ifadeler ile yazarak bu girişi tamamlayabiliriz. Burada hız sınırı altındaki değerlerde para cezası yazılmaması için üyelik fonksiyonu sabit tutulmuş ve ‘hizyok’ ismi verilmiş ve Type kısmında trapmf seçeneği kullanılmıştır. Daha sonra sırası ile ‘yavas’, ‘normal’ ve ‘hızli’ adlarındaki üyelik fonksiyonları tasarlanmış ve Type kısmında trimf seçeneği kullanılmıştır. ‘cokhızli’ üyelik fonksiyonu için ise Type kısmında belli bir değerden sonra uygulanacak cezanın sabit tutulabilmesi için Trapmf seçeneği kullanılmıştır.

**Tablo 3.** Kural tablosu.

| HIZ SINIRLARI (Km/h) | ARACIN HIZI |          |             |             |               |
|----------------------|-------------|----------|-------------|-------------|---------------|
|                      | HIZ YOK     | YAVAŞ    | NORMAL      | HIZLI       | ÇOK HIZLI     |
| 50                   | Ceza Yok    | Az Ceza  | Normal Ceza | Çok Ceza    | Maksimum Ceza |
| 90                   | Ceza Yok    | Ceza Yok | Az Ceza     | Normal Ceza | Çok Ceza      |
| 110                  | Ceza Yok    | Ceza Yok | Ceza Yok    | Az Ceza     | Normal Ceza   |
| 120                  | Ceza Yok    | Ceza Yok | Ceza Yok    | Ceza Yok    | Az Ceza       |



**Şekil 6.** MATLAB’da giriş ve çıkış parametrelerini oluşturma.

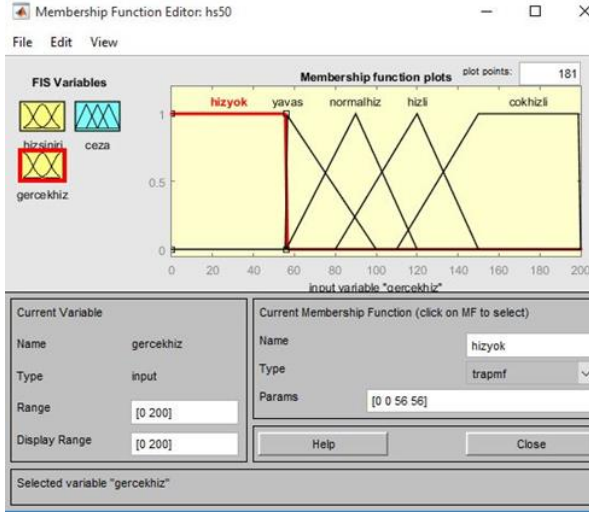


**Şekil 7.** MATLAB’da hız sınırı üyelik fonksiyonu oluşturma.

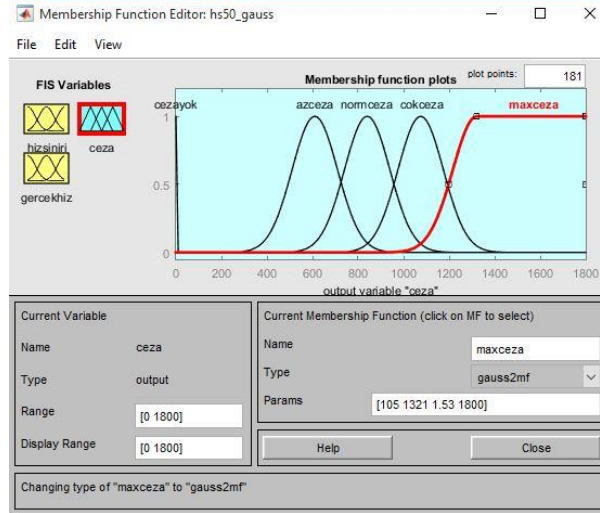
Ceza adını verdiğimiz çıkış üyelik fonksiyonu Şekil 9’daki gibi oluşturulur. Bu aşamada ‘cezayok’ üyelik fonksiyonunu 1 değerinde sabit tutmak için Trimf üyelik fonksiyonu [0 0 0] değerleri kullanılmıştır. Ardından ‘azceza’, ‘normceza’ ve ‘cokceza’ üyelik fonksiyonlarını oluştururken Type bölümünde ‘gaussmf’, ‘maxceza’ üyelik fonksiyonunu oluştururken ise Type bölümünde ‘gauss2mf’ seçenekleri tercih edilmiştir. Böylelikle bizlerin belirleyeceği bir değerin üzerinde ceza değeri sabit tutulabilecektir.

Eğer hız sınırı 50 Km/h ve aracın hızı 56 Km/h'nın altındaysa ceza yazılmaması için ve diğer durumların gerçekleşmesi durumunda gerekli ceza değerlerinin hesaplanması için;

1. If (hizsiniri is hizsiniri50) and (gercekhiz is hizyok) then (ceza is cezayok)
  2. If (hizsiniri is hizsiniri50) and (gercekhiz is yavas) then (ceza is azceza)
  3. If (hizsiniri is hizsiniri50) and (gercekhiz is normalhiz) then (ceza is normceza)
  4. If (hizsiniri is hizsiniri50) and (gercekhiz is hizli) then (ceza is cokceza)
  5. If (hizsiniri is hizsiniri50) and (gercekhiz is cokhizli) then (ceza is maxceza)
- şeklinde kural tablosu oluşturulmuştur.



Şekil 8. MATLAB'da gerçek hız üyelik fonksiyonu oluşturma.



Şekil 9. MATLAB'da hız sınırı cezası için çıkış üyelik fonksiyonu oluşturma.

#### 4.8.2. Uygulamanın simülasyon programında test edilmesi

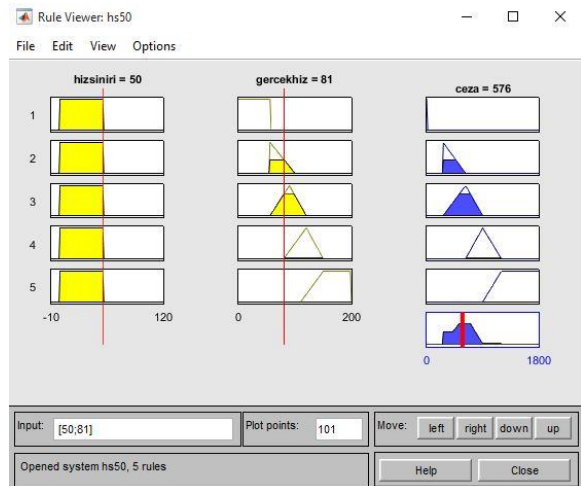
Uygulama programında tasarım yapıldıktan sonra test aşamasına geçilmiştir. Hız sınırının 50 Km/h ve gerçekleşen hızın 80 Km/h olduğu durumda elde edilen sonuç Şekil 10'daki gibi olmuştur. 80 Km/h hız %50 sınırını geçtiği için 1339 TL ceza olacakken bu uygulamada 562 TL olmuştur. Eğer 75 Km/h hız ile gidilseydi ceza 652 TL olacaktı. Yani 5 Km/h hız farkı normalde 687 TL fark oluşturacakken, bu uygulamada 75 Km/h hıza yakın bir ceza oluşmuştur.

Hız sınırının 50 Km/h ve gerçekleşen hızın 81 Km/h olduğu durumda elde edilen sonuç Şekil 11'deki gibi olmuştur. Bir önceki duruma göre sadece 1 Km/h hız artışı sadece 14 TL ceza artışına sebep olmuştur. Normal uygulanan sistemde ise 1 Km/h hız artışı bazı aralıklarda ceza farkına sebep olmazken, bazı sınır noktalarında ise 2 katından fazla ceza artışlarına sebep olabilmektedir.

Hız sınırının 50 Km/h ve gerçekleşen hızın 82 Km/h olduğu durumda elde edilen sonuç Şekil 12'deki gibi olmuştur. Görüldüğü gibi 1 Km/h ilave hız artışı 13 TL ceza artışına sebep olmuştur. Sadece 50 Km/h hız limiti için yapılan bu detaylı incelemenin ardından diğer hız limitleri için hususi ve ticari olmak üzere hız artışlarına karşılık ceza grafikleri oluşturulmuştur.

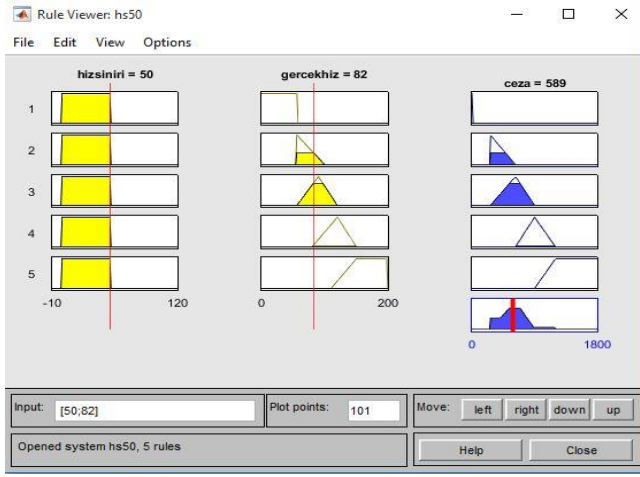


Şekil 10. HS 50 ve GH 80 olma durumu.

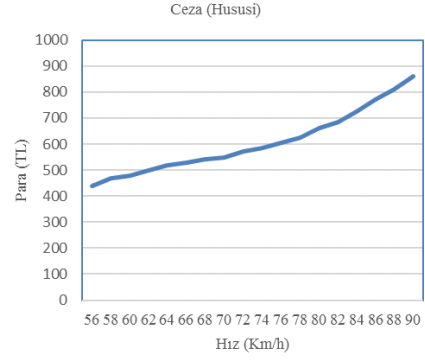


Şekil 11. HS 50 ve GH 81 olma durumu.





Şekil 12. HS 50 ve GH 82 olma durumu.



Şekil 13. Hız sınırı 50 Km/h için elde edilen sonuç grafiği.

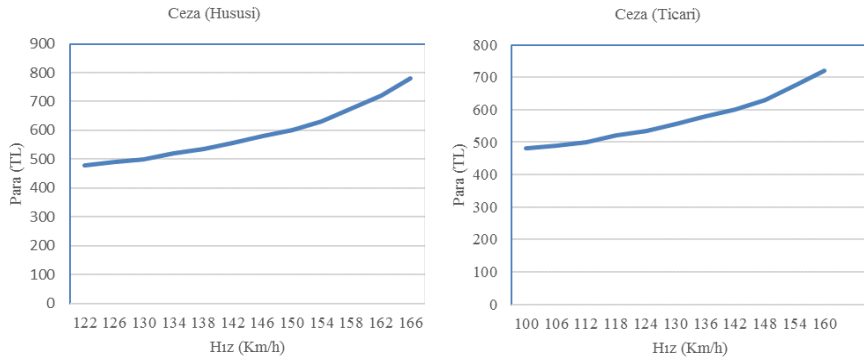
## 5. ARAŞTIRMA BULGULARI

Dış ortamdan görüntü almak için kullanılacak olan kameranın çözünürlüğünün ve görüntü yakalama hızının yüksek olması plaka tanıma sisteminde daha doğru sonuçlar elde etmek için faydalı olacaktır. Bu çalışmada yatayda ve dikeyde 100 ile 300 dpi arasında çözünürlük uygun sonuçlar elde etmemizi sağlamıştır.

Günümüz trafik hız sınırı cezası uygulamasında hız sınırının 50 Km/h olduğu bir bölgede 75 Km/h hızla giden bir araç 652 TL, 76 Km/h hızla giden bir araç ise 1339 TL trafik cezası ödemektedir. Bulanık mantık temelli trafik hız sınırı cezası hesaplama yönteminde ise hız sınırının 50 Km/h olduğu bir bölgede 74 Km/h hızla giden bir araca 625 TL, 75 Km/h hızla giden bir araca 651 TL, 76 Km/h hızla giden bir araca ise 674 TL trafik cezası uygulanmaktadır. Bu şekilde istenilen lineer artış elde edilmiştir.

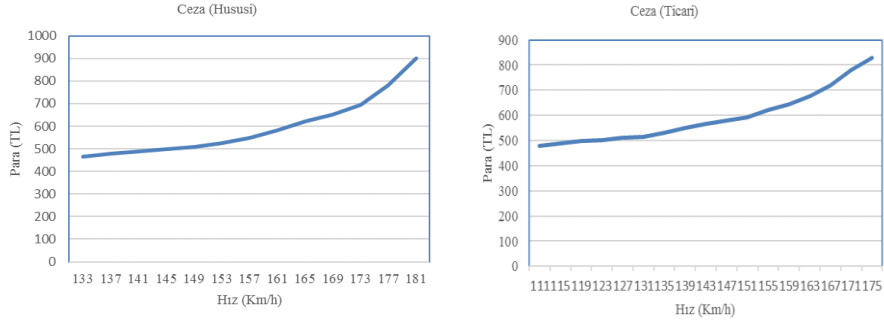
Hız sınırı bölgesi, dış ortamdan veya yerel hafızadan alınan görüntü ve gerçekleşen hızın arayüze yüklenmesi sonrası hesaplama yapıldığında elde edilen sonuçlar Excel programına yüklendikten sonra aşağıdaki gibi grafikler elde edilmiştir. Böylelikle 50 km/h hız sınırı hususi ve ticari araçlar için Şekil 13, 110 km/h hız sınırı hususi araçlar ve 90 Km/h hız sınırı ticari araçlar için Şekil 14, 120 km/h hız sınırı hususi araçlar ve 100 km/h hız sınırı ticari araçlar için Şekil 15 ve 90 km/h hız sınırı hususi araçlar ve 80 Km/h hız sınırı ticari araçlar için Şekil 16'daki gibi sonuçlar oluşmuştur.

Şekil 14'de de hususi (110 Km/h hız sınırı) ve ticari (90 Km/h hız sınırı) araçlar için görüldüğü gibi sert geçişlerin olmadığı bir ceza değerlendirmesi oluşmuştur. Hususi araçlar için 122 Km/h hız ve 143 Km/h hız için 314 TL ceza, 144 Km/h ve 165 Km/h hız için 652 TL ceza, 166 Km/h hız için 1339 TL ceza ödenecekken görüldüğü gibi her hız limiti aşımı için makul bir ceza artışı elde edilmiştir. Benzer durum ticari araçlar için de 100 Km/h hız ve 117 Km/h hız için 314 TL ceza, 118 Km/h hız ve 135 Km/h hız için 652 TL ceza, 136 Km/h hız için 1339 TL ceza ödenecekken yine hız limiti aşımaları için makul ceza artışları elde edilmiştir.



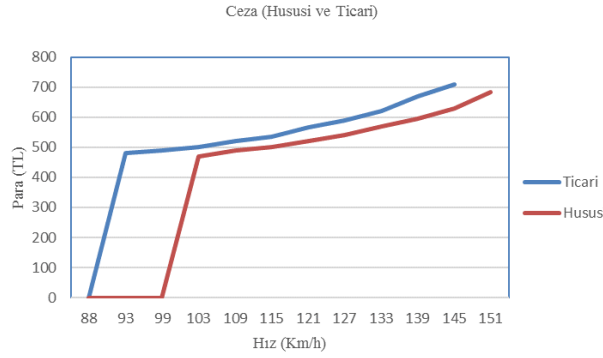
Şekil 14. Hız sınırı 110 Km/h hususi ve 90 Km/h ticari araçlar için sonuç grafiği.

Şekil 15'de de hususi (120 Km/h hız sınırı) ve ticari (100 Km/h hız sınırı) araçlar için görüldüğü gibi sert geçişlerin olmadığı bir ceza değerlendirmesi oluşmuştur. Hususi araçlar için 133 Km/h hız ve 156 Km/h hız için 314 TL ceza, 157 Km/h ve 180 Km/h hız için 652 TL ceza, 181 Km/h hız için 1339 TL ceza ödenecekken görüldüğü gibi her hız limiti aşımı için makul bir ceza artışı elde edilmiştir. Benzer durum ticari araçlar için de 111 Km/h hız ve 130 Km/h hız için 314 TL ceza, 131 Km/h hız ve 150 Km/h hız için 652 TL ceza, 151 Km/h hız için 1339 TL ceza ödenecekken yine hız limiti aşımaları için makul ceza artışları elde edilmiştir.



Şekil 15. Hız sınırı 120 Km/h hususi ve 100 Km/h ticari araçlar için elde edilen sonuç grafiği.

Şekil 16'da hususi (90 Km/h hız sınırı) ve ticari (80 Km/h hız sınırı) araçlar için ceza değerlendirmesi tek grafikte verilmiştir. Görüldüğü gibi her iki araç türünde de %10 tolerans limitinde bir ceza oluşmamış, hususi araçlarda 99 Km/h hız değerinden sonra, ticari araçlarda da 88 Km/h hız değerinden sonra cezalandırma başlamıştır. Bu durumda %10 tolerans değerinden sonra dar bir aralıkta fazla ceza artışları olurken, daha sonrasında daha doğrusala yakın bir ceza artışı oluşmuştur.



Şekil 16. Hız sınırı 90Km/h hususi ve 80 Km/h ticari araçlar için sonuç grafiği.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Plaka tanıma sistemi görüntü üzerinden ilgili bölümü alma, karakterleri parçalara ayırma ve karakterleri tanıma olarak üç aşamadan oluşmaktadır. Görüntü alınırken daha doğru sonuçlar elde etmek için çözünürlüğün yüksek tutulması gerekir. Bu şekilde plaka bölgesinin resimden ayrılması işleminde işlemcinin daha fazla çalışmasına karşın daha az hata yapılmış olur.

Python programı ile bu çalışma yapılırken arduino programlama kartı yerine bilgisayar kullanılması gerekmektedir. Program, işlemci ve ram kapasitesi düşük bilgisayarlarda çalıştırıldığında sık sık durabilmekte veya kendini kapatabilmektedir.

Matlab Fuzzy Logic programında tasarım aşamasında çıkış üyelik fonksiyonları belirlenirken type kısmında gaussmf ve gauss2mf seçilmesi ceza belirleme aşamasında daha istenilen sonuçların alınmasını sağlamıştır.

İlerleyen aşamalarda programı geliştirmek adına çıkışta daha lineer çıktılar elde edebilmek için Python programlama dilinde Sugeno yaklaşımı kullanılarak program üzerinde değişiklikler yapılabilir. Bu işlem için program içerisindeki üyelik dereceleri hesaplama, kural tablosu oluşturma ve durulaştırma bölümleri Sugeno yaklaşımına göre yeniden yazılabilir.

### Yazar Katkıları

Her bir yazar da çalışmaya eşit miktarda katkıda bulunmuştur.

### Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler

### KAYNAKÇA

[1] <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Trafi k/HizSinirlari.aspx>, Erişim tarihi Ocak 11, 2021.

[2] <http://trafik.gov.tr/kurumlar/trafik.gov.tr/03-Mevzuat/2021-yili-trafik-idari-para-ceza-rehberi.pdf>, Erişim tarihi Ocak 11, 2021.

- [3] F. Bayram “Derin öğrenme tabanlı otomatik plaka tanıma”, *Politeknik Dergisi*, vol. 23, no. 4, pp. 955-960, 2020.
- [4] H.M. Ertunç “Introduction To Fuzzy Logic”, Kocaeli Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği, 2012.
- [5] A.E. Tiryaki, ve R. Kazan “Bulaşık Makinesinin Bulanık Mantık ile Modellenmesi”, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Mühendis ve Makine Dergisi, vol. 48, no. 565, 2007.
- [6] İ. Ertuğrul “Akademik Performans Değerlendirmede Bulanık Mantık Yaklaşımı”, *İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, vol. 20, no. 1, pp. 155 – 176, 2006.
- [7] D. Li, P. Ranjitkar “A Fuzzy Logic-Based Variable Speed Limit Controller”, *Journal of Advanced Transportation*, vol. 49, no. 8, 2015.
- [8] F. Barreno, M. Santos, M.G. Romana “A Novel Adaptive Vehicle Speed Recommender Fuzzy System For Autonomous Vehicles On Conventional Two-Lane Roads, *Expert Systems*, 2022.
- [9] X.R. Liang, D.Q. Wang “Design and Simulation of Speed Limit Controller Based on Fuzzy Logic Inference”, *Home Applied Mechanics and Materials Applied Mechanics and Materials*, vols. 220-223, pp. 988-991, 2012.
- [10] B. Öztürk, V. Sezer “A New Speed Planning Method Based On Predictive Curvature Calculation For Autonomous Driving”, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 30, no. 4, 2022.
- [11] G. Lanzaro, M. Andrade “A Fuzzy Expert System For Setting Brazilian Highway Speed Limits”, *International Journal of Transportation Science and Technology*, 2022.
- [12] E. Deniz “Plaka Tanıma Sistemi”, Kocaeli Üniversitesi Bilişim Sistemleri Mühendisliği, 2018.
- [13] M. Ünay “Bilgisayarlı Görü Teknikleri Kullanılarak Yapay Zeka Temelli Limon Ağacı Rekolte Tahmini”, Yüksek Lisans Tezi, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karaman, 2021.
- [14] A. Kızılkaya “Sayısal Görüntü İşleme”, Pamukkale Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği, 2008.
- [15] J.W. Hsieh, S.H. Yu, and Y.S. Chen “Morphology-based License Plate Detection from Complex Scenes”, *IEEE Proceedings of the 16th International Conference on Pattern Recognition*, Quebec City, Canada, vol. 3, pp. 176-179, 2002.
- [16] V. Nابیev “Yapay Zeka Problemler”, *Yöntemler, Algoritmalar, Seçkin Yayıncılık*, 2013.
- [17] K.S. Narendra ve S. Mukhopadhyay “Adaptive control using neural networks and approximate models”, *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 8, no. 3 pp. 475-485, 1997.
- [18] O. Özdemir, Y. Kalınkara “Bulanık Mantık: 2000-2020 Arası Tez ve Makale Çalışmalarına Yönelik Bir İçerik Analizi”, *ACTA INFOLOGICA*, İstanbul University Press, vol. 4, no. 2, pp. 155-174, 2020.
- [19] Ç. Elmas “Yapay Zeka Uygulamaları”, *Seçkin Yayıncılık*, 2007.
- [20] J. Bih “Paradigm shift - an introduction to fuzzy logic”, *Potentials.IEEE*, vol. 25, no. 1, pp. 6-21, 2006.
- [21] R. Babuska “Fuzzy Modeling for Control”, *Kluwer Academic Publisher*, 1998.



## FDCCII Based New Memcapacitor Emulator Circuit with Electronically Tunable Elektronik Olarak Ayarlanabilen FDCCII Tabanlı Yeni Memkapasitör Emülatör Devresi

<sup>1</sup>Muhammet Oğuz KORKMAZ , <sup>2</sup>Abdullah YEŞİL 

<sup>1,2</sup>Department of Electrical and Electronics Engineering, Bandırma Onyediy Eylül University, Balıkesir, 10200 Turkey

<sup>1</sup>mkorkmaz@bandirma.edu.tr, <sup>2</sup>ayesil@bandirma.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

### ARTICLE INFO

#### Article history

Received : 3 March 2023

Accepted : 5 April 2023

#### Keywords:

Memcapacitor, Emulator, FDCCII, Electronic Tunable, Grounded

### ABSTRACT

Since memcapacitor and meminductor elements have not been produced yet, emulator circuits are used to examine their application areas. In this paper, a new fully differential second-generation current conveyor (FDCCII) based grounded memcapacitor emulator circuit is presented. The proposed circuit consists of one FDCCII, one multiplier, three capacitors and two MOSFETs. These two MOSFETs are utilized as electronic resistors in the circuit. The variable part of memconductance can be adjusted electronically and the proposed memcapacitor possesses an incremental-decremental adjustable structure. Moreover, it contains fewer active elements than many memcapacitor emulator studies in the literature. The proposed circuit was designed in LTspice, and frequency response, temperature, and Monte Carlo analyses were performed. In addition, the electronic resistor has been simulated at various values, demonstrating that the circuit is electronically adjustable. The simulation results are consistent with the mathematical results presented in the article.

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

### MAKALE BİLGİSİ

#### Makale Tarihleri

Gönderim : 3 Mart 2023

Kabul : 5 Nisan 2023

#### Anahtar Kelimeler:

Memkapasitör, Emülatör, FDCCII, Elektronik Ayarlanabilir, Topraklı

### ÖZET

Memkapasitör ve memindüktör elemanları henüz üretilmediğinden uygulama alanlarını incelemek için emülatör devreleri kullanılmaktadır. Bu makalede, yeni bir tam farksal ikinci kuşak akım taşıyıcı (FDCCII) tabanlı topraklanmış memkapasitör emülatör devresi sunulmaktadır. Önerilen devre, bir FDCCII, bir çarpan, üç kapasitör ve iki MOSFET'ten oluşmaktadır. Bu iki MOSFET, devrede elektronik direnç olarak kullanılmaktadır. Memkapasitansın değişken kısmı elektronik olarak ayarlanabilir ve önerilen devre artan-azalan olarak ayarlanabilir yapıdadır. Ayrıca literatürdeki birçok memkapasitör emülatör çalışmasından daha az aktif eleman içermektedir. Önerilen devre LTspice programında tasarlanmış ve frekans tepkisi, sıcaklık ve Monte Carlo analizleri yapılmıştır. Ayrıca elektronik direnç, çeşitli değerlerde simüle edilerek devrenin elektronik olarak ayarlanabilir olduğu gösterilmiştir. Simülasyon sonuçları, makalede sunulan matematiksel sonuçlarla tutarlıdır.

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

## 1. INTRODUCTION

Emulator circuits have been used in the implementation of memory elements ever since the first study [1] presented the theoretical and scientific basis for the memristor element. After the production of the first memristor element [2] using  $\text{TiO}_2$  in 2008, more studies have begun on the development of emulator circuits for memory elements. Although it is not possible to produce memcapacitor and meminductor elements at the moment, grounded and floating emulator circuits are developed and the application areas of the elements are investigated. Although there are many memcapacitor emulator circuits designed using the memristor element in the literature [3]–[13]. One of the main disadvantages of these emulators is that they have to use the memristor, which can be difficult to find on the market, or that they require a large number of active elements to design the memristor emulator. In the floating memcapacitor emulator circuit designed by Sah et al. [14], two operational amplifiers (OPAMP), one multiplier circuit and four passive elements are used. In the study by Zhao et al. [15], both grounded and floating memcapacitor emulator circuits are proposed. While three second generation current conveyor (CCII) elements, one multiplier and five passive elements were used in the circuit designed in grounded structure, five CCII elements one multiplier and seven passive elements were used in the circuit designed in floating structure. In a study by Sharma et al. [16], a memcapacitor emulator circuit was designed using two CCII, one multiplier and passive elements. The designed emulator circuit can be used as floating and grounded by using it in different configurations. The floating emulator circuit designed by Yu et al. [17], can be used to obtain memristor, memcapacitor and meminductor elements by using different configurations. The memcapacitor emulator can be obtained by using four AD844s, one OPAMP, and nine passive elements. Although floating structures have more usage areas than grounded structures, the number of active elements used is higher in studies designed as floating structures [14-17] compared to grounded ones.

In the grounded structure memcapacitor emulator circuit designed by Fouda and Radwan [18], four OPAMPs, one multiplier, seven passive elements and one current controlled current source are used and the simulation results of the circuit are given. Three OPAMPs, two multiplier circuits and nine passive elements are used in the grounded memcapacitor emulator circuit designed by Fitch et al. [19]. The circuit has been tested both as a simulation and experimentally. In a study conducted by Yuan and Li [20], a circuit was designed using three OPAMPs, one multiplier, and nine passive elements. This circuit was then tested in simulation and experimentally, and it was utilized in a chaotic oscillator circuit. In a study conducted by Yeşil and Babacan [21], two different memcapacitor emulator circuits were designed. The first circuit was designed using two CCII, a multiplier, and four passive elements, while the second circuit was designed using a CCII element, an operational transconductance amplifier (OTA), a multiplier, and three capacitors. Simulation results for both circuits are given, but only two CCII-based emulator circuits are experimentally studied. Two memcapacitor emulator circuits in grounded structure were proposed by Raj et al. [22] and tested in Chua's oscillator circuit. The first circuit contains three OTA elements, while the second circuit consists of two MO-OTA elements. Three passive elements are utilized in both circuits. Yuan et al. [23] proposed a new grounded memcapacitor emulator circuit. The circuit has been investigated both simulation and experimentally by using the chaotic oscillator circuit. The memcapacitor emulator is made of five OPAMPs, a multiplier and fourteen passive elements. A memcapacitor emulator circuit designed by Konal and Kacar [24] utilizes two OTAs, a multiplier circuit and four passive elements. Although the circuit is electronically adjustable, it is limited to operating at frequencies between 1 Hz and 10 Hz. The active element numbers of the emulator circuits of the studies in this grounded structure [18-24] are high.

In this study, a grounded new memcapacitor emulator circuit is proposed. It consists of one fully differential second-generation current conveyor (FDCCII), one multiplier, three capacitors and two PMOS transistors which act like electronically adjustable resistor. Therefore, the variable part of memconductance can be controlled by biasing voltage. LTspice program was used to simulate the proposed circuit throughout the design process. Frequency response, temperature, and Monte Carlo analyses were carried out to validate the circuit's functionality. In addition, the adjustable resistor was tested at different values to demonstrate that the circuit can be adjusted electronically. The simulation results agree with the mathematical results presented in the article.

## 2. PROPOSED MEMCAPACITOR EMULATOR CIRCUIT

The memcapacitor element is defined by the nonlinear relationship between sigma ( $\sigma$ ) and flux ( $\varphi$ ) as seen in Equation (1). The sigma ( $\sigma$ ) used in the memcapacitor equation is the integral of the charge. The memcapacitor equation can be expressed in terms of charge and voltage, if the sigma and the flux in the equation are taken as the derivative of time [25]. If both the numerator and the denominator of the expression in Equation (1) are derived with respect to time, the memcapacitor equation can be defined in terms of charge and voltage as in Equation (2). By rearranged Equation (2), the equation of the charge-controlled invert memcapacitor is obtained as in Equation (3) [26].

$$C_M = \frac{d\sigma}{d\varphi} \quad (1)$$



$$C_M = \frac{\frac{d\sigma}{dt}}{\frac{d\phi}{dt}} = \frac{q(t)}{V(t)} \quad (2)$$

$$V_C(t) = C_M^{-1} \left[ \int q(\tau) d\tau \right] q(t) \quad (3)$$

The schematic representation of FDCCII element used in the proposed memcapacitor emulator is shown in Figure 1.

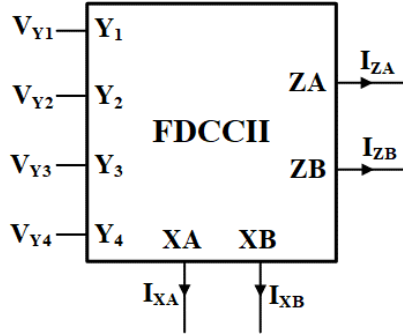


Figure 1. Schematic representation of the FDCCII element.

The current-voltage relationships between the terminals of the element are shown in Equation (4). No current flows through the Y input terminals of the element.

$$\begin{bmatrix} V_{XA} \\ V_{XB} \\ I_{ZA} \\ I_{ZB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Y1} \\ V_{Y2} \\ V_{Y3} \\ V_{Y4} \\ I_{XA} \\ I_{XB} \end{bmatrix} \quad (4)$$

As illustrated in Figure 2, the proposed circuit employs one FDCCII element, one multiplier, three capacitors, and two PMOS transistors. These transistors are worked as an electronically adjustable resistor. The input voltage is applied to the XA terminal of the FDCCII element. The input current flowing through capacitor  $C_1$  on terminal XA is given by Equation (5). The  $I_{XA}(t)$  current flows in the opposite direction to the  $I_{IN}(t)$  current, while it flows in the same direction as the  $I_{ZA}(t)$  current, as seen in Equation (6).

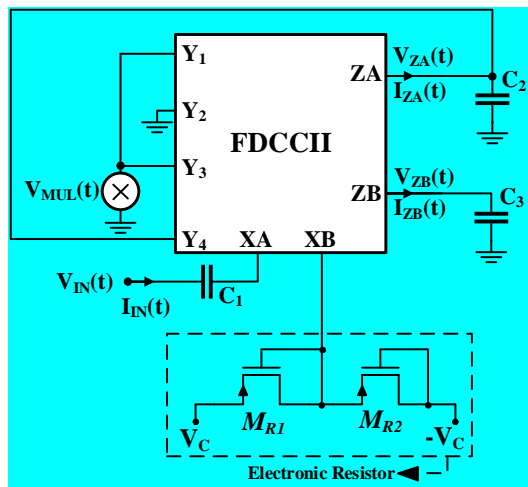


Figure 2. The proposed FDCCII based memcapacitor emulator circuit.

$$I_{IN}(t) = C_1 \frac{d(V_{IN}(t) - V_{XA}(t))}{dt} \quad (5)$$

$$I_{ZA}(t) = I_{XA}(t) = -I_{IN}(t) \quad (6)$$

The current  $I_{ZA}(t)$  flowing through the capacitor  $C_2$  creates the voltage  $V_{ZA}(t)$ . Since the current  $I_{ZA}(t)$  is equal to the inverse of the current  $I_{IN}(t)$ , the integral of the current  $I_{ZA}(t)$  gives the expression charge (q). If the  $Y_4$  terminal is connected to the  $Z_A$  terminal in the circuit, the Equation (7) is obtained.

$$V_{Y4}(t) = V_{ZA}(t) = \frac{1}{C_2} \int I_{ZA}(t) dt = -\frac{1}{C_2} \int I_{IN}(t) dt = -\frac{q(t)}{C_2} \quad (7)$$

When the multiplier is positive, the product of  $V_{ZA}(t)$  and  $V_{ZB}(t)$  voltages is applied to the  $Y_1$  and  $Y_3$  terminals of the FDCCII. The  $I_{ZB}(t)$  current is equal to the  $I_{XB}(t)$  as seen in Equation (9).

$$V_{MUL}(t) = V_{ZA}(t)V_{ZB}(t) \quad (8)$$

$$I_{ZB}(t) = I_{XB}(t) = \frac{V_{XB}(t)}{R_{eq}} = \frac{-V_{Y1}(t) + V_{Y2}(t) + V_{Y4}(t)}{R_{eq}} = \frac{-V_{ZA}(t)V_{ZB}(t) + V_{ZA}(t)}{R_{eq}} \quad (9)$$

When the voltage  $V_{ZA}(t)$  is substituted in the equation, the current  $I_{ZB}(t)$  can be obtained as in Equation (10). The current  $I_{ZB}(t)$  flowing through the capacitor  $C_3$  creates the voltage  $V_{ZB}(t)$  as in Equation (11).

$$I_{ZB}(t) = \frac{q(t)V_{ZB}(t) - q(t)}{R_{eq}C_2} \quad (10)$$

$$V_{ZB}(t) = \frac{1}{C_3} \int I_{ZB}(t) dt = -\frac{1}{R_{eq}C_2C_3} \int (q(t)V_{ZB}(t) - q(t)) dt \quad (11)$$

If  $\lambda = (R_{eq}C_2C_3)^{-1}$  is defined in Equation (11) and by taking the derivative of both sides, Equation (12) is obtained.

$$V_{ZB}'(t) + \lambda q(t)V_{ZB}(t) = \lambda q(t) \quad (12)$$

The solution of the first order inhomogeneous differential equation in Equation (12) is given in the appendix and the voltage  $V_{ZB}(t)$  is found as in Equation (13).

$$V_{ZB}(t) = 1 - e^{-\frac{1}{R_{eq}C_2C_3} \int q(t) dt} \quad (13)$$

The voltage on the multiplier is given as in Equation (14).

$$V_{MUL}(t) = V_{ZA}(t)V_{ZB}(t) = \left(-\frac{q(t)}{C_2}\right) \left(1 - e^{-\frac{1}{R_{eq}C_2C_3} \int q(t) dt}\right) \quad (14)$$

Using Equation (4) and (14), the  $V_{XA}(t)$  is obtained as Equation (15).

$$V_{XA}(t) = Y_1 - Y_2 + Y_3 = V_{MUL}(t) - 0 + V_{MUL}(t) \Rightarrow V_{XA}(t) = \left(-\frac{2q(t)}{C_2}\right) \left(1 - e^{-\frac{1}{R_{eq}C_2C_3} \int q(t) dt}\right) \quad (15)$$

When the  $V_{XA}(t)$  is substituted in Equation (5), Equation (16) is obtained.

$$I_{IN}(t) = C_1 \frac{d \left( V_{IN}(t) + \left( \frac{2q(t)}{C_2} \right) \left( 1 - e^{-\frac{1}{R_{eq}C_2C_3} \int q(t) dt} \right) \right)}{dt} \quad (16)$$

By integrating both sides of Equation (16), the charge is obtained as shown in Equation (17).

$$\begin{aligned} \int I_{IN}(t) dt &= C_1 \int \frac{d \left( V_{IN}(t) + \left( \frac{2q(t)}{C_2} \right) \left( 1 - e^{-\frac{1}{R_{eq}C_2C_3} \int q(t) dt} \right) \right)}{dt} dt \\ \Rightarrow q(t) &= C_1 V_{IN}(t) + \left( \frac{2C_1 q(t)}{C_2} \right) \left( 1 - e^{-\frac{1}{R_{eq}C_2C_3} \int q(t) dt} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

Inverse memcapacitance of the decremental charge controlled memcapacitor structure is obtained as shown in Equation (18).

$$C_M^{-1} \left[ \int q(\tau) d\tau \right] = \frac{V_{IN}(t)}{q(t)} \Rightarrow C_M^{-1} \left[ \int q(\tau) d\tau \right] = \frac{V_{in}(t)}{q(t)} = \underbrace{\frac{1}{C_1} - \frac{2}{C_2}}_{\text{Fix Part}} + \underbrace{\frac{2}{C_2} e^{-\frac{1}{R_{eq}C_2C_3} \int q(t) dt}}_{\text{Variable Part}} \quad (18)$$

When the multiplier is set to negative, inverse memcapacitance of the incremental charge controlled memcapacitor structure is obtained, as can be seen in Equation (19).

$$C_M^{-1} \left[ \int q(\tau) d\tau \right] = \frac{V_{IN}(t)}{q(t)} \Rightarrow C_M^{-1} \left[ \int q(\tau) d\tau \right] = \frac{V_{in}(t)}{q(t)} = \underbrace{\frac{1}{C_1} + \frac{2}{C_2}}_{\text{Fix Part}} - \underbrace{\frac{2}{C_2} e^{-\frac{1}{R_{eq} C_2 C_3} \int q(t) dt}}_{\text{Variable Part}} \quad (19)$$

As shown in Equation (18) and (19), the variable part of the proposed emulator circuit can be modified with the  $R_{eq}$  resistor which can be adjusted by biasing voltage ( $V_C$ ) and the fixed part can be modified with the  $C_1$  capacitor.

### 3. SIMULATION RESULTS OF THE PROPOSED CIRCUIT

The FDCCII element used in the proposed circuit was designed using CMOS elements in LTspice. The internal structure of the FDCCII element is based on reference [27]. In the proposed circuit shown in Figure 2, the resistance value ( $R_{eq}$ ) is 1.1 kΩ, since the voltage of the electronic resistor element ( $V_C$ ) is set to 700 mV. The capacitors  $C_1$ ,  $C_2$  and  $C_3$  are 20 pF, 100 pF and 50 pF, respectively. In all simulation studies, the input voltage amplitude is 300 mV and the frequency is 200 kHz. The input voltage and charge graphs for the decreasing and increasing structure of the emulator circuit are shown in Figure 3 (a) and Figure 3(b), respectively.

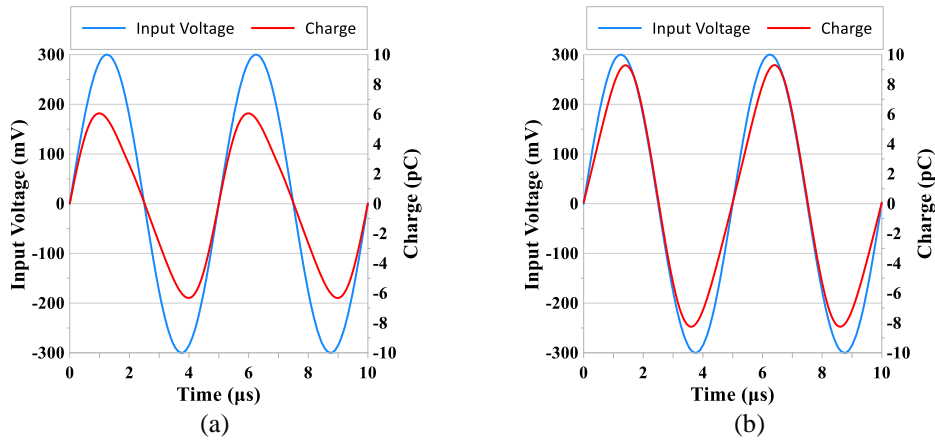


Figure 3. Input voltage and charge graph of (a) decremental structure (b) incremental structure.

The hysteresis loops in Figure 4 were obtained with an input signal frequency of 200 kHz, 300 kHz, and 1 MHz. It can be observed from Figure 4 that as the input frequency of the memcapacitor element is increased, the hysteresis loops become more linear. In Figure 5, the electronic adjustability of the hysteresis loop is examined according to the control voltage. When the control voltage of the electronic resistor is set to 500 mV, 700 mV, or 900 mV, the resistance values of electronic resistor are calculated as 3.6 kΩ, 1.1 kΩ, or 0.7 kΩ, respectively. According to Equation (18) and (19), it should be noted that the variable part increases as the resistance value decreases, in other words control voltage increases. It can be clearly seen from Figure 5 that the hysteresis loop of the circuit becomes linear as control voltage decreases.

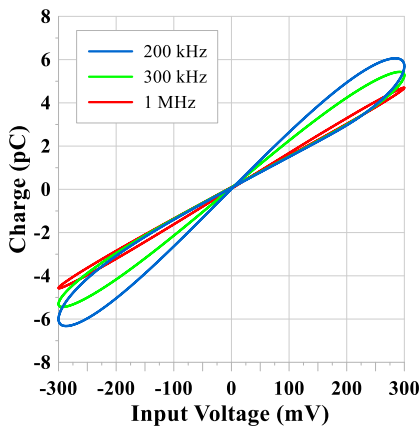


Figure 4. Hysteresis loops obtained at 200 kHz, 300 kHz and 1 MHz input frequencies.

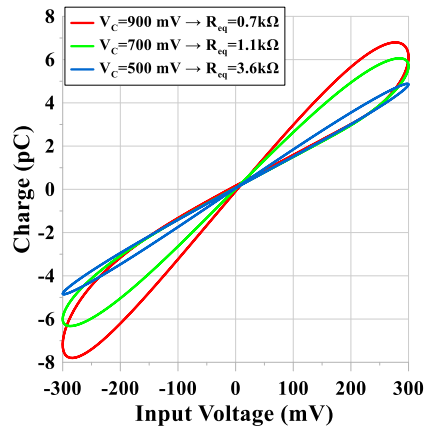
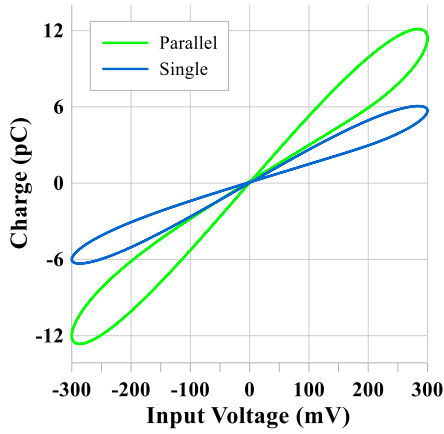
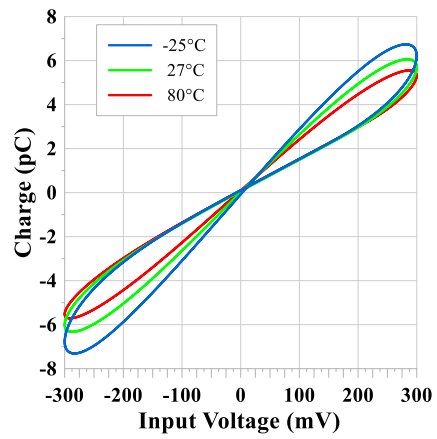


Figure 5. Hysteresis loops obtained at different resistance values.

So as to survey connectivity of memcapacitor emulator, different connections such as single and parallel of memcapacitor are depicted in Figure 6. When the hysteresis loops given in Figure 6 are examined, it is clearly observed that the slopes of hysteresis loops are altered depending on different connections. For instance, its slope increases in parallel connection, in other word memcapacitance enhances.

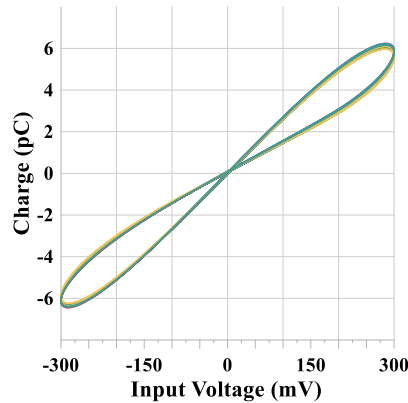


**Figure 6.** The hysteresis loops resulting from the single and parallel connection of the proposed memcapacitor emulator circuit.



**Figure 7.** Hysteresis loops obtained at -25°C, 27°C and 80°C.

The temperature analysis of the proposed circuit was made at temperatures of -25°C, 27°C and 80°C. When examining Figure 7, it is seen that as the temperature increases, the hysteresis loop becomes linear but maintains its characteristic features. While performing Monte Carlo Analysis of the proposed emulator circuit, the  $W$  and  $L$  values of  $M_{R1}$ ,  $M_{R2}$  MOSFETs used in the electronic resistor circuit and the tolerance values of capacitance values of  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  capacitors were determined as 5%. Examining the hysteresis loops obtained after 50 iterations as shown in Figure 8 revealed that the circuit didn't change significantly at the 5% tolerance value.



**Figure 8.** Monte Carlo analysis result obtained as a result of 50 iterations with 5% tolerance.

#### 4. CONCLUSION

In this study, a charge-controlled memcapacitor emulator circuit based on FDCCII is presented. The proposed emulator circuit is simulated in the LTspice program. When the relationship between the input voltage and the charge is examined, it is seen that the closed hysteresis loop is close to the origin and has a symmetrical structure. In the hysteresis loops obtained at different input frequencies, it was observed that the hysteresis loops became linear as the frequency increased. The input voltage and frequency of the emulator circuit are kept constant and connected in a single and parallel configuration in the simulation. When the hysteresis loops obtained were examined, it was observed that the width of the hysteresis loop increased approximately twice as expected when the memcapacitor emulator circuits were connected in parallel. The circuit was tested at temperatures of -25°C, 27°C, and 80°C in order to analyze the effect of temperature on the circuit. When the obtained data were examined, it was seen that the circuit became linear as the temperature increased, but kept its general characteristic structure. After running 50 iterations of a Monte Carlo analysis on the circuit with a tolerance value of 5%, it was observed that while the circuit element values changed the amplitude of the hysteresis loop slightly, the loop's characteristics remained the same.

#### Appendix

The  $f(x)$  and  $g(x)$  are defined as in Equation (16).

$$V_{ZB}'(t) + \lambda q(t)V_{ZB}(t) = \lambda q(t) \tag{16}$$

$f(x)$                        $g(x)$

The general solution of the inhomogeneous differential equation obtained in equation (16) is as in equation (17).

$$V_{ZB}(t) = e^{-\int f(x)dx} \left[ \int e^{\int f(x)dx} g(x)dx + C \right] \quad (17)$$

When the expressions  $f(x)$  and  $g(x)$  defined in equation (16) are replaced in equation (17) and the equation is arranged, the expression  $V_{ZB}(t)$  is obtained as in equation (18).

$$V_{ZB}(t) = \frac{\lambda}{\lambda} + C e^{-\lambda \int q(t)dt} \quad (18)$$

To find the constant value of  $C$ , if the initial values are assumed to be zero and equation (18) is substituted in equation (11), the expression  $C$  is obtained as in equation (19).

$$C = -\frac{\lambda}{\lambda} e^{\lambda \int q(0)dt} \Rightarrow C = -1 \quad (19)$$

If the constant  $C$  and the expression  $\lambda$  are substituted in equation (18), the expression  $V_{ZB}(t)$  becomes as in equation (20).

$$V_{ZB}(t) = 1 - e^{-\frac{1}{R_{eq}C_2C_3} \int q(t)dt} \quad (20)$$

## Acknowledgment

This work was supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) under Project 119E458.

## Author Contributions

The authors contributed equally to the study.

## Conflict of Interest

The authors of the article declare that there is no conflict of interest between them.

## REFERENCES

- [1] L.O. Chua “Memristor—The Missing Circuit Element”, IEEE Transactions on Circuit Theory, vol. 18, no. 5, pp. 507–519, 1971.
- [2] D.B. Strukov, G.S. Snider, D.R. Stewart, and R.S. Williams “The missing memristor found”, Nature, vol. 453, no. 7191, pp. 80–83, 2008.
- [3] D.S. Yu, Y. Liang, H.H.C. Iu, and Y.-H. Hu “Mutator for transferring a memristor emulator into meminductive and memcapacitive circuits”, Chinese Physics B, vol. 23, no. 7, p. 070702, 2014.
- [4] D.S. Yu, Y. Liang, H. Chen, and H.H.C. Iu “Design of a practical memcapacitor emulator without grounded restriction”, IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, vol. 60, no. 4, pp. 207–211, 2013.
- [5] X.Y. Wang, A.L. Fitch, H.H.C. Iu, and W.G. Qi “Design of a memcapacitor emulator based on a memristor”, Phys Lett A, vol. 376, no. 4, pp. 394–399, Jan. 2012.
- [6] Y.V. Pershin and M. Di Ventra “Memristive circuits simulate memcapacitors and meminductors”, Electron Lett, vol. 46, no. 7, p. 517, 2010.
- [7] D. Biolek and V. Biolkova “Mutator for transforming memristor into memcapacitor”, Electron Lett, vol. 46, no. 21, p. 1428, 2010.
- [8] D. Yu, Y. Liang, H.H.C. Iu, and L.O. Chua “A universal mutator for transformations among memristor, memcapacitor, and meminductor”, IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, vol. 61, no. 10, pp. 758–762, Oct. 2014.
- [9] F.J. Romero, D.P. Morales, A. Godoy, F.G. Ruiz, I. M. Tienda, A. Ohata, N. Rodriguez “Memcapacitor emulator based on the Miller effect”, International Journal of Circuit Theory and Applications, vol. 47, no. 4, pp. 572–579, Apr. 2019.
- [10] Z.G. Çam Taşkıran, M. Sağbaş, U.E. Ayten, and H. Sedef “A new universal mutator circuit for memcapacitor and meminductor elements”, AEU - International Journal of Electronics and Communications, vol. 119, 2020.
- [11] A. Singh and S.K. Rai “VDCC-Based Memcapacitor/Meminductor Emulator and Its Application in Adaptive Learning Circuit”, Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Electrical Engineering, vol. 45, no. 4, pp. 1151–1163, Dec. 2021.
- [12] F. Wang and F. Wang “Floating Memcapacitor Based on Known Memristor and Its Dynamic Behaviors”, IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, vol. 69, no. 12, pp. 5134–5138, 2022.
- [13] A. Sinha, B. Aggarwal, S.K. Rai, and S. Gautam “Current Conveyor Transconductance Amplifier (CCTA) based Grounded Memcapacitor Emulator”, International Journal of Electrical and Electronics Research, vol. 10, no. 3, pp. 442–446, 2022.
- [14] M.P. Sah, C. Yang, R.K. Budhathoki, H. Kim, and H. J. Yoo “Implementation of a memcapacitor emulator



- with off-the-shelf devices”, *Elektronika ir Elektrotechnika*, vol. 19, no. 8, pp. 54–58, 2013.
- [15] Q. Zhao, C. Wang, and X. Zhang “A universal emulator for memristor, memcapacitor, and meminductor and its chaotic circuit”, *Chaos*, vol. 29, no. 1, p. 013141, 2019.
- [16] P.K. Sharma, R.K. Ranjan, F. Khateb, and M. Kumngern “Charged controlled MEM-element emulator and its application in a chaotic system”, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 171397–171407, 2020.
- [17] D. Yu, X. Zhao, T. Sun, H.H.C. Iu, and T. Fernando “A simple floating mutator for emulating memristor, memcapacitor, and meminductor”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 67, no. 7, pp. 1334–1338, 2020.
- [18] M.E. Fouda and A.G. Radwan “Charge controlled memristor-less memcapacitor emulator”, *Electron Lett*, vol. 48, no. 23, p. 1454, 2012.
- [19] A.L. Fitch, H.H.C. Iu, and D.S. Yu “Chaos in a memcapacitor based circuit”, *Proceedings - IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, no. 3, pp. 482–485, 2014.
- [20] F. Yuan and Y. Li “A chaotic circuit constructed by a memristor, a memcapacitor and a meminductor”, *Chaos*, vol. 29, no. 10, 2019.
- [21] A. Yesil and Y. Babacan “Electronically Controllable Memcapacitor Circuit with Experimental Results”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 68, no. 4, pp. 1443–1447, 2021.
- [22] N. Raj, R.K. Ranjan, and A. James “Chua’s Oscillator With OTA Based Memcapacitor Emulator”, *IEEE Trans Nanotechnol*, vol. 21, pp. 213–218, 2022.
- [23] F. Yuan, Y. Li, G. Wang, G. Dou, and G. Chen “Complex Dynamics in a Memcapacitor-Based Circuit”, *Entropy*, vol. 21, no. 2, p. 188, Feb. 2019.
- [24] M. Konal and F. Kacar “Electronically Tunable Memcapacitor Emulator Based on Operational Transconductance Amplifiers”, *Journal of Circuits, Systems and Computers*, vol. 30, no. 05, p. 2150082, Apr. 2021.
- [25] D. Biolek, M. di Ventra, and Y.V. Pershin “Reliable SPICE simulations of memristors, memcapacitors and meminductors”, *Radioengineering*, vol. 22, no. 4, pp. 945–968, 2013.
- [26] M. Di Ventra, Y.V. Pershin, and L.O. Chua “Circuit Elements With Memory: Memristors, Memcapacitors, and Meminductors”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 10, pp. 1717–1724, 2009.
- [27] A.A. El-Adawy, A.M. Soliman, and H.O. Elwan “A novel fully differential current conveyor and applications for analog VLSI”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing*, vol. 47, no. 4, pp. 306–313, 2000.



## Mikroskopik Kan Hücre Görüntülerinin Güncel Derin Öğrenme Mimarileri ile Bölütlemesi

### Segmentation of Microscopic Blood Cell Images with Current Deep Learning Architectures

<sup>1</sup>Murat TOPTAŞ , <sup>2</sup>Davut HANBAY 

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

<sup>2</sup>İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Battalgazi/Malatya, Türkiye

<sup>1</sup>mtoptas@bandirma.edu.tr, <sup>2</sup>davut.hanbay@inonu.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 7 March 2023

Accepted : 10 April 2023

##### Keywords:

Cell, Segmentation, U-Net, DeepLabv3+, FCN

#### ABSTRACT

Blood cells are the basic components of blood, and they play an important role in the healthy functioning of the human body. The shape, number, size, and other characteristics of blood cells are dependent on various factors, and changes in these properties can be associated with many diseases. Therefore, the detection, classification, and segmentation of blood cells have become a very important issue in the field of health. With the high-performance effect of deep learning architectures on medical images, the number of automatic diagnosis systems on these blood cells has increased. In this article, cell segmentation was performed on microscopic blood cell images using DeepLabv3+, U-Net, and FCN architectures. The best accuracy result was the accuracy with a score of 0.9575 in the DeepLabv3+ architecture. The experimental results support the robustness of the proposed method.

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

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 7 Mart 2023

Kabul : 10 Nisan 2023

##### Anahtar Kelimeler:

Hücre, Bölütleme, U-Net, DeepLabv3+, FCN

#### ÖZET

Kan hücreleri, kanın temel bileşenleridir. Bu bileşenler insan vücudunun sağlıklı bir şekilde çalışmasında önemli rol oynarlar. Kan hücrelerinin şekli, sayısı, boyutu ve diğer özellikleri çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu özelliklerin değişimleri birçok hastalıkla ilişkilendirilebilmektedir. Bu nedenle, kan hücrelerinin tespit edilmesi, sınıflandırılması ve bölütlenmesi sağlık alanında çok önemli bir konu haline gelmiştir. Derin öğrenme mimarilerinin medikal görüntüler üzerinde göstermiş olduğu yüksek performans etkisiyle bu kan hücreleri üzerinde otomatik tanı sistemlerinin sayısı artmıştır. Bu makalede, DeepLabv3+, U-Net ve FCN mimarileri ile mikroskopik kan hücresi görüntüleri üzerinde hücre bölütlemesi yapılmıştır. En iyi doğruluk sonucuna 0.9575 ile DeepLabv3+ mimarisinde ulaşılmıştır. Deneysel sonuçlar, önerilen yöntemin sağlamlığını destekler niteliktedir.

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

## 1. GİRİŞ

Kan, yaşam işlevlerini yerine getiren önemli bir sıvıdır. Bu sıvının içerisinde üç bileşen vardır. Bu bileşenler beyaz kan hücreleri (WBCs), kırmızı kan hücreleri (RBCs) ve trombositlerdir. Kan içerisinde bulunan bu bileşenler, insan yaşamını ve sağlığını olumlu ya da olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle, bu bileşenlerin şekli, sayısı ve türü araştırmacılar tarafından her zaman popüler bir konu olmuştur. Özellikle tıp alanında anemi gibi tedavi edilmesi kolay hastalıklar ve lösemi gibi tedavisi kolay olmayan hastalıklar üzerinde kan bileşenlerinin etkisi çok büyüktür. Bu bileşenlerin anatomik ve morfolojik yapılarını incelemek için mikroskop kullanılmaktadır. Mikroskop kullanılarak alınan bu görüntüler üzerinde insan tecrübesine dayalı yapılan manuel işlemler can sıkıcı ve zaman alıcıdır. İnsan kaynaklı hataları en aza indirmek, zaman kazanmak ve daha fazla örnekle karşılaşmak için bu alanda bilgisayar destekli sistemlerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu sistemler, görüntü bölütleme yöntemleri ve görüntü sınıflandırma yöntemleri kullanarak mikroskobik kan görüntülerinden anlamlı bilgiler elde edebilmektedir. Görüntü bölütleme, bir görüntüyü birden çok nesneye ayırma işlemidir. Bölütleme işlemi, birçok tıbbi uygulama alanında görülmektedir [1,2]. Hücre bölütleme ise bir görüntüdeki her bir hücrenin bölütlenmesini gerçekleştirerek tümörlerin veya diğer patolojilerin belirlenmesini sağlamaktadır. Kan hücreleri, pek çok belirsizlik içerir. Kan hücre görüntülerinin arka planı ile nesnelerin arasındaki kontrast bu belirsizliğe sebep olmaktadır. Aslında, kan hücre görüntülerinin gri seviye dağılımları deşışkendir ve bu durum görüntülerin bulanık görülmesine sebep olmaktadır. Bu nedenle, bu bulanık görüntülerin bölütlenmesi kolay değildir [3]. Diğer bir zorluk ise, hücrelerin karmaşık oluşumu ve üst üste binmesidir [4]. Depto ve arkadaşları [5] bilgisayar destekli yapılan hücre segmentasyonu yöntemlerini iki başlık altında incelemiştir. Bunların ilki, öğrenmeye dayalı olmayan yöntemlerdir [6-8]. Diğer başlık ise, öğrenmeye dayalı yöntemlerdir [9-11]. Huang ve arkadaşları [12], karma evrişim bloklarında dayalı bir U-Net mimarisi geliştirmişlerdir. Bu mimari, hücre görüntülerini bölütlemek için önerilmiştir. Orijinal U-Net mimarisi, paralel olarak istiflenmiş farklı boyutlardaki bir evrişim bloğu ile deşıştırılmıştır. Raza ve arkadaşları [13], floresan mikroskopi ve histoloji görüntülerinde çekirdekleri, bezleri ve hücreleri segmentlere ayırmak için bir evrişimli sinir ağı (CNN) önermişlerdir. Önerilen CNN mimarisi alt örnekleme yolunda ek katmanlara sahiptir. Böylelikle, bağlamsal bilgilerin korunması amaçlanmıştır. Önerilen ağ mimarisi, çıktıyı çoklu çözünürlüklerde yorumlayan bir model olarak tasarlanmıştır. Bu mimaride, model parametrelerini öğrenmek için, alt örnekleme yolundaki model çoklu giriş görüntü çözünürlüklerinde eğitilmiştir. Sadanandan ve arkadaşları [14], florasan boyama yöntemi ile boyanmış hücrelerin bölütlenmesini yapan bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntem, derin evrişimsel sinir ağlarına dayanır. İlk önce, hücrelerin parlak alan görüntüleri yakalanır. Ardından çekirdekler, sitoplazmik bölgeler ve hücreler floresan işaretçiler ile boyanır. Floresan kanallardan gelen bilgilere göre hücreler segmentlere ayrılır. Jiang ve arkadaşları [15], CNN tabanlı iki aşamalı bir bölütleme yöntemi önermişlerdir. Bu yöntem ile bitki hücrelerinin bölütlenmesi sağlanmıştır. İlk aşamada, havza algoritması kullanılmıştır. Böylelikle, bir ön bölütleme işlemi gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada, parçalanmış hücre adayları evrişimsel sinir ağları kullanılarak orijinal görüntü üzerinde net sınırların belirlenmesini sağlamıştır. Zhang ve arkadaşları [16], mikro-akışkan çiplerde hücreleri bölümlere ayırmak için U-Net++ tabanlı bir derin sinir ağı geliştirmişlerdir. Önerilen yöntem dört aşamadan oluşur. İlk aşamada, hücre görüntüleri bir ön işlemden geçirilmiştir. İkinci aşamada, derin sinir ağı ile, yüksek kaliteli hücre duvarları belirlenmiştir. Üçüncü aşamada, bu hücre duvarları kullanılarak iç büyük nokta tespiti sağlanmıştır. Bu aşamada amaç, temas hücrelerini bölümlere ayırmaktır. Son aşamada ise tespit edilen iç büyük noktaların belirli bir kurala göre çiftler oluşturmak üzere eşleştirilmesidir. Nishimura ve arkadaşları [17], zayıf denetimli bir hücre örneği segmentasyonu yöntemi önermişlerdir. Önerilen yöntem iki aşamadan oluşur. İlk aşama, hücre algılama aşamasıdır. Bu aşamada, CNN mimarisini kullanarak hücre görüntüsünün algılanması sağlanmıştır. Ardından, algılanan hücre merkezlerinin kaba merkez konumu tahmin edilmiştir. İkinci aşama, geriye yayılım aşamasıdır. Bu aşamada, algılama ağından kaba hücre şekilleri tespit edilmiştir. Zhao ve arkadaşları [18], U şeklinde bir yapıya sahip bir derin öğrenme mimarisi önermişlerdir. Önerilen mimari, hafif özellikli dikkat ağıdır (LFANet). Bu mimaride, servikal hücre görüntüleri bir ön işlemden geçirilmiştir. Ön işlenmiş görüntüler, üzerinden veri çoğaltma işlemi yapılmış ve görüntüler artırılmıştır. Bu görüntüler, önerilen LFANet mimarisine verilmiştir. Sonuç olarak, bölütlenmiş hücre görüntüleri elde edilir. Bölütlenmiş hücre görüntülerinin performans değerlendirmesi için bir son işlem yapılır ve görüntüler görselleştirilir.

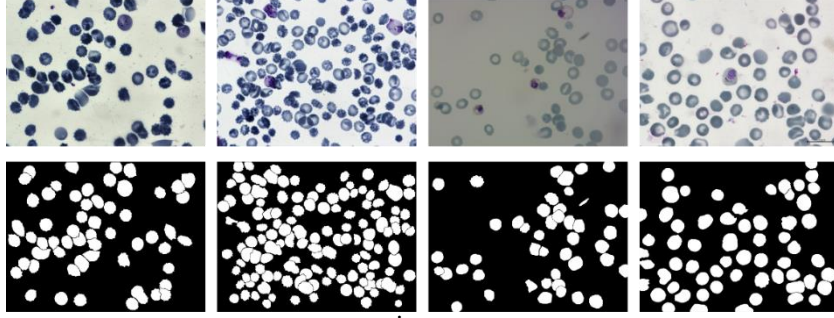
Mikroskobik hücre görüntülerinin incelenmesi üzerine yukarıda birçok uygulamadan bahsedilmiştir. Bu uygulamalar başarılı sonuçlar üretse de bu alanda yapılan çalışmalar sürekli artmaktadır. Çünkü sürekli yeni hücre görüntüleri yayınlanmakta ve teknolojik ilerlemeler devam etmektedir. Bu durum sağlam, güvenilir ve hızlı uygulama geliştirme ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Bu makalede, yeni yayınlanmış ve halka açık olarak sunulmuş mikroskobik hücre görüntülerinden oluşan bir veri seti kullanılarak hücre bölütlemesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Bölütleme işlemi için güncel bir derin öğrenme mimarisi olan DeepLabv3+ mimarisi kullanılmıştır. Bu mimari nesne sınırlarını kodlayıcı ve kod çözücü yapısından dolayı net bir şekilde ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle hücre sınırlarını daha net belirleyebilmek için bu makalede kullanılmıştır. Bu mimariden alınan sonuçlara göre ortalama doğruluk oranı 0.9575 olarak hesaplanmıştır.

Makalenin geri kalanı şu şekilde organize edilmiştir: Bölüm 2’de, önerilen yöntemin arka planında kullanılan materyallerden ve yöntemlerden bahsedilmiştir. Bölüm 3’de, önerilen yöntemin deneysel çalışmaları ve sonuçları sunulmuştur. Bölüm 4’de, önerilen yöntemin çıkarımı yapılmıştır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Veri Seti

Depo ve arkadaşları [5] tarafından 2021 yılında mikroskobik kan hücrelerinden oluşan bir veri seti halka açık olarak sunulmuştur. Bu veri seti BBBC041Seg olarak adlandırılmaktadır. Toplamda 1328 adet görüntü bulunmaktadır. Bu veri setinde 1328 adet orijinal kan hücre görüntüsü ve 1328 adet gerçek zemin görüntüsü vardır. Bu görüntülerin bir kısmı 1600x1200x3 piksel boyutunda olup bir kısmı ise 1944x1383x3 piksel boyutundadır. Veri seti görüntülerin hepsi RGB renk uzayındadır. Veri setine ait bazı görüntüler Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Veri setindeki bazı görüntüler. İlk satır orijinal veri seti görüntülerini, ikinci satır bu görüntülerin gerçek zemin görüntülerini temsil etmektedir.

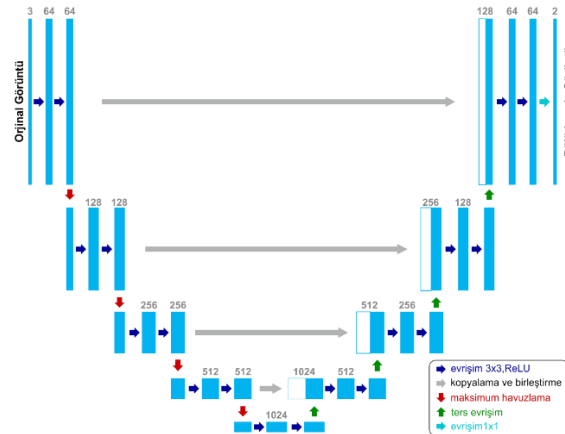
Veri seti her eğitimde rastgele olarak eğitim ve test verilerine bölünmüştür. Her eğitim verisi daha sonra kendi içinde eğitim ve doğrulama olarak tekrar bölünmüştür. Tablo 1, veri seti görüntülerinin eğitim, test ve doğrulama için kullanılma oranlarını ve sayılarını içermektedir.

Tablo 1. Veri setinde bulunan görüntü sayıları.

|                | Eğitim (Doğrulama) | Test | Toplam |
|----------------|--------------------|------|--------|
| Görüntü Sayısı | 1063 (106)         | 265  | 1328   |
| Oran           | %80                | %20  | %100   |

### 2.2. U-Net Mimarisi

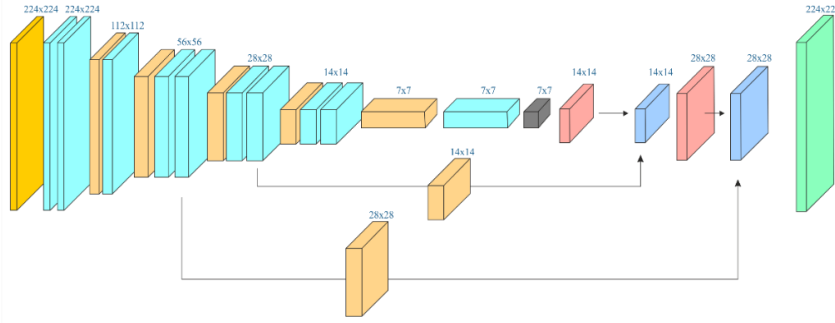
U-Net 2015 yılında bölütleme için önerilmiş bir derin öğrenme mimarisidir [19]. Bu mimarinin ağ yapısında, kodlayıcı ve kod çözücü yapılar bulunmakta ve şekilsel olarak U harfini anımsatmaktadır. U-Net mimarisinin görsel hali Şekil 2’de sunulmuştur. Şekil 2 incelendiğinde, mimarinin sol tarafı kodlayıcı kısmını, sağ tarafı ise kod çözücü kısmını temsil etmektedir. Mimarinin kodlayıcı kısımda 3x3 piksel boyutunda evrişim katmanı bulunmaktadır. Her evrişim katmanını doğrultulmuş doğrusal birim (ReLU) aktivasyon fonksiyonu takip etmektedir. Ayrıca, her iki evrişim katmanından sonra 2x2 piksel boyutunda maksimum havuzlama katmanı bulunmaktadır. Kod çözücü tarafta ise öncelikle havuzlama katmanında bulunan azaltma işleminin tersi uygulanır. Bu işlem ters evrişim (up-convolution) olarak isimlendirilmektedir. Her bir ters evrişim katmanından sonra 3x3 piksel boyutunda evrişim işlemi hemen ardından da ReLU aktivasyon fonksiyonu gelmektedir. Son katmanda ise 1x1 piksel boyutunda evrişim katmanı uygulanmıştır. U-Net mimarisinde tüm özellik haritalarını kodlayıcıdan kod çözücüye aktarır ve kod çözücünden gelen ilgili özellik haritasıyla birleştirir. Bu durum U-Net mimarisini daha büyük bir mimari yapar ve daha fazla bellek ihtiyacını ortaya çıkarır. Bellek ihtiyacı fazla olmasına rağmen diğer mimarilere göre daha yüksek sonuçlar verdiği için avantajlı bir mimaridir.



Şekil 2. U-Net mimarisinin yapısı.

### 2.3. Tamamen Bağlı Ağlar

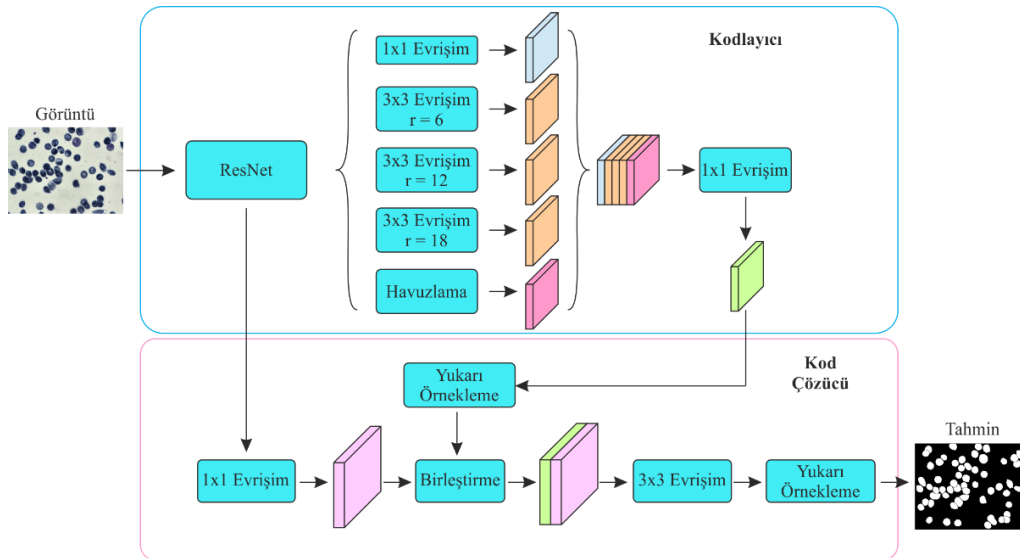
Tamamen Bağlı Ağlar (FCN), 2015 yılında [20] semantik segmentasyon için önerilmiş bir derin ağ mimarisidir. Bir görüntü CNN mimarisine girdi olarak verildikten sonra belli katmanlardan geçirilerek tam bağlı katmana iletilmektedir. Bu süreçte, girdi görüntüsü uzamsal bilgi kaybına uğramaktadır. Bu yaşanan bilgi kaybı, yöntemlerin başarısı üzerinde olumsuz etkiler oluşturduğu için FCN mimarileri önerilmiştir. FCN mimarisi, bölütlemeden görevli pikselden piksele evrişimli bir ağıdır. Alt örnekleme ve yukarı örnekleme olmak üzere iki temel bileşenden oluşur. Alt örnekleme bileşeni, evrişim katmanı ve havuzlama katmanını içerir. Yukarı örnekleme bileşeni ise, ters evrişim katmanlarını içerir. Alt örnekleme ile küçülen özellik haritalarının boyutu, yukarı örnekleme ile yükseltilir. Böylece, girdi ve çıktı görüntülerinin de boyutları eşitlenmiş olur. Şekil 3'de FCN mimarisini gösteren bir örnek verilmiştir.



Şekil 3. Görüntü bölütleme için bir FCN çerçevesi.

### 2.4. DeepLabv3+

DeepLab serisi, semantik bölütleme işlemleri için ortaya çıkarılmıştır. İlk çıkan seri DeepLabv1 [21] modelidir. Bu model, VGG16 ağına dayanarak tasarlanmıştır ve koşullu rastgele alan (conditional random field-CRF) kullanmıştır. Ancak, çok ölçekli segmentasyonu nesnelere için işlem yeteneği zayıf kalmıştır. Bunun üzerine DeepLabv2 [22] modeli ortaya çıkmıştır. Bu modelde, ResNet-101 mimarisi ile Atrous Mekansal Piramit Havuzu (Atrous Spatial Pyramid Pooling - ASPP) birlikte kullanılmıştır. ASPP mimarisi, bilgi kaybını önlemek için kullanılmıştır. Daha sonra, ASPP'yi geliştirerek DeepLabv3 [23] modeli çıkarılmıştır. Bu model, ağı derinleştirmek için delik evrişimi kullanmış ve CRF yöntemini kaldırmıştır. DeepLabv3+ [24] serisi ise, kullanılan ResNet-101 mimarisinin yerine Xception mimarisini kullanmıştır. DeepLabv3+, nesne sınırlarını net bir şekilde elde etmek için bir kodlayıcı ve kod çözücünden oluşur. Kodlayıcı kısmında, derin ayırma evrişimi ve ASPP katmanları bulunur. Böylece, özellik kaybını azaltılır ve daha yüksek seviyeli anlamsal bilgiler yakalanmış olur. Kod çözücü kısmında ise kodlayıcı kısmında çıkarılan özellik haritası üzerinde, düşük seviyeli özellikler birleştirilir ve yukarı örnekleme gerçekleştirilir. Ardından alt örnekleme sırasında kaybolan uzamsal bilgiler tekrar kurtarılır. DeepLabv3+ mimarisini anlatan bir görsel Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 4. DeepLabv3+ mimarisi.



### 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLAR

#### 3.1. Çalışma Ortamı

Önerilen yöntem, Windows 10 işletim sistemi üzerinde, 32 GB RAM kullanılarak, AMD Ryzen3 3100 işlemci, NVIDIA GeForce RTX 2080 Ti ekran kartı ile Matlab yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

#### 3.2. Performans Değerlendirme

Kan hücrelerinin bölütleme yöntem başarısını test etmek için performans ölçütlerine ihtiyaç duyulmuştur. Performans ölçütleri, önerilen yöntemle diğer son teknolojik yöntemlerin başarı oranını karşılaştırmak için kullanılan metriklerdir. Bu metriklerin bilinmesi için dört temel parametrenin bilinmesi gerekir. Bu parametreler, doğru pozitif (TP), doğru negatif (TN), yanlış pozitif (FP) ve yanlış negatif (FN)'dir. Bu parametreler, kullanılarak hesaplanan performans ölçütleri Tablo 2'de sunulmuştur.

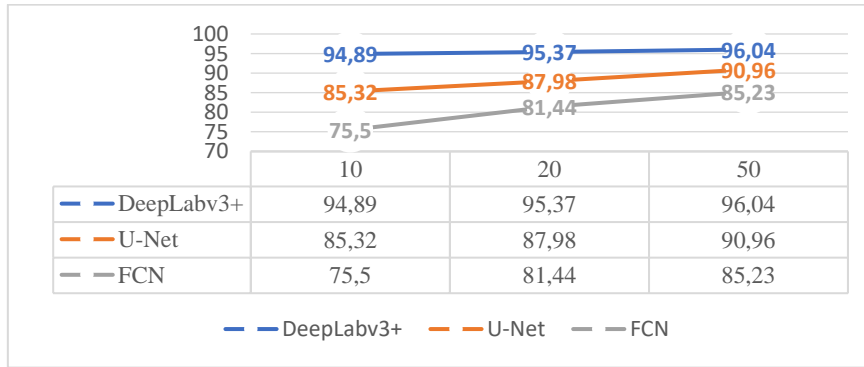
**Tablo 2.** Performans metrikleri.

| Metrik            | Eşitlik                                     |
|-------------------|---|
| Ortalama Doğruluk | $Acc = \frac{TP + TN}{(TP + TN + FP + FN)}$ |
| Jaccard           | $J(A, B) = \frac{TP}{TP + FP + FN}$         |
| DICE              | $D(A, B) = \frac{2 * TP}{2TP + FP + FN}$    |

#### 3.3. Deneysel Çalışma

Önerilen yöntemde, 2021 yılında halka açık olarak sunulan mikroskobik kan hücre görüntülerinden oluşan BBBC041Seg isimli veri seti kullanılmıştır. Bu veri seti üzerinde üç farklı derin öğrenme mimarisini kullanarak hücre bölütlemesi gerçekleştirilmiştir. Hücre bölütlemesinin öncesinde ve sonrasında herhangi bir ek işlem yapılmamıştır. BBBC041Seg veri seti görüntüleri U-Net, FCN ve DepLabv3+ mimarileri kullanılarak bölütleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan mimarilerin öğrenme oranı iki farklı şekilde denetlenmiştir. İlk olarak, öğrenme oranı 0,001'den başlatılmış ve her 10 epokta 0,1 ile çarpılarak azaltılmıştır. İkinci olarak, sabit öğrenme oranı da 0,001 olarak kabul edilmiş ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Momentum hiper-parametresi 0,9 olarak belirlenmiş ve görüntüler 32'lik gruplara ayrılarak her epokta karıştırılmıştır.

Mikroskobik kan hücrelerini bölütlemek için kullanılan derin ağ mimarileri 10, 20 ve 50 epokta çalıştırılmıştır. Her mimarinin sabit öğrenme oranı ile aldığı Dice benzerlik ölçütünün sonucu Şekil 5'de görsel olarak sunulmuştur. Bu görsele göre, en iyi sonuç 50 epokta DepLabv3+ mimarisi ile elde edilmiştir.



**Şekil 5.** Epok değerleri için elde edilen Dice benzerlik indeks sonucu.

Ayrıca öğrenme oranının etkisini görmek için 0,001 ile başlatılan öğrenme oranı her 10 epokta 0,1 ile çarpılarak üç derin ağ mimarisinin veri seti üzerindeki bölütleme etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda sabit öğrenme oranının daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bu deneye maksimum 50 epok için test edilmiş ve elde edilen sayısal veriler Tablo 3'de sunulmuştur.

**Tablo 3.** Sabit ve değişken öğrenme oranının sonuçlar üzerinde etkisi.

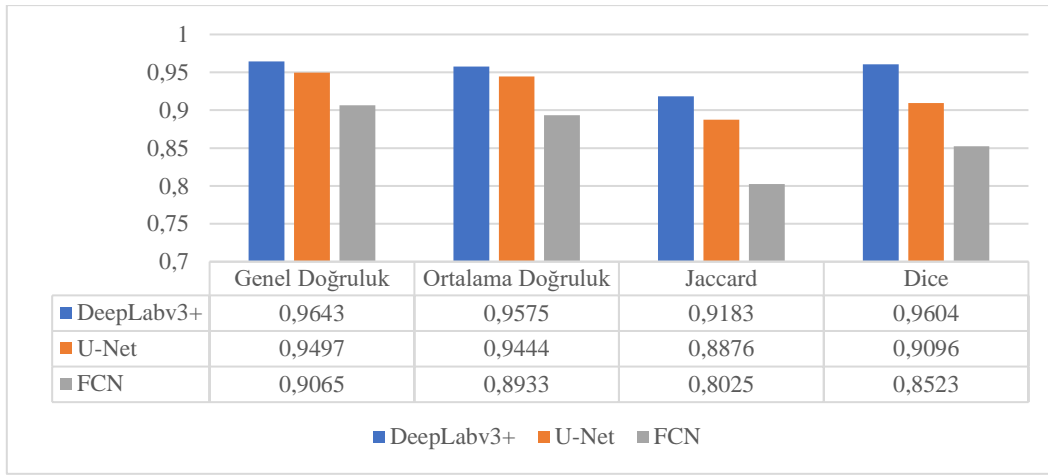
| Model      | Öğrenme Oranı | Genel Doğruluk | Ortalama Doğruluk | Jaccard | Dice   |
|------------|---------------|----------------|-------------------|---------|--------|
| DeepLabv3+ | Değişken      | 0.9531         | 0.9428            | 0.8957  | 0.9429 |
|            | Sabit         | 0.9643         | 0.9575            | 0.9183  | 0.9604 |
| U-Net      | Değişken      | 0.9233         | 0.9105            | 0.8334  | 0.8736 |
|            | Sabit         | 0.9497         | 0.9444            | 0.8876  | 0.9096 |
| FCN        | Değişken      | 0.8965         | 0.8723            | 0.7893  | 0.8245 |
|            | Sabit         | 0.9065         | 0.8933            | 0.8025  | 0.8523 |

Sabit öğrenme oranı ile test edilen DeepLabv3+, U-Net ve FCN mimarilerin üç epokta geçirdiği süreler Tablo 4’de sunulmuştur. Buradaki verilere göre en yavaş çalışan mimari her zaman FCN mimarisi olurken en hızlı çalışan mimari ise DeepLabv3+ mimarisi olmuştur.

**Tablo 4.** Farklı epok değerlerde eğitim süresi.

| Model      | Süre (sn.) |         |         |
|------------|------------|---------|---------|
|            | 10 epok    | 20 epok | 50 epok |
| DeepLabv3+ | 350        | 695     | 1661    |
| U-Net      | 475        | 1101    | 2749    |
| FCN        | 1410       | 2673    | 6948    |

Literatürde bu veri seti üzerinde işlem yapan tek çalışma veri setini sunan makaleye aittir [5]. Bu makalede, yazarlar en iyi sonucu TernausNet mimarisinde almıştır. Bu mimaride Jaccard indeksi 87.65 ve Dice benzerlik indeksi 93.38’dir. Bu makale de veri setinin test edildiği derin öğrenme mimarilerine ait deneysel sonuçlar Şekil 6’da sunulmaktadır. Şekil 6 incelendiğinde en iyi başarıyı gösteren derin öğrenme mimarisinin DeepLabv3+ olduğu gözükmektedir. Bu mimari diğer test edilen iki mimariye göre her performans ölçütünde en yüksek başarıyı sergilemiştir. Bu başarı, DeepLabv3+ mimarisinin mikroskobik kan hücresi görüntülerinde kullanılabileceğinin bir kanıtı niteliğindedir.



**Şekil 6.** Derin ağ mimarilerinin performans sonuçları.

#### 4. ÇIKARIM

Derin ağ mimarilerinin medikal görüntü veri setleri üzerinde çok yüksek bir performansı bulunmaktadır. Bu nedenle bu mimariler, mikroskobik kan hücresi görüntülerinin bölütlenmesinde de kullanılmıştır. Ancak, bu mimarilerin hem hiper parametreleri hem de mimari türleri performans sonucunu doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada, sağlık sektörüne katkı sağlaması amacıyla derin ağ mimarilerinin üç türü ile kan hücresi bölütleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Farklı öğrenme oranı ve farklı epok değerleri mimariler üzerindeki etkisi incelenmiştir. DeepLabv3+, U-Net ve FCN mimarileri, bu çalışmada kullanılan mimariler olup halka açık olarak sunulan bir veri seti üzerinde test edilmiştir. Bu veri seti araştırmalarımız doğrultusunda veri setini yayınlayan makale dışında test edilmemiştir. Bu çalışma, yeni bir veri seti olan BBBC041Seg veri seti üzerinde deneyler yaparak veri setinin kıyaslanabilirliğini sağladığı içinde önemlidir. Üç mimari içerisinde 0.9575 doğruluk oranı ile en iyi doğruluk değerine sahip ve 1661 saniye çalışma süresiyle en kısa çalışma süresine sahip mimari DeepLabv3+ mimarisi olmuştur. Gelecekte, mikroskobik kan hücrelerinin türlerine göre (kırmızı kan hücresi, beyaz kan hücresi veya trombosit) sınıflandırılması ve bölütlenmesi hedeflenmektedir.

#### Yazar Katkıları

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamıştır.

#### Çıkar Çatışması

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

#### KAYNAKÇA

[1] B. Toptaş and D. Hanbay “Retinal blood vessel segmentation using pixel-based feature vector”,

Biomed Signal Process Control, vol. 70, p. 103053, 2021.

- [2] N. Şahin, N. Alpaslan, and D. Hanbay “Robust optimization of SegNet hyperparameters for skin lesion segmentation”, *Multimed Tools Appl*, vol. 81, no. 25, pp. 36031–36051, 2022.
- [3] D.R. Nayak, N. Padhy, and B.K. Swain “Blood cell image segmentation using modified fuzzy divergence with morphological transforms”, *Mater Today Proc*, vol. 37, pp. 2708–2718, 2021.
- [4] D. Kumar et al. “Automatic Detection of White Blood Cancer From Bone Marrow Microscopic Images Using Convolutional Neural Networks”, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 142521–142531, 2020.
- [5] D.S. Depto et al. “Automatic segmentation of blood cells from microscopic slides: A comparative analysis”, *Tissue Cell*, vol. 73, p. 101653, 2021.
- [6] S.S. Savkare, A.S. Narote, and S.P. Narote “Automatic Blood Cell Segmentation Using K-Mean Clustering from Microscopic Thin Blood Images,” in *Proceedings of the Third International Symposium on Computer Vision and the Internet*, pp. 8–11, 2016.
- [7] K. Nawa, E. Suryani, and H. Prasetyo “Dengue Virus Infected Leukocyte Classification on Microscopic Images with Image Histogram Based Support Vector Machine”, in *2019 5th International Conference on Science and Technology (ICST)*, pp. 1–5, 2019.
- [8] S. Mohapatra, D. Patra, and S. Satpathi “Image analysis of blood microscopic images for acute leukemia detection”, in *2010 International Conference on Industrial Electronics, Control and Robotics*, pp. 215–219, 2010
- [9] M.I. Razzak and S. Naz “Microscopic Blood Smear Segmentation and Classification Using Deep Contour Aware CNN and Extreme Machine Learning”, in *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, pp. 801–807, 2017
- [10] A. Arbelle and T.R. Raviv “Microscopy Cell Segmentation via Adversarial Neural Networks”, In *2018 IEEE 15th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI 2018)*, 2018.
- [11] Z. Zhou, M.M. Rahman Siddiquee, N. Tajbakhsh, and J. Liang “UNet++: A Nested U-Net Architecture for Medical Image Segmentation”, pp. 3–11, 2018.
- [12] C. Huang, C. Huang, H. Ding, and C. Liu “Segmentation of Cell Images Based on Improved Deep Learning Approach”, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 110189–110202, 2020.
- [13] S.E.A. Raza et al. “Micro-Net: A unified model for segmentation of various objects in microscopy images”, *Med Image Anal*, vol. 52, pp. 160–173, 2019.
- [14] S.K. Sadanandan, P. Ranefall, S. le Guyader, and C. Wählby “Automated Training of Deep Convolutional Neural Networks for Cell Segmentation”, *Sci Rep*, vol. 7, no. 1, p. 7860, 2017.
- [15] W. Jiang, L. Wu, S. Liu, and M. Liu “CNN-based two-stage cell segmentation improves plant cell tracking”, *Pattern Recognit Lett*, vol. 128, pp. 311–317, 2019.
- [16] Z. Zhang, Q. Li, W. Song, P. Wei, and J. Guo “A novel concavity based method for automatic segmentation of touching cells in microfluidic chips”, *Expert Syst Appl*, vol. 202, p. 117432, 2022.
- [17] K. Nishimura, C. Wang, K. Watanabe, D. Fei Elmer Ker, and R. Bise “Weakly supervised cell instance segmentation under various conditions”, *Med Image Anal*, vol. 73, Oct. 2021.
- [18] Y. Zhao, C. Fu, S. Xu, L. Cao, and H. feng Ma “LFANet: Lightweight feature attention network for abnormal cell segmentation in cervical cytology images”, *Comput Biol Med*, vol. 145, 2022.
- [19] O. Ronneberger, P. Fischer, and T. Brox “U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation”, May 2015.
- [20] J. Long, E. Shelhamer, and T. Darrell “Fully convolutional networks for semantic segmentation”, in *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 3431–3440, 2015.
- [21] L.-C. Chen, G. Papandreou, I. Kokkinos, K. Murphy, and A. L. Yuille “Semantic Image Segmentation with Deep Convolutional Nets and Fully Connected CRFs”, 2014.
- [22] L.-C. Chen, G. Papandreou, I. Kokkinos, K. Murphy, and A. L. Yuille “DeepLab: Semantic Image Segmentation with Deep Convolutional Nets, Atrous Convolution, and Fully Connected CRFs”, *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, vol. 40, no. 4, pp. 834–848, 2018.
- [23] L.-C. Chen, G. Papandreou, F. Schroff, and H. Adam, “Rethinking Atrous Convolution for Semantic Image Segmentation”, Jun. 2017.
- [24] L.-C. Chen, Y. Zhu, G. Papandreou, F. Schroff, and H. Adam “Encoder-Decoder with Atrous Separable Convolution for Semantic Image Segmentation”, 2018.



## Yenilenebilir Enerji Kaynaklarını İçeren Çok Kaynaklı Tek Alanlı Modern Güç Sistemi için Yük Frekansı Kontrolünün İyileştirilmesi

### Improving Load Frequency Control for Multi-Source Single Area Modern Power System Including Renewable Energy Sources

<sup>1</sup>Yunus BALCI , <sup>2</sup>Serhat DUMAN 

<sup>1,2</sup>Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bandırma/Balıkesir, Türkiye

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

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 9 March 2023  
Accepted : 28 March 2023

##### Keywords:

Load Frequency Control,  
Chameleon Swarm  
Algorithm, Optimization

#### ABSTRACT

Recently, with the increasing energy demand and the inclusion of renewable energy sources (RES) in electrical power systems, the importance of frequency and voltage stability in interconnected power systems is increasing. In modern power systems, high quality, continuous and stable electrical energy transmission should be provided to the consumer. During sudden load changes in power systems, the mismatch between power generation and load demand causes undesirable oscillations in the frequency between generation zones. Load frequency control (LFC) is applied to minimize frequency oscillations in the system. Controllers used to suppress oscillations in the system must operate satisfactorily in line with the desired system criteria. In this context, PID and PID+DD controller structures were used. SMA, GTO and CSA algorithms presented in the literature were used in the optimization of the controller parameters. The LFC problem was investigated in a multi-source single-site test system including thermal, hydroelectric, gas, wind and diesel energy systems. Boiler dynamics structure is used to increase the nonlinearity of the test system. As a result of the optimization process, the success of the algorithms in optimizing the controller parameters was evaluated in itself and it was seen that the CSA algorithm was more successful 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 : 9 Mart 2023  
Kabul : 28 Mart 2023

##### Anahtar Kelimeler:

Yük Frekans Kontrolü,  
Bukalemun, Sürü  
Algoritması, Optimizasyon

#### ÖZET

Son zamanlarda, artan enerji talebi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) elektrik güç sistemlerinde yer almasıyla, enterkonnekte güç sistemlerinde frekans ve gerilim kararlılığının önemi artmaktadır. Modern güç sistemlerinde tüketiciye kaliteli, sürekli ve kararlı elektrik enerjisi iletimi sağlanmalıdır. Güç sistemlerindeki ani yük değişimlerinde güç üretimi ile yük talebi arasındaki uyumsuzluk, üretim bölgeleri arasındaki frekansta istenmeyen salınımlara neden olur. Sistemdeki frekans salınımlarını minimize etmek için yük frekans kontrolü (YFK) uygulanır. Sistemdeki salınımları bastırmak için kullanılan denetleyiciler, istenen sistem kriterleri doğrultusunda tatmin edici bir şekilde çalışmalıdır. Bu bağlamda PID ve PID+DD denetleyici yapılarından yararlanılmıştır. Denetleyici parametrelerinin optimizasyonunda literatürde sunulan GBO, BSA ve BKA algoritmaları kullanılmıştır. YFK problemi, termal, hidroelektrik, gaz, rüzgar ve dizel enerji sistemlerini içeren çok kaynaklı tek alanlı test sisteminde incelenmiştir. Test sisteminin doğrusalsızlığını artırmak için kazan dinamiği yapısı kullanılmıştır. Optimizasyon işlemi sonucunda algoritmaların denetleyici parametrelerini optimize etme başarısı kendi içinde değerlendirilmiş ve BSA algoritmasının diğer algoritmalara göre daha başarılı olduğu görülmüştür.

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

## 1. GİRİŞ

Günümüzde enerji talepleri ve teknolojiadaki hızlı gelişmeler ile yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) kullanımı, gaz ve termal santraller gibi geleneksel elektrik üretim sistemlerine ek olarak giderek artmıştır. Modern elektrik güç sistemleri, geleneksel enerji üretim birimleriyle birlikte rüzgar, güneş, hidro, biyokütle, jeotermal, dalga ve gelgit enerjisi gibi YEK'lerin kullanılmasıyla daha karmaşık hale geldi. Ancak artan enerji taleplerinin karşılanmasında, farklı elektrik üretim birimlerinin bir arada kullanılması ve bunun sonucunda ortaya çıkan enerji üretimi ve tüketimi arasındaki dengesizlikler, enterkonnekte güç sisteminde frekans ve gerilim bozulmalarına neden olmaktadır.

Güç sistemlerindeki kararlılık problemleri olarak tanımlanan bu bozulmalar, son zamanlarda güç sistemleri araştırma grupları tarafından ele alınan ve çözülmesi gereken güncel araştırma konularından biri haline gelmiştir. Yük frekans kontrolü (YFK) veya otomatik üretim kontrolü (OÜK), farklı yapıya sahip elektrik üretim ünitelerinden oluşan modern elektrik güç sistemlerinin enterkonnekte sistemde birbirleriyle senkron olarak çalışmasını ve tüketicilere kaliteli bir enerji ulaşmasını sağlamayı amaçlar. Diğer bir ifadeyle YFK, güç sistemindeki sürekli dalgalanmaya rağmen üretim ve tüketici tarafındaki yük talebi arasındaki dengeyi sağlayarak, frekans ve bağlı güç akışlarındaki değişimleri belirlenen sınır değerler içinde tutmak olarak tanımlanabilir. Ayrıca YFK, modern elektrik güç sistemlerinin etkin kontrolünde veya işletilmesinde değişimlerin izlenmesi ve alan kontrol hatasının (AKH) en aza indirilmesi için en uygun denetleyici yapısının tasarlanmasını ve kullanılmasını zorunlu kılmaktadır [1-7].

Son zamanlarda, modern güç sistemlerinin en önemli kararlılık problemlerinden biri olan YFK problemi üzerinde çalışan güç sistemi araştırmacıları, kararlılık problemlerinin üstesinden gelebilmek için çeşitli denetleyici yapıları ve optimizasyon algoritmaları kullanarak sistem performansını artırmaya çalışmışlardır. Literatürdeki tüm çalışmalar, güç sistemlerinde çalışma koşulları değiştiğinde oluşan frekans ve bağlantı hattı gücündeki değişimleri veya salınımları sönmölemek için yapılmıştır. Bu bağlamda yapılan çalışmalarda iki ana kriter ortaya çıkmaktadır. Bunlar, denetleyici tasarımı ve denetleyici parametrelerini optimize etmek için kullanılan optimizasyon algoritmalarıdır. Optimizasyon algoritmaları, YFK problemi için performansı artırmada kullanılan en etkili sistem parametrelerinden biridir. Ayrıca problem için tasarlanan denetleyici yapılarının birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.

Literatürün kapsamlı incelemesine göre, esneklikleri nedeniyle, YFK tasarımında sıklıkla geleneksel oransal-integral-türev (PID) ve oransal integral (PI) denetleyiciler kullanılmıştır [8]. PID denetleyicisinin parametrelerinin optimizasyonunda yerçekimsel arama algoritması (YAA) [9], geliştirilmiş stokastik fraktal arama (GSFA) [10], öğretim tabanlı öğrenme tabanlı optimizasyon (ÖTÖA) [11], emperyalist rekabetçi algoritma (ERA) [12], bakteriyel yiyecek arama algoritması (BYAA) [13], karınca kolonisi optimizasyonu (KKO) [14], genetik algoritma (GA) [15], çiçek tozlaşma algoritması (ÇTA) [16], bakteri yiyecek arama optimizasyonu (BYAO) [17], balina optimizasyon algoritması (BOA) [18] gibi çeşitli optimizasyon algoritmaları kullanıldı. Parametreleri optimize edilen PID denetleyicinin çeşitli güç sistemlerinde belirli çalışma koşullarında sistem performansını iyileştirmede birçok denetleyici yapısına göre daha başarılı olduğu literatürde belirtilmektedir. Ayrıca bir çalışmada I, PI, PID ve oransal-integral-türev-artı-ikinci-dereceden-türev (PID+DD) denetleyicileri ayrı ayrı ikincil denetleyiciler olarak ele alınır. Denetleyici parametreleri karınca aslan optimizasyonu (KAO) ile tasarlanmış ve PID + DD denetleyicinin daha kısa yerleşme süresi, aşma miktarları ve azaltılmış salınımlar açısından daha iyi performansını ortaya koymaktadır [19].

Bu çalışmada, klasik PID ve PID+DD denetleyici yapıları frekans ve şebeke güç değişimindeki salınımları sönmölemek için tasarlanmıştır. Denetleyici yapıları, yenilenebilir enerji kaynakları içeren çok kaynaklı tek alanlı modern elektrik güç sisteminde test edilmiştir. Denetleyiciler, sistem çalışma koşulları değiştiğinde sistem performansını iyileştirmeyi başardı. Ancak kullanıcı deneyimine veya matematiksel yaklaşımlara dayalı olarak belirlenen denetleyici parametreleri, bazen denetleyicinin sistem performansını iyileştirmede yetersiz kalmasına neden olmuştur. Çalışmanın kalitesini ve denetleyicilerin performansını artırmak için literature güncel olarak sunulan balçık küf algoritması (BKA) [20], goril birlikleri optimizasyonu (GBO) [21] ve bukalemun sürü algoritması (BSA) [22] kullanılarak denetleyicilerin parametreleri ayarlanmıştır.

Çalışmanın başlıca katkıları şu şekilde sıralanabilir:

- Test sistemlerindeki YFK problemini çözmek için PID ve PID+DD denetleyici parametreleri optimize edilmiştir.
- YEK'lerin de dahil olduğu tek alanlı beş ayrı ünite oluşan farklı bir test sistemi sunulmuştur.
- Denetleyici parametrelerinin optimizasyonunda üç farklı güncel algoritma kullanılmıştır.
- BSA algoritmasının GBO ve BKA algoritmalarına göre üstünlüğü göstermek.

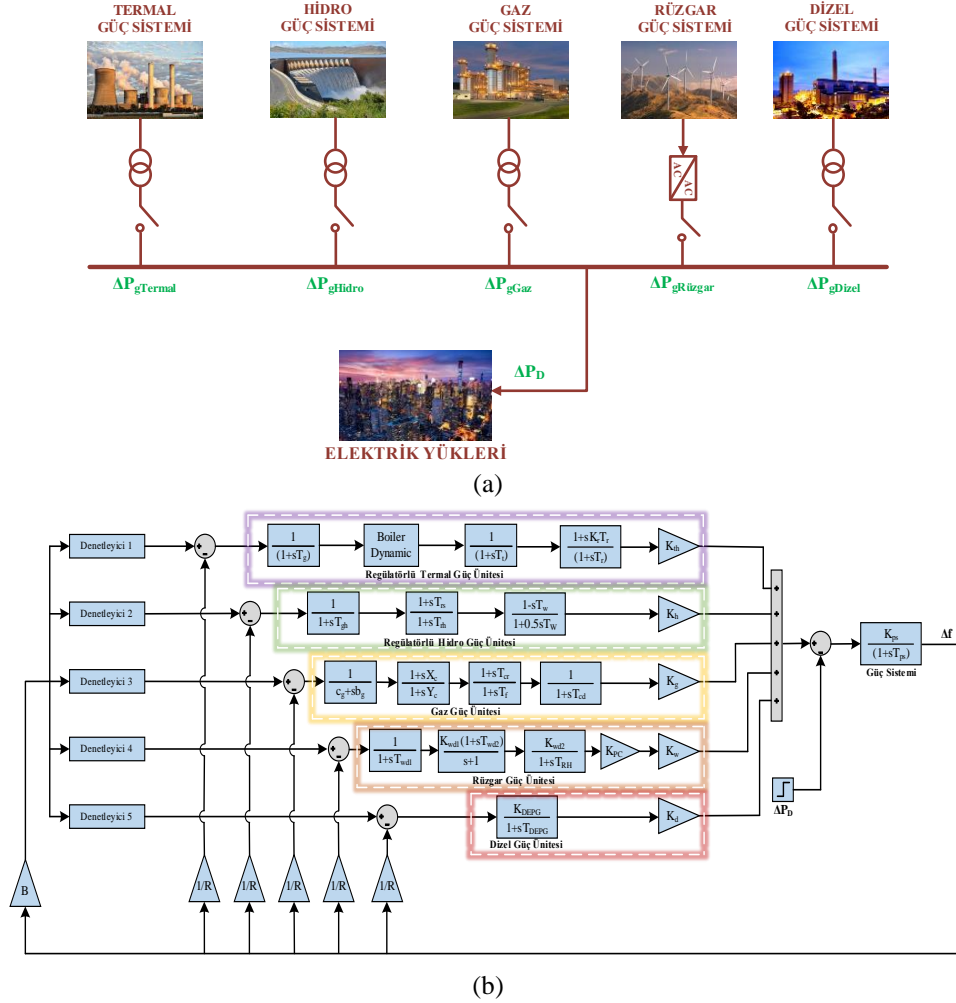
Giriş bölümünden sonra makalenin düzeni şu şekildedir:

- İkinci bölümde, yenilenebilir enerji kaynaklarını içeren modern elektrik güç sistemi modeli tanıtılır.
- Üçüncü bölümde, test sisteminde kullanılan denetleyici yapıları açıklanır.
- Dördüncü bölümde, denetleyici parametrelerinin optimizasyonunda en iyi algoritma BSA sunulmuştur.
- Beşinci bölümde, test sisteminden elde edilen simülasyon sonuçları verilmiş ve algoritmalar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.
- Altıncı bölümde, çalışmanın sonuçları yorumlanmıştır.



## 2. YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ İÇEREN ÇOK KAYNAKLI TEK BÖLGELİ GÜÇ SİSTEMİNİN MODELLENMESİ

Bu bölümde, modern güç sistemlerindeki en önemli kararlılık problemlerinden biri olan YFK problemini incelemek için yenilenebilir enerji kaynaklarını içeren çok kaynaklı tek bölgesel dinamik bir test sistemi tanımlanmıştır. YFK'ye uygun şekilde güç sisteminin transfer fonksiyonu modeli MATLAB/Simulink ortamında tasarlanmıştır. Şekil 1(a)'da test sisteminin genel şematik diyagramı ve Şekil 1(b)'de YFK tasarımı ve analizi için yaygın olarak kullanılan transfer fonksiyonu modeli verilmiştir. Sistem termal, hidroelektrik, gaz, rüzgar ve dizel olmak üzere 5 farklı üniteden oluşur.



Şekil 1. (a) Genel şematik diyagram ve (b) Test sisteminin transfer fonksiyonu modeli.

Güç sisteminde, denetleyici çıkışı  $\Delta P_{ref}$ , yük bozulması  $\Delta P_D$  kontrol alanının girişlerini, generatör frekans hatası  $\Delta f$  ve alan kontrol hatası (AKH) kontrol alanı çıkışlarını temsil eder. AKH'nın matematiksel ifadesi Denklem (1)'de gösterilmiştir.

$$AKH = -\Delta f \quad (1)$$

B burada frekans yanlılığı parametresini tanımlar. Yeniden ısıtma türbinli termal sistemde, hız regülatörünün matematiksel ifadesi Denklem (2)'de gösterilmektedir.

$$G_g(s) = \frac{\Delta P_g}{\Delta P_v} = \frac{1}{sT_g + 1} \quad (2)$$

Burada  $\Delta P_v$  hız regülatörünün girişidir ve bu değer Denklem (3)'teki gibi hesaplanır. R, hız regülatöründe hız regülasyonu için kullanılan parametreyi tanımlar ve  $\Delta P_{ref}$  üretilecek referans güç değeri için sisteme gönderilen komutu gösterir.

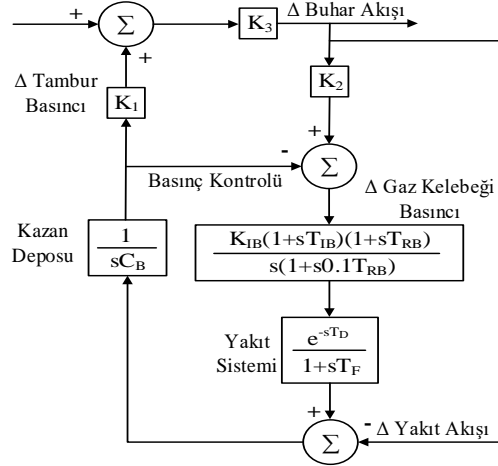
$$\Delta P_v = \Delta P_{ref} - \frac{1}{R} \Delta f \quad (3)$$

Generatör çifti ve sistemdeki yük  $K_{ps}$  kazanç ve  $T_{ps}$  zaman sabiti üzerinden modellenmiş ve her saha çıkışındaki frekans hatası matematiksel olarak Denklem (5)'teki gibi ifade edilmiştir.

$$G_p(s) = \frac{K_{ps}}{sT_{ps} + 1} \quad (4)$$

$$\Delta f(s) = G_p(s)[\Delta P_t(s) - \Delta P_D(s)] \quad (5)$$

Termal tesislerde, kazan buhar akışı, yakıt sistemini kontrol ederek tambur basıncı ayarlanarak ayarlanır. Buhar basıncındaki ve buhar akışının hızındaki değişiklik, türbin kontrol vanaları ve kazan kontrolü tarafından algılanır. Elde edilen veriler ışığında gerekli eylemler gerçekleştirilir. Kazan dinamiği yapısının blok diyagramı Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Kazan dinamiği genel yapısı.

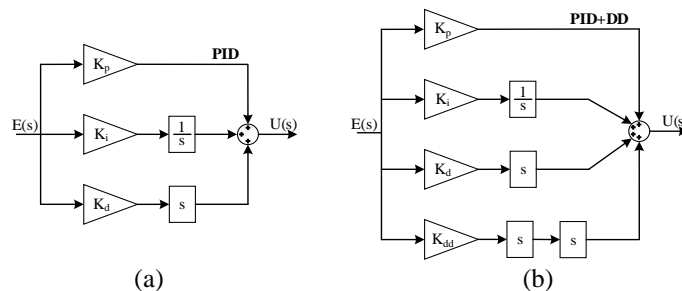
Ünitelerin katılım faktörü olarak adlandırılan güç üretimindeki katkı miktarları sırasıyla  $K_{th}$ ,  $K_h$ ,  $K_g$ ,  $K_w$  ve  $K_d$  sabitleriyle belirlenir. Çalışmada kullanılan test sistemi parametreleri Tablo 1'de verilmiştir [7-23-24-25].

Tablo 1. Test sistemine ait sistem parametreleri.

| Parametre | Değer | Parametre | Değer | Parametre  | Değer | Parametre | Değer |
|-----------|-------|-----------|-------|------------|-------|-----------|-------|
| $T_g$     | 0.2   | $c_g$     | 1.0   | $T_{wd2}$  | 0.6   | $R$       | 2.4   |
| $T_t$     | 0.5   | $b_g$     | 0.05  | $K_{wd2}$  | 1.3   | $K_1$     | 0.85  |
| $K_r$     | 0.3   | $X_c$     | 0.6   | $K_{PC}$   | 0.8   | $K_2$     | 0.095 |
| $T_r$     | 10.0  | $Y_c$     | 1.0   | $K_w$      | 0.125 | $K_3$     | 0.92  |
| $K_{th}$  | 0.4   | $T_{cr}$  | 0.01  | $K_{DEPG}$ | 0.03  | $C_B$     | 200.0 |
| $T_{gh}$  | 0.2   | $T_f$     | 0.23  | $T_{DEPG}$ | 2.3   | $K_{IB}$  | 0.03  |
| $T_{rs}$  | 10.0  | $T_{cd}$  | 0.2   | $K_d$      | 0.125 | $T_{IB}$  | 26.0  |
| $T_{rh}$  | 28.7  | $K_g$     | 0.125 | $K_{ps}$   | 120.0 | $T_{RB}$  | 6.9   |
| $T_w$     | 1.0   | $T_{wd1}$ | 0.041 | $T_{ps}$   | 20    | $T_D$     | 0.0   |
| $K_h$     | 0.225 | $K_{wd1}$ | 1.25  | $B$        | 0.425 | $T_F$     | 10.0  |

### 3. DENETLEYİCİ YAPILARI VE PARAMETRE SEÇİMİ

Bu çalışmada, YEK'leri içeren çok kaynaklı tek bölgeyi güç sistemi için yük frekans kontrolünde PID ve PID+DD denetleyici yapıları kullanılmıştır. Oransal-integral-türev (PID) denetleyici, basit tasarımı ve çok çeşitli çalışma koşullarına karşı sağlam performansı nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. PID benzeri yapılandırılmış, oransal-integral-türev-artı-ikinci-dereceden-türev (PID + DD) denetleyicisi, otomatik gerilim regülatörü (OGR) sistemini incelemek için araştırmacıların dikkatini çekti [19]. Kullanılan denetleyici yapılarının aynı bozunum ve optimizasyon algoritmasında gösterdikleri performans birbirleriyle kıyaslanmıştır. Bu denetleyicilerin blok şemaları Şekil 3'de gösterildiği gibidir.



Şekil 3. Denetleyici yapılarının blok diyagramları.

- PID denetleyici (Şekil 3(a)) endüstride ve birçok mühendislik alanında kullanılmaktadır. Bu denetleyici yapısı  $K_p$ ,  $K_i$  ve  $K_d$  olarak tanımlanan optimize edilecek üç parametre içerir. Bu denetleyicinin transfer fonksiyonu Denklem (6)'da gösterilmiştir.

$$G_{\text{denetPID}}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (6)$$

- PID + DD denetleyici, (Şekil 3(b)) PID denetleyiciye ilave olarak optimize edilecek dördüncü bir parametre içerir. Bu ilave parametre ikinci-dereceden-türevdir ( $K_{dd}$ ). Bu denetleyicinin transfer fonksiyonu Denklem (7)'de gösterilmiştir.

$$G_{\text{denetPID+DD}}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s + K_{dd} s^2 \quad (7)$$

YFK probleminde denetleyici tasarımı ve denetleyici parametrelerinin optimizasyonu, güç sistemi araştırma grupları tarafından ele alınması ve araştırılması gereken çok sıcak bir konu olarak öne çıkmaktadır. Modern elektrik güç sistemlerinde YFK performansını etkileyen ikincil denetleyicinin yapısı, denetleyici parametrelerinin optimal değerlerini bulmak için kullanılan optimizasyon algoritmaları ve çözümlerin optimizasyon algoritmalarına uygunluğunu değerlendirmek için kullanılan performans indeksleri olmak üzere üç temel unsur vardır [6].

YFK performansı literatürdeki güncel farklı algoritmalar kullanılarak iyileştirilmeye çalışılmıştır. Kullanılan denetleyici yapılarında AKH, giriş sinyali olarak alınır ve denetleyicinin çıkışı referans güç ayarı veya sistem kontrol girişi olarak ifade edilmiştir.  $\Delta P_{\text{ref}}$ , denetleyici yapılarında Denklem (8)'de verildiği gibi matematiksel olarak modellenmiştir.

$$\Delta P_{\text{ref}} = \text{AKH} \left( \overbrace{K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s}^{\text{PID}} \right) \quad (8.a)$$

$$\Delta P_{\text{ref}} = \text{AKH} \left( \overbrace{K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s + K_{dd} s^2}^{\text{PID+DD}} \right) \quad (8.b)$$

Üretim-yük dengesi, modern elektrik güç sistemlerinde YFK sorunu için en uygun şekilde ayarlanmalıdır. Bu nedenle, ikincil denetleyicide bu dengeyi sağlamak için tasarlanan denetleyicilerin tasarım parametreleri eş zamanlı olarak optimize edilmelidir.

Bu parametreler kullanıcı deneyimine göre tasarlandığında, kontrol performansı optimize edilmiş sistem performansından daha zayıf bir etkiye sahip olacaktır. Bu nedenle kullanıcı deneyiminin etkisini ortadan kaldırmak için optimizasyon algoritmaları kullanılarak tasarlanan denetleyici yapılarında amaç fonksiyonunun kullanılması oldukça önemlidir. Bu çalışmada YFK problemlerinde en çok tercih edilen zaman ağırlıklı mutlak hatanın integrali (ITAE) kriteri, optimizasyon algoritması için maliyet fonksiyonu olarak belirlenmiş ve Denklem (9)'da gösterilmiştir.

$$J = \text{ITAE} = \int_0^{T_{\text{sim}}} t(|\Delta f|) dt \quad (9)$$

Burada  $T_{\text{sim}}$ , test sistemlerinde yanıtlar elde etmek için ayarlanmış simülasyon süresidir.  $\Delta f$  kontrol alanı frekansının sapsmasını temsil eder.  $J$  uygunluk fonksiyonu minimum değere indirildiğinde, belirlenen basamak yük bozunumu (SLP) değişimine bağlı olarak  $\Delta f$  salınımlarında daha fazla sönüm görülebilmektedir. İstenen bir sonuç olarak, denetleyicilerin parametreleri aşağıda formüle edildiği gibi belirtilen sınır değerler içinde kalmıştır.

$$\begin{aligned} K_p^{\min} &\leq K_p \leq K_p^{\max} \\ K_i^{\min} &\leq K_i \leq K_i^{\max} \\ K_d^{\min} &\leq K_d \leq K_d^{\max} \\ K_{dd}^{\min} &\leq K_{dd} \leq K_{dd}^{\max} \end{aligned} \quad (10)$$

Şekil 3'deki PID ve PID+DD denetleyici yapıları  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  ve  $K_{dd}$  olarak ifade edilen 4 parametrenin optimizasyon algoritmaları ile en iyi değerleri bulunarak tasarlanmıştır.

#### 4. BUKALEMUN SÜRÜ ALGORİTMASI

Algoritma 2021 yılında Braik tarafından önerilmiş en yeni optimizasyon tekniklerinden birisidir [22]. BSA, bukalemunların gerçek hayattaki avlanma ve yiyecek arama şeklini taklit eden metasezgisel bir optimizasyon tekniğidir. Genel olarak, bukalemunlar bulunduğu ortama göre renk değiştirebildiklerinden dağlarda, ovalarda ve çöllerde böcekleri avlanma yeteneğine sahip olan nadir canlılardır. Bukalemunların avlanması, avın takip edilmesi,

avı kovalamak için gözlerin kullanılması ve ava saldırma gibi farklı adımları içerir. Algoritmanın matematiksel modellenmesi ve işleyişi alt bölümlerde açıklanmıştır.

#### 4.1. Başlatma ve Fonksiyon Değerlendirilmesi

BSA, optimizasyon işlemini rastgele oluşturulmuş bir başlangıç popülasyonu ile başlatan popülasyon temelli metasezgisel bir algoritmadır. Bukalemun popülasyonu büyüklüğü  $n$ ,  $d$  boyutlu bir arama uzayında başlatılır ve tüm bireyler, optimizasyon probleminin muhtemel çözümü olarak kabul edilir. Arama uzayındaki herhangi bir yinelemede bukalemun konumu, Denklem (11) ile ifade edilir. Yineleme sayısı  $i = 1, 2, \dots, t$  ile, bukalemunun konumu ise  $y_{t,d}^i$  ile ifade edilir.

$$y_t^i = [y_{t,1}^i, y_{t,2}^i, \dots, y_{t,d}^i] \quad (11)$$

Başlangıç popülasyonu, problem boyutuna ve arama uzayındaki bukalemun sayısına göre Denklem (12) ile ifade edilir.

$$y^i = l_j + r(u_j - l_j) \quad (12)$$

$i$ . bukalemunun başlangıç vektörü  $y^i$ , arama uzayının üst sınırı  $u_j$ , arama uzayının alt sınırı  $l_j$  ile ifade edilir.  $r$ ,  $[0-1]$  arasında değişen rastgele bir düzgün sayıdır. Her bir adımdaki çözümün kalitesi, amaç fonksiyonuna dayalı olarak her adımda değerlendirilir.

#### 4.2. Avın Aranması

Bukalemunların avın aranması esnasındaki davranışı, Denklem (13)'de önerildiği gibi konum güncelleme stratejisine dayalı olarak matematiksel olarak modellenir.

$$y_{t+1}^{i,j} = \begin{cases} y_t^{i,j} + p_1(P_t^{i,j} - G_t^j)r_2 + p_2(G_t^j - y_t^{i,j})r_1 & r_i \geq P_p \\ y_t^{i,j} + \mu((u^j - l^j)r_3 + l_b^j) \operatorname{sgn}(\operatorname{rand} - 0.5) & r_i < P_p \end{cases} \quad (13)$$

burada  $t$  ve  $(t + 1)$  ilgili yineleme adımını gösterir.  $i$  ve  $j$ ,  $j$ . boyuttaki  $i$ . bukalemunu temsil eder. Bukalemunun mevcut ve yeni konumu sırasıyla  $y_t^{i,j}$  ve  $y_{t+1}^{i,j}$  ile temsil edilir.  $P_t^{i,j}$  bukalemunun en iyi ve  $G_t^j$  ise yerel en iyi konumunu ifade eder.

$p_1$  ve  $p_2$ , keşif yeteneğini kontrol eden iki pozitif sayıdır.  $r_1$ ,  $r_2$  ve  $r_3$ , 0 ile 1 arasında oluşturulan ve rasgele uniform sayılardır.  $r_i$ , 0 ile 1 arasında değişen  $i$  indeksinde oluşturulan rastgele uniform bir sayıdır.  $P_p$ , bukalemunun avı algılama olasılığını gösterir.  $\operatorname{sgn}(\operatorname{rand} - 0.5)$  kullanma ve keşfin yönü üzerinde bir etkiye sahiptir ve  $-1$  veya  $1$  olabilir.  $\mu$ , yineleme sayısı azalan yineleme parametresinin bir fonksiyonudur.

#### 4.3. Bukalemun Gözlerinin Dönüşü

Bukalemunlar, avlarının seçmek ve yerini tam tespit için gözlerinin 360 derece dönen üstün yönünü kullanır. Bu dönüş, bukalemunların avlanma mekanizmasını açıklamak için matematiksel olarak formüle edilmiştir. Bu durumda bukalemunlar avlandıkları yere göre yer değiştirirler. Bu bağlamda aşağıdaki adımlar önerilmiştir.

- Bukalemunun ilk konumu yerçekiminin odak noktasıdır (başlangıç).
- Avın konumunu tanıyan dönüş matrisi keşfedilir.
- Bukalemunun durumu, yerçekiminin odak noktasındaki dönme matrisi kullanılarak yenilenir.
- Son olarak, bukalemunlar ilk pozisyona geri döndürülür.

Bir bukalemunun yeni konumu, Denklem (14)'deki gibi matematiksel olarak ifade edilir.

$$y_{t+1}^i = y_t^i + y_t^i \quad (14)$$

burada  $y_{t+1}^i$  dönüşten sonraki konumdur,  $y_t^i$  dönüşten önceki mevcut konumu ve  $y_t^i$  bukalemunun arama uzayındaki dönüş koordinatlarını gösterir.

#### 4.4. Avın Avlanması

Bukalemunlar, avlarına önce aşırı derecede yaklaşır ve daha sonra ani olarak saldırırlar. Avına yaklaşan bukalemunun en iyi bukalemun olduğu varsayılır ve en uygundur. En iyi bukalemun dilini kullanarak avına saldırır. Dilini uzunluğunun iki katı kadar uzatabilmesi bir avantaj sağlar. Bu mekanizma, bukalemunların avlarını etkili bir şekilde yakalayarak arama alanından yararlanmalarına yardımcı olur. Bir bukalemunun dilinin ava doğru hareketi anındaki hızı Denklem (15)'e göre matematiksel olarak modellenebilir.

$$v_{t+1}^{i,j} = \omega v_t^{i,j} + c_1(G_t^j - y_t^{i,j})r_1 + c_2(P_t^{i,j} - y_t^{i,j})r_2 \quad (15)$$

burada  $v_{t+1}^{ij}$ ,  $t + 1$  yinelemesinde  $i$ . bukalemun  $j$ . boyuttaki yeni hızını temsil eder,  $v_t^{ij}$ ,  $i$ . bukalemunun  $j$ . boyuttaki mevcut hızını temsil eder,  $y_t^{ij}$ ,  $i$ . bukalemunun mevcut konumunu temsil eder,  $P_t^{ij}$ ,  $i$ . bukalemunun en iyi bilinen konumudur ve  $G_t^j$  bukalemunlar tarafından şimdiye kadar bilinen yerel en iyi konumdur.  $c_1$  ve  $c_2$  bukalemun dilini düşürmede  $P_t^{ij}$  ve  $G_t^j$ 'nin etkisini kontrol eden iki pozitif sabittir,  $r_1$  ve  $r_2$ , 0 ile 1 aralığında dağıtılan iki rastgele sayıdır ve  $\omega$ , yinelemeli üretimlerle doğrusal olarak azalan eylemsizlik ağırlığıdır.

## 5. TEST SİSTEMİNE AİT SİMÜLASYON SONUÇLARI

Bu çalışmada modern güç sistemlerindeki en önemli kararlılık problemlerinden biri olan YFK problemi modern bir test sisteminde detaylı olarak incelenmiştir. Çalışmada PID ve PID+DD denetleyicilerinin sistem performansı, dayanıklılığı ve verimliliği, çeşitli çalışma senaryoları altında güç sistemi modelinin dinamik tepkilerini elde etmek için kullanılmıştır. Literatür taramasına göre, denetleyici yapılarının performansları, ITAE performans indeksi kullanılarak test sisteminin frekans sapmaları, oturma süresi, altında kalma ve aşma miktarları açısından değerlendirilmiştir. Sistem  $t=0$ 'da sırasıyla %1, %5 ve %10 bozunum değerlerinde ve iki farklı denetleyici yapısında ayrı ayrı simüle edilmiştir. Ayrıca optimizasyon algoritmaları arasında adil bir değerlendirme ortamı sağlamak amacıyla optimizasyon sırasında kullanılan ayar parametreleri literatüre ilk sunuldukları değerlerde kabul edilmiştir. Ayrıca, popülasyon sayısı ve maksimum yineleme sayısı sırasıyla 30 ve 100 olarak ayarlanmıştır. Optimizasyon probleminde kısıtlar denetleyici parametrelerinin sınırları olup, bu sınırlar Tablo 2'de verilmiştir. Simülasyon sonuçlarını elde etmek için Intel(R), core(TM) i7-8750H 2.2 GHz CPU ve 8 GB RAM'e sahip bir bilgisayar kullanılmıştır.

**Tablo 2.** Denetleyici parametrelerinin sınırları.

| Sınırlar | Parametreler |       |       |          |
|----------|--------------|-------|-------|----------|
|          | $K_p$        | $K_i$ | $K_d$ | $K_{dd}$ |
| Minimum  | -7           | -7    | -7    | -0.1     |
| Maksimum | 7            | 7     | 7     | 0.1      |

Test sistemindeki simülasyon çalışmaları YEK'leri içeren çok kaynaklı elektrik güç sistemi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kullanılan denetleyici yapılarının en uygun parametreleri farklı bozunum değerlerinde GBO, BKA ve BSA algoritmaları ile belirlenmiştir ve değerler EK1, EK2 ve EK3'de verilmiştir.

Simülasyon çalışmasından elde edilen dinamik sistem tepkisi  $\Delta f$ 'yi içeren grafikler Şekil 4'de detaylı olarak verilmiştir. Test sistemine ait  $\Delta f$ 'nin minimum ve maksimum aşım değerleri, oturma süresi değerleri ve sistem yanıtlara göre performans sıralaması Tablo 3'de detaylı olarak verilmiştir. Yerleşme zamanını ölçmek için  $\pm 0.0001$  gibi çok dar bir tolerans bandı kabul edilmiştir.

PID denetleyicisi oturma süresi açısından bozunumun %1 olduğu durumda BKA algoritması için 2.5187, GBO algoritması için 1.5025 ve BSA algoritması için 2.4044 olarak tespit edilmiştir. PID denetleyicisi için diğer bozunum değerleride dikkate alındığında GBO algoritması oturma süresi bakımından daha başarılıdır. PID+DD denetleyicisi için farklı bozunum değerlerinde oturma süresi bakımından algoritmaların başarıları değişkenlik göstermiştir. Bozunumun %1, %5 ve %10 olduğu durumlarda sırasıyla 1.2610 değeriyle BKA, 4.4981 değeriyle GBO ve 3.4135 değeriyle BSA daha başarılı olmuştur. Fakat tüm değerler ortak olarak değerlendirildiğinde BKA daha başarılı olarak nitelendirilebilir.

Minimum aşma değeri sırasıyla BKA, GBO ve BSA algoritmaları için %1'lik bozunum değerinde PID denetleyicisi için -0.014906, -0.015484 ve -0.013924, PID+DD denetleyicisi için -0.016095, -0.018416 ve -0.014459 olmuştur. BSA algoritması minimum aşma değeri açısından diğerlerinden daha üstündür. Ek olarak %5 ve %10'bozunum değerleri içinde sıralama değişmemiştir.

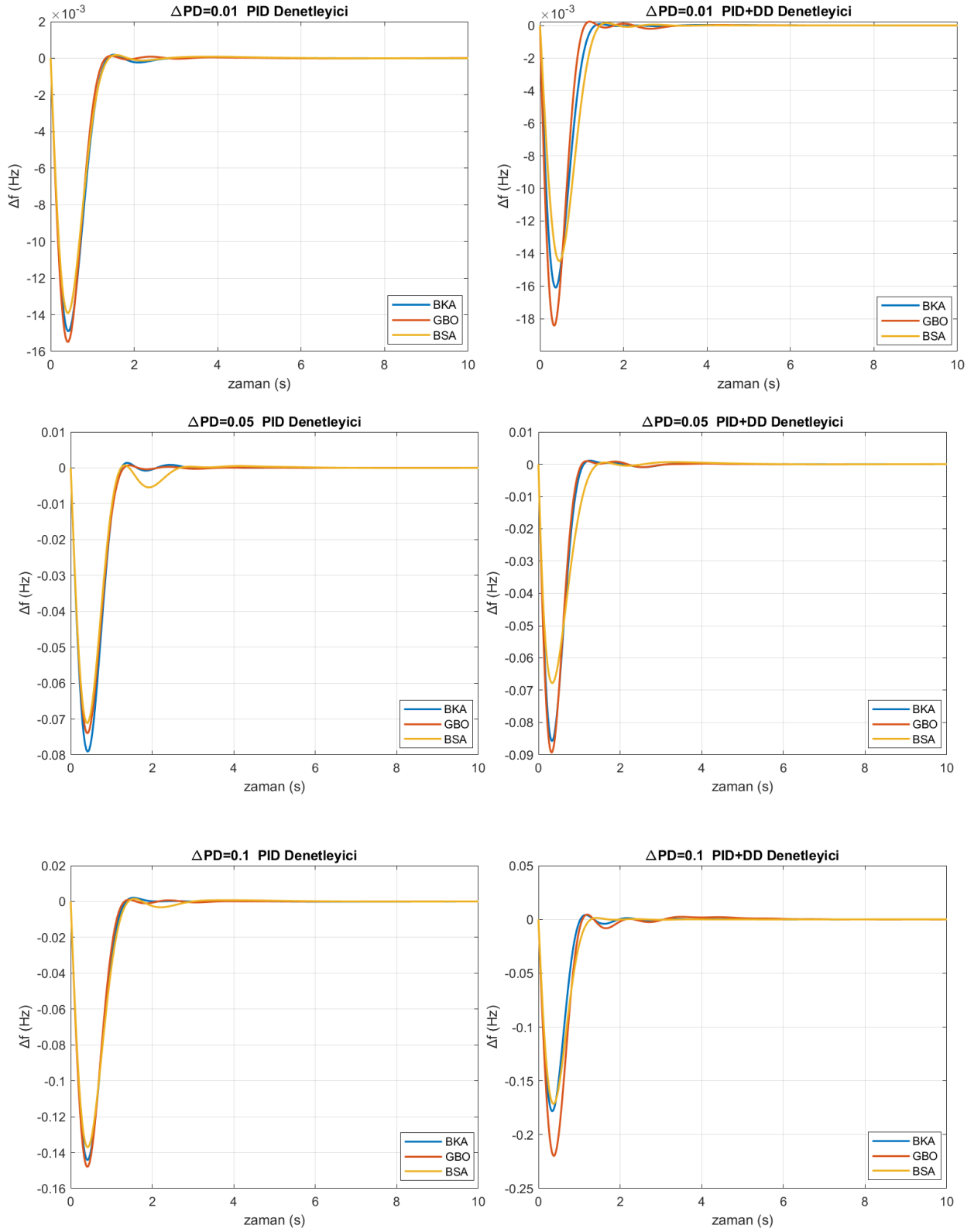
Maksimum aşma değeri bakımından hem PID hem de PID+DD denetleyicisi için farklı bozunum değerlerinde algoritmaların başarı sıraları değişkenlik göstermiştir. PID denetleyicisi için bozunumun sırasıyla %1, %5 ve %10 olduğu durumlarda 0.00012952 değeriyle GBO, 0.00069138 değeriyle BSA ve 0.00101250 değeriyle GBO daha başarılı olmuştur. PID+DD denetleyicisinde ise bozunumun sırasıyla %1, %5 ve %10 olduğu durumlarda  $8.4012 \times 10^{-5}$  değeriyle BKA, 0.00067620 değeriyle BSA ve 0.00137830 değeriyle BSA daha başarılı olmuştur. PID denetleyicisi için maksimum aşma değerinde en iyi GBO, PID+DD denetleyicisi için ise BSA algoritması daha başarılıdır. Ayrıca sistemdeki bozunumun arması genel olarak oturma süresi, minimum aşma ve maksimum aşma değerlerini artırmıştır.

Kullanılan her iki denetleyici yapısından elde edilen sistem yanıtları yerleşme süresi, minimum aşma değeri ve maksimum aşma değeri açısından ayrı ayrı incelendiğinde;

- Yerleşme süresi açısından GBO,
- Minimum ve maksimum sapma değeri açısından BSA,

algoritmasının daha iyi olduğu görülür. Tüm kriterlerin ortak değerlendirilmesi sonucunda algoritmalar arasında en iyi sıralama sırasıyla BSA, GBO ve BKA şeklindedir.





Şekil 4. Test sisteminde kullanılan denetleyicilerin  $\Delta f$  sistem yanıtı.

**Tablo 3.** Denetleyicilerin sistem yanıtlarına göre optimizasyon algoritmalarının performans sıralaması.

| Denetleyiciler   |           |                   | Algoritmalar            |             |             |
|--|-----------|-------------------|-------------------------|-------------|-------------|
|  |           |                   | BKA                     | GBO         | BSA         |
| <b>PID</b>   | Ts (s)    | $\Delta f_{0.01}$ | 2.5187                  | 1.5025      | 2.4044      |
|  |           | $\Delta f_{0.05}$ | 3.4515                  | 3.4116      | 6.1292      |
|  |           | $\Delta f_{0.10}$ | 4.6642                  | 3.5642      | 6.2804      |
|  | Min. (US) | $\Delta f_{0.01}$ | -0.01490600             | -0.01548400 | -0.01392400 |
|  |           | $\Delta f_{0.05}$ | -0.07915800             | -0.07392900 | -0.07115700 |
|  |           | $\Delta f_{0.10}$ | -0.14422000             | -0.14785000 | -0.13711000 |
|  | Mak. (OS) | $\Delta f_{0.01}$ | 0.00019359              | 0.00012952  | 0.00017760  |
|  |           | $\Delta f_{0.05}$ | 0.00140780              | 0.00071964  | 0.00069138  |
|  |           | $\Delta f_{0.10}$ | 0.00205650              | 0.00101250  | 0.00149450  |
| <b>PID+DD</b>  | Ts (s)    | $\Delta f_{0.01}$ | 1.2610                  | 3.0267      | 1.6967      |
|  |           | $\Delta f_{0.05}$ | 4.9636                  | 4.4981      | 5.4152      |
|  |           | $\Delta f_{0.10}$ | 4.8071                  | 7.1197      | 3.4135      |
|  | Min. (US) | $\Delta f_{0.01}$ | -0.01609500             | -0.01841600 | -0.01445900 |
|  |           | $\Delta f_{0.05}$ | -0.08575600             | -0.08925900 | -0.06777200 |
|  |           | $\Delta f_{0.10}$ | -0.17818000             | -0.21975000 | -0.17149000 |
|  | Mak. (OS) | $\Delta f_{0.01}$ | 8.4012x10 <sup>-5</sup> | 0.00023562  | 0.00015898  |
|  |           | $\Delta f_{0.05}$ | 0.00112290              | 0.00098289  | 0.00067620  |
|  |           | $\Delta f_{0.10}$ | 0.00415930              | 0.00451810  | 0.00137830  |
| En iyi denetleyici sonuçlarına göre optimizasyon algoritmalarının sıralaması |           |                   |                         |             |             |
| Denetleyiciler   |           |                   | Algoritmalar            |             |             |
|  |           |                   | BKA                     | GBO         | BSA         |
| <b>PID</b>   | Ts (s)    | $\Delta f_{0.01}$ | 3                       | 1           | 2           |
|  |           | $\Delta f_{0.05}$ | 2                       | 1           | 3           |
|  |           | $\Delta f_{0.10}$ | 2                       | 1           | 3           |
|  | Min. (US) | $\Delta f_{0.01}$ | 2                       | 3           | 1           |
|  |           | $\Delta f_{0.05}$ | 3                       | 2           | 1           |
|  |           | $\Delta f_{0.10}$ | 2                       | 3           | 1           |
|  | Mak. (OS) | $\Delta f_{0.01}$ | 3                       | 1           | 2           |
|  |           | $\Delta f_{0.05}$ | 3                       | 2           | 1           |
|  |           | $\Delta f_{0.10}$ | 3                       | 1           | 2           |
| <b>PID+DD</b>  | Ts (s)    | $\Delta f_{0.01}$ | 1                       | 3           | 2           |
|  |           | $\Delta f_{0.05}$ | 2                       | 1           | 3           |
|  |           | $\Delta f_{0.10}$ | 2                       | 3           | 1           |
|  | Min. (US) | $\Delta f_{0.01}$ | 2                       | 3           | 1           |
|  |           | $\Delta f_{0.05}$ | 2                       | 3           | 1           |
|  |           | $\Delta f_{0.10}$ | 2                       | 3           | 1           |
|  | Mak. (OS) | $\Delta f_{0.01}$ | 1                       | 3           | 2           |
|  |           | $\Delta f_{0.05}$ | 3                       | 2           | 1           |
|  |           | $\Delta f_{0.10}$ | 2                       | 3           | 1           |
| Ortalama Değerler  |           |                   | 2.22                    | 2.16        | <b>1.61</b> |
| Ortalama Değerlerin Sıralaması   |           |                   | 3                       | 2           | <b>1</b>    |

## 6. SONUÇ

Artan enerji talebini karşılamak için, son zamanlarda fosil yakıt üretim birimlerini içeren güç sistemlerine YEK'lerin entegrasyonu artmıştır. Bu bağlamda çalışmada, modern elektrik güç sistemlerinin tüketici tarafında değişen yük koşullarında meydana gelen YFK problemini çözmek için PID ve PID+DD denetleyici yapısı parametreleri üç farklı optimizasyon algoritması ile optimize edilmiştir. Optimize edilen denetleyiciler sistem doğrusalsızlığını artıran kazan dinamiği yapısı ve YEK'leri de içeren tek alanlı çok kaynaklı güç test sisteminde incelenmiştir.

Simülasyonlarda %1, %5 ve %10'luk yük bozunum değerleri ayrı ayrı uygulanmış ve farklı algoritmalarla optimize edilen denetleyici yapılarının verdiği sonuçlar incelenmiştir. Denetleyici parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan optimizasyon algoritmaları kendi içlerinde karşılaştırılmıştır. BSA algoritması ile parametreleri optimize edilen denetleyiciler sistemdeki salınımları sönmülemde daha başarılı olmuştur.

### Yazar Katkıları

Yazarlar çalışmaya eşit oranlı katkı sunmuşlardır.

### Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler

## KAYNAKÇA

- [1] D. H. Tungadio and Y. Sun “Load frequency controllers considering renewable energy integration in power system”, *Energy Reports*, vol. 5, pp. 436-453, 2019.
- [2] K. Peddakapu et al. “A state-of-the-art review on modern and future developments of AGC/LFC of conventional and renewable energy-based power systems”, *Renewable Energy Focus*, vol. 43, pp. 146-171, 2022.
- [3] M. Ranjan and R. Shankar “A literature survey on load frequency control considering renewable energy integration in power system: Recent trends and future prospects”, *Journal of Energy Storage*, vol. 45, p.103717, 2022.
- [4] A. Pappachen and A.P. Fathima “Critical research areas on load frequency control issues in a deregulated power system: A state-of-the-art-of-review” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 72, pp. 163-177, 2017.
- [5] Y. Arya et al. “AGC performance amelioration in multi-area interconnected thermal and thermal-hydro-gas power systems using a novel controller”, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 24, pp. 384-396, 2021.
- [6] E. Celik et al. “(1+PD)-PID cascade controller design for performance betterment of load frequency control in diverse electric power systems”, *Neural Computing and Applications*, vol. 33, pp. 15433-15456, 2021.
- [7] A. Tabak and S. Duman “Levy flight and fitness distance balance-based coyote optimization algorithm for effective automatic generation control of PV-based multi-area power systems”, *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 47, pp. 14757-14788, 2022.
- [8] Y. V. Hote and S. Jain “PID controller design for load frequency control: Past, Present and future challenges”, *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 4, pp. 604-609, 2018.
- [9] S. Duman and N. Yorukeren “Automatic generation control of the two area non-reheat thermal power system using gravitational search algorithm”, *Przegład Elektrotechniczny*, vol. 10a, pp. 254-259, 2012.
- [10] E. Celik “Improved stochastic fractal search algorithm and modified cost function for automatic generation control of interconnected electric power systems”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 88, 103407, 2020.
- [11] A.K. Barisal “Comparative performance analysis of teaching learning based optimization for automatic load frequency control of multi-source power systems”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 66, pp. 67-77, 2015.
- [12] H. Shabani, B. Vahidi, and M. Ebrahimpour “A robust PID controller based on imperialist competitive algorithm for load-frequency control of power systems”, *ISA Transactions*, vol. 52, pp. 88-95, 2013.
- [13] E.S. Ali and S.M. Abd-Elazim “BFOA based design of PID controller for two area load frequency control with nonlinearities”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 51, pp. 224-231, 2013.
- [14] J. Kaliannan, A. Baskaran, and N. Dey “Automatic Generation Control of Thermal-Thermal-Hydro Power Systems with PID Controller using Ant Colony Optimization”, *Int. J. Serv. Sci. Manag. Eng. Technol.*, vol. 6, no. 2, pp. 18-34, 2015.
- [15] D.C. Das, A.K. Roy, and N. Sinha “GA based frequency controller for solar thermal-diesel-wind hybrid energy generation/energy storage system”, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 43, no. 1, pp. 262-279, 2012.
- [16] K. Jagatheesan et al. “Application of flower pollination algorithm in load frequency control of multi-area interconnected power system with nonlinearity”, *Neural Comput. Appl.*, vol. 28, no. s1, pp. 475-488, 2017.
- [17] A. Panwar, G. Sharma, and R.C. Bansal “Optimal AGC Design for a Hybrid Power System Using Hybrid Bacteria Foraging Optimization Algorithm”, *Electr. Power Components Syst.*, vol. 47, no. 11-12, pp. 955-965, 2019.
- [18] K.S. Simhadri and B. Mohanty “Performance analysis of dual-mode PI controller using quasi-oppositional whale optimization algorithm for load frequency control”, *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 30, no. 1, pp. 1-23, 2020.
- [19] M. Raju, L.C. Saikia, and N. Sinha “Automatic generation control of a multi-area system using ant lion optimizer algorithm based PID plus second order derivative controller”, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 80, pp. 52-63, 2016.
- [20] S. Li, H. Chen, M. Wang, A.A. Heidari, and S. Mirjalili “Slime mould algorithm: A new method for stochastic optimization”, *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 111, pp. 300-323, 2020.
- [21] B. Abdollahzadeh, F. Soleimanian Gharehchopogh, and S. Mirjalili “Artificial gorilla troops optimizer: A new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems”, *Int. J. Intell. Syst.*, vol. 36, no. 10, pp. 5887-5958, 2021.
- [22] M.S. Braik “Chameleon Swarm Algorithm: A bio-inspired optimizer for solving engineering design problems”, *Expert Syst. Appl.*, vol. 174, no. April 2020, p. 114685, 2021.
- [23] B. Mohanty, S. Panda, and P.K. Hota “Differential evolution algorithm based automatic generation control for interconnected power systems with non-linearity”, *Alexandria Engineering Journal*, vol. 53, pp. 537-552, 2014.
- [24] S. Oladipo, Y. Sun, and Z. Wang “Application of a new fusion of flower pollinated with pathfinder algorithm for AGC of multi-source interconnected power system”, *IEEE Access*, vol. 9, pp. 94149-94168, 2021.
- [25] P.C. Sahu, R.C. Prusty, and S. Panda “Approaching hybridized GWO-SCA based type-II fuzzy controller in AGC of diverse energy source multi area power system”, *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, vol. 32, pp. 186-197, 2020.

**EKLER**

**EK1.** Denetleyicileri yapılarının optimize edilmiş parametreleri ( $\Delta P_p=0.01$ ).

| Denetleyici     | Parametreler    |                 | Algoritmalar |         |         |
|-----------------|-----------------|-----------------|--------------|---------|---------|
|                 |                 |                 | BKA          | GBO     | BSA     |
| <b>PID</b>      | Denet-1         | K <sub>p</sub>  | -6.5029      | -7.0000 | -6.8514 |
|                 |                 | K <sub>i</sub>  | -0.7962      | 1.5168  | 0.5345  |
|                 |                 | K <sub>d</sub>  | -7.0000      | -3.0957 | -6.6434 |
|                 | Denet-2         | K <sub>p</sub>  | -6.3272      | -7.0000 | -6.9967 |
|                 |                 | K <sub>i</sub>  | -0.0146      | -7.0000 | -3.9598 |
|                 |                 | K <sub>d</sub>  | 0.1634       | -0.3912 | 0.2149  |
|                 | Denet-3         | K <sub>p</sub>  | -4.9536      | -7.0000 | -7.0000 |
|                 |                 | K <sub>i</sub>  | -7.0000      | -7.0000 | -6.9956 |
|                 |                 | K <sub>d</sub>  | -5.1820      | -7.0000 | -5.0803 |
|                 | Denet-4         | K <sub>p</sub>  | -6.9798      | -6.9995 | -6.9997 |
|                 |                 | K <sub>i</sub>  | -6.7340      | -5.6283 | -6.9713 |
|                 |                 | K <sub>d</sub>  | 0.2437       | -2.9731 | -1.9372 |
|                 | Denet-5         | K <sub>p</sub>  | 0.4802       | -6.9998 | -6.9981 |
|                 |                 | K <sub>i</sub>  | -0.3524      | -5.9396 | -6.8461 |
|                 |                 | K <sub>d</sub>  | 4.9296       | -6.9991 | -6.9533 |
| <b>PID+DD</b>   | Denet-1         | K <sub>p</sub>  | -5.8130      | -7.0000 | -5.9337 |
|                 |                 | K <sub>i</sub>  | -0.7635      | -1.3804 | -0.9443 |
|                 |                 | K <sub>d</sub>  | -6.9537      | -6.9954 | -6.8867 |
|                 |                 | K <sub>dd</sub> | 0.0582       | 0.1000  | -0.0992 |
|                 | Denet-2         | K <sub>p</sub>  | -6.6012      | -6.9938 | -5.7611 |
|                 |                 | K <sub>i</sub>  | -0.0079      | 1.3082  | 0.2421  |
|                 |                 | K <sub>d</sub>  | 0.0211       | -0.0158 | 0.1040  |
|                 |                 | K <sub>dd</sub> | -0.0569      | -0.1000 | 0.0611  |
|                 | Denet-3         | K <sub>p</sub>  | -5.8950      | -3.8819 | -6.7839 |
|                 |                 | K <sub>i</sub>  | -6.9985      | -6.9946 | -6.6748 |
|                 |                 | K <sub>d</sub>  | -5.4851      | -5.7380 | -6.9458 |
|                 |                 | K <sub>dd</sub> | 0.0149       | 0.1000  | -0.0950 |
|                 | Denet-4         | K <sub>p</sub>  | -7.0000      | -7.0000 | -6.9182 |
|                 |                 | K <sub>i</sub>  | -6.9999      | -7.0000 | -6.6487 |
|                 |                 | K <sub>d</sub>  | 1.6317       | 3.1993  | 2.8248  |
| K <sub>dd</sub> |                 | 0.0341          | 0.0988       | 0.0651  |         |
| Denet-5         | K <sub>p</sub>  | -0.0000         | 7.0000       | -5.8898 |         |
|                 | K <sub>i</sub>  | 0.1877          | 7.0000       | -5.7207 |         |
|                 | K <sub>d</sub>  | 1.3929          | -6.9152      | -6.4415 |         |
|                 | K <sub>dd</sub> | -0.0024         | -0.1000      | -0.0981 |         |

**EK2.** Denetleyicileri yapılarının optimize edilmiş parametreleri ( $\Delta P_b=0.05$ ).

| Denetleyici   | Parametreler |          | Algoritmalar |         |         |
|---------------|--------------|----------|--------------|---------|---------|
|               |              |          | BKA          | GBO     | BSA     |
| <b>PID</b>    | Denet-1      | $K_p$    | -6.9981      | -7.0000 | -7.0000 |
|               |              | $K_i$    | -1.0652      | -0.3844 | 0.7271  |
|               |              | $K_d$    | -4.3017      | -6.9999 | -6.9782 |
|               | Denet-2      | $K_p$    | -3.8254      | -6.9997 | -6.9104 |
|               |              | $K_i$    | 0.2909       | -1.5407 | -4.1636 |
|               |              | $K_d$    | -0.0299      | 0.2217  | -0.1711 |
|               | Denet-3      | $K_p$    | -6.8191      | -7.0000 | -6.9886 |
|               |              | $K_i$    | -6.9955      | -7.0000 | -6.9941 |
|               |              | $K_d$    | -6.8549      | -7.0000 | -3.1007 |
|               | Denet-4      | $K_p$    | -7.0000      | -6.9999 | -6.9991 |
|               |              | $K_i$    | -6.8329      | -6.9999 | -6.9992 |
|               |              | $K_d$    | 2.2371       | 2.2472  | -4.2018 |
|               | Denet-5      | $K_p$    | 1.1569       | 7.0000  | -4.6827 |
|               |              | $K_i$    | 5.2019       | -6.9999 | 1.6833  |
|               |              | $K_d$    | -2.2608      | -0.4908 | -5.9448 |
| <b>PID+DD</b> | Denet-1      | $K_p$    | -6.7508      | -7.0000 | -6.9747 |
|               |              | $K_i$    | 0.4043       | 0.6464  | 1.5080  |
|               |              | $K_d$    | -2.6753      | -2.5485 | -6.9920 |
|               |              | $K_{dd}$ | -0.0866      | -0.0999 | -0.0995 |
|               | Denet-2      | $K_p$    | -6.9981      | -7.0000 | -6.9999 |
|               |              | $K_i$    | -3.9116      | -4.7085 | -6.9941 |
|               |              | $K_d$    | -0.9791      | -1.2169 | -0.9189 |
|               |              | $K_{dd}$ | -0.1000      | -0.0999 | -0.1000 |
|               | Denet-3      | $K_p$    | -6.8074      | -7.0000 | -6.9916 |
|               |              | $K_i$    | -6.9573      | -7.0000 | -6.9547 |
|               |              | $K_d$    | -6.7589      | -7.0000 | -1.7958 |
|               |              | $K_{dd}$ | 0.0190       | -0.0622 | -0.0971 |
|               | Denet-4      | $K_p$    | -7.0000      | -6.9999 | -6.9999 |
|               |              | $K_i$    | -6.9993      | -7.0000 | -7.0000 |
|               |              | $K_d$    | -0.6553      | -0.0658 | -4.0296 |
| $K_{dd}$      |              | -0.0052  | 0.0922       | -0.0981 |         |
| Denet-5       | $K_p$        | 2.6766   | 6.9644       | -6.9995 |         |
|               | $K_i$        | -2.2610  | 7.0000       | -6.9995 |         |
|               | $K_d$        | -6.4043  | -7.0000      | -7.0000 |         |
|               | $K_{dd}$     | -0.0561  | 0.1000       | -0.0412 |         |



**EK3.** Denetleyicileri yapılarının optimize edilmiş parametreleri ( $\Delta P_b=0.1$ ).

| Denetleyici   | Parametreler |          | Algoritmalar |         |         |
|---------------|--------------|----------|--------------|---------|---------|
|               |              |          | BKA          | GBO     | BSA     |
| <b>PID</b>    | Denet-1      | $K_p$    | -7.0000      | -7.0000 | -6.9827 |
|               |              | $K_i$    | 0.2816       | -0.3791 | 0.5255  |
|               |              | $K_d$    | -6.9497      | -7.0000 | -7.0000 |
|               | Denet-2      | $K_p$    | -6.9921      | -7.0000 | -6.6598 |
|               |              | $K_i$    | -3.2496      | -1.5549 | -3.9477 |
|               |              | $K_d$    | 0.2304       | 0.2166  | 0.2680  |
|               | Denet-3      | $K_p$    | -6.9960      | -7.0000 | -6.9715 |
|               |              | $K_i$    | -7.0000      | -7.0000 | -6.9834 |
|               |              | $K_d$    | -6.0059      | -7.0000 | -4.0863 |
|               | Denet-4      | $K_p$    | -7.0000      | -7.0000 | -7.0000 |
|               |              | $K_i$    | -6.9645      | -7.0000 | -6.7842 |
|               |              | $K_d$    | 0.2896       | 2.0904  | -2.7448 |
|               | Denet-5      | $K_p$    | -5.1872      | 7.0000  | -4.0239 |
|               |              | $K_i$    | 0.4992       | -7.0000 | 0.5888  |
|               |              | $K_d$    | -0.6457      | 7.0000  | -6.8262 |
| <b>PID+DD</b> | Denet-1      | $K_p$    | -6.9610      | -7.0000 | -6.9544 |
|               |              | $K_i$    | -0.2774      | 0.2756  | 0.1069  |
|               |              | $K_d$    | -2.6317      | 0.6511  | -6.3342 |
|               |              | $K_{dd}$ | -0.0507      | -0.1000 | -0.0728 |
|               | Denet-2      | $K_p$    | -4.3184      | -7.0000 | -6.5113 |
|               |              | $K_i$    | -1.9837      | -3.3987 | -3.2597 |
|               |              | $K_d$    | -1.1230      | -1.9226 | -0.7731 |
|               |              | $K_{dd}$ | -0.0997      | -0.1000 | -0.0795 |
|               | Denet-3      | $K_p$    | -6.8668      | -2.5332 | -6.9996 |
|               |              | $K_i$    | -6.9981      | -6.8526 | -5.2155 |
|               |              | $K_d$    | -5.5480      | -6.9998 | -5.2706 |
|               |              | $K_{dd}$ | -0.0270      | 0.0367  | -0.0917 |
|               | Denet-4      | $K_p$    | -6.9983      | -2.8823 | -4.9921 |
|               |              | $K_i$    | -7.0000      | -3.3511 | -6.5621 |
|               |              | $K_d$    | 0.5746       | -2.4934 | 2.9372  |
| $K_{dd}$      |              | -0.0273  | -0.1000      | 0.0247  |         |
| Denet-5       | $K_p$        | 2.1392   | -1.8415      | 3.3434  |         |
|               | $K_i$        | 6.1841   | -7.0000      | -2.4560 |         |
|               | $K_d$        | -5.6160  | -7.0000      | 2.0471  |         |
|               | $K_{dd}$     | 0.0132   | -0.0998      | 0.0117  |         |



## Güldüren (Emet-Kütahya) Bölgesindeki Demir Cevherleşmesinin Jeolojik, Mineralojik ve Jenetik Açından İncelenmesi

### Geological, Mineralogical and Genetic Investigation of Iron Mineralization in Güldüren (Emet-Kütahya) Region

<sup>1</sup>Nursel ÖKSÜZ , <sup>2</sup>Özge KABCUK , <sup>3</sup>Mehmet SAVAS , <sup>4</sup>İsmail KOÇAK 

<sup>1</sup>Yozgat Bozok Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Yozgat, Türkiye

<sup>2</sup>Yozgat Bozok Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

<sup>3</sup>ETİ MADEN, Emet Bor İşletme Müdürlüğü, Kütahya, Türkiye

<sup>4</sup>Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bandırma/Balıkesir, Türkiye

<sup>1</sup>nursel.oksuz@bozok.edu.tr, <sup>2</sup>ozge.kabcuk@gmail.com,

<sup>3</sup>msavas69@hotmail.com, <sup>4</sup>ismailkocak81@gmail.com

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 6 March 2023

Accepted : 11 April 2023

##### Keywords:

Eğrigöz Granitoid,  
Hydrothermal, Skarn,  
Magnetite, Kütahya (Emet)  
Iron

#### ABSTRACT

The study area is in Güldüren Village, Emet district of Kütahya province, and its distance from the city center is 93 km on average and 25 km from Emet. While the Co/Ni values of the samples indicate that the mineralization comes from a hydrothermal source, the V/(V+Ni) ratio indicates that oxic conditions are also dominant in the mineralization in the region. In addition to these, when the  $\sum$ REE contents and the LREE/HREE ratio are evaluated, it can be concluded that hydrothermal solutions play an important role in the ore formations in the study area. It can be concluded that the mineralization is a contact metasomatic formation between Eğrigöz granitoid and recrystallized limestone. However, the presence of vein-shaped mineralizations in the field, geochemical data, the results in the graphs, and the paragenesis suggest that the iron formations in the study area occur in two different origins, both skarn and hydrothermal.

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

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 6 Mart 2023

Kabul : 11 Nisan 2023

##### Anahtar Kelimeler:

Eğrigöz Granitoidi,  
Hidrotermal, Skarn,  
Manyetit, Kütahya (Emet)  
Demir

#### ÖZET

İnceleme alanı Kütahya ili Emet ilçesi Güldüren Köyü sınırları içinde olup, il merkezine uzaklığı ortalama 93km, Emet'e ise 25km'dir. Bölgeden alınan cevher örneklerindeki Co/Ni değerleri cevherleşmenin hidrotermal bir kaynaktan geldiğini işaret ederken, V/(V+Ni) oranı ise bölgede gerçekleşen cevherleşmede oksik şartların da hakim olduğunu ifade etmektedir. Bunların yanında  $\sum$ NTE içerikleri ve HNTE/ANTE oranı değerlendirildiğinde ise inceleme alanındaki cevher oluşumlarında hidrotermal çözeltilerin önemli rol aldığı sonucuna varılabilir. Cevher parajenezi temel olarak manyetit ve hematit oluşurken daha az oranda da götit ve pirit gözlenmiştir. Gang ise kuvarstan oluşmaktadır. Çalışma alanındaki cevherleşmenin Eğrigöz granitoidi ile rekristalize kireçtaşı arasında gelişen kontakt metasomatik bir oluşum olduğu sonucuna varılabilir. Ancak arazide damar şeklinde gözlenen cevherleşmelerin varlığı, jeokimyasal veriler, çizilen grafiklerdeki sonuçlar ve mineral parajenezi çalışma alanındaki demir oluşumlarının hem skarn hem de hidrotermal olmak üzere iki farklı kökende oluştuğunu düşündürmektedir.

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

ORCID: <sup>1</sup>0000-0001-7371-3202

<sup>2</sup>0000-0003-3206-3578

<sup>3</sup>0000-0002-8780-1091

<sup>4</sup>0000-0002-4519-4561

## 1. GİRİŞ

İç Batı Ege bölgesinde yer alan Güldüren (Emet-Kütahya) bölgesi, demir mineral zenginleşmeleri ve oluşumlarının sıkça görüldüğü bir bölgedir. Çalışmaya konu olan demir cevherleşmesi, Kütahya ilinin Emet ilçesine bağlı, Güldüren Köyü yakınında gözlenmektedir. Cevherleşmenin Güldüren köyüne uzaklığı 25km'dir.

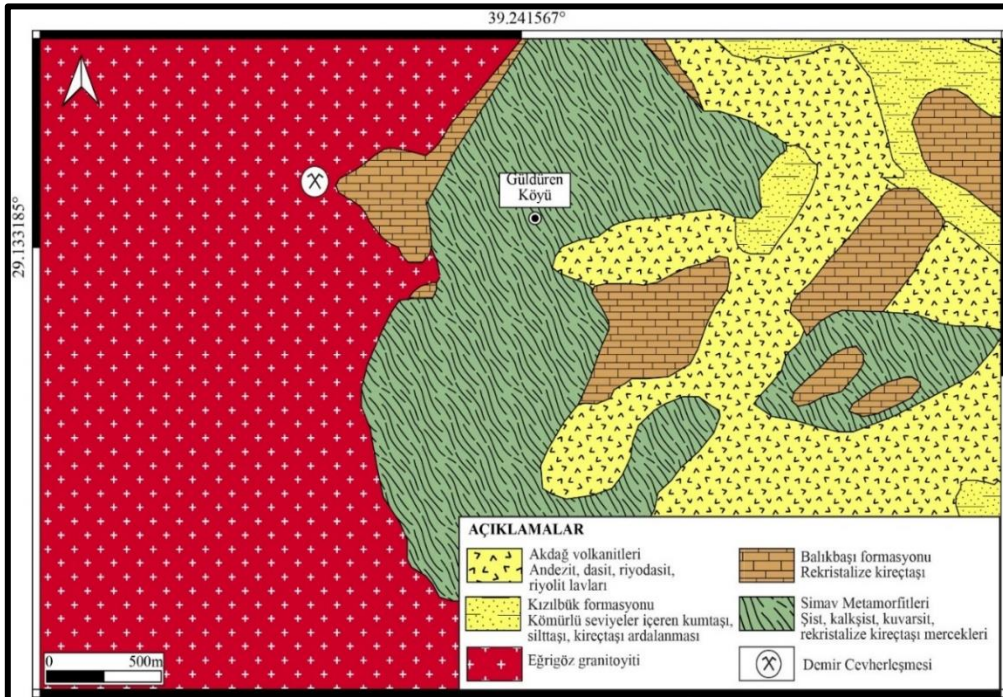
Demir, hem silikatlı hem de sülfürlü mineralleri oluşturabilen bir elementtir. Oluşum açısından ise ultramafik kayalarla (gabro ve anortozit gibi) ya da granitoidlerle ilişkili volkano-sedimanter, lateritik, sünger/bataklık, metamorfik, oolitik, bantlı ve plaser gibi birçok oluşum tipi sergilemektedir. Bölgede gözlenen cevherleşmenin de ilişkili olduğu düşünülen I-tipi, kalk-alkalin karakterli Eğrigöz graniti (granitoid), Sakarya Kıtası, Mendere Masifi ve bindirme istifinin farklı dilimleri içine sokulan KB-GD doğrultulu bir magmatik kuşak içerisinde yer almaktadır [1]. Eğrigöz graniti aynı zamanda antimuan, demir oluşumları, Au-Ag içeren mezotermal Pb-Zn-Cu damarları, skarnlar ve gossanları içeren bir dizi mineral oluşumu ile ilişkilidir [2,3].

Çalışma alanının yakın civarında daha önce yapılan çeşitli çalışmalar da söz konusudur [2,4,5]. Albayrak [4], çalışma alanının kuzeyinde yaptığı çalışmada Sakarı tepe, Katranlı dere, Çavdarlık dere, Gögez, Elekkaşı sırtı, Maden tepe ve Karataş tepe cevherleşmelerini incelemiştir. Karataş tepe cevherleşmesinin hidrotermal tipi cevherleşme diğer tüm cevherleşmelerin ise skarn tipi cevherleşme olduğunu bildirmiştir. Uğurcan [5] ise çalışma alanının güney kesiminde (Kalkan ve Karağıl) yaptığı araştırmada cevherleşmeleri skarn tipi olarak tanımlamıştır.

Bölgede demir cevherleşmesi ile ilgili daha önce jeokimyasal ve köken olarak herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Bu sebeple de bu çalışmanın ana hedefleri, Güldüren (Emet-Kütahya) bölgesinde gözlenen demir cevherleşmelerinin maden jeolojisi ve jeokimyası incelenerek, söz konusu demir oluşumlarının kökeni, cevher yan kayaç ilişkisi ve cevher parajenezini üzerine veriler üreterek, oluşum koşullarının aydınlatılması, ortaya çıkan sonuçlar doğrultusunda da yeni hedef sahaların ortaya çıkarılmasına katkıda bulunmaktır.

## 2. ÇALIŞMA ALANININ JEOLJİSİ

İnceleme alanı İç Batı Anadolu Bölgesi'nde Kütahya Emet Güldüren Köyü sınırları içinde olup, 1/25.000 ölçekli Türkiye topoğrafik haritasında J22d1 paftası içinde yer almaktadır (Şekil 1). Çalışma alanında gözlenen Fe cevherleşmesinin de Şekil 2'de gözlenen bu rekristalize kireçtaşı ile Eğrigöz granitoidi kantağında ve kırık çatlaklarda hidrotermal çözeltilerle oluştuğu düşünülmektedir. Senozoyik birimler içerisinde yer alan Eğrigöz granitoidi ise tipik olarak granit, granodiyorit ve mikrogranit bileşimindedir. Granitler gri renkli, yer yer aşırı ayrışmalıdır. Eğrigöz graniti tabanda yer alan kayalara sokulum yapmaktadır. Arazi çalışmaları sırasında rekristalize kireçtaşlarının Eğrigöz granitoidine sokulum yaptığı dokanak boyunca hornfels oluşumları ve maneyit cevherleşmesi gözlenmiştir (Şekil 3). Kızılbük Formasyonu, kumtaşları ile ardalamalı silttaşları ile başlamaktadır. Kalk-alkalen volkanizmaya ilişkin özellikler sunan andezit, dasit, riyodasit ve riylit bileşimli lavlar dasitik-riyolitik domlar ve lav akıntılarını şeklinde gözlenmektedir. Akdağ volkanitleri ise kalk-alkalen volkanizmaya ilişkin özellikler sunan andezit, dasit, riyodasit ve riylit bileşimli lavlar dasitik-riyolitik domlar ve lav akıntılarını şeklinde gözlenmektedir.

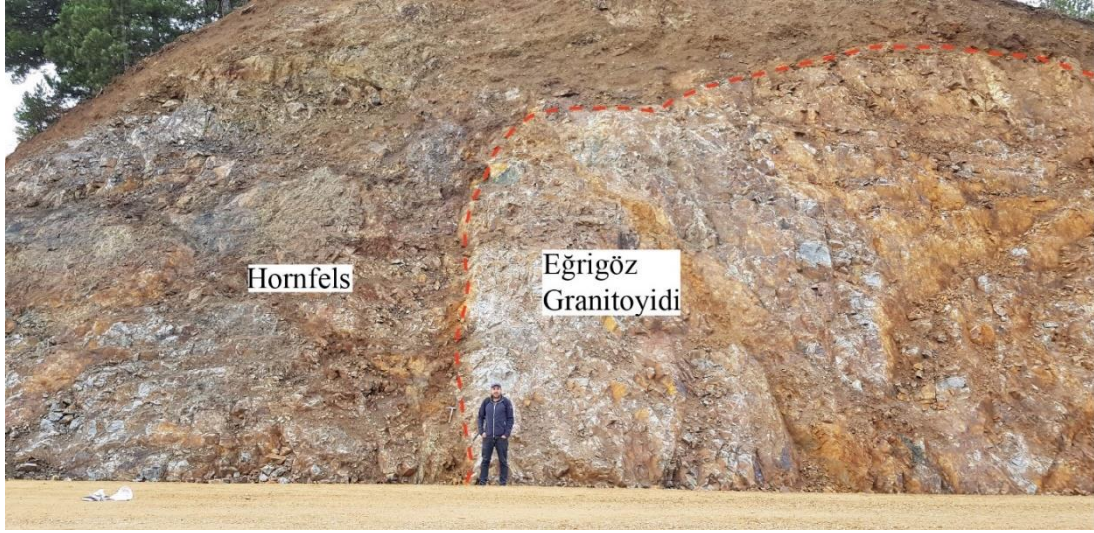


Şekil 1. İnceleme alanı ve çevresini gösterir jeolojik harita [6].





Şekil 2. Rekrystalize kireçtaşı-granitoyid kantağı.



Şekil 3. Eğrigöz granitoyidi ve hornfels.

### 3. MATERYAL VE METHOD

Çalışma alanından toplam 18 adet cevher örneği, 20 adet de yan kayaç örneği alınmıştır. Çalışma, cevher örneklerden hazırlanan parlak kesit yapımı ve kimyasal analizlerin yapılması için örnek hazırlama işlemlerinin tamamlanması şeklinde yürütülmüştür. Jeokimyasal verileri elde etmek için 18 adet cevher örneği Yozgat Bozok Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Laboratuvarında 100 mesh büyüklüğünde toz hale getirilmiştir. Bu örneklerin ana oksit, eser element ve Nadir Toprak Elementleri (NTE) analizleri de ICP-ES ve ICP-MS yöntemi ile Maden Tetkik ve Arama (MTA) Genel Müdürlüğü Laboratuvarında yaptırılmıştır. Bunun yanında 18 adet cevher örneğinden MTA laboratuvarında parlak kesit hazırlanmıştır. Yapılan parlak kesitler Yozgat Bozok Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nde bulunan Leica marka üstten aydınlatmalı polarizan mikroskop altında incelenerek cevherin parajenezi ve yapı-doku özellikleri belirlenmiştir.

### 4. BULGULAR

#### 4.1. Cevher Mineralojisi

Çalışma alanında damar ve merccek şeklinde gözlenen cevherleşmenin parajenezini belirlemek için öncelikle parlak kesit yapılarak üstten aydınlatmalı mikroskopta parajenez ve yapı-doku özellikleri incelenmiştir. Bunları desteklemek için 15 adet örnekten de XRD (X-Ray Difraktogramı) analizi yaptırılmıştır. Tüm bu çalışmalara göre çalışma alanındaki cevher parajenezi; manyetit, hematit, götit ve pirit, gang ise kuvars olarak belirlenmiştir.

##### 4.1.1. Manyetit ( $Fe_3O_4$ )

Demir oksit bileşimli olan manyetit, magmatik ve metamorfik kayalarda aksesuar olarak bulunurken, kontakt metazomatik, bantlı demir oluşumları dahil olmak üzere sedimanter kayalarda, göl ve deniz tortullarında hem

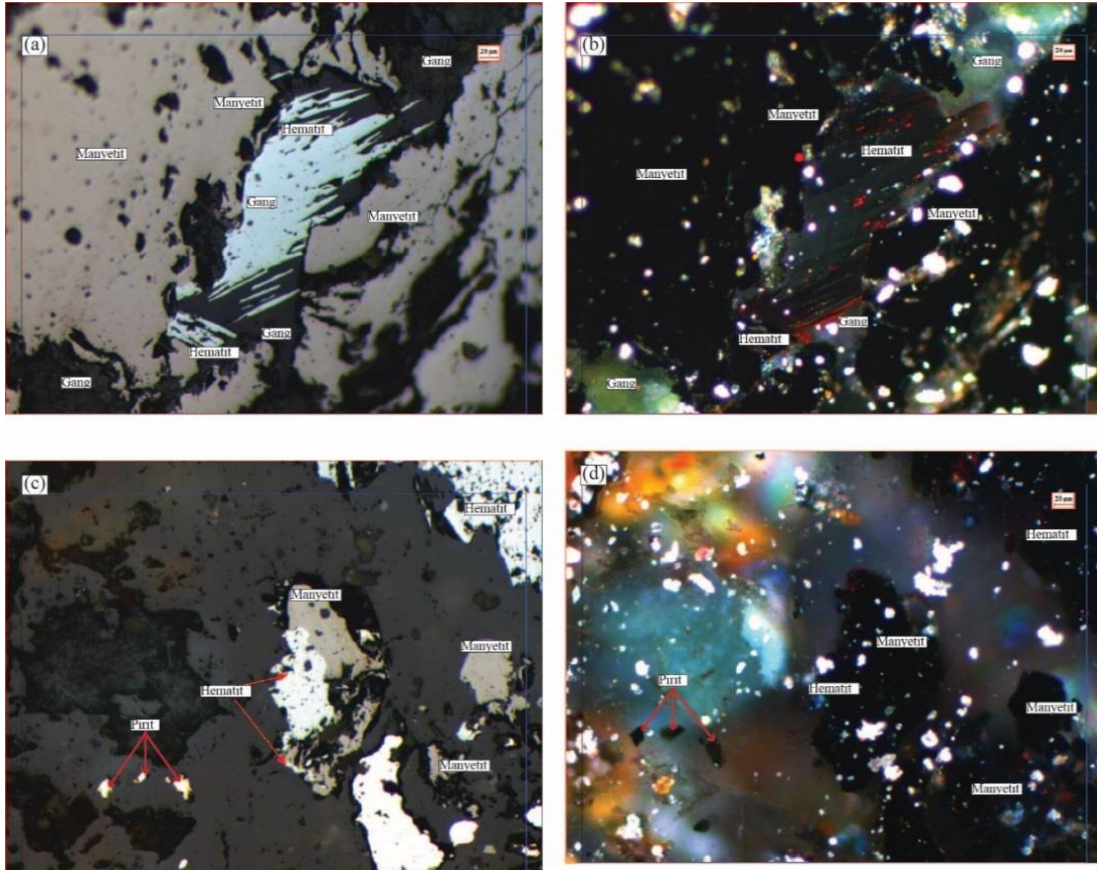


kırıntılı taneler hem de manyetofosiller olarak oluşabilir [7]. Manyetit, cevherin oluşum koşullarını değerlendirmede oldukça büyük önem taşımaktadır. Bunun yanında, ortamın oksijeni ile reaksiyona girerek hematite dönüşebilir. Bu dönüşüm ortamın oksijen fugasitesini anlamak için de gösterge oluşturmaktadır [7]. İnceleme alanındaki cevher örneklerin parlak kesit incelemelerinde de en yaygın mineral manyetit olarak gözlenmiştir (Şekil 4a-d). Manyetitler maden mikroskopik incelemelerde birinci nikelde gri kahverengi gözlenirken ikinci nikelde ise izotrop tur (Şekil 4a-d). Hematite dönüşümler ise oldukça yaygındır (Şekil 4c, d).

#### 4.1.2. Hematit ( $Fe_2O_3$ )

Maden minerallerinin yapı ve doku özelliklerinin bilinmesi, yüzey biçimlerinin yalnız bilimsel açıdan değil aynı zamanda oluşum koşullarının aydınlatılması, cevher hazırlama ve metalürjik işlemler için de önemlidir [8]. Bunun yanında mineraller izometrik, levhamsı ve iğnemsî olmak üzere üçe ayrılır. Aynı mineraller değişik kökenli yataklarda değişik kristal yapısı gösterir. Bunun yanında hematit, yeryüzünde yaygın olarak gözlenen bir diğer demir oksittir. Hidrotermal damarlarda ve magmatik kayalarda aksesuar mineral olarak bulunabilir. Volkanik ve birçok metamorfik kayalarda, kontakt metamorfik yataklarda, birincil veya ikincil olarak sedimanter kayalarda yaygın olarak oluşabilir [8]. Dünyada gözlenen çoğu önemli hematit oluşumu sedimanter kökenli olarak bilirse de değişik kökenli yataklarda, değişik kristal şekillerinde gözlenebilir. Örneğin hematit, yüksek ısıda oluşan maden yataklarında iğne, düşük ısıda oluşan yataklarda ise levha biçimi gösterir. Çok düşük ısıda oluşan hematitler ise ışınal-lifsi biçimde olup jellerden oluşur [8].

Çalışma alanında ise hematit yaygın olarak gözlenen ikinci mineraldir. Parlak kesit incelemelerinde birinci nikelde krem, açık sarı, ikinci nikelde ise oldukça belirgin mavimsi renkte gözlenmekte iken (Şekil 4a-d) bazı kesitlerde ise oldukça belirgin kırmızı iç yansıma göstermektedir (Şekil 4b,d). Manyetitlerin hematite dönüşümü oldukça yaygın gözlenmektedir (Şekil 4a, c). Mineral, bazı kesitlerde çubuksu yapısı ile de dikkat çekmektedir (Şekil 4a).



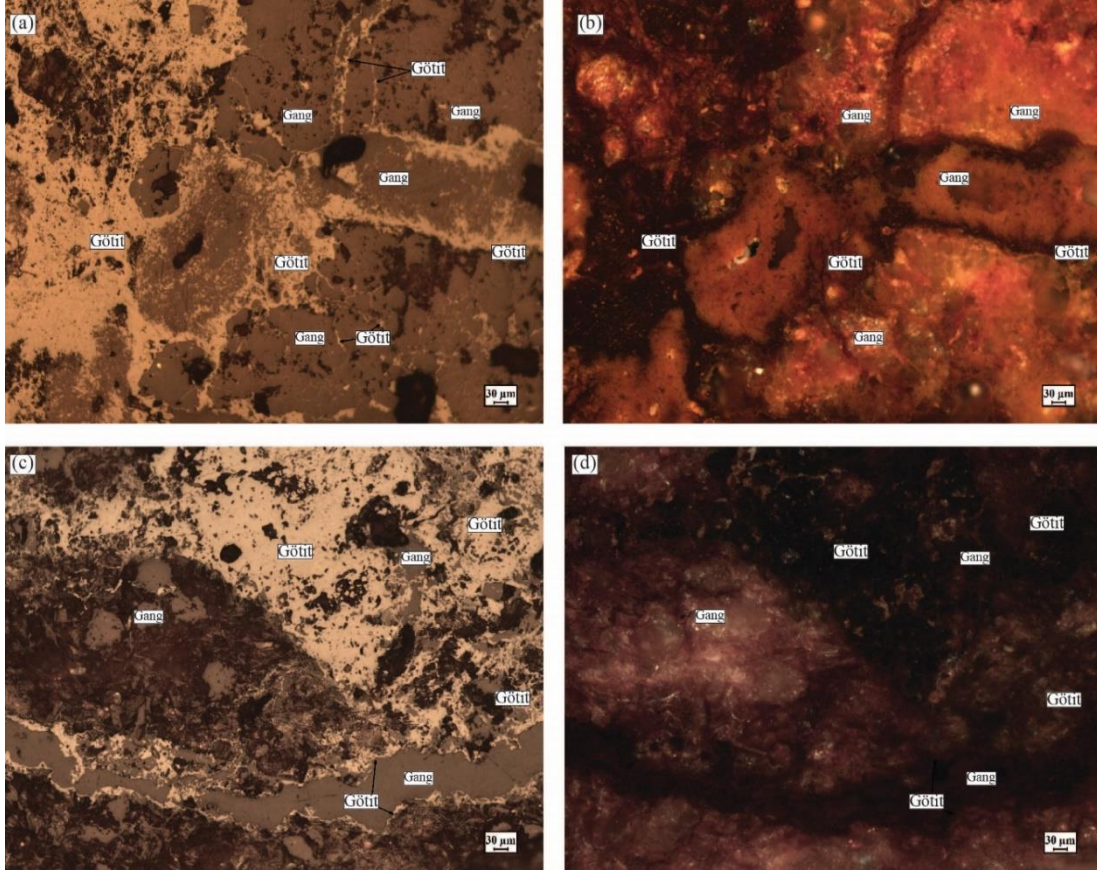
Şekil 4. Hematitin ve manyetitin parlak kesit görünümü, I. Nikol, b. Hematitin ve manyetitin parlak kesit görünümü, II. Nikol, c. Manyetitin hematite dönüşümü, I. Nikol, d. Manyetitin hematite dönüşümü II. Nikol.

#### 4.1.3. Götit ( $FeO(OH)$ )

Oksihidroksit bileşimli götit; ferrosit ve lepidokrositin polimorfudur. Götit, düşük sıcaklıktaki oluşumlarda özellikle sedimanter ortamlarda ve demirce zengin cevherleşmelerin olduğu yerlerde günlenme sonucunda sıklıkla gözlenir [9]. Bunun yanında götit oluşumu,  $Fe^{2+}$ 'nin  $Fe^{3+}$ 'e oksidasyonu sonucunda da oluşabilir. Bu da yukarıda bahsedildiği gibi götitin yüzey koşullarında günlenme sonucunda oluşmasına yol açar. Bu şekilde gözlenen oksidasyon değişikliği nedeniyle, götite yaygın olarak psödomorf oluşumlara sık rastlanır [10].



Götüt, çalışma alanında birçok parlak kesitte yoğun olarak dikkat çekmektedir. Birinci nikelde açık-koyu gri renklerde gözlenen götüt, ikinci nikelde sarı, turuncu, kırmızı iç yansıması ile tipiktir (Şekil 5a,b). Bazı parlak kesitlerde ise izotrop özellik göstermektedir (Şekil 5d). Çoğu örnekte gangi ornadır şekilde geliştiği gözlenmiştir (Şekil 5a-d).



Şekil 5.a, c. Götütün parlak kesit görünümü, I. Nikol. b, d. Götütün parlak kesit görünümü II. Nikol.

#### 4.1.4. Pirit (FeS<sub>2</sub>)

Pirit, yeryüzünde yaygın olarak gözlenen bir sülfür mineralidir. Magmatik ayrışma ile oluşabildiği gibi aynı zamanda magmatik kayalarda, kontakt metamorfik yataklarda, hidrotermal damarlarda ve birincil ve ikincil olarak bazı sedimanter kayalarda bulunabilir.

Çalışma alanında diğer minerallere göre daha az oranda bulunan pirit, parlak kesitlerde iki farklı şekilde gözlenmektedir. Birinci oluşum, kırık ve çatlakları doldurarak damar şeklinde gözlenmektedir (Şekil 6a, b). İkinci oluşum ise daha yaygın olarak gözlenen ve hematiti ornatarak gelişen piritlerdir (Şekil 6c). İlk nikelde oldukça belirgin sarı, açık sarı ikinci nikelde ise belirgin izotropdur (Şekil 6b).

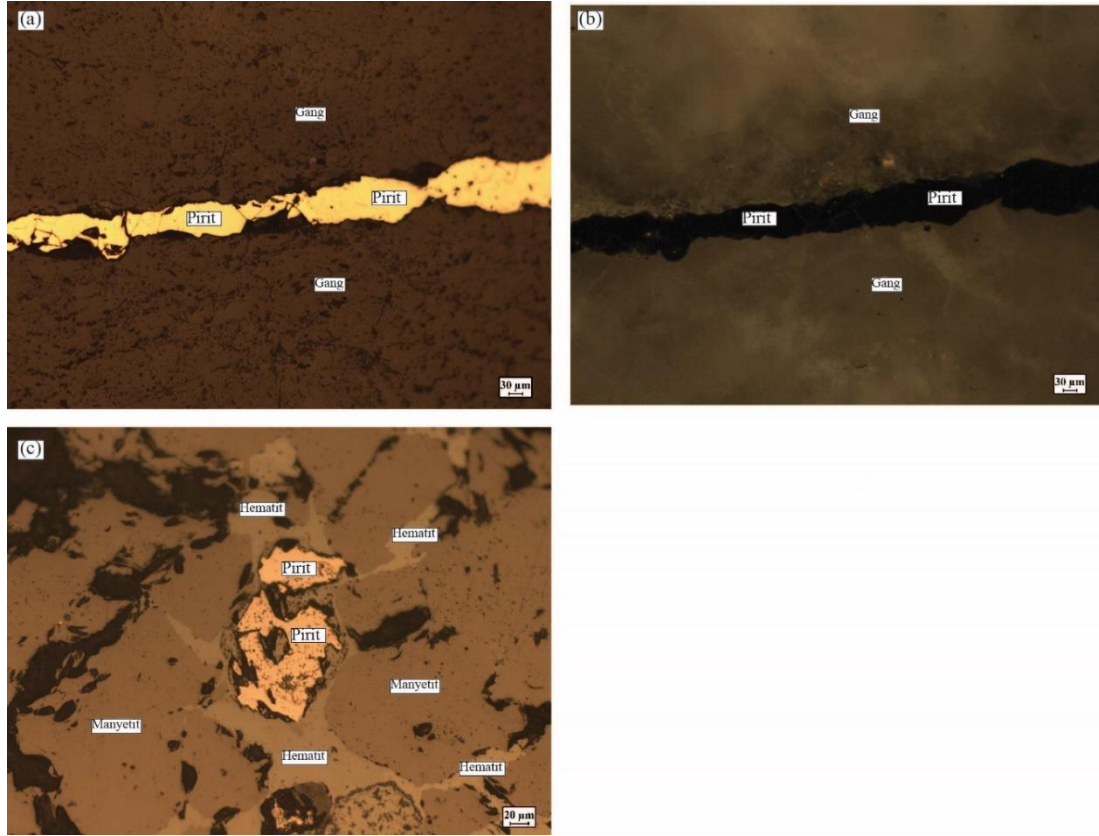
#### 4.2. Jeokimya

Bu bölümde Güldüren demir cevherleşmesinden derlenen 18 adet örneğin ana oksit, eser element ve Nadir Toprak Element (NTE) verileri kullanılarak cevherleşmenin kökeni ve oluşumuna yönelik yaklaşımlarda bulunulmuştur.

Güldüren demir cevherleşmesinden derlenen 18 adet cevher numunesinin SiO<sub>2</sub> değerleri en düşük %1.1, en yüksek %73.2 ve ortalama %39.8, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> değerleri en düşük %0.2, en yüksek %17.9 ve ortalama %8.4; CaO değerleri en düşük %0.1, en yüksek %4.7 ve ortalama %1.2, Na<sub>2</sub>O değerleri en düşük %0.1, en yüksek %4.4 ve ortalama %1.8; MgO değerleri en düşük %0.3, en yüksek %8.2 ve ortalama %2.0; K<sub>2</sub>O değerleri en düşük %0.0, en yüksek %6.6 ve ortalama %3.1 arasında değişken değerlere sahiptir. Cevher örneklerinde bollukları daha az olan MnO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, TiO<sub>2</sub> gibi ana bileşen içerikleri ise %10'den daha düşük değerlerdedir. Güldüren demir cevherleşmesinde önemli yer tutan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> değerleri en düşük %1.1, en yüksek %93.1 ve ortalama %35.3 oranında bulunmakta olup numunelerde belirlenen en yüksek Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarı ana çalışma alanından alınan KE-21 kodlu örnekte % 93.1'dir. Bu verilere göre birincil cevher örneklerin başlıca Si, Al, Fe, Ca, Mg gibi ana oksitlerce daha zengin olduğu görülmektedir (Tablo 1).

Sedimanlardaki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> oranı, sediment taşınımından veya diyajenezden çok az etkilenmesine karşın volkanik madde katkısının varlığından önemli ölçüde etkilenmektedir [11,12]. Volkanik kayalardaki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> oranı 8.00-21.00 aralığında bulunmaktadır [11,12]. Güldüren demir cevherleşmesinin Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>

oranları 0.38-65.50 ve ortalama 22.22 olarak hesaplanmıştır (Tablo 1). Bu oran, volkanik aktivitenin çalışma alanındaki cevher oluşumunda önemli ölçüde etkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 6 a. Damar şekilli pirit, I. Nikol. b. Damar şekilli pirit, II. Nikol. c. Hematiti ornatarak oluşan pirit, I. Nikol.

Tablo 1. Çalışma alanından alınan cevher örneklerinin ana oksit değerleri (%).

| %     | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | MgO | MnO | Na <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | TiO <sub>2</sub> | A.Za | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /<br>TiO <sub>2</sub> |
|-------|------------------|--------------------------------|-----|--------------------------------|------------------|-----|-----|-------------------|-------------------------------|------------------|------|--|
| KE-1  | 73.2             | 13.1                           | 0.7 | 1.4                            | 5.2              | 0.3 | 0.1 | 3.3               | 0.1                           | 0.2              | 1.3  | 65.50  |
| KE-2  | 3.3              | 0.2                            | 0.4 | 8.2                            | 0.1              | 4.0 | 0.2 | 0.1               | 0.1                           | 0.1              | 0.0  | 2.00   |
| KE-3  | 66.4             | 15.1                           | 4.7 | 1.1                            | 4.4              | 0.8 | 0.1 | 3.9               | 0.2                           | 0.5              | 2.4  | 30.20  |
| KE-8  | 69.0             | 15.3                           | 2.4 | 2.7                            | 4.1              | 1.1 | 0.1 | 3.2               | 0.2                           | 0.6              | 0.8  | 25.50  |
| KE-9  | 68.4             | 15.7                           | 2.2 | 2.6                            | 3.3              | 1.1 | 0.1 | 4.4               | 0.2                           | 0.6              | 1.0  | 26.17  |
| KE-10 | 66.7             | 14.6                           | 4.5 | 2.4                            | 5.8              | 0.7 | 0.1 | 3.1               | 0.2                           | 0.5              | 1.0  | 29.20  |
| KE-13 | 50.1             | 17.9                           | 0.9 | 11.2                           | 3.2              | 8.2 | 0.3 | 0.3               | 0.3                           | 1.3              | 6.0  | 13.77  |
| KE-16 | 2.6              | 0.2                            | 0.4 | 90.9                           | 0.1              | 2.2 | 0.2 | 0.1               | 0.1                           | 0.1              | 2.1  | 2.00   |
| KE-18 | 1.8              | 0.3                            | 0.1 | 91.7                           | 0.1              | 2.1 | 0.2 | 0.1               | 0.1                           | 0.1              | 2.5  | 3.00   |
| KE-21 | 1.1              | 0.3                            | 0.1 | 93.1                           | 0.1              | 1.5 | 0.4 | 0.1               | 0.1                           | 0.1              | 2.4  | 3.00   |
| KE-22 | 4.4              | 0.4                            | 0.6 | 88.7                           | 0.1              | 3.2 | 0.2 | 0.1               | 0.1                           | 0.2              | 1.9  | 1.93   |
| KE-23 | 19.1             | 0.3                            | 0.3 | 71.9                           | 2.3              | 1.9 | 0.1 | 0.2               | 0.1                           | 0.1              | 3.1  | 4.67   |
| KE-24 | 1.7              | 0.6                            | 0.1 | 90.5                           | 3.1              | 1.4 | 0.3 | 0.1               | 0.2                           | 0.0              | 1.1  | 45.92  |
| KE-25 | 71.4             | 12.8                           | 0.7 | 1.7                            | 6.6              | 0.3 | 0.2 | 3.1               | 0.1                           | 0.2              | 2.1  | 59.72  |
| KE-26 | 68.0             | 15.3                           | 0.8 | 1.8                            | 6.3              | 1.1 | 0.1 | 3.9               | 0.2                           | 0.5              | 1.8  | 28.61  |
| KE-27 | 64.9             | 15.5                           | 1.7 | 3.0                            | 5.7              | 1.2 | 0.3 | 3.4               | 0.2                           | 0.7              | 2.9  | 21.49  |
| KE-28 | 66.3             | 14.0                           | 0.5 | 2.9                            | 6.1              | 1.5 | 0.0 | 2.9               | 0.1                           | 0.4              | 1.6  | 36.92  |
| KE-29 | 17.5             | 0.2                            | 0.5 | 69.2                           | 0.0              | 2.8 | 0.1 | 0.1               | 0.3                           | 0.4              | 2.7  | 0.38   |
| MİN   | 1.1              | 0.2                            | 0.1 | 1.1                            | 0.0              | 0.3 | 0.0 | 0.1               | 0.1                           | 0.0              | 0.0  | 0.38   |
| MAX   | 73.2             | 17.9                           | 4.7 | 93.1                           | 6.6              | 8.2 | 0.4 | 4.4               | 0.3                           | 1.3              | 6.0  | 65.50  |
| ORT   | 39.8             | 8.4                            | 1.2 | 35.3                           | 3.1              | 2.0 | 0.2 | 1.8               | 0.2                           | 0.4              | 2.0  | 22.22  |

Co elementinin değişken karakteristikleri Ni ile yakından ilişkilidir. Co/Ni oranı ise demir yataklarındaki cevher oluşum proseslerinin oluşumunu anlamak için oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır [13,14]. Özellikle sedimanter ortam ve sedimantasyon hakkında karar veren, deniz tabanında bir sıcak su sedimantasyonunun kılavuz çizgisidir [15]. Bu verilere göre Co/Ni<1 değeri sedimanter kökeni işaret ederken [15], Co/Ni>1 ise hidrotermal ortamını ifade eder [13,16]. Bu çalışmadaki yataklardan alınan örneklerdeki Co/Ni değerleri 2 örnekte 1'in altında iken, 16 örnekte ise 1'in üzerinde gözlenmiştir (Tablo 2). Buna göre cevherleşmenin, hidrotermal bir kaynaktan geldiği söylenebilir. Vanadium alterasyon anında oldukça duraylı bir elementtir [17]. V/(V+Ni) değeri, karasal katkının artışına bağlı olarak yükselir. Ayrıca aerobik mikrobiyal metabolik prosesler anında da oksik şartlar hakimdir [17]. Bunun yanında V/(V+Ni) oranı 0.60'dan düşük ise mineralizasyon anındaki şartların anoksik olduğunu ifade eder [18]. Çalışma alanındaki cevher örneklerinde V/(V+Ni) oranı tüm örneklerde 0.60'ın üstünde hesaplanmıştır (Tablo 2). Dolayısı ile bölgede gerçekleşen cevherleşmede oksik şartların hakim olduğu söylenebilir. As, Cu, Co Mo, Pb, Sb, Sr, Bi ve V gibi elementler hidrotermal akışkanlarda zenginleşme gösterir [19-21]. Bu elementlere bakıldığında çalışma alanındaki tüm cevher örneklerinde zenginleşme gözlenmektedir (Tablo 2). Cevherlerdeki düşük Mo içeriği hidrotermal akışkanlardaki düşük sıcaklığı yansıtabilir [22,23]. Çalışma alanında bu değer 6.00-0.80 ppm (ortalama 2.24ppm) aralığında olup cevherleşmede düşük sıcaklıktaki bir hidrotermal oluşumdan bahsedilebilir (Tablo 2). [22]'ye göre yüksek Ba ve düşük Co, Ni ve Cu içerikleri ya organikçe zengin sedimentlerden çözülmeyi ya da hidrotermal sistemlerde derinlerdeki baritin çökeltme eksikliğini gösterir. Sedimantasyon ve volkanik aktivitenin etkisinden dolayı hidrotermal çözeltilerde Ba konsantrasyonu, deniz suyundan daha yüksektir. Ba konsantrasyonu, çalışma alanındaki cevher örneklerinde 1510.20-5.20ppm (ortalama 711.97ppm)'dir (Tablo 2). Oldukça yüksek gözlenen Ba içeriklerine göre çalışma alanındaki cevherleşmeler hidrotermal oluşumu karakterize etmektedir. Hidrotermal yataklardaki Co içeriği ise hidrojenetik yataklara göre daha düşüktür. Yüksek Co konsantrasyonu aynı zamanda derin denizel çevrenin göstergesidir [24]. Çalışma alanındaki cevher örneklerine ait Co değeri 14.40-49.60ppm (ortalama 31.47ppm) değerindedir (Tablo 2). Bu veriler de cevherleşmedeki hidrotermal kökenli bir cevherleşmeyi yansıtmaktadır.

**Tablo 2.** Çalışma alanından alınan cevher örneklerinin element değerleri (ppm).

| ppm          | As    | Be   | Bi   | Cd    | Co    | Cu    | Ga    | Ge    | Hf   | In   | Mo   | Ni    | Sb   | Tl   | V      |
|--------------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|------|------|--------|
| <b>KE-1</b>  | 33.80 | 3.90 | 0.10 | 0.10  | 43.30 | 57.50 | 17.00 | 0.70  | 1.60 | 0.10 | 3.60 | 2.50  | 1.00 | 1.10 | 12.40  |
| <b>KE-2</b>  | 17.60 | 0.30 | 3.90 | 35.10 | 23.60 | 84.20 | 10.70 | 9.50  | 0.30 | 0.10 | 1.20 | 6.20  | 1.10 | 0.10 | 34.30  |
| <b>KE-3</b>  | 6.70  | 3.00 | 0.10 | 0.10  | 27.50 | 13.20 | 18.20 | 0.50  | 0.70 | 0.10 | 1.70 | 1.60  | 0.90 | 0.40 | 43.00  |
| <b>KE-8</b>  | 7.30  | 3.20 | 0.10 | 0.10  | 41.30 | 2.00  | 20.60 | 0.80  | 1.00 | 0.10 | 0.80 | 2.90  | 4.10 | 1.00 | 45.90  |
| <b>KE-9</b>  | 2.90  | 3.50 | 0.30 | 0.20  | 49.60 | 19.70 | 21.20 | 0.80  | 0.70 | 0.10 | 1.30 | 7.10  | 3.00 | 0.80 | 47.60  |
| <b>KE-10</b> | 4.70  | 3.50 | 0.30 | 0.60  | 32.40 | 20.60 | 19.00 | 0.80  | 1.30 | 0.10 | 6.00 | 1.70  | 1.50 | 0.60 | 38.40  |
| <b>KE-13</b> | 27.10 | 3.90 | 0.10 | 3.00  | 23.10 | 6.30  | 26.10 | 1.70  | 0.20 | 0.10 | 1.80 | 34.50 | 3.90 | 0.60 | 124.40 |
| <b>KE-16</b> | 15.50 | 0.20 | 6.50 | 36.10 | 14.40 | 3.90  | 6.30  | 8.40  | 0.10 | 0.10 | 1.20 | 13.10 | 2.00 | 0.30 | 23.70  |
| <b>KE-18</b> | 17.70 | 0.10 | 4.20 | 37.70 | 24.60 | 6.20  | 8.40  | 10.40 | 0.20 | 0.10 | 2.80 | 1.20  | 1.40 | 0.20 | 25.00  |
| <b>KE-21</b> | 9.10  | 0.40 | 8.20 | 36.40 | 19.10 | 0.10  | 12.30 | 8.70  | 0.30 | 0.10 | 1.60 | 2.00  | 2.00 | 0.30 | 26.50  |
| <b>KE-22</b> | 29.20 | 3.80 | 0.10 | 0.10  | 42.20 | 56.50 | 16.20 | 0.60  | 1.50 | 0.10 | 3.50 | 2.40  | 0.90 | 1.00 | 12.50  |
| <b>KE-23</b> | 16.50 | 0.20 | 3.60 | 33.20 | 23.40 | 83.90 | 10.40 | 9.20  | 0.20 | 0.10 | 1.10 | 6.10  | 1.20 | 0.20 | 33.50  |
| <b>KE-24</b> | 6.80  | 2.90 | 0.10 | 0.20  | 26.50 | 13.60 | 17.20 | 0.40  | 0.60 | 0.10 | 1.80 | 1.50  | 0.80 | 0.30 | 44.90  |
| <b>KE-25</b> | 7.20  | 3.10 | 0.10 | 0.10  | 40.80 | 3.10  | 19.90 | 0.70  | 1.10 | 0.10 | 0.90 | 2.80  | 3.50 | 0.90 | 46.10  |
| <b>KE-26</b> | 3.10  | 3.40 | 0.20 | 0.50  | 48.20 | 18.50 | 20.60 | 0.80  | 0.80 | 0.10 | 1.20 | 6.90  | 2.80 | 0.80 | 39.20  |
| <b>KE-27</b> | 4.80  | 3.30 | 0.30 | 33.50 | 33.10 | 21.20 | 18.20 | 1.10  | 1.20 | 0.10 | 5.90 | 1.60  | 1.40 | 0.60 | 28.90  |
| <b>KE-28</b> | 25.00 | 3.80 | 5.20 | 36.40 | 23.40 | 6.40  | 25.80 | 8.50  | 0.30 | 0.10 | 1.80 | 14.50 | 3.40 | 0.50 | 24.30  |
| <b>KE-29</b> | 14.20 | 2.20 | 2.40 | 14.90 | 29.90 | 21.40 | 16.00 | 4.20  | 0.60 | 0.10 | 2.20 | 7.30  | 2.10 | 0.50 | 42.30  |
| <b>MİN</b>   | 2.90  | 0.10 | 0.10 | 0.10  | 14.40 | 0.10  | 6.30  | 0.40  | 0.10 | 0.10 | 0.80 | 1.20  | 0.80 | 0.10 | 12.40  |
| <b>MAX</b>   | 33.80 | 3.90 | 8.20 | 37.70 | 49.60 | 84.20 | 26.10 | 10.40 | 1.60 | 0.10 | 6.00 | 34.50 | 4.10 | 1.10 | 124.40 |
| <b>ORT</b>   | 13.84 | 2.48 | 1.99 | 14.91 | 31.47 | 24.35 | 16.89 | 3.77  | 0.71 | 0.10 | 2.24 | 6.44  | 2.06 | 0.57 | 38.49  |



**Tablo 2.** Çalışma alanından alınan cevher örneklerinin element değerleri (ppm).

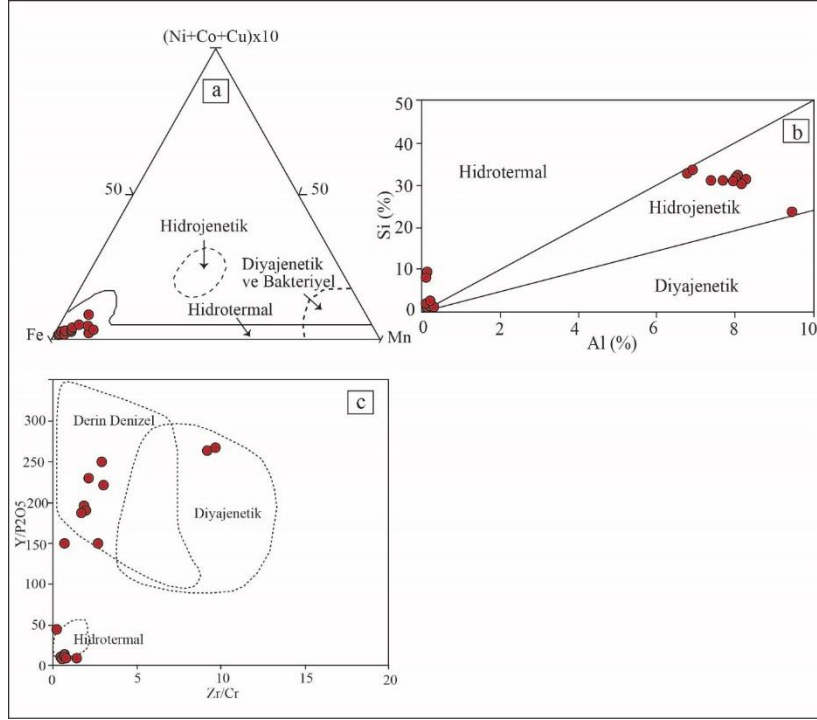
| ppm   | Ba      | Cr    | Cs   | Nb    | Pb    | Rb     | Sr    | Ta   | Zr    | Hf   | Sc    | Th    | U    | Co/Ni | V/<br>(V+Ni) |
|-------|---------|-------|------|-------|-------|--------|-------|------|-------|------|-------|-------|------|-------|--------------|
| KE-1  | 776.60  | 4.90  | 2.10 | 17.9  | 41.80 | 170.6  | 139.8 | 4.00 | 46.90 | 1.60 | 4.20  | 35.60 | 4.10 | 17.32 | 0.83         |
| KE-2  | 20.80   | 11.20 | 2.10 | 0.90  | 75.90 | 24.50  | 3.40  | 0.50 | 8.70  | 0.30 | 1.70  | 0.40  | 2.10 | 3.81  | 0.85         |
| KE-3  | 1315.60 | 9.80  | 2.30 | 13.7  | 9.10  | 141.7  | 336.9 | 2.30 | 17.90 | 0.70 | 8.00  | 21.10 | 4.00 | 17.19 | 0.96         |
| KE-8  | 1505.20 | 8.90  | 4.10 | 15.6  | 24.50 | 160.0  | 346.2 | 2.90 | 22.90 | 1.00 | 9.00  | 21.90 | 2.30 | 14.24 | 0.94         |
| KE-9  | 1013.80 | 10.20 | 4.30 | 15.50 | 21.70 | 120.7  | 332.3 | 3.20 | 20.00 | 0.70 | 9.30  | 20.00 | 2.90 | 6.99  | 0.87         |
| KE-10 | 1342.80 | 10.20 | 2.10 | 19.00 | 12.20 | 218.7  | 229.2 | 2.30 | 29.30 | 1.30 | 9.30  | 17.70 | 3.10 | 19.06 | 0.96         |
| KE-13 | 333.30  | 80.70 | 4.10 | 30.80 | 11.90 | 141.4  | 73.70 | 1.90 | 5.70  | 0.20 | 14.90 | 13.70 | 0.40 | 0.67  | 0.78         |
| KE-16 | 5.60    | 8.20  | 0.20 | 0.40  | 72.50 | 15.40  | 2.30  | 0.20 | 4.90  | 0.10 | 1.60  | 0.20  | 0.40 | 1.10  | 0.64         |
| KE-18 | 104.80  | 10.80 | 1.40 | 0.40  | 79.20 | 46.60  | 9.60  | 0.70 | 6.70  | 0.20 | 1.60  | 0.10  | 2.10 | 20.50 | 0.95         |
| KE-21 | 5.20    | 8.50  | 0.70 | 1.00  | 80.50 | 16.50  | 1.50  | 0.30 | 11.60 | 0.30 | 1.40  | 0.10  | 0.50 | 9.55  | 0.93         |
| KE-22 | 780.20  | 5.10  | 1.90 | 16.80 | 40.90 | 169.2  | 138.2 | 3.90 | 46.80 | 1.50 | 4.30  | 32.20 | 3.80 | 17.58 | 0.84         |
| KE-23 | 25.00   | 11.50 | 1.80 | 1.10  | 74.20 | 25.10  | 3.80  | 0.60 | 8.60  | 0.20 | 1.80  | 0.50  | 2.30 | 3.84  | 0.85         |
| KE-24 | 1401.60 | 10.20 | 2.20 | 12.90 | 8.90  | 140.5  | 335.2 | 2.40 | 17.80 | 0.60 | 7.90  | 20.40 | 3.90 | 17.67 | 0.97         |
| KE-25 | 1510.20 | 8.80  | 4.00 | 15.50 | 23.20 | 158.9  | 345.2 | 2.80 | 22.50 | 0.90 | 8.50  | 19.80 | 2.20 | 14.57 | 0.94         |
| KE-26 | 1015.80 | 10.10 | 4.20 | 15.30 | 20.90 | 119.9  | 333.6 | 3.10 | 19.90 | 0.60 | 9.20  | 20.10 | 2.80 | 6.99  | 0.85         |
| KE-27 | 1358.90 | 9.80  | 2.20 | 18.10 | 13.10 | 219.5  | 226.3 | 2.20 | 28.80 | 1.20 | 13.90 | 16.80 | 3.00 | 20.69 | 0.95         |
| KE-28 | 280.60  | 8.20  | 0.60 | 25.50 | 12.10 | 139.0  | 72.50 | 1.80 | 6.10  | 0.20 | 1.70  | 13.60 | 0.50 | 1.61  | 0.63         |
| KE-29 | 19.40   | 9.50  | 1.30 | 0.90  | 70.50 | 17.30  | 2.50  | 0.20 | 4.80  | 0.10 | 1.30  | 0.30  | 0.30 | 4.10  | 0.85         |
| MİN   | 5.20    | 4.90  | 0.20 | 0.40  | 8.90  | 15.40  | 1.50  | 0.20 | 4.80  | 0.10 | 1.30  | 0.10  | 0.30 | 0.67  | 0.63         |
| MAX   | 1510.20 | 80.70 | 4.30 | 30.80 | 80.50 | 219.5  | 346.2 | 4.00 | 46.90 | 1.60 | 14.90 | 35.60 | 4.10 | 20.69 | 0.97         |
| ORT   | 711.97  | 13.14 | 2.31 | 11.61 | 38.51 | 113.64 | 162.9 | 1.96 | 18.33 | 0.65 | 6.09  | 14.14 | 2.26 | 10.97 | 0.87         |

Çeşitli ana ve eser element ayırım diyagramları, değişik kökenli demir oluşumlarının ayırımı için birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır [15, 19, 25-30]. Bu diyagramlar, hidrotermal (kıtasal ya da denizel) ve hidrojenetik köken arasındaki ayırımı kullanılır. Hidrotermal terimi; denizel çevrelerdeki sedimanter-exhalative demir mineralizasyonu ya da kıtasal çevrelerdeki göl ortamı ve jeotermal sulardaki sıcak nokta (hot spring)'lerden direkt olarak depolanan cevherler için kullanılmıştır [19,27,30]. Hidrojenetik terimi ise deniz suyundan çözünen malzemenin adsorplanması ya da yavaş çökelişi ile oluşan cevherler için kullanılır. Fe-(Ni+Co+Cu) $\times$ 10-Mn üçgen diyagramında çalışma alanından alınan cevher örneklerinin jeokimyasal verileri yerleştirilmiştir (Şekil 7a). Buna göre örneklerin tamamı hidrotermal alanda dağılım göstermiştir. Cevher çökelişiminin ortamsal olarak irdelendiği Şekil 7b'deki % Si-Al diyagramında, çok düşük Si ve yüksek Al konsantrasyonlarına sahip örneklerin yarısının hidrotermal yarısının ise hidrojenetik alanda dağılım gösterdiği belirlenmiştir. Karasal birimlerin günlenmesi sonucu açığa çıkan detritik kökenli demir, deniz suyuna kaynak teşkil edebilir. Ana, eser ve nadir toprak elementleri arasındaki ilişkiler, ana kayacının denizel ortamda çökmesi sırasında (detritik) demirin kısmen suda çözünerek kısmen de ilksel cevher formunu koruyarak ortama taşındığını göstermektedir. Bu şekilde sulu ortamlarda çökelen cevherler hidrojenetik olarak tanımlanır [31]. Zr/Cr-Y/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> diyagramında ise 8 örneğin derin denizel alanda, 2 örneğin diyajenetik ve 8 örneğin de hidrotermal alanda dağılım gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 7c). Bunların yanında Ti+V değerinin Al+Mn ve Ni/(Cr+Mn) değerlerine göre çizilen grafikler ile de cevherleşmenin kökeni ile ilgili yorumlar yapılmıştır. Bu grafiklere göre cevher örneklerinin hemen hemen tamamının skarn alanında yoğunlaştığı görülmektedir (Şekil 8a,b).

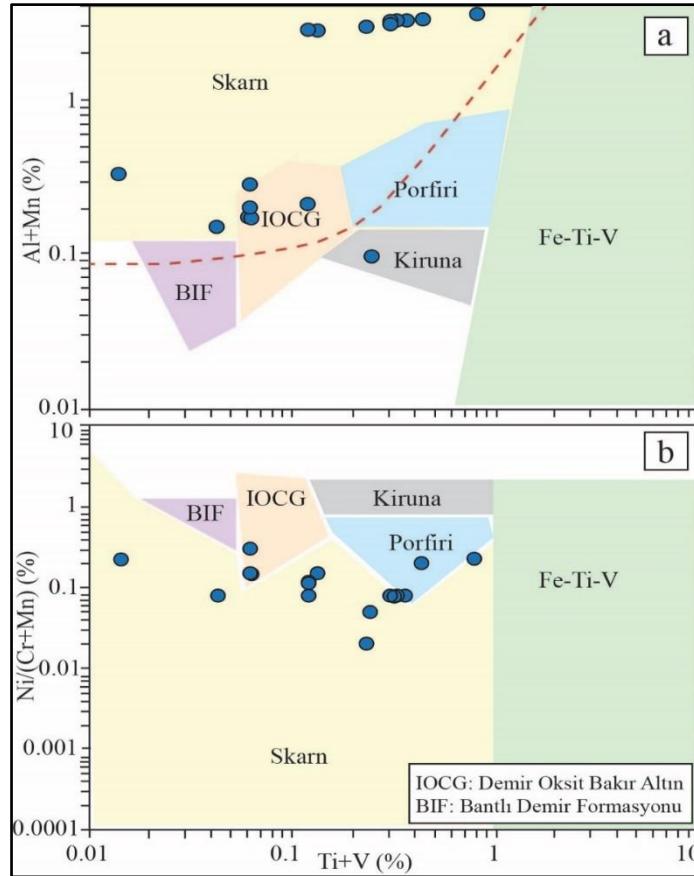
### 4.3. Nadir Toprak Element (NTE) Jeokimyası

Jeokimyasal değerlendirme yapmak için çalışma alanından alınan cevher örneklerinin NTE içeriklerinden yararlanılmıştır. 18 adet cevher örneği kökensel değerlendirmeler için analiz edilmiş ve sonuçlar Tablo 3'te sunulmuştur. Yapılan analize göre cevher örneklerinin  $\Sigma$ NTE değerleri 2.40-271 ppm ve ortalama 142.86 ppm değerlerindedir. Bu  $\Sigma$ NTE değerleri, cevherleşmenin hidrotermal yataklarla uyumlu olduğunu gösterirken (e.g., Northeast Pacific Ocean Baby Bare Deposit; NTE= 20.6–249.6ppm [17]), hidrojenetik (hydrogenous) yataklardaki değerine göre ise (e.g., Hazara deposit;  $\Sigma$ NTE= 791ppm; [29]) oldukça düşük kalmaktadır. Hidrotermal yatakların  $\Sigma$ NTE içeriğinin hidrojenetik yataklara göre daha düşük olduğu bilinmekte [26] ve hidrotermal oksit yataklarının  $\Sigma$ NTE değerleri daha geniş bir aralık sunmaktadır [23,34]. Çalışma alanındaki cevher örneklerinde HNTE (Hafif Nadir Toprak Element) oranı 1.00-244.10 ppm ve ortalama 108.91ppm, ANTE (Ağır Nadir Toprak Element) oranları 1.40-75.20 ve ortalama 33.95ppm değerlerini verirken HNTE/ANTE oranları ise 0.68-9.07 ve ortalama 2.85 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler HNTE değerlerinin,

ANTE değerlerine göre zenginleştiğini göstermektedir. Bu oran, cevher içeren hidrotermal çözeltilerdeki HNTE'nin ANTE'ye göre daha duraylı olmasından dolayı öncelikli olarak zenginleştiğini ifade eder [35,36]. Dolayısıyla çalışma alanındaki cevher oluşumlarında hidrotermal çözeltilerin önemli rol aldığı sonucuna varılabilir.



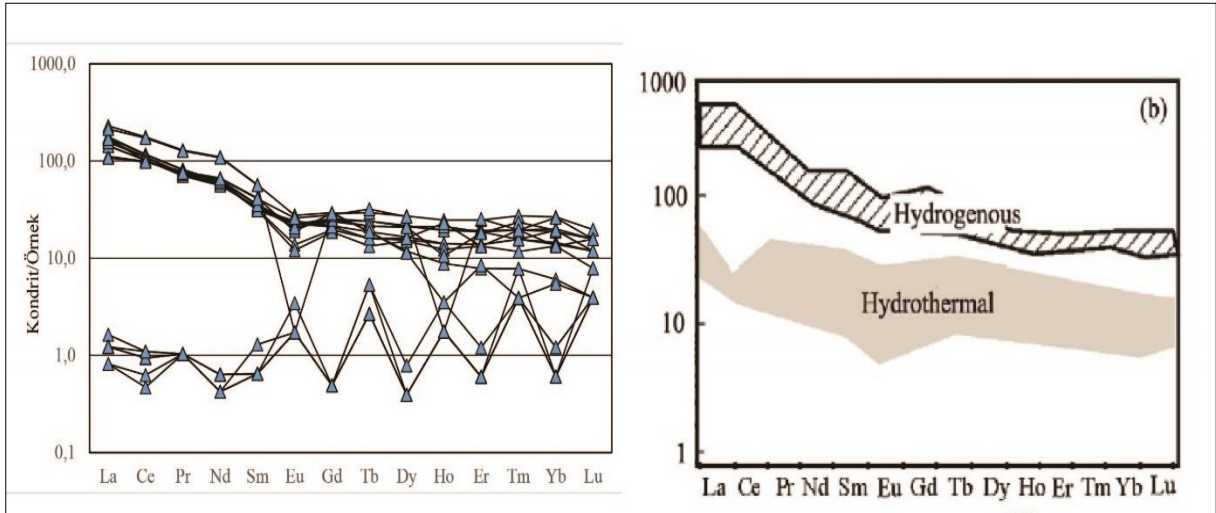
Şekil 7. Çalışma alanındaki cevher örneklerine ait değişim diyagramı. a.) Fe-(Ni+Co+Cu)x10-Mn diyagramı [27, 30], b.) Al-Si diyagramı [15, 26, 28], c.) Zr/Cr-Y/P2O5 Diyagramı [32].



Şekil 8. Çalışma alanındaki cevher örneklerine ait değişim diyagramı. a. Ti+V-Al+Mn diyagramı, b. Ti+V-Ni/(Cr+Mn) diyagramı [33].



Bu zenginleşme kondrite göre normalize edilen  $La_N$  ve  $Yb_N$  ( $La_N/Yb_N=3.04$ ) ile  $Tb_N$  ve  $Yb_N$  ( $Tb_N/Yb_N=2.23$ ) oranları ile de belirlenmiştir. Bunlarla birlikte Eu ve Ce anomalileri de değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler sonucunda NTE verileri kondrite göre normalize edilerek spider diyagramı çizilmiştir ve hidrojenetik ve hidrotermal ayrımın yapıldığı desen ile karşılaştırılmıştır (Şekil 9a, b). Burada da görüldüğü gibi hidrojenetik kökenli cevherleşmelerde  $\Sigma NTE$  değerleri daha yüksek iken hidrotermal yataklarda düşüktür. Bunun yanında hidrojenetik yataklarda pozitif, hidrotermal yataklarda ise negatif Ce anomalisi gözlenmektedir. Eu anomalisi ise oluşum ortamına göre değişiklik sunmaktadır. Deniz suyundaki Eu değeri 0.61ppm, hidrotermal yataklarda ise 7ppm değerine yakındır. Ce anomali değişimleri ise deniz suyunda 0.17, kıtasal kabukta ise 1.03 değerine yakındır [37-40]. Çalışma alanındaki demir örneklerindeki Eu anomalisi 0.04-5.78 (ortalama 1.46) aralığında gözlenmektedir. Bunun yanında çizilen spider diyagram, hidrotermal/hidrojenetik ayrımın gösterildiği diyagramla karşılaştırıldığında da görüldüğü gibi çalışma alanından alınan örneklerde iki farklı cevher oluşumunun varlığı dikkat çekmektedir. Ayrıca Eu verileri hem pozitif hem de negatif anomali sunmaktadır. Anomali değeri  $Eu^*=Eu_N/[2/3Sm_N+1/3Gd_N]$  ile hesaplandığında 6 örneğin yüksek pozitif anomali sunduğu, 12 örneğin ise negatif anomali sunduğu görülmektedir. Negatif Eu anomalisi, kıtasal kabuktan kirlenmeye ve/veya sediman katkısı ile dehidratasyonu [41,42], ayrıca düşük sıcaklıklı ve oksitleyici hidrotermal suların varlığını işaret eder. Pozitif Eu anomalisi ise hidrotermal bir oluşumun göstergesidir [43-45], Ce anomalisi ise Eu anomalisine göre daha karmaşıktır. Ce anomalisi değeri çalışma alanındaki örneklerde 0.35-0.47 (ortalama 0.43) aralığındadır. La'nın davranışına göre Ce anomalisi de etkilenir. Örneğin La'nın zenginleşmesi ile birlikte Ce tüketilmesinin varlığı cevherleşmedeki modern deniz suyunun varlığına işaret ederken bunun yanında pozitif La anomalisinin hidrotermal Fe yatakları için de gösterge olduğu belirtilmiştir. La zenginleşmesi bazı durumlarda yalancı negatif Ce\* anomalisine yol açabilmektedir. Bunu için iki farklı hesaplama ile Ce\* anomalisi belirlenmiştir.  $Ce^*=Ce_N/[2/3La_N+1/3Pr_N]$  ve  $Pr^*=Pr_N/(Ce_N \times Nd_N)/2$  hesaplamaları yapılmıştır (Tablo 3). Ce\* hesaplamalarında 18 örnekte 4'ü pozitif, 14'ü negatif anomalisi desteklemektedir (0.35-0.47 ve ortalama 0.43). Pr\* hesaplaması sonucunda 6 örnekte pozitif, 12 örnekte negatif anomali Ce\* negatif anomali hesaplamalarını destekler niteliktedir (Tablo 3).  $Ce_{anom}$  verileri ise  $Ce_{anom} = \log(3Ce_N/(2La_N+Nd_N))$  formülü ile hesaplanmıştır [46].  $Ce_{anom} > -0.1$  ise pozitif Ce anomalisinden ve sediman su kütlelerinin anoksik bir karakter gösterdiğinden bahsedilebilirken,  $Ce_{anom} < -0.1$  ise, negatif Ce anomalisinden ve sediman su kütlelerinin oksik bir ortamda olduğu söylenebilir [41,46,47]. Çalışma alanındaki veriler dikkate alındığında örneklerin tamamının -0.1'den küçük değerler gösterdiği ve cevherleşmenin oksik şartlarda gerçekleştiği söylenebilir (Tablo 3). Hidrotermal çözeltilerin Y/Ho oranı, kondrite yakın değerlerde iken (27.00), bu oran deniz suyunda daha yüksektir (>44.00) [48]. Kıvrıntılı malzemenin (karasal) (asidik ve bazik) girmesi ile Y/Ho oranında düşüş gözlenmektedir [49]. Cevher örneklerindeki Y/Ho oranı 37.62 olarak belirlenmiştir. Bu oran, hidrotermal çözeltilere göre yüksek değerler sunarken oluşumda hidrotermal bir kaynak ile karasal kökenli bir ortamın varlığından bahsedilebilir (Tablo 3).



Şekil 9 a. Cevher örneklerinin kondrite göre normalize edilmiş spider diyagramı (Normalize değerler [50]'den alınmıştır). b. Hidrojenetik [51] ve hidrotermal [52] alanları gösteren diyagram.

**Tablo 3.** Çalışma alanından alınan cevher örneklerinin NTE değerleri (ppm).

| Örnek ppm | La    | Ce     | Pr    | Nd    | Sm   | Eu   | Gd   | Tb   | Dy   | Ho   | Er   | Tm   | Yb   | Lu   | Y     | ΣNTE   | HNTE/ ANTE | Ce*  | Pr*  | Ce <sub>anom</sub> | Eu*  | LaN/YbN | Y/Ho   | Tb/Yb |
|-----------|-------|--------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|--------|------------|------|------|--------------------|------|---------|--------|-------|
| KE-1      | 43.50 | 74.80  | 7.90  | 29.10 | 4.90 | 0.80 | 4.00 | 0.60 | 3.90 | 0.80 | 2.30 | 0.40 | 2.40 | 0.30 | 26.80 | 202.50 | 3.88       | 0.47 | 0.01 | -0.31              | 0.50 | 5.64    | 33.50  | 1.10  |
| KE-2      | 0.40  | 0.70   | 0.10  | 0.30  | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.20 | 0.10 | 0.80  | 3.40   | 1.00       | 0.44 | 1.31 | -0.32              | 2.89 | 0.86    | 8.00   | 2.20  |
| KE-3      | 35.30 | 65.40  | 6.90  | 27.60 | 5.10 | 1.30 | 5.00 | 0.90 | 5.50 | 1.10 | 3.20 | 0.50 | 3.30 | 0.40 | 38.90 | 200.40 | 2.41       | 0.46 | 0.01 | -0.32              | 0.74 | 3.58    | 35.36  | 1.20  |
| KE-6      | 39.50 | 70.60  | 7.20  | 28.10 | 4.90 | 1.40 | 4.40 | 0.70 | 4.20 | 0.80 | 2.30 | 0.40 | 2.30 | 0.30 | 29.20 | 196.30 | 3.40       | 0.47 | 0.01 | -0.31              | 0.85 | 5.36    | 36.50  | 1.34  |
| KE-9      | 42.10 | 64.30  | 7.50  | 30.30 | 5.50 | 1.30 | 5.20 | 0.90 | 5.40 | 1.10 | 3.10 | 0.50 | 3.10 | 0.40 | 37.90 | 208.60 | 2.62       | 0.47 | 0.01 | -0.31              | 0.69 | 4.14    | 34.45  | 1.28  |
| KE-10     | 27.40 | 63.30  | 7.50  | 31.60 | 6.40 | 1.10 | 5.90 | 1.10 | 6.90 | 1.40 | 4.10 | 0.70 | 4.40 | 0.50 | 50.20 | 212.50 | 1.83       | 0.43 | 0.01 | -0.35              | 0.51 | 2.92    | 35.86  | 1.10  |
| KE-13     | 56.10 | 113.00 | 12.50 | 52.10 | 8.80 | 1.60 | 6.00 | 0.70 | 3.00 | 0.50 | 1.30 | 0.20 | 1.00 | 0.10 | 14.10 | 271.00 | 9.07       | 0.45 | 0.01 | -0.33              | 0.58 | 21.41   | 28.20  | 3.09  |
| KE-16     | 0.30  | 0.60   | 0.10  | 0.30  | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 1.00  | 3.30   | 0.83       | 0.40 | 1.74 | -0.34              | 2.89 | 1.71    | 10.00  | 4.41  |
| KE-18     | 0.20  | 0.30   | 0.10  | 0.20  | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.60  | 2.40   | 0.71       | 0.35 | 3.92 | -0.34              | 2.89 | 1.71    | 6.00   | 4.41  |
| KE-21     | 0.20  | 0.40   | 0.10  | 0.20  | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.80  | 2.70   | 0.69       | 0.35 | 3.92 | -0.34              | 2.89 | 1.71    | 8.00   | 4.41  |
| KE-22     | 42.30 | 73.90  | 7.80  | 28.80 | 4.80 | 0.70 | 3.80 | 0.50 | 3.80 | 0.70 | 2.20 | 0.30 | 2.20 | 0.20 | 26.50 | 198.50 | 3.94       | 0.47 | 0.01 | -0.31              | 0.45 | 6.07    | 37.86  | 1.00  |
| KE-23     | 0.30  | 0.60   | 0.10  | 0.20  | 0.20 | 0.10 | 0.10 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.10 | 0.20 | 0.10 | 0.90  | 3.70   | 0.68       | 0.40 | 2.61 | -0.31              | 1.68 | 0.86    | 4.50   | 4.41  |
| KE-24     | 34.80 | 64.80  | 6.80  | 26.50 | 5.20 | 1.20 | 4.90 | 0.80 | 5.40 | 1.20 | 3.10 | 0.40 | 3.20 | 0.30 | 37.50 | 196.10 | 2.45       | 0.46 | 0.01 | -0.32              | 0.68 | 3.64    | 31.25  | 1.10  |
| KE-25     | 38.20 | 69.70  | 7.10  | 28.20 | 4.80 | 1.30 | 4.30 | 0.60 | 4.10 | 1.30 | 2.20 | 0.50 | 2.20 | 0.40 | 28.20 | 193.10 | 3.41       | 0.47 | 0.01 | -0.32              | 0.81 | 5.53    | 21.69  | 1.20  |
| KE-26     | 41.20 | 64.10  | 7.40  | 29.40 | 5.40 | 1.20 | 5.10 | 0.80 | 5.30 | 0.60 | 3.00 | 0.60 | 3.20 | 0.30 | 37.50 | 205.10 | 2.64       | 0.47 | 0.01 | -0.31              | 0.65 | 3.96    | 62.50  | 1.10  |
| KE-27     | 26.30 | 62.50  | 7.30  | 31.20 | 6.30 | 1.50 | 5.70 | 1.20 | 6.80 | 0.10 | 4.20 | 0.50 | 4.30 | 0.40 | 49.50 | 207.80 | 1.86       | 0.43 | 0.01 | -0.36              | 0.71 | 2.91    | 495.00 | 1.23  |
| KE-28     | 52.30 | 109.90 | 12.20 | 51.30 | 8.70 | 0.10 | 5.90 | 0.70 | 2.90 | 0.20 | 1.40 | 0.10 | 0.90 | 0.10 | 13.70 | 260.40 | 9.05       | 0.44 | 0.01 | -0.34              | 0.04 | 23.22   | 68.50  | 3.43  |
| KE-29     | 0.30  | 0.70   | 0.10  | 0.30  | 0.10 | 0.20 | 0.10 | 0.20 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.20 | 0.10 | 0.20 | 0.90  | 3.70   | 0.85       | 0.40 | 1.74 | -0.34              | 5.78 | 1.71    | 9.00   | 8.82  |
| MİN       | 0.20  | 0.30   | 0.10  | 0.20  | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.60  | 2.40   | 0.68       | 0.35 | 0.01 | -0.36              | 0.04 | 0.86    | 6.00   | 24.00 |
| MAX       | 56.10 | 113.00 | 12.50 | 52.10 | 8.80 | 1.60 | 6.00 | 1.20 | 6.90 | 1.40 | 4.20 | 0.70 | 4.40 | 0.50 | 50.20 | 271.00 | 9.07       | 0.47 | 3.92 | -0.31              | 5.78 | 23.22   | 35.86  | 64.52 |
| ORT       | 26.71 | 49.98  | 5.48  | 21.98 | 3.97 | 0.79 | 3.38 | 0.57 | 3.22 | 0.58 | 1.84 | 0.32 | 1.85 | 0.24 | 21.94 | 142.86 | 2.85       | 0.43 | 0.85 | -0.33              | 1.46 | 5.39    | 37.62  | 77.69 |

$$Ce^* = Ce_N / [2/3La_N + 1/3Pr_N]$$

$$\sum HNTE = La + Ce + Pr + Nd + Sm + Eu$$

$$Pr^* = Pr_N / (Ce_N \times Nd_N)^{1/2}$$

$$Eu^* = Eu_{norm} / [2/3Sm_{norm} + 1/3Gd_{norm}]$$

$$\sum ANTE = Gd + Tb + Dy + Ho + Er + Tm + Yb + Lu$$

$$Ce_{anom} = \log [3x Ce_N / (2x La_N + Nd_N)]$$

## 5. SONUÇLAR

İnceleme alanı Kütahya ili Emet ilçesi Güldüren Köyü sınırları içerisinde yer almaktadır. Bölgedeki cevher parajenezi temel olarak manyetit ve hematit oluşurken daha az oranda da göt ve pirit gözlenmiştir. Gang ise kuarstan oluşmaktadır.

Çalışma alanında yer alan Eğrigöz graniti de dahil olmak üzere Batı Anadolu'da yer alan genç magmatik ürünlerin önemli bir kısmı, Neotetis'in bu dönemdeki kapanımı ve kıta-kıta çarpışması sonucu gelişmiştir. Bölgenin hemen kuzeyinde yer alan ofiyolitlerden ve yüksek basınç/düşük sıcaklık metamorfizmlerinden oluşan Tavşanlı Zonu, Neotetis'in bu kapanımı ve çarpışma sonundaki bindirmelerle oluşmuştur [53, 54]. Bunun yanında Eğrigöz plütunu ve çevresindeki plütunların Neotetis'in kapanımına ve Pontit ile Anatolit-Torit Bloğu'nun çarpışmasına bağlı olarak geliştiğini ve Eğrigöz plütununun kalkalkali monzogranit bileşimli ve yaşının 20-24.6My arasında olduğunu belirtmiştir.

Jeokimyasal yorumlamalar için çalışma alanındaki cevher örneklerinin ana oksit, eser element ve NTE içerikleri değerlendirilmiştir. Bunların yanında arazi gözlemleri, cevher parajenezi ve minerallerde gözlenen yapı-doku verilerine göre çalışma alanındaki cevherleşmenin Eğrigöz granitoidi ile rekristalize kireçtaşı arasında gelişen kontakt metasomatik bir oluşum olduğu sonucuna varılabilir. Nitekim önceki çalışmalarda Eğrigöz granitoidinin kuzeyinde Karataş tepe cevherleşmesinin hidrotermal tipi cevherleşme olarak belirtilirken Eğrigöz granitoidinin kuzeyinde ve güneyinde gözlenen diğer tüm demir cevherleşmeleri de skarn olarak tanımlanmıştır. Arazide damar şeklinde gözlenen cevherleşmelerin varlığı, jeokimyasal veriler, çizilen grafiklerdeki sonuçlar ve mineral parajenezi çalışma alanındaki demir oluşumlarının hem skarn hem de hidrotermal olmak üzere iki farklı kökeni düşündürmekte ve daha önceki çalışmalarla uyumlu olduğunu göstermektedir.

### Yazar Katkıları

Nursel ÖKSÜZ %40, Özge KABCUK %30, Mehmet SAVAŞ %20, İsmail KOÇAK %10

### Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler

### Destek ve Teşekkür Beyanı

Bu makale Bozok Üniversitesi Araştırma Fonu Müdürlüğü tarafından desteklenen 6601-FBE/19-338 nolu ve "Güldüren (Emet-Kütahya) Bölgesindeki Demir Cevherleşmesinin Jeolojik, Mineralojik ve Genetik Açısından İncelenmesi" isimli projenin bir bölümünü oluşturmaktadır. Yazar araştırmayı destekleyen Bozok Üniversitesi Araştırma Fonu Birimi'ne teşekkürlerini sunar.

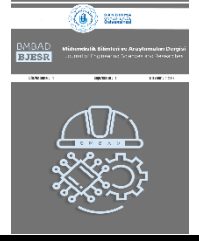
### KAYNAKÇA

- [1] A. Hasözbeke, E. Akay, B. Erdoğan, M. Satır, W. Siebel "Early Miocene Granite Formation by Detachment Tectonics or Not? A Case Study from the Northern Menderes Massif (Western Turkey)", *Journal of Geodynamics*, vol. 50, pp. 67–80 2010
- [2] T. Oyman, İ. Özgenç, M. Tokçaer, M. Akbulut "Petrology, geochemistry, and evolution of the iron skarns along the northern contact of the Eriğöz Plutonic Complex, Western Anatolia, Turkey", *Turkish Journal of Earth Sciences*, vol. 21, pp. 1–41 2012
- [3] E. Gürçan "Eğrigöz ve Koyunoba Plütunları (Simav-Kütahya) Çevresindeki Pb-Zn-(Ag) Yataklarının Jeolojisi", *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir*, 413s. 2018
- [4] Ö. Albayrak "Eğrigöz Masifi Kuzey ve Batı Kesimi (Tavşanlı-Kütahya) Polimetalik Cevherleşmelerinin Genetik İncelenmesi ve Jeodinamik Ortam Koşullarının Tanımlanması", *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir*, 90s. 2003
- [5] O.G. Uğurcan "Kalkan ve Karaağıl (Simav-Kütahya) Skarn Tipi Demir Yataklarının Mineralojik, Petrografik ve Jeokimyasal İncelenmesi", *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İzmir*, 216s. 2012
- [6] H. Elibol, İ. Alan, V. Balcı, N. Böke, M. Soyaklı "Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi. 1/100.000 ölçekli Kütahya-J22 Paftası", *Jeoloji Etütleri Dairesi, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, ANKARA* No: 249 2018
- [7] I. S. Carmichael, M.S. Ghiorso "Oxidation-reduction Relations in Basic Magma: a Case for Homogeneous Equilibria", *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 78, no. 2–3, pp. 200–210 1986
- [8] A. Çağatay "Maden Mikroskopisi", *Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları*, no. 72 1979
- [9] C. Van Der Zee, D.R. Roberts, D.G Rancourt, C. P. Slomp "Nanogoethite is the dominant reactive oxyhydroxide phase in lake and marine sediments", *Geology*, vol. 31, no. 11, pp. 993–996 2003
- [10] P. Larese-Casanova, S.B. Haderlein, A. Kappler "Biomining of Lepidocrocite and Goethite by Nitrate-Reducing Fe(II)-Oxidizing Bacteria: Effect of pH, Bicarbonate, Phosphate, and Humic Acids"

- Geochimica et Cosmochimica Acta, vol. 74, no. 13, pp. 3721–3734 2010
- [11] K.I. Hayashi, H. Fujisawa, H.D. Holland, H. Ohmoto “Geochemistry of 1.9 Ga Sedimentary Rocks from Northeastern Labrador, Canada” *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 61, no. 19, pp. 4115–4137 1997
- [12] K. Sugitani, Y. Horuchi, M. Adachi, R. Sugisak “Anomalously Low Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> Values for Archean Cherts from the Pilbara Block, Western Australia-Possible Evidence for Extensive Chemical Weathering on the Early Earth” *Precambrian Research*, vol. 80, no. 1–2, pp. 49–76 1996
- [13] F. Delian, S. Dasgupta, B.R. Bolton, H. Hariya, H. Momoi, L. Jiaju, S. Roy “Mineralogy and Chemistry of the Proterozoic Wafangzi Ferromanganese Deposit, China” *Economic Geology*, vol. 87, pp. 1430–1440 1992
- [14] A. Fernández, M.C. Moro “Origin and Depositional Environment of Ordovician Stratiform Iron Mineralization from Zamora (NW Iberian Peninsula)” *Mineralium Deposita*, vol. 33, no. 6, pp. 606–619 1998
- [15] J.R. Toth “Deposition of Submarine Crusts Rich in Manganese and Iron” *Geological Society of America Bulletin*, vol. 91, pp. 44–54 1980
- [16] J. Nayan, J. Rongfen, W. Ziyu “Permian Palaeogeography and Geochemical Environment in Lower Yangtze Region, China” *Petroleum Industry Press, Beijing*, p. 206. 1994
- [17] X. Jiancheng, Y. Xiaoyong, D. Jianguo “Geochemical Characteristics of Sedimentary Manganese Deposit of Guichi, Anhui Province, China” *Journal of Earths*, vol. 24, pp. 374–380 2006
- [18] L. Marynowski, M. Zatoń, M. Rakociński, P. Filipiak, S. Kurkiewicz, T.J. Pearce. “Deciphering the Upper Famennian Hangenberg Black Shale Depositional Environments Based on Multi-proxy Record.” *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 346, pp. 66–86. 2012
- [19] K. Nicholson “Genetic Types of Manganese Oxide Deposit in Scotland: Indicators of Paleo-Ocean-Spreading Rate and a Devonian Geochemical Mobility Boundary” *Economic Geology*, vol. 87, pp. 1301–1309 1992
- [20] S. Metz, J. Trefry “Chemical and Mineralogical Influences on Concentrations of Trace Metals in Hydrothermal Fluids” *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 64, no. 13, pp. 2267–2279 2013
- [21] C. Wohlgemuth-Ueberwasser, F. Viliolen, S. Petersen, C. Vorster “Distribution and solubility Limits of Trace Elements in Hydrothermal Black Smoker Sulfides: An in-situ LA-ICP-MS study.” *gca*, vol. 159, pp. 16–41 2015
- [22] J.R. Hein, M.S. Schulz, R.E. Dunham, R.J. Stern, S.H. Bloomer “Diffuse Flow Hydrothermal Manganese Mineralization Along the Active Mariana and Southern Izu-Bonin Arc System, Western Pacific” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B8) 2008
- [23] A. Şaşmaz, B. Turkyilmaz, N. Öztürk, F. Yavuz, M. Kumral “Geology and Geochemistry of Middle Eocene Maden Complex Ferromanganese Deposits from Elazığ-Malatya Region, Eastern, Turkey” *Ore Geology Reviews*, vol. 56, pp. 352–372 2014
- [24] R. Del Rio Salas, J. Ruiz, I. Ochoa-Landín, O. Noriega, F. Barra, D. Meza-Figueroa, F. Pazmoreno “Geology, Geochemistry and Re-Os systematics of Manganese Deposits from the Santa Rosalía Basin and Adjacent Areas in Baja California Sur, México” *Mineralium Deposita*, vol. 43, no. 4, pp. 467–482 2008
- [25] M. Adachi, K. Yamamoto, R. Sugisaki. “Hydrothermal Cherts and Associated Siliceous Rocks From the Northern Pacific: Their geological significance as indication of ocean ridge activity.” *Sediment Geology*, vol. 47, pp. 12–148 1986
- [26] J.H. Choi, Y. Hariya “Geochemistry and Depositional Environment of Mn Oxide Deposits in the Tokoro Belt, Northeastern Hokkaido, Japan” *Economic Geology*, vol. 87, pp. 1265–1274 1992
- [27] D.A. Crerar, J. Namson, M.S. Chyi, L. Williams, M.D. Feigenson “Manganiferous Cherts of the Franciscan Assemblage: I. General Geology, Ancient and Modern Analogues, and Implications for Hydrothermal Convection at Oceanic Spreading Centers.” *Economic Geology*, vol. 77, pp. 519–540 1982
- [28] T. Peters “Geochemistry of Manganese-bearing Cherts Associated with Alpine Ophiolites and the Hawasina Formations in Oman” *Marine Geology*, vol. 84, no. 3-4, pp. 229– 238 1988
- [29] M.T. Shah, C.J. Moon “Manganese And Ferromanganese Ores From Different Tectonic Settings. In The NW Himalayas, Pakistan” *Journal of Asian Earth Sciences*, vol. 29, pp. 455–465 2007
- [30] E. Bonatti, T. Kraemer, & H. Rydel. “Classification and genesis of submarine iron-manganese deposits.” In D. R. Horn (Ed.), *Ferromanganese deposits on the ocean floor* (pp. 149–166). National Science Foundation. 1972
- [31] E. Varol. “Akdağ (Divriği-Sivas) Demir Yatağının Oluşumunun Mineralojik, Jeokimyasal Ve İzotopik Bulgular Yardımıyla İncelenmesi” *Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara Üniversitesi, Ankara*, 139s, 2014
- [32] Wonder, J. D., Spry, P. G., Windom, K. E. “Geochemistry and origin of manganese-rich rocks related to iron-formation and sulfide deposits, western Georgia.” *Economic Geology*, 83(5), 1070-1081 1988
- [33] Dupuis, C., Beaudoin, G. “Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types.” *Mineralium Deposita*, vol. 46, pp. 319–335 2011
- [34] R.A. Mills, D. Wells, S. Roberts “Genesis of Ferromanganese Crusts from the TAG

- Hydrothermal Field” *Chemical Geology*, vol. 176, no. 3–293 2001
- [35] D.E. Ruhlin, R.M. Owen “The Rare Earth Element Geochemistry of Hydrothermal Sediments from the East Pasific Rice: Examination of a Seawater Scavenging Mechanism”. *Geochimica et Cosmochimica Acta* vol. 50, pp. 393–400 1986
- [36] A. Zarasvandi, D. Lentz, M. Rezai, H. Pourkaseb “Genesis of the Nasirabad Manganese Occurrence, Fars Province, Iran: Geochemical Evidences” *Chemie der Erde*, vol. 73, pp. 495–508 2013
- [37] A. Danielson, P. Möller, P. Dulski “The Europium Anomalies in Banded Iron Formations and the Thermal History of the Oceanic Crust” *Chemical Geology*, vol. 97, pp. 89–100 1992
- [38] C. Manikyamba, S.M. Naqvi “Geochemistry of Fe-Mn Formations of the Archean Sandur Schist Belt, India -- Mixing of Clastic and Chemical Processes at a Shallow Shelf” *Precambrian Research*, vol. 72, pp. 69–95 1995
- [39] P. Mishra, B.K. Mohapatra, P.P. Singh “Mode of Occurrence and Characteristics of Mn-Ore Bodies in Iron Ore Group of Rocks, North Orissa, India and Its Significance in Resource Evaluation” *Resource Geology*, vol. 56, pp. 55–64 2006
- [40] T. Moriyama, M.K. Panigrahi, D. Pandit, Y. Watanabe “Rare Earth Element Enrichment in Late Archean Manganese Deposits from the Iron Ore Group, East India” *Resource Geology*, vol. 58, pp. 402–413 2008
- [41] N. Öksüz “Geochemical characteristics of the Eymir (Sorgun-Yozgat) manganese deposit, Turkey” *Journal of Rare Earths*, vol. 29, no. 3, pp. 287–296 2011
- [42] S. Sun, W.F. McDonough “Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. In: Saunders, A.D., Norry, M.J. Eds. *Magmatism in Ocean Basins.*” London Geol. Soc. Spec. Publ., pp. 313–345 1989
- [43] C. Ilouga, C.E. Suh, G.R. Tanwi “Textures and Rare Earth Elements Composition of Banded Iron Formations (BIF) at Njweng Prospect, Mbalam Iron Ore District, Southern Cameroon” *International Journal of Geosciences*, vol. 4, pp. 146–165 2013
- [44] R.F. Dymek, C. Klein “Chemistry, Petrology and Origin of Banded Iron-Formation Lithologies from the 3800 MA Isua Supracrustal Belt, West Greenland.” *Precambrian Research*, vol. 39, pp. 247–302 1988
- [45] C. Klein, N.J. Beukes “Time Distribution, Stratigraphy and Sedimentologic Setting and Geochemistry of Precambrian Iron Formation. In: Schopf, J.W. and Klein, C., Eds. *The Proterozoic Biosphere: A Multidisciplinary Study*” Cambridge University Press, New York, pp. 139–146. 1992
- [46] J. Wright, H. Schrader, W.T. Holser “Paleoredox Variations in Ancient Oceans Recorded by Rare-Earth Elements in Fossil Apatite” *Geochim Cosmochim Acta*, vol. 51, pp. 631–644 1987
- [47] İ. Koçak “Geochemistry of the Igdekoy-Doğanlar Na-Ca Borate Deposit, Emet Province (Western Anatolia, Turkey)” *Geological Quarterly*, vol. 64, no. 3, pp. 807–817 2020
- [48] M. Bau, P. Dulski “Comparing yttrium and rare earths in hydrothermal fluids from the mid-atlantic ridge: Implications for Y and REE behaviour during near-vent mixing and for the Y/Ho ratio of proterozoic seawater” *Chemical Geology*, vol. 15, no. 1–2, pp. 77–90 1999
- [49] R. Bolhar, B.S. Kamber, S. Moorbath, C.M. Fedo, M.J. Whitehouse “Characterisation of Early Archaean Chemical Sediments by Trace Element Signatures.” *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 222, no. 1, pp. 43–60 2004
- [50] M.N. Evensen, P. Hamilton, R.K. O’niions “Rare-earth abundances in chondritic meteorites. *Geochim*” *Cosmochim Acta*, vol. 42, pp. 1199–1212 1978
- [51] U. Von Stackelberg “Growth History of Manganese Nodules and Crusts of the Peru Basin” *Geological Society, London, Special Publications*. vol. 119, pp. 153–176 1997
- [52] A. Usui, M. Someya “Distribution and Composition of Marine Hydrogenetic and Hydrothermal Manganese Deposits in the Northwest Pacific. In: Nicholson, K., Hein, J.R., Buhn, B., Dasgupta, S. (Eds.), *Manganese Mineralization: Geochemistry and Mineralogy of Terrestrial and Marine Deposits*” *Geological Society of London Special Publication*, vol. 119, pp. 177–198 1997
- [53] A.I. Okay “Distribution and Characteristics of the Northwest Turkish Blueschists. *The Geological Evolution of the Eastern Mediterranean*” *Geological Society Special Publication* vol. 17, pp. 455–466 1984
- [54] S. Sherlock, S. Kelley, S. Inger, N. Harris, A. Okay “<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar and Rb-Sr Geochronology of High Pressure Metamorphism and Exhumation History of the Tavşanlı Zone, NW Turkey” *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. 137, pp. 46–58 1999





## Kötü Amaçlı Yazılım Türlerinin Tespitinde Kullanılan 1B Verilerin 2B Barkod Türlerine Dönüştürülerek Derin Ağlarla Analizlerinin Gerçekleştirilmesi

### Conversion of 1D Data Used in Detection of Malware Types to 2D Barcode Types and Analysis with Deep Networks

<sup>1</sup>Mesut TOĞAÇAR 

<sup>1</sup>Fırat Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Yönetim Bilişim Sistemleri, ELAZIĞ

<sup>1</sup>mtogacar@firat.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 9 March 2023

Accepted : 15 April 2023

##### Keywords:

Feature Extraction,  
Malware, 2D Barcode  
Types, Deep Learning

#### ABSTRACT

Malware is software designed to damage computer-based systems, obtain or modify important information. This type of software targets network environments where people interact. Smart devices used in these network environments have become one of the indispensable parts of our lives today. Recently, many artificial intelligence-based studies have been carried out in order to ensure the security of smart devices and to detect malicious software. The dataset of this study consists of text-based content containing hidden malware types. The proposed approach consists of a preprocessing step and a deep learning model. In the preprocessing step, two new datasets were obtained by transforming the text-based data into 2-dimensional barcode types. In the next step, the feature sets were extracted by training the datasets by the designed deep network model. In the last step, the feature sets were combined and the classification process was carried out using the Softmax method. Experimental analyzes showed that the proposed approach increased the overall performance and the overall accuracy in the classification process was 100%.

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

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 9 Mart 2023

Kabul : 15 Nisan 2023

##### Anahtar Kelimeler:

Özellik Çıkarma, Kötü  
Amaçlı Yazılımlar, 2B  
Barkod Türleri, Derin  
Öğrenme

#### ÖZET

Kötü amaçlı yazılımlar bilgisayar tabanlı sistemlere zarar vermek, önemli bilgileri elde etmek veya değiştirmek amaçlı hazırlanmış yazılımlardır. Bu tür yazılımlar insanların etkileşim içerisinde olduğu ağ ortamlarını hedef alırlar. Bu ağ ortamlarında kullanılan akıllı cihazlar günümüzde hayatımızın vazgeçilmez parçalarından biri olmuştur. Akıllı cihazların güvenliğini sağlayabilmek, zararlı yazılımların tespitini gerçekleştirebilmek için son zamanlarda yapay zekâ tabanlı birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın veri kümesi gizlenmiş kötü amaçlı yazılım türlerini içerisinde barındıran metin tabanlı içeriklerden oluşmaktadır. Önerilen yaklaşım, ön işleme adımından ve derin öğrenme modelinden oluşmaktadır. Ön işleme adımında metin tabanlı veriler, 2-boyutlu barkod türlerine dönüştürülerek iki yeni veri kümesi elde edilmiştir. Bir sonraki adımda veri kümeleri tasarlanmış derin ağ modeli tarafından eğitilerek özellik setleri çıkartılmıştır. Son adımda özellik setleri birleştirilerek sınıflandırma süreci Softmax yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel analizler önerilen yaklaşımın genel performansı artırdığı görülmüştür ve sınıflandırma sürecinde genel doğruluk başarısı %100 olarak elde edilmiştir.

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

## 1. GİRİŞ

Son zamanlarda insanların internet ortamındaki etkileşimleri dikkate alındığında gözle görülebilir büyük bir artış yaşanmıştır. Bilgi tabanlı sistemlerin artması, dijital ortamların yoğun ilgi görmesi, sosyal medya üzerinden işlemlerin gerçekleşmesi, vb., durumlardan dolayı internet dünyası kötü amaçlı yazılımcıların hedefi haline gelmiştir. Kötü amaçlı yazılımcılar tarafından geliştirilen yazılımlar, çeşitli saldırı türleri ile sistemleri ele geçirmek, verileri yedeklemek veya değiştirmek, varlığını gizleyerek sürdürmek, kullanıcı hesaplarını ele geçirmek, ağ ortamına bağlı sistemlere zarar vermek, vb. amaçlar doğrultusunda tasarlanmıştır [1]. Panda Security'in 2018 raporuna göre bilgisayar korsanları tarafından günlük 230 bin kötü amaçlı yazılım tasarlanmaktadır. Bu sayı her geçen gün daha da artmaktadır. Kaspersky firmasının 2019 yılı raporuna göre kimlik avı dolandırıcılığında istenmeyen e-postalar ilk sırada yer almaktadır ve bu eğilimin yakın zamanda değişmesi mümkün değildir. Ayrıca siber saldırılara maruz kalan küçük şirketler ekonomik anlamda olumsuz etkilenmişlerdir. Accenture firması, web tabanlı saldırılara karşı her yıl yaklaşık 2.4 milyon dolar harcama yaparak tedbirler almıştır. Siber saldırılar sadece bir grup tarafından gerçekleştirilen eylemler olarak tanımlanmayıp, devletler tarafından da desteklenmektedir. Bu durumun en iyi örneği, İsrail tarafından desteklenmiş ve İran Nükleer Santrali'nin çalışmasını engellemek amacıyla geliştirilmiş Stuxnet adı verilen kötü amaçlı yazılımdır [2]. Kötü amaçlı yazılımların etkisini azalabilmek ve tespitini kolaylaştırmak için bu yazılımların türlerine göre gerçek zamanlı stratejiler geliştirilmektedir. Günümüzde yapay zeka tabanlı yaklaşımlar gerçek zamanlı sistemlere entegre edilerek işlemlerin daha kolaylaştırılması hedeflenmiştir. İnsanüstü karar verebilen bu sistemler gerçek zamanlı işlemlerde daha da etkili rol üstlenebilmektedir [3]. Literatür de bazı çalışmalar bu durumu destekler niteliktedir;

M. Akhtar ve ark. [4] botnet saldırılarını tespit etmek için hibrit bir derin öğrenme yaklaşımı önerdi. Önerdikleri yaklaşım evrimsel sinir ağı (ESA) ile uzun-kısa süreli bellek (LSTM) modelinden oluşmuştu. Kötü amaçlı yazılım sınıflarının tespitinde önerdikleri yaklaşım ile %99 genel doğruluk başarıları elde etmişlerdi [4]. Ding Yuxin ve Zhu Siyi çalışmasında derin inanç ağlarını (DBN) kullanarak kötü amaçlı yazılımların tespitini başarılı bir şekilde gerçekleştirdi. Sınıflandırma sürecinde önerdikleri DBN modelini destek vektör makineleri (SVM), karar ağaçları ve k-en yakın komşu (kNN) yöntemleri ile kıyaslamışlar ve en iyi performans DBN modeli ile yaklaşık %98 oranında genel doğruluk başarıları sağlamışlardır [5]. Vinayakumar Ravi ve ark. çalışmasında kötü amaçlı yazılımların tespiti için çok görünümlü dikkat tabanlı derin öğrenme modelini önerdiler. Önerilen yaklaşımı hem windows tabanlı verilerde hem de android tabanlı verilerde uyguladılar ve sırasıyla %98 ile %97 genel doğruluk başarıları elde ettiler [6]. J. Pavithra ve S.Samy çalışmasında web işlemlerinin yer aldığı veri kümesini kullanarak web saldırılarının tespitini gerçekleştirmişlerdir. Önerdikleri yaklaşımda makine öğrenme yöntemlerini (SVM, rastgele orman) ve Bayes modelini kullandılar. Deneysel analizlerde en başarılı sonucu rastgele orman yöntemi vermiştir ve bu yöntem ile yaklaşık %99 genel doğruluk başarıları sağlamışlardır [7].

Bu çalışmada kötü amaçlı bellek analizi kayıtlarından oluşan veriler, barkod türlerine dönüştürülerek yeni veri kümeleri elde edildi. Bir sonraki aşamada veri kümeleri tasarlanmış ESA modeli ile eğitildi ve tür tabanlı özellik setleri elde edildi. Ardından tür tabanlı özellik setleri birleştirilerek sınıflandırma işlemi gerçekleştirildi.

Bu çalışmanın mevcut literatürden farkları şunlardır;

- Kötü niyetli yazılım verileri 1-boyutlu (1B) kayıtlardan oluşur ve 1B kayıtlar 1B-ESA modelleri kullanılarak analizleri gerçekleştirilir. Bu çalışma ile 1B kayıtlar 2-boyutlu (2B) barkod türlerine dönüştürülerek 2B-ESA modeliyle eğitimi gerçekleştirildi.
- Veri kümesindeki her bir kayıt okunabilir içeriklerden oluşmaktadır. Kayıtlar barkod türlerine dönüştürülerek bu durumun önüne geçildi ve veri güvenliği ön plana çıkarıldı.
- 2B-ESA modelinin sunmuş olduğu olanaklardan (tür tabanlı özellik seti elde etme, özellik birleştirme) yararlanıldı.

Bu çalışmanın amacı ve hedefleri şu şekilde özetlenir;

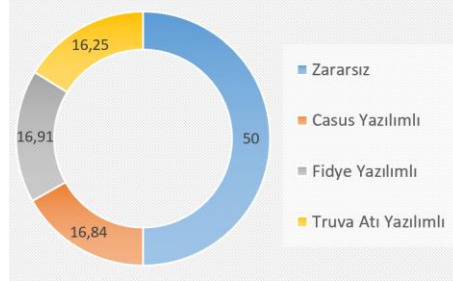
- Kötü amaçlı yazılım türlerini (casus yazılımı, fidye yazılımı, trojan) normal veri bilgilerinden ayırt edebilecek bir yaklaşım geliştirmeyi amaçlamıştır.
- Ön işlem adımı olarak metin tabanlı verileri 2B barkod türlerine (veri matrisi, aztek) dönüştürerek elde edilen görüntü verileri, önerilen 2B-ESA modele girdi olarak verilerle başarılı bir sınıflandırma gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.
- Ön işlem adımı sayesinde metin tabanlı veriler 2B-ESA modeli tarafından da eğitilebilecek,
- ESA modeli tarafından çıkartılan öznelik setleri birleştirilerek sınıflandırma sürecine katkı sağlanması amaçlanmıştır.

Bu makale şu şekilde özetlenir; kullanılan materyal hakkında bilgiler Bölüm 2'de verilmiştir. Önerilen yaklaşımda kullanılan yöntemler ve modeller hakkında bilgiler Bölüm 3'te verilmiştir. Deneysel analizler ve analizlerin karşılaştırılması hakkında detaylı bilgiler Bölüm 4'te verilmiştir. Tartışma ve Sonuç bölümü makalenin son bölümünde yer almıştır.

## 2. CIC-MALMEM-2022 VERİ KÜMESİ

CIC-MalMem-2022, Kanada Siber Güvenlik Enstitüsü (CIC) araştırmacıları tarafından oluşturulmuş ve kötü amaçlı yazılım bellek analizi (MalMem) verilerini içeren açık erişimli bir veri kümesidir. Gizlenmiş kötü amaçlı

yazılımlar, tespit edilmekten veya yok edilmekten kaçınarak bellek gibi donanımsal yerlerde varlıklarını sürdürürler. Bu veri kümesi, ortalama bir kullanıcının bir kötü amaçlı yazılım saldırısı sırasında neleri çalıştıracağına daha doğru bir örneğini temsil etmektedir. CIC-MalMem-2022, iyi amaçlı veriler ve kötü amaçlı veriler olmak üzere dengeli bir dağılım gerçekleştirilerek oluşturulmuştur. Kötü amaçlı yazılım verilerinin dökümü incelendiğinde 29.298'i zararsız ve 29.298'i kötü amaçlı olmak üzere toplam 58.596 kayıt içermektedir. Kötü amaçlı yazılımlar; casus, fidye ve truva atı olmak üzere üç türden oluşmaktadır. Veri türlerinin içerdiği kayıt türlerine göre yüzdelik oranları Şekil 1'de gösterilmiştir. Her bir kayıt 57 adet öznitelikten oluşmaktadır ve bu özniteliklerin kategori ve sınıf öznitelikleri hariç diğer öznitelikler sayısal formatlardan oluşmaktadır [8].



Şekil 1. Veri kümesinin türleri ve yüzdelik dilimleri (%).

Deneyel analizlerin donanımsal gereksinimleri de dikkate alınarak orijinal veri kümesinin tamamı bu çalışma da kullanılmadı. Veri kümesinin her bir türünden 500 kayıt rastgele seçilerek yeni bir veri kümesi oluşturuldu. Bu çalışma için kullanılan veri kümesi türleri ve kullanılan kayıt sayısı hakkında bilgiler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Bu çalışmanın deneyel analizlerinde kullanılan veri kümesi türleri ve istatistik bilgisi.

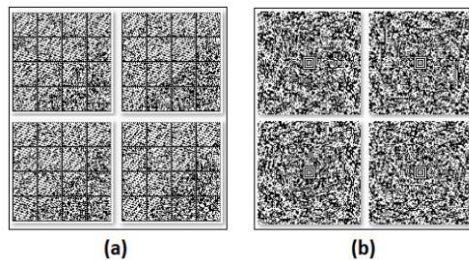
| Veri Türü         | Kayıt Sayısı |
|-------------------|--------------|
| Zararsız          | 500          |
| Casus yazılım     | 500          |
| Fidye yazılım     | 500          |
| Truva atı yazılım | 500          |
| Toplam            | 2000         |

### 3. YÖNTEMLER VE YAKLAŞIMLAR

#### 3.1. Veri Matrisi ve Aztek Kodu

Veri matrisleri büyük miktarda veriyi kodlamak için tercih edilen, siyah beyaz kare modüller şeklinde kodlayan iki boyutlu bir matris barkod türüdür. Kısacası çok yüksek veri saklama yoğunluğuna sahip 2B barkod sembolisidir. Veri matrisleri genellikle kare şeklinde iki boyutlu bir görüntü ile temsil edilir; bazen dikdörtgen görüntülerden de oluşabilmektedir. Veri matrislerinin her bir noktası bit ile temsil edilir. Tek bir veri matrisi 2335 alfa sayısal karakteri destekler veya 1556 bayta kadar veri tutabilir. Bu kapasite veri sıkıştırma algoritmaları ile birlikte daha da artabilmektedir. Veri matrislerinin hata düzeltme seviyeleri de mevcuttur. Yaklaşık %25'e kadar okunmayan veri matrisi barkodunu veri kaybı söz konusu olmadan yeniden yüklemek ve okumak mümkündür. Veri matrisleri genel olarak posta hizmetleri, tıbbi/sağlık endüstrisi, genel lojistik amaçlar, belge yönetim uygulamalarında sıkça tercih edilmektedir [9]. Veri matrisi örnekleri Şekil 2(a)'da gösterilmiştir.

Aztek kodu, piramidin havadan görünümüne benzeyen merkezinde bulucu kodu sayesinde bu isim verilmiştir. Araç tescil belgelerinde, seyahat belgeleri, uçak biletlerinde sıkça kullanılan bu kodlama, 2B bir matris barkod türüdür. Çoğu 2B matris kodlarının aksine aztek kodu ile tasarlanmış bir barkod, kenarında sessiz bir gölge barındırmaz. Böylece daha küçük alanları daha verimli kullanarak büyük verileri depolama özelliğine sahip olurlar. Ayrıca veri büyüklüğüne bağlı olarak aztek kodların boyutları da değişebilir ve potansiyel olarak çok miktarda bilgileri tutabilirler. Aztek kodların QR kodlardan üç köşesinde üç bulucu desen bulunmaz, merkezinde bulucu desen yer alır [10]. Aztek kodları 3832 numerik değerleri destekler ve 1914 bayta kadar veri tutabilir [9]. Aztek kodunu temsil eden örnek Şekil 2(b)'de gösterilmiştir.



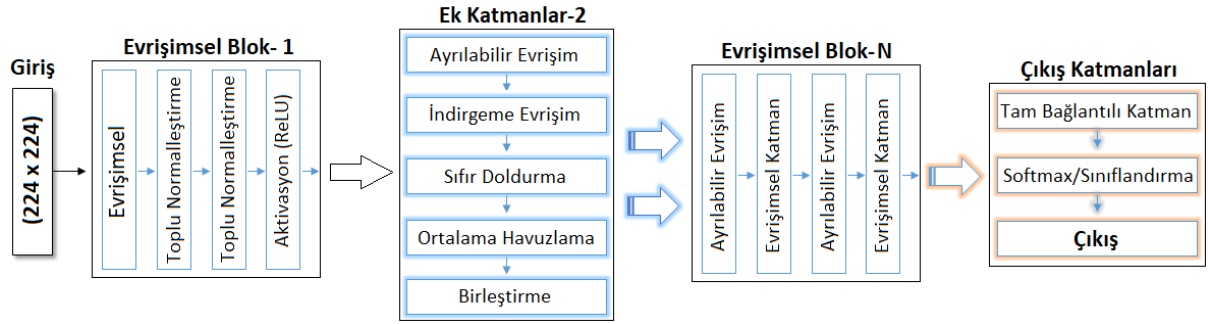
Şekil 2. Veri kümesinden elde edilmiş 4 kayıt örneğinin barkod gösterimi; a) veri matrisi, b) aztek kodu.

### 3.2. Tasarlanmış Derin Ağ Modeli

ESA modelleri genel olarak üç bileşenden oluşur; Evrişimsel katman, havuzlama katmanı ve tam bağlantılı katman. Evrişimsel katmanlar girdi görüntülerini bir filtre aracılığıyla dolaştırarak özneliklerin çıkartılmasını sağlar. Bunu gerçekleştirirken çıktı olarak aktivasyon haritalarını oluştururlar. Aktivasyon haritaları havuzlama katmanı kullanılarak daha düşük boyutlu özneliklere dönüştürülür [11]. Bu süreç ESA modelinin mimari yapısına bağlı olarak belirli aralıklarla tekrarlanır. Havuzlama katmanı bu sayede ESA modelinin aşırı öğrenmesini engeller. Toplu normalleşme (batch normalization), bir önceki katmanın öğrenmesini beklemeden eş zamanlı olarak öğrenme olanağı sağlar [12]. Girdi verisi iki boyutlu matristen oluşmaktadır. Bu matris çekirdek olarak ifade edilmektedir ve ana çekirdek iki küçük çekirdeğe bölünecek şekilde ayrılması işlemine ayrılabilir evrişimsel (separable convolution) denilmektedir [13]. İndirgeme (reduction) evrişimsel katman sayesinde girdi boyutları bir sonraki katmana düşürülerek aktarılması sağlanır. Sıfır doldurma (zero padding) bir önceki katman çıkış boyutunu korumaya müsaade eder. Yani, çıkış görüntüsünün kenarlarına tamamı sıfır değerine sahip bir piksel kenarlığı eklenmesini sağlar [14]. ESA modelinin son aşamasında tam bağlantılı katmanlar kullanılır ve tam bağlantılı katmanlar önceki katmanlardan çıkartılmış nöronları/ düğümleri tek bir katmanda düzleştirir. Yani nöronlar çıkış katmanına düzleştirilerek bağlanır. Son adımda girdi türlerinin sınıflandırılma süreci ile ilgili olasılık değerlerin hesaplanması gerçekleşir [15]. Genel olarak ESA modellerinde farklı bir sınıflandırıcı kullanılmadığı takdirde tercih edilen sınıflandırıcı fonksiyonu Softmax'tır.

Softmax fonksiyonu ESA modellerinin ham çıktısını normalleştirmek olasılık değerleri elde etmek için son katmanda genellikle tercih edilir. Softmax fonksiyonun matematiksel işlevini gösteren denklem aşağıda verilmiştir. Denklem 1 incelendiğinde;  $x_i$  bir makine öğrenimi sonucu elde edilmiş ağırlık çıktılarını temsil eder.  $i = 1, \dots, N$  arası örneklem değerlerinden oluşur.  $P_i$  değişkeni,  $i$ . elemanın olasılık değerini temsil eder [16].

$$P_i = \frac{e^{x_i}}{\sum_{k=1}^N e^{x_k}} \quad (1)$$



Şekil 3. Tasarlanmış ESA modelinin katman yapısı.

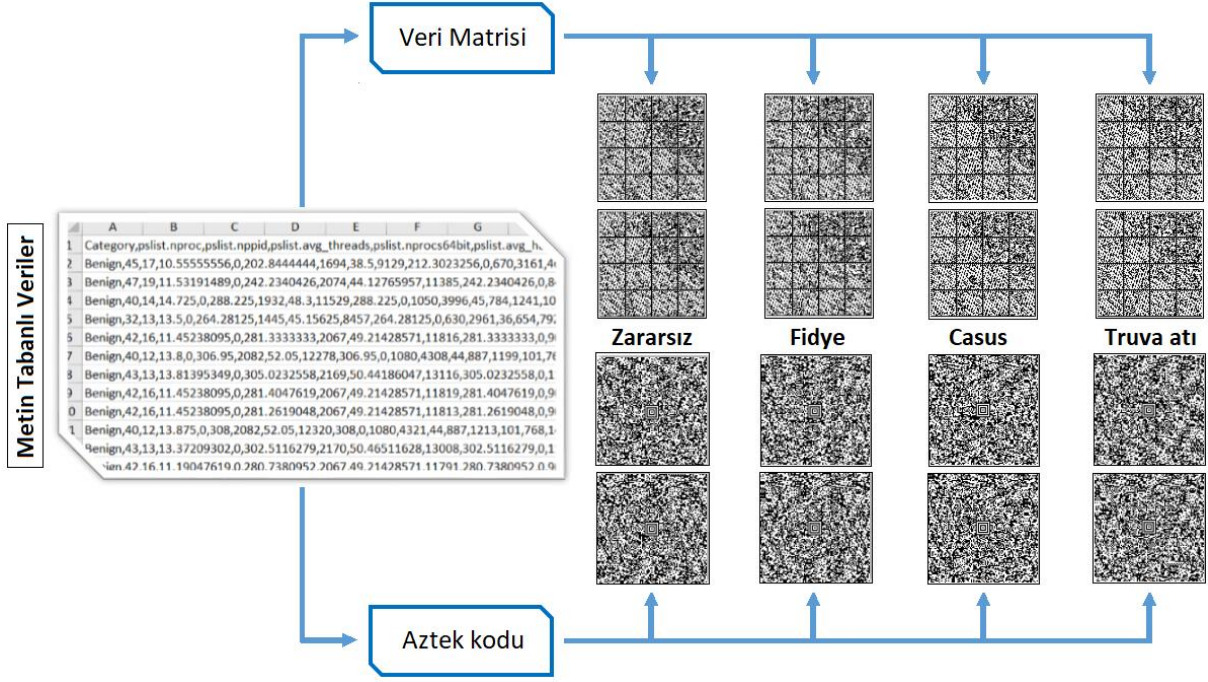
Bu çalışmanın analizleri için Keras Kütüphanesi kullanılarak özgün bir ESA modeli tasarlanmıştır. Tasarlanan ESA modeli Şekil 3'te gösterildi. Önerilen modelin girdi çözünürlüğü 224x224'tür ve ImageNet veri kümesi kullanılarak önceden eğitilmiş ağırlık parametreleri elde edilerek tasarlandı. Öğrenme oranı 1e-4 tercih edildi ve optimizasyon yöntemi olarak stokastik gradyan inişi (SGD) seçildi. Tam bağlantılı katman her bir girdi verisi için 1000 öznelik verecek şekilde ayarlandı. Sınıflandırma sürecinde çıkış, *tür sayısı (zararsız, casus, fidye, truva atı) × görüntü sayısı* öznelik seti verecek şekilde oluşturuldu.

### 3.3. Önerilen Yaklaşım

Önerilen yaklaşım, metin içerikli verileri 2B barkod türlerine dönüştürerek 2B-ESA modeli tarafından başarılı bir şekilde eğitilmesini sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Literatürdeki çalışmalarda kullanılan 1B veriler, 1B-ESA modelleri tarafından eğitilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma da ise hedef, 1B veri kümesini 2B görüntü verilerine dönüştürmektir ve ardından 2B olarak tasarlanmış ESA modeliyle eğitilmesini başarılı bir şekilde gerçekleştirmektir. Buradan elde edilecek başarı diğer 2B-ESA modelleri tarafından da başarılı bir şekilde kullanabileceği öngörülmektedir. Önerilen yaklaşım iki aşamadan oluşmaktadır;

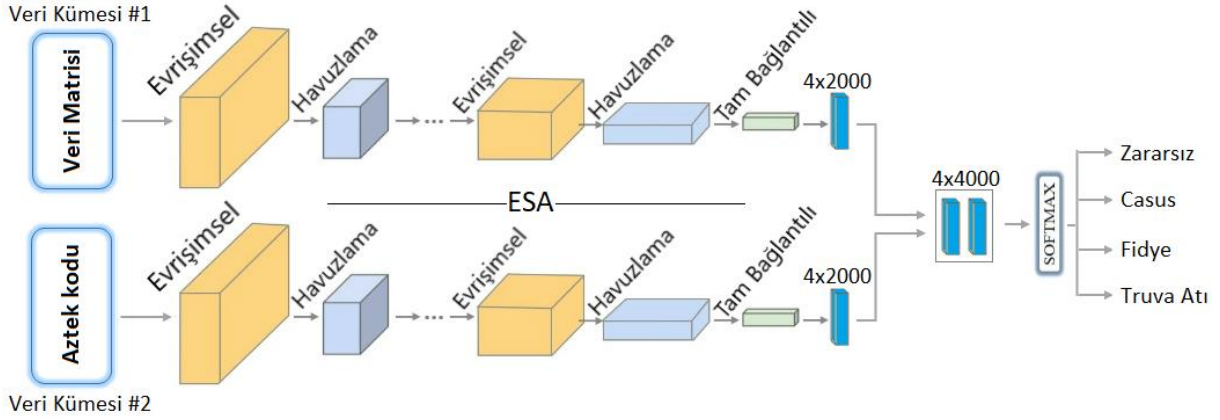
Birinci aşamada 1B metin tabanlı kayıtlar 2B barkod türlerine dönüştürülerek 2B görüntüler elde edildi. 2B barkod türlerine dönüştürme işleminde iki teknik kullanıldı. Bu teknikler; aztek kodu (aztec code) [17] ve veri matrisi (data matrix) [18]. 1B veri kümesinin her satırı sırasıyla Python dilinde çağrılarak aztek ve veri matrisi teknikleri ile derlendi. Ardından her bir kayıt satırı için barkod türlerine ait 2B görüntüler elde edildi. Bu aşama sonunda iki adet veri kümesi oluşturuldu (aztek ve veri matrisi teknikleri aracılığıyla). Birinci aşamada elde edilen görüntü kümesine ait örnek görüntüler Şekil 4'te gösterilmiştir.





Şekil 4. Metin tabanlı kayıtların 2B Barkod türlerine dönüştürülmesi işlemi.

İkinci aşamada, 2B-veri kümeleri (veri matrisi ve aztek kodu ile oluşturulmuş veri kümesi) tasarlanmış ESA modeli tarafından eğitildi ve modelin tam bağlantılı son katmanından tür tabanlı öznelik setleri çıkartıldı. Ardından özellik birleştirme (feature fusion) tekniği ile iki özellik seti birleştirildi. Burada amaç genel doğruluk performansını artırmaktı. Ardından birleştirilmiş öznelik seti Softmax tarafından yeniden sınıflandırıldı. İkinci aşamada gerçekleştirilen işlemler ve önerilen yaklaşımın genel tasarımı Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Önerilen yaklaşımın genel tasarımı.

#### 4. DENEYSEL ANALİZLER

Bu çalışmada önışlem adımları ve tasarlanmış ESA modeli Python diliyle kodlandı ve analizler için Google Colab sunucusu kullanıldı. Python kodları Jupyter Notebook platformu üzerinden derlendi. Analiz ölçümlerinde karmaşıklık matrisi tercih edildi [19]. Karmaşıklık matrisinin hesaplanmasında kullanılan metrikler şunlardır; geri çağırma (G çağ), kesinlik (kes), f-skor (f-skr) ve doğruluk (doğ) [20]. Metriklerin hesaplanma işlemleri için Denklem 2-5'te yer alan matematiksel formüller kullanıldı. İlgili denklemlerde; (D): doğru, (Y): yanlış, (N): negatif, (P): pozitif anlamı taşımaktadır [21, 22]. Tasarlanmış ESA modeli için tercih edilen parametre değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

$$G_{\text{çağ}} = \frac{DP}{DP+YN} \quad (2)$$

$$Kes = \frac{DP}{DP+YP} \quad (3)$$

$$F\text{-skr} = \frac{2 \times DP}{2 \times DP + YP + YN} \quad (4)$$

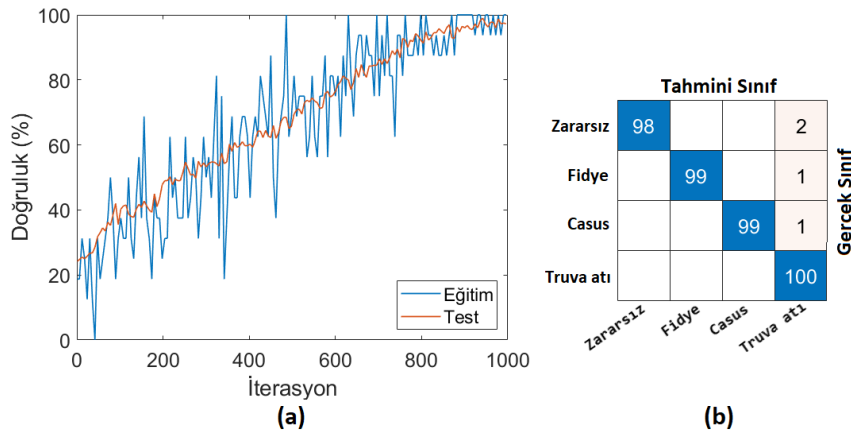
$$Doğ = \frac{DP+DN}{DP+DN+YP+YN} \quad (5)$$



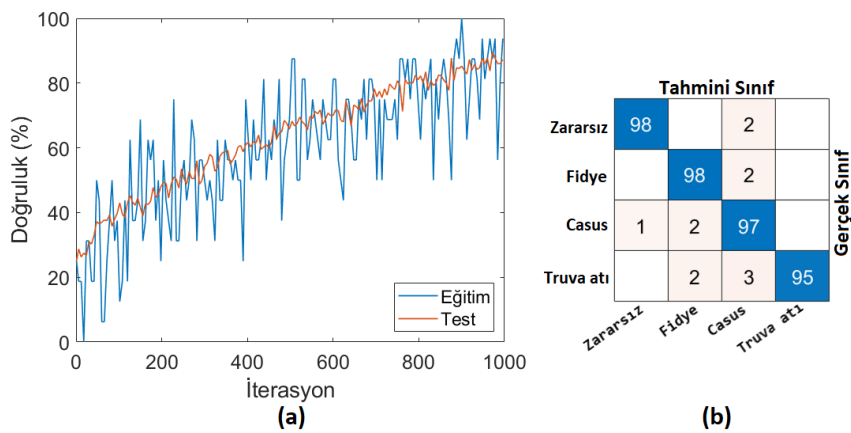
**Tablo 2.** ESA modeli için tercih edilmiş parametre değerleri.

| Parametre                       | Tercih / Değer |
|---------------------------------|----------------|
| İterasyon sayısı                | 1000           |
| Öğrenme oranı                   | 1e-4           |
| Optimizasyon                    | SGD            |
| Sınıflandırıcı                  | Softmax        |
| Aktivasyon fonksiyonu           | ReLU           |
| Evrişimsel katman sayısı        | 36             |
| Evrişimsel katman filtre boyutu | (3×3) ve (5×5) |
| Havuzlama katman filtre boyutu  | (3×3)          |
| Donanım kaynağı                 | Tekli GPU      |
| Mini – topluluk (mini-batch)    | 16             |
| Eğitim oranı: test oranı        | 0.8:0.2        |

DeneySEL analizler iki adımdan oluşmuştur. Birinci adımda bu çalışma için tasarlanmış 2B-ESA modeli tarafından 2B-veri kümelerinin (veri matrisi ve aztek kodu) eğitimi gerçekleştirildi. Veri matrisi ile oluşturulmuş veri kümesinin eğitim-test başarı grafikleri ve karmaşıklık matrisi Şekil 6'da gösterilmiştir. Aztek kodu ile oluşturulmuş veri kümesinin eğitim-test başarı grafikleri ve karmaşıklık matrisi Şekil 7'de gösterilmiştir. 2B- veri kümelerinin tasarlanmış ESA modeli ile eğitiminden elde edilmiş metrik sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. Tablo 3'teki sonuçlar incelendiğinde veri matrisi ön işleme adımıyla elde edilmiş veri kümesinin ESA modeli tarafından eğitimi aztek koduyla işlenmiş veri kümesine göre daha başarılı sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Veri matrisi ile işlenmiş veri kümesinin ESA modeliyle eğitim sonucunun genel doğruluk başarısı %99'du ve aztek kodu ile işlenmiş veri kümesinin ESA modeliyle eğitim sonucunun genel doğruluk başarısı %97'di.



**Şekil 6.** Veri matrisi ile oluşturulmuş veri kümesinin ESA modeli ile eğitim analizi; a) doğruluk grafiği, b) karmaşıklık matrisi.

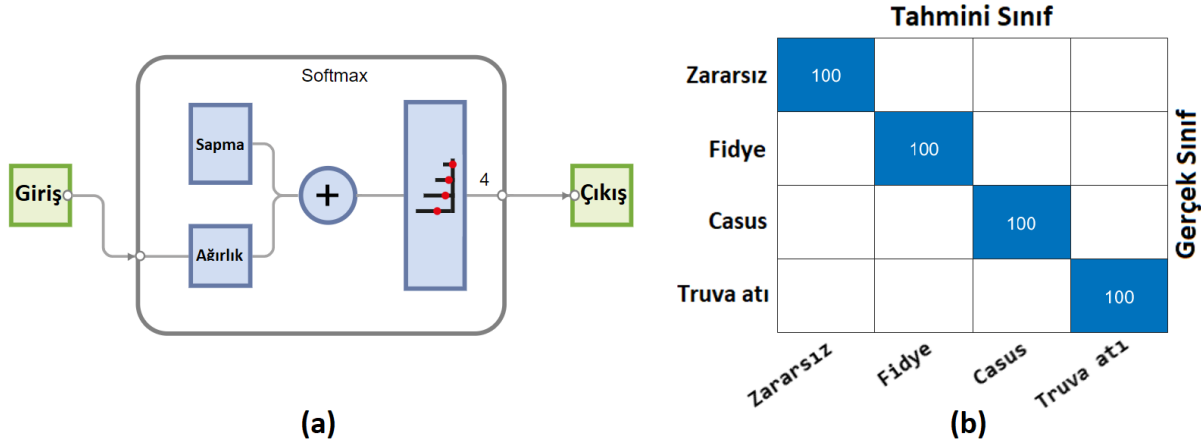


**Şekil 7.** Aztek kodu ile oluşturulmuş veri kümesinin ESA modeli ile eğitim analizi; a) doğruluk grafiği, b) karmaşıklık matrisi.

**Tablo 3.** Önerilen ESA modeli ile elde edilmiş karmaşıklık matrisi sonuçları.

| Ön işlem     | Sınıf     | Kes  | G_çag | F-skr | Doğ. (%) | Genel Doğ. (%) |
|--------------|-----------|------|-------|-------|----------|----------------|
| Veri matrisi | Zararsız  | 0,98 | 1,0   | 0,99  | 99,50    | 99,0           |
|              | Fidye     | 0,99 | 1,0   | 0,99  | 99,75    |                |
|              | Casus     | 0,99 | 1,0   | 0,99  | 99,75    |                |
|              | Truva atı | 1,0  | 0,96  | 0,98  | 99,0     |                |
| Aztek kodu   | Zararsız  | 0,98 | 0,99  | 0,98  | 99,25    | 97,0           |
|              | Fidye     | 0,98 | 0,96  | 0,97  | 98,50    |                |
|              | Casus     | 0,97 | 0,93  | 0,95  | 97,50    |                |
|              | Truva atı | 0,95 | 1,0   | 0,97  | 98,75    |                |

DeneySEL analizIN ikinci adımında ESA modelinin son katmanından çıkartılmış tür tabanlı öznitelik seti her iki veri kümesi için birleştirilerek ( $2x$  [sınıf sayısı  $\times$  görüntü sayısı]) önerilen yaklaşımın genel performansı artırılması amaçlanmıştır. Her bir veri kümesinden çıkartılmış  $4 \times 2000$  öznitelik setleri birleştirilerek  $4 \times 4000$  boyutunda öznitelik seti oluşturuldu. Ardından softmax yöntemi ile birleştirilmiş öznitelik seti yeniden sınıflandırıldı. Softmax yönteminin mimari yapısı ve sınıflandırma sonucunda elde edilmiş karmaşıklık matrisi Şekil 8’de gösterilmiştir. DeneySEL analizIN ikinci adımında öznitelik setlerin birleştirilmesi genel performansı artırdığı gözlemlenmiştir ve % 100 genel doğruluk başarısı elde edilmiştir. Bu adımda elde edilmiş metrik sonuçları Tablo 4’te verilmiştir.

**Şekil 8.** Birleştirilmiş öznitelik setinin softmax yöntemi ile sınıflandırılması; a) softmax'ın işlevi, b) karmaşıklık matrisi.**Tablo 4.** Önerilen yaklaşım ile elde edilmiş karmaşıklık matrisinin metrik sonuçları.

| Model             | Sınıf     | Kes | G_çag | F-skr | Genel Doğ. (%) |
|-------------------|-----------|-----|-------|-------|----------------|
| Önerilen yaklaşım | Zararsız  | 1,0 | 1,0   | 1,0   | 100            |
|                   | Fidye     | 1,0 | 1,0   | 1,0   |                |
|                   | Casus     | 1,0 | 1,0   | 1,0   |                |
|                   | Truva atı | 1,0 | 1,0   | 1,0   |                |

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Yakın zamanda teknolojik gelişmeler ile beraber insanların internet dünyasıyla etkileşimi artmıştır. Bununla beraber kötü amaçlı yazılımcıların çeşitli senaryolar ortaya koyarak internet kullanıcılarını kendi amaçları doğrultusunda tuzağa çekme oranlarında da artış yaşanmıştır. Dolayısıyla ağ ortamında çok sayıda kullanıcıyı eş zamanlı kontrol edebilmek ve güvenliğini sağlayabilmek için birçok analiz gerçekleştirilmiştir. Özellikle eşzamanlı kontrollerin zaman, hız ve doğruluk parametrelerini verimli bir şekilde kullanabilmek önem arz etmektedir. Yapay zekâ yaklaşımları eş zamanlı kontrolleri gerçekleştirebilmek için son zamanlarda birçok çalışmada tercih edilmiştir. Bu çalışma, kötü amaçlı yazılımların tespitinde metin tabanlı verilerin 2B görüntülere dönüştürülerek 2B-ESA modeliyle eğitimini başarılı bir şekilde ayırt edebildiğini göstermiştir. Ayrıca hızdan kazanç ve zamandan tasarruf sağlamak amacıyla orijinal veri kümesinin tüm kayıtları değil de belirli bir oranda (her bir sınıf için 500 kayıt) kayıtları rastgele seçilerek eğitilmiştir. Son aşamada ESA modelinin son katmanından tür tabanlı öznitelik setleri çıkartılarak birleştirilmiş ve softmax ile yeniden sınıflandırılmıştır. Sonuç olarak %100 genel performans

başarısı sağlanmıştır. Önerilen yaklaşım, kötü amaçlı yazılımların tespiti de başarılı bir rol üstlenmiştir. Önerilen yaklaşımın ana katkıları şunlardır;

- 1B verilerin 2B-ESA modelleri ile eğitilmesinin önü açılmıştır. Bunu sağlamak için 1B veriler 2B barkod türlerine dönüştürülmüştür.
- 2B-ESA modeli ile başarılı sonuçlar elde edilmiştir.
- 1B veri kayıtları 2B barkod türlerine dönüştürülerek veri güvenliği önplanda tutulmuştur.
- Tasarlanmış ESA modelinin son katmanın da tür/sınıf tabanlı özellik setleri elde edilmiştir.
- Özellik setlerini birleştirerek (feature fusion), önerilen yaklaşımın performans artısını sağlamıştır.

Önerilen yaklaşımın sınırlılıkları arasında donanımsal yetersizlikten dolayı veri kümesinin tüm kayıtları analizlerde kullanılmadı. Ayrıca uçtan uca bir model olmaması belirli aşamalarda zaman kaybına yol açmıştır.

Bu çalışmada kullanılan veri kümesi 2022 yılında yayınlanmış ve aynı veri kümesini kullanan diğer çalışmalar karşılaştırılması Tablo 5'te gösterilmiştir. Louk ve ark. [23] çalışmasında ağaç tabanlı topluluk öğrenme yöntemlerini kullanarak analizlerini gerçekleştirmiştir. Klasik yöntemlerle analizlerin gerçekleştirilmesi sonucu en iyi performans XGBoost ve rastgele orman yöntemleri ile elde etmiştir. Bu yöntemler ile yaklaşık %99 genel doğruluk başarısı elde etmişlerdir. Dener ve ark. [24] çalışmasında ağaç tabanlı topluluk öğrenme yöntemleri ile makine öğrenme yöntemlerini kullanmışlar. Çalışmalarında klasik yöntemler ile veri kümesinin tamamını analiz ettiler ve analizler sonucunda en iyi performans lojistik regresyon yöntemi ile sağladılar. Bu yöntem ile %99,97 genel doğruluk başarısı elde etmişlerdir. Louk [23] ve Dener [24] çalışmalarında veri kümesini zararsız ve zararlı yazılımlar olmak üzere ikili sınıflandırma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmanın analizlerinde ise zararsız veriler ile beraber kötü amaçlı yazılımların (casus, fidye, Truva atı) verileri kullanıldı. Mezina ve Burget [25], genişletilmiş 1B-ESA tabanlı model tasarladılar. Sınıflandırıcı olarak softmax yöntemini kullandılar. Sonuç olarak önerdikleri yaklaşımda %83,53 genel doğruluk performansı elde ettiler. Mezina ve Burget [25] önerdikleri yaklaşımda geleneksel yöntemler içerdiği için yenilikçi yönü sınırlı kalmıştır. Talukder ve ark. [26] veri kümesinin sayısını azaltmak ve dengelemek için SMOTE tekniğini kullandılar. Özellik seçimi için XGBoost yöntemini ve sınıflandırma sürecinde rastgele orman yöntemini kullandılar. İkili olarak gerçekleştirdikleri sınıflandırma (zararlı ve zararsız) işleminde %100 genel doğruluk performansı elde ettiler.

**Tablo 5.** Önerilen yaklaşımın diğer çalışmalar ile karşılaştırılması.

| Makale                      | Sınıf Sayısı | Yöntem / Model   | Genel Doğ. (%) |
|-----------------------------|--------------|--|----------------|
| M.H. Louk ve ark. [23]      | 2            | Ağaç Tabanlı Topluluk Öğrenimi                               | 99             |
| M. Dener ve ark. [24]       | 2            | Topluluk Öğrenme / Makine Öğrenme                            | 99,97          |
| A. Mezina ve R. Burget [25] | 4            | Genişletilmiş 1B- ESA  | 83,53          |
| M.A. Talukder ve ark. [26]  | 2            | SMOTE & Makine Öğrenme                                       | 100            |
| Önerilen Yaklaşım           | 4            | 2B Barkod dönüştürme / Tasarlanmış ESA / Özellik birleştirme | 100            |

Gelecek çalışmada, metin tabanlı verilerin 2B diğer barkod yöntemleri kullanılarak analizleri gerçekleştirilecektir. Barkod türleri arasında en iyi performansı verebilen yöntem belirlenerek çeşitli 2B-ESA modelleriyle eğitimi gerçekleştirilecektir. Son adımda ise ESA modellerinden çıkartılmış öznelik setleri meta-sezgisel algoritmalara girdi olarak verilerek en verimli öznelik setleri seçilecek ve sınıflandırılacaktır.

#### Yazar Katkıları

Mesut Toğaçar: Fikrin ortaya çıkmasını sağlamış, deneysel analizleri gerçekleştirmiş ve makaleyi yazmıştır.

#### Çıkar Çatışması

Makale yazarı, herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

#### KAYNAKÇA

- [1] M.D. Yılmaz "Malware classification with using deep learning", Comput. Informatics, vol. 2, no. 2, pp. 21-40, 2022.
- [2] U.H. Tayyab, F.B. Khan, M.H. Durad, A. Khan, and Y.S. Lee "A Survey of the Recent Trends in Deep Learning Based Malware Detection", J. Cybersecurity Priv., vol. 2, no. 4, pp. 800-829, 2022.
- [3] M. Toğaçar "Siber Saldırılarına Karşı Kullanılan Makine Öğrenme Yöntemlerinin Web Uygulamalarında Güvenlik Etkinliğinin Ölçümü", Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol., vol. 9, no. 4, pp. 608-620, 2021.
- [4] M.S. Akhtar and T. Feng "Detection of Malware by Deep Learning as CNN-LSTM Machine Learning Techniques in Real Time", Symmetry (Basel), vol. 14, no. 11, pp. 2308, 2022.
- [5] D. Yuxin and Z. Siyi "Malware detection based on deep learning algorithm", Neural Comput. Appl., vol. 31, no. 2, pp. 461-472, 2019.

- [6] V. Ravi, M. Alazab, S. Selvaganapathy, and R. Chaganti “A Multi-View attention-based deep learning framework for malware detection in smart healthcare systems”, *Comput. Commun.*, vol. 195, pp. 73–81, 2022.
- [7] J. Pavithra and S. Selvakumara Samy “A Comparative Study on Detection of Malware and Benign on the Internet Using Machine Learning Classifiers”, *Math. Probl. Eng.*, vol. 2022, pp. 1–8, 2022.
- [8] T. Carrier, P. Victor, A. Tekeoğlu, and A. Lashkari “Malware Memory Analysis”, UNB, 2022.
- [9] D. G. Tec-it “Data Matrix (ECC200) - 2D Barcode”, 2022.
- [10] C. Center “Aztec Codes”, url: <https://www.cognex.com/resources/symbologies/2-d-matrix-codes/aztec-codes>, (Erişim Tarihi: 12/03/2023).
- [11] A. Zafar “A Comparison of Pooling Methods for Convolutional Neural Networks”, *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 17, p. 8643, 2022.
- [12] C. Garbin, X. Zhu, and O. Marques “Dropout vs. Batch Normalization: An Empirical Study of Their Impact to Deep Learning”, *Multimed. Tools Appl.*, vol. 79, no. 19, pp. 12777–12815, 2020.
- [13] T. Huang, J. Chen, and L. Jiang “DS-UNeXt: depthwise separable convolution network with large convolutional kernel for medical image segmentation”, *Signal Image Video Process*, 2022.
- [14] M.R.A. Bacha, A. Oukebdane, and A. Hafid Belbachir “Implementation of the zero-padding interpolation technique to improve angular resolution of X-ray tomographic acquisition system”, *Pattern Recognit. Image Anal.*, vol. 26, no. 4, pp. 817–823, 2016.
- [15] R. Nirthika, S. Manivannan, A. Ramanan, and R. Wang “Pooling in convolutional neural networks for medical image analysis: a survey and an empirical study”, *Neural Comput. Appl.*, vol. 34, no. 7, pp. 5321–5347, 2022.
- [16] G.C. Cardarilli et al. “A pseudo-softmax function for hardware-based high speed image classification”, *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, p. 15307, 2021.
- [17] D. Alimov “Aztec Code generator”, url: <https://pypi.org/project/aztec-code-generator/>, (Erişim Tarihi: 21/02/2023).
- [18] X. Ling Yushulx “Barcode Image Composer”, url: <https://pypi.org/project/barcode-image-composer/>, (Erişim Tarihi: 21/02/2023).
- [19] E. Başaran “Classification of white blood cells with SVM by selecting SqueezeNet and LIME properties by mRMR method”, *Signal Image Video Process.*, vol. 16, no. 7, pp. 1821–1829, 2022.
- [20] A. Çalışkan “Detecting human activity types from 3D posture data using deep learning models”, *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 81, p. 104479, 2023.
- [21] A. Ari “Multipath feature fusion for hyperspectral image classification based on hybrid 3D/2D CNN and squeeze-excitation network”, *Earth Sci. Informatics*, vol. 16, no. 1, pp. 175–191, 2023.
- [22] M. Toğaçar, B. Ergen, and Z. Cömert “Detection of weather images by using spiking neural networks of deep learning models”, *Neural Comput. Appl.*, vol. 33, no. 11, pp. 6147–6159, 2021.
- [23] M.H.L. Louk and B.A. Tama “Tree-Based Classifier Ensembles for PE Malware Analysis: A Performance Revisit”, *Algorithms*, vol. 15, no. 9, p. 332, 2022.
- [24] M. Dener, G. Ok, and A. Orman “Malware Detection Using Memory Analysis Data in Big Data Environment”, *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 17, p. 8604, 2022.
- [25] A. Mezina and R. Burget “Obfuscated malware detection using dilated convolutional network”, *14th Int. Congr. Ultra Mod. Telecommun. Control Syst. Work.*, p. 110–115, 2022.
- [26] M.A. Talukder et al. “A dependable hybrid machine learning model for network intrusion detection”, *J. Inf Secur. Appl.*, no. 72, p. 103405, 2023.